

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Машине алатке

Број индекса: 717/2017

Владимир И. Богић

Обрадни систем за сечење материјала ласером
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да размотри обрадни систем за сечење ласером, изврши анализу поступака примене ласера за сечење материјала и прикаже моделе за економску анализу примене обрадних система за сечење ласером, односно анализу трошкова. У посебном делу рада потребно је да кандидат изврши поређење прорачуна трошкова добијених према моделу који се примењују у предузећу „Ковач-монт“ из Старих Бановаца, са моделом развијеним на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

Завршни рад треба да садржи:

1. Увод
2. Теоријска анализа процеса обраде ласером
3. Врсте обрадних система са ласером
4. Преглед и анализа модела за прорачун трошкова сечења ласером
5. Обрадни систем за сечење ласером у фирми „Ковач-монт“ и пример дела
6. Анализа трошкова сечења ласером
7. Закључак
8. Литература

Крагујевац, октобар 2018. године

ментор:

Проф. др Богдан Недић

Резиме:

Обрада ласером представља велики искорак у обради материјала и значајно доприноси даљем развоју у области производних технологија. Иако није у потпуности искоришћена ова технологије омогућује обраде које нису могле у претходном периоду да се изводе са потребном брзином и тачношћу. У оквиру рада извршена је анализа обрадног система за сечење ласером са аспекта суштине процеса примене ласерског снопа и сечења материјала. Приказани су модели прорачуна трошкова обраде сечења ласером и на конкретном примеру извршено поређење прорачуна трошкова у предузећу „Ковач-монт“ и трошкова према моделу развијеном на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Кључне речи: сечење ласером, обрадни систем, трошкови, анализа трошкова

Summary:

Laser processing is a major step forward in material processing and significantly contributes to further development in the field of manufacturing technologies. Although not fully exploited, these technologies allow for processing that they could not perform in the previous period with the required speed and accuracy. In the framework of the work, the analysis of the laser cutting system from the aspect of the essence of the laser beam application process and the cutting of the material was performed. The models for calculating the cost of processing laser cutting are presented and on the concrete case a comparison of the cost calculation in the company "Kovač-mont" and costs according to the model developed at the Faculty of Engineering Sciences in Kragujevac was made.

Key words: laser cutting, processing system, costs, cost analysis

Садржај:

1. Увод	1
1.2. Историјат и развој ласера	1
2. Анализа процеса обраде ласером	3
2.1. Принцип рада и опис ласера.....	3
2.2. Врсте ласера	6
2.3 Чврсти ласери.....	7
3. Начини обраде ласером са његовим применама	9
3.1. Ласерско сечење	9
3.2. Ласерско заваривање	15
3.3. Ласерска термичка обрада	15
3.4. Ласерско гравирање	16
4. Преглед и анализа постојећих модела за прорачун трошкова.....	18
4.1. Модел 1	18
4.2. Модел 2.....	19
4.3. Модел 3.....	22
4.4. Модел 4.....	24
4.5. Модел 5.....	26
5. Опис машина за сечење ласером	29
5.1. Рутер машине за сечење ласером.....	29
5.2. Конфигурација рутера:.....	31
5.3. Основни делови ласерске машине	32
6. Опис CO ₂ ласера на коме ће бити извршено сечење	37
6.1. Пример предмета обраде за сечење ласером	39
7. Пример прорачуна трошкова	41
7.1. Пример прорачуна производње.....	41
7.2. Пример прорачуна производње по модулу 4.....	41
7.3. Коментар на поређење прорачуна:	43
8. Закључак.....	44
9. Литература	45

1. УВОД

Технички и технолошки прогрес и нагли развој низа различитих техника, као што су авионска, нуклеарна, рачунарска и др. довео је до развоја производње и примене нових материјала при производњи. Тако су настали материјали са добрим механичким и триболошким карактеристикама, велике затезне чврстоће и тврдоће, високе отпорности на високим и ниским температурама, као и материјали знатно веће отпорности на хабање и сл.

Упоредо са развојем, производњом и применом нових материјала, морала се развијати и технологија њихове прераде, јер, обрада дотадашњим, конвенционалним поступцима била отежана, а у неким случајевима и немогућа. Методе обраде материјала се из тог разлога усавршавају, и уводе се нови, прогресивни поступци обраде, који доприносе већој продуктивности и економичности. То су неконвенционални поступци обраде са или без отклањања вишка материјала.

Један од најпознатијих и најраспрострањенијих неконвенционалних поступака обраде јесте обрада ласером, тачније метода сечења ласером. Сечење ласером је једна од најуспешнијих поступака. За неке материјале, ласерска обрада јесте једини могући начин обраде. Одликује је велика прецизност, продуктивност, способност брзог сечења, резни алат овог поступка јесте усмерени зрак светлости што значи да нема хабања резног алата као ни контакта машине и радног комада. У односу на друге видове обраде одликује га: минимална деформација радног предмета, минимална зона утицаја топлоте, узак и прецизан рез, глатке и равне ивице и друго. Док мане представљају недовољно познавање примене ласерске обраде и недовољно података који утичу на ласерско сечење што значи да овај метод није у потпуности искоришћен. Самим тим јавља се и проблем економичности. Конкуренција је јако велика и треба опстати. С обзиром да ласер представља економичнију методу обраде у индустрији, разна истраживања су се бавила питањем његове повољности, али одрађени делови овог сегмента нису довољно испитани тако да немамо довољно података како би ласер био искоришћен како технолошки тако економски.

1.2. Историјат и развој ласера

Реч ЛАСЕР је настала као скраћеница од речи „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ која значи појачање светлости преко стимулисане емисије зрачења. Он је за извор светлости код којег се за разлику од конвенционалних извора светлости, светлост генерише механизмом стимулисане емисије.

Иако на први поглед физика ласера звучи јако компликовано, развојем технологије ласери нас данас у великом броју окружују у нашем свакодневном животу.

Претекавши неколико изврсних експерименталних група, први ласер направио је 1960. године Теодор Х. Маиман у Мајамију. Његов ласер је емитовао светлост таласне дужине 694 nm у пулсном режиму, а ласерску емисију постигао је стимулисаном емисијом из рубинског кристала побуђеног светлосном лампом. Убрзо затим развијен је и први уранијум ласер (1960), хелијум ласер (1961), Nd ласер: YAG-ласер и CO₂ ласер (1964), Ar ласер (1964), хемијски ласер (1965).

Након тога, ласери почињу на велико да се производе у експерименталним лабораторијама широм света, а коначно развојем технологије данас имамо праву ласерску револуцију.

Ласерска технологија нашла је примену и у обради материјала. С обзиром на циљ, овај рад се бави обрадом материјала једним од неконвенционалних поступака обраде материјала, обраду ласером. Рад је теоријско-дескриптивног карактера. У раду је коришћена техника анализе садржаја из неконвенционалних поступака обраде материјала, с посебним освртом на обраду материјала ласером.

Сврха овог рада је опис обраде ласером са посебним освртом на анализу економичности и трошкова овог поступка обраде.

2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

2.1. Принцип рада и опис ласера

Према квантној теорији, атом може да се налази у стањима са строго одређеним вредностима енергије и таква стања се називају стационарна стања. У стационарном стању атома електрони су распоређени по енергетским нивоима. Енергије електрона у атому могу имати различите вредности попут $E_1, E_2, E_3 \dots E_n$.

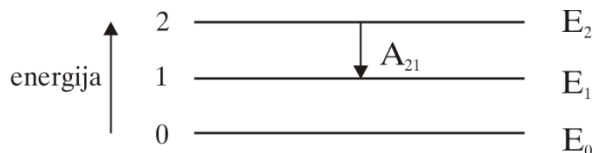
На слици 2.1. приказан је низ енергетских стања, *нивоа* једног атома неког физичког система. Стање E_0 је основно стање, а остала су побуђена стања. Док је атом у непобуђеном (основном) стању, он не зрачи енергију, а електрони заузимају најниже енергетске нивое. Спољашњим утицајем се атом може побудити да пређе на виши енергетски ниво. Електрон приликом побуђивања може примити само онолико енергије, ни мање ни више, колико износе разлике енергија спектра тог атома. Ако на пример, материјалну средину (квантни систем), чији се атоми или молекули карактеришу са два стационарна стања, са енергијама E_1 и E_2 ($E_1 < E_2$), тада E_1 представља основно стање, а E_2 побуђено стање. Приликом прелаза електрона из побуђеног стања енергије E_2 у основно стање енергије E_1 , емитује се фотон енергије:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Где је:

h – Планкова константа, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$

ν – фреквенција зрачења.



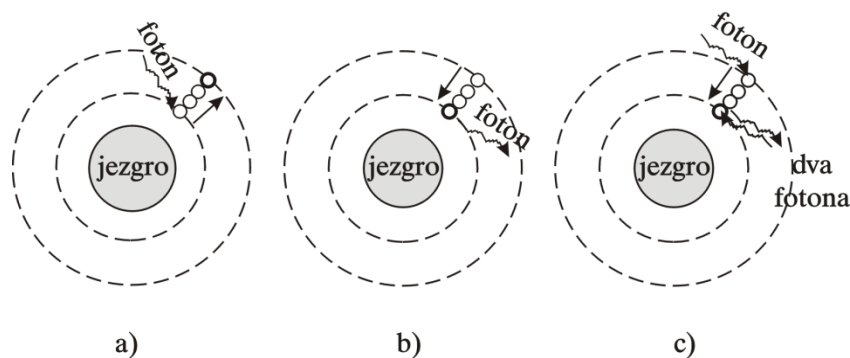
Слика 2.1. Енергетска стања атомског система

Спонтано и стимулисано зрачење

Могућа стања електромагнетног зрачења атома система (слика 2.2) су:

- а) апсорпција,
- б) спонтано зрачење и
- с) стимулисано (индуковано) зрачење.

Системи честица атоми, јони или молекули, могу се из основног стања апсорпцијом енергије фотона или неког другог облика енергије побудити на виши енергетски ниво. У побуђеном стању систем остаје врло кратко време, 10^{-8} s , а затим прелази у основно стање, без спољашњих утицаја, уз емисију фотона. Овакво зрачење се назива **спонтано зрачење**. У овом случају вероватноћа спонтаног прелаза са стања E_1 на стање E_2 не постоји.



Слика 2.2. Могућа стања електромагнетног зрачења атома система[1]

а) апсорпција, б) спонтано зрачење, ц) стимулисано зрачење

Емитовање енергије $h\nu$ траје одређено време и може се замислити као импулс пригушених синусних осцилација фреквенције ν_0 . Трајање осцилација карактерише се преко времена живота побуђеног стања:

$$t_{sp} = \frac{1}{A_{21}}$$

Где је:

t_{sp} - средње време побуђених атома,

A_{21} - брзина спонтаног прелаза са нивоа 2 на ниво 1.

У присуству електромагнетног таласа фреквенције:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

атом може променити своје енергетско стање са нивоа E_1 на ниво E_2 и при томе апсорбовати фотон енергије таласа $h\nu$. Ако је атом у тренутку интеракције био у енергетском стању E_2 , он ће емитовати фотон енергије $h\nu$ и прећи у стање E_1 . Овај вид емисије назива се индуковано или стимулисано зрачење. Код индукованог зрачења квант енергије $h\nu$ долази у систем који се већ налази у побуђеном стању и присиљава електрон да се пре времена врати у основно стање. На излазу из система добијају се два идентична фотона који имају исту фазу, фреквенцију и смер кретања. Ако ова два фотона наиђу на друге побуђене атоме у метастабилном стању, њима ће се придружити нови фотони са истим својствима, па се број оваквих фотона веома брзо повећава. Тако настаје лавина идентичних фотона који се крећу у правцу и смеру као и упадни фотон, што значи да се јавља ефекат појачања светлости. Емитована светлост је у фази са оном која изазива стимулацију [3].

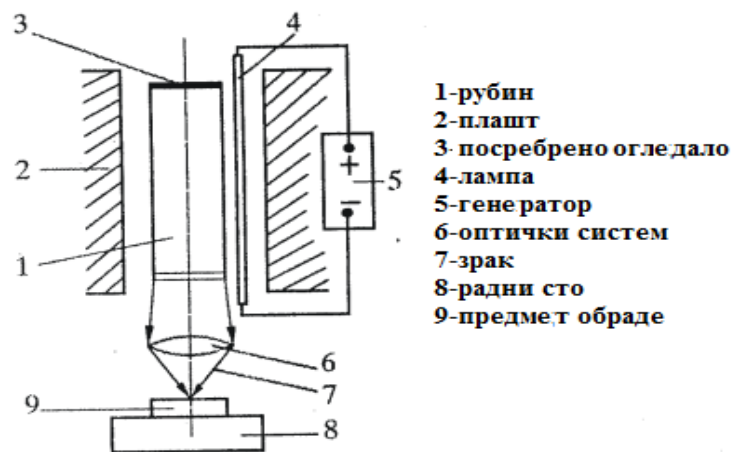
Сам процес настанка и емитовања светлости – ласера, на пример код ласера заснованог на рубиновом кристалу са малим примесама хрома, се састоји из неколико карактеристичних фаза. Осветљавањем рубиновог кристала долази до:

- преласка јона хрома из непобуђеног – основног стања у побуђено – нестабилно стање
- стимулисане и спонтане емисије светлости. Након престанка дејства светлосног извора долази до емитовања светлости у различитим правцима. Део светлости одлази кроз спољашњу површину рубиновог кристала у виду „луминосцентне“

светлости и губи се, док се други усмерава и креће паралелно са осом кристала у виду снопа фотона

- с) вишеструко поновљене ланчане реакције односно образовања нових фотона и веома снажног светлосног снопа
- д) појаве ласера, врло уског светлосног снопа потпуно дефинисане и константне таласне дужине.

Поларни вештачки кристал рубина величине оловке $\phi=7mm$ и $l=125mm$, 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 постављају 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 2-6kW. Импулсни генератор састоји се од извора напајања високог напона, од 1000V и више, који преко исправљача напаја батерије кондензатора. Шема обраде и ласер са чврстим емитером од рубинског кристала дати су на слици 2.3:

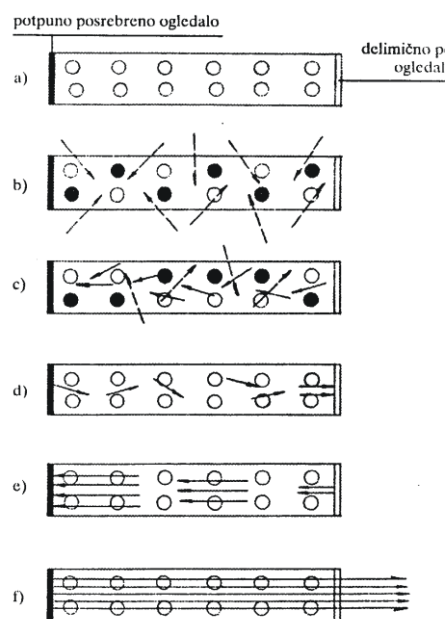


Слика 2.3. Шема обраде рубинског ласера[1]

Помоћу оптичког система фокусира се ласерски сноп на предмет обраде постављен на радном столу.

Појаве које се дешавају у рубинском ласеру приказане су на слици 2.4.

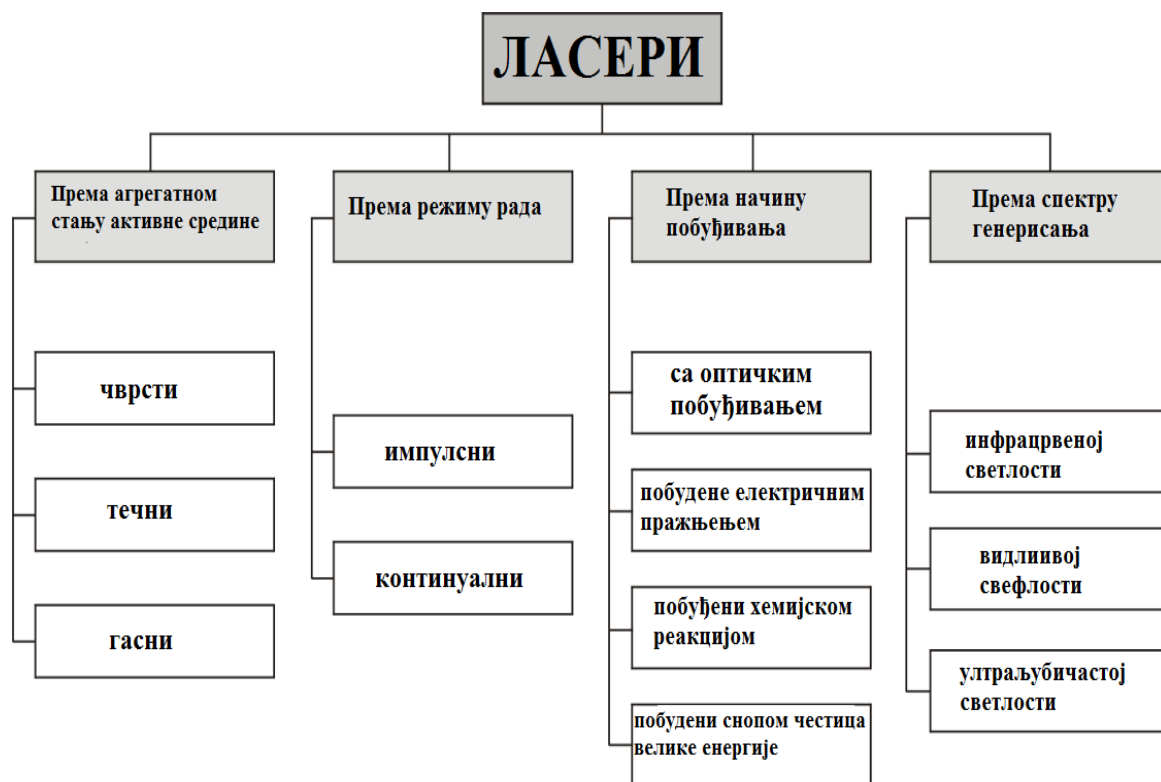
До укључења импулсне лампе, јони хрома се налазе у основном стању (бели кружићи). Када се кристал рубина осветли снажном лампом (испрекидане стрелице) јони хрома апсорпцијом упадних фотона бивају побуђени на један од виших енергетских нивоа (b, c - црни кружићи). Са виших енергетских нивоа јони хрома прелазе не зрачећи светлост (вишак енергије се предаје кристалној решетки) 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 (d, e). Након неколико узастопних рефлексија на чеоним плочама снажни флуks фотона пролази кроз полупосребрено оледало (f).



Слика 2.4. Појаве које се дешавају у рубинском ласеру[1]

2.2. Врсте ласера

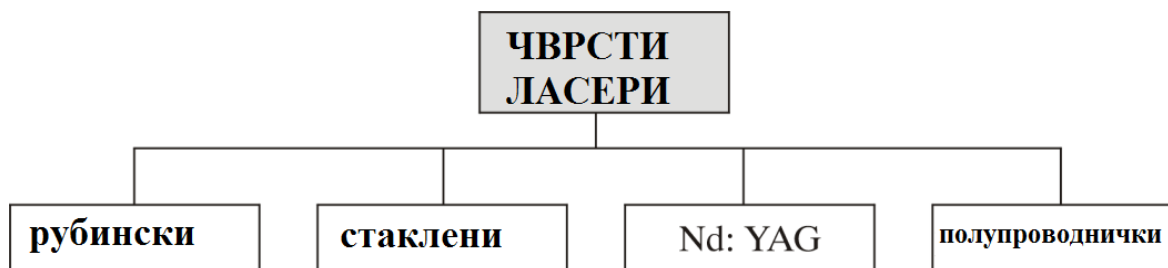
Постоји више критеријума за поделу ласера. На слици 2.5 приказана је најчешћа подела.



Слика 2.5. Врсте ласера [1]

2.3 Чврсти ласери

Ласери са чврстим телом нашли су примену у обради метала и неметала. На слици 2.6 је дата подела чврстих ласера.



Слика 2.6. Подела чврстих ласера[1]

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 cm за оптички најхомогеније материјале.

2.3.1. Рубински ласер

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 (10x10mm) са додатком 0.5% тровалентног хрома (Cr^{+++}). Рубин је минерал бледо ружичасте боје до јарко црвене боје, при чему преовладава црвена боја таласне дужине светлости $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$.

Рубински ласери могу да раде у импулсном (са енергијом од неколико J) и континуалном режиму (са енергијом до 100J). Због великог загеревања и малог степена искоришћења који износи 1%, рубински ласери се у већини случајева користе као импулсни. Ласери који раде у континуалном режиму обично се хладе посебним системом за хлађење.

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

2.3.2. Стаклени ласер

Стаклени ласери се састоје од високопрозирног стакленог тела у коме су дисперзно распоређени јони ниодијума Nd^{+++} , као активна средина.

Постоје два вида стаклених ласера:

- ласери од силикатног стакла са $\lambda = 1.062 \mu\text{m}$ и
- ласери од фосфатног стакла $\lambda = 1.054 \mu\text{m}$.

Стаклени ласери имају релативно висок коефицијент корисног дејства (до 3 %) при малој енергији импулса од 20J. 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 $1000J$. 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.

Већа заступљеност ових ласера у поређењу са рубинским је у нижој цени и могућности да раде у широком дијапазону енергије $1 \div 1000J$. Постоје стаклени ласери и са такозваним гигантским импулсом са енергијом од 10^4 до 10^5J .

2.3.3. 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 $Y_3Al_5O_{12}$ који представља најчешћи извор ласерског зрачења. YAG спада у групу врло тврђих материјала. Захваљујући високој тврдоћи обрада YAG-а је отежана, јер захтева дијамантска средства.

YAG ласер одликује висока прозирност 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 мЈ у основном моду, са фреквенцијом од $1 \div 50Hz$. У континуалном режиму снага његове емисије је између 1 и 20W.

2.3.4. Полупроводнички ласери

Полупроводнички ласер (диодни ласер), представља сићушни кристал, произведен атомском тачношћу, подељен у два основна подручја. Они се данас израђују са релативно малом јачином па нису нашли примену у обради метала и неметала. Имају релативно широку примену у мерној техници, холографији, фотографској техници итд.

3. НАЧИНИ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ СА ЊЕГОВИМ ПРИМЕНАМА

3.1. Ласерско сечење

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_c , 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 3.1. приказано је сечење ласером.

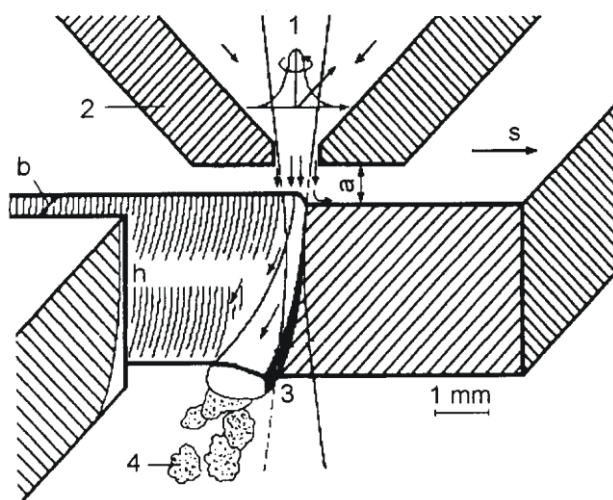


Слика 3.1. Сечење ласером

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 106W, 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 3.2. дат је шематски приказ процеса сечења ласером.



Слика 3.2. Шематски приказ сечења ласером

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 испаравањем);
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 CO_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).

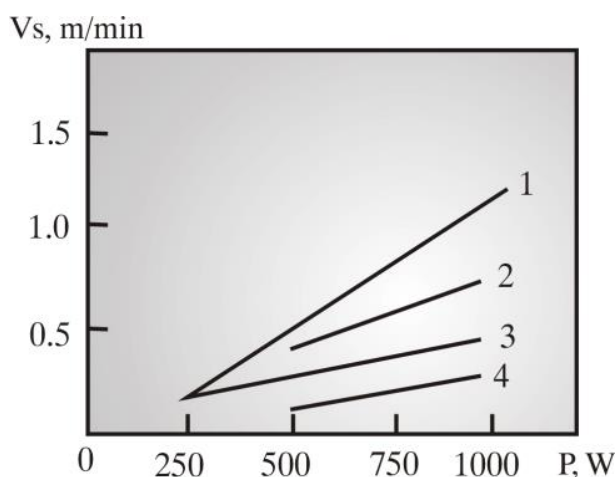
Режими обраде

Снага ласера

Најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине је снага ласера. На слици 3.3. приказана је зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.

Брзина сечења

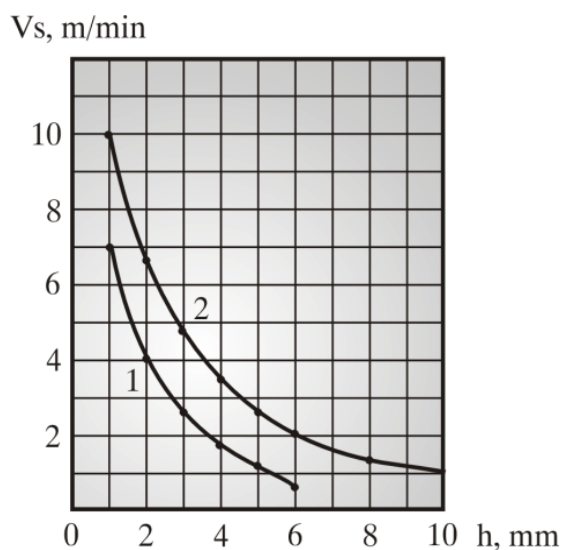
Продуктивност обраде, зависи директно од брзине сечења. Брзина сечења је други по значају битан параметар за сечење ласером и зависи од низа фактора: снага ласера, мод, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета итд.



Слика 3.3. Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале

1. Нерђајући челик ($h=3.2\text{ mm}$), 2. Алуминијум ($h=0.8\text{ mm}$),
3. Нискоугљенични челик ($h=2.3\text{ mm}$), 4. Титан ($h=1.5\text{ mm}$)

На слици 3.4. приказан је утицај дебљине лима на максималну дебљину сечења.



Слика 3.4. Зависност максималне брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике

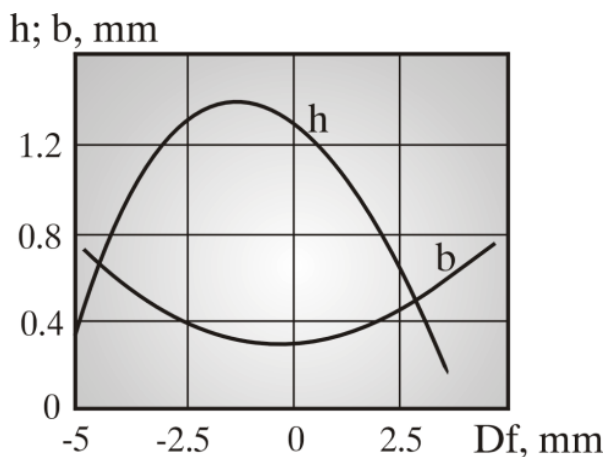
$P=625W$, 2. $P=1250W$

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



Слика 3.5. Утицај дефокусације Δf на ширину b и дубину h реза.

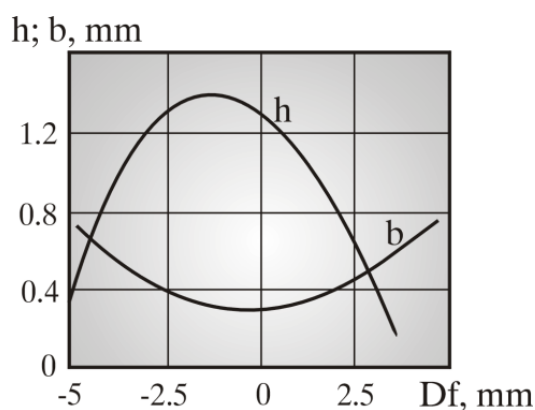
Помоћни гас

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, храпавост 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 3.6. дат је шематски приказ ласерског млаза.

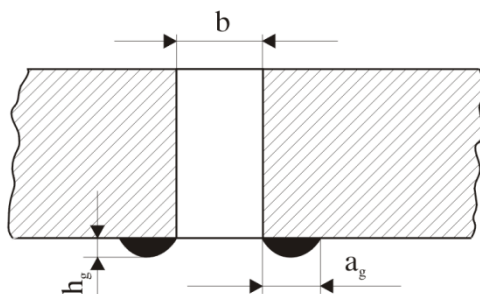


Слика 3.6. Шематски приказ ласерског млаза

Ширина реза је битна карактеристика сечења ласером. Вредност ширине реза код метала је мала, креће се од 0.1-0.3mm, при сечењу челичних лимова. Ширина реза се повећава са повећањем дебљине лима.

При обради метала, по дужини реза са доње стране, формира се гребен од отворнутог метала и металних оксида, чиме се погоршава квалитет обраде.

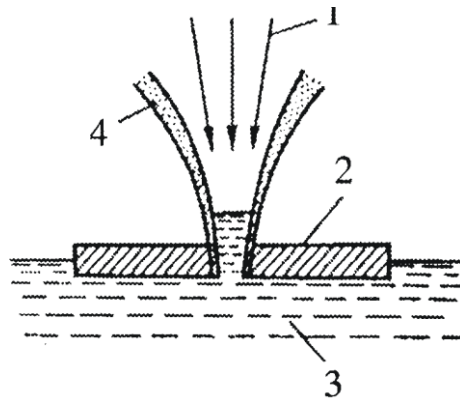
На слици 3.7. приказана је појава гребена приликом сечења метала.



Слика 3.7. - Појава гребена при сечењу метала ласером

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 3.8. приказана је шема сечења ласером у течној средини.



Слика 3.8. Шема сечења ласером у течној средини

1 - ласерски зраци, 2 - предмет обраде, 3 - течност, 4 - гасна струја

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.). На слици 3.9. приказана је једна од машина која служи за ласерско резање.



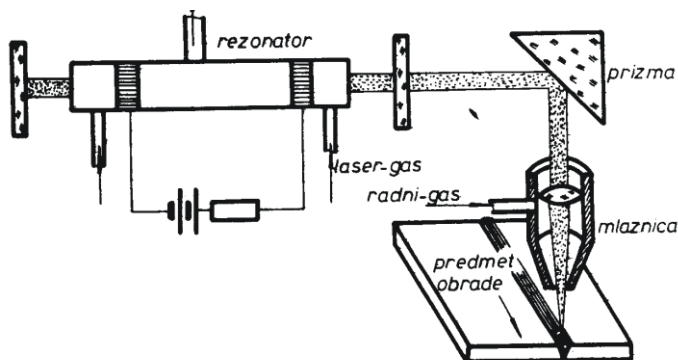
Слика 3.9. машина за сечење ласером

3.2. Ласерско заваривање

Заваривање ласером представља технолошки процес који карактерише локално топљење метала на месту спајања - заваривања елемената. Општи захтев код заваривања ласером је да ласер даје релативно дугачке импулсе у времену од 1-10ms, са максималном снагом од 10-100kW. Међутим, снага која одговара укупном интензитету, мора бити довољно мала да се спречи испаравање и одмицање материјала. Трајање импулса мора бити довољно дуго да би се омогућило нижим деловима површине да дођу до тачке топљења, одвођењем топлоте са горњег дела површине.

CO₂ ласери се не користе код заваривања због великог коефицијента рефлексије, који се за већину материјала креће од 94-98% на собној температури, за таласну дужину ласера од 10.6 μ m. Индустијски CO₂ ласери снаге неколико вати, могу се користити за заваривање танких метала дебљине 1mm (Al и Cu легуре). Међутим, такви материјали могу се заваривати економичније класичним методама.

На слици 3.10. дата је принципијелна шема заваривања ласером, а слика 3.11. представља машину за ласерско заваривање



Слика 3.10. Принципијелна шема заваривања ласером



Слика 3.11. Машина за ласерско заваривање

3.3. Ласерска термичка обрада

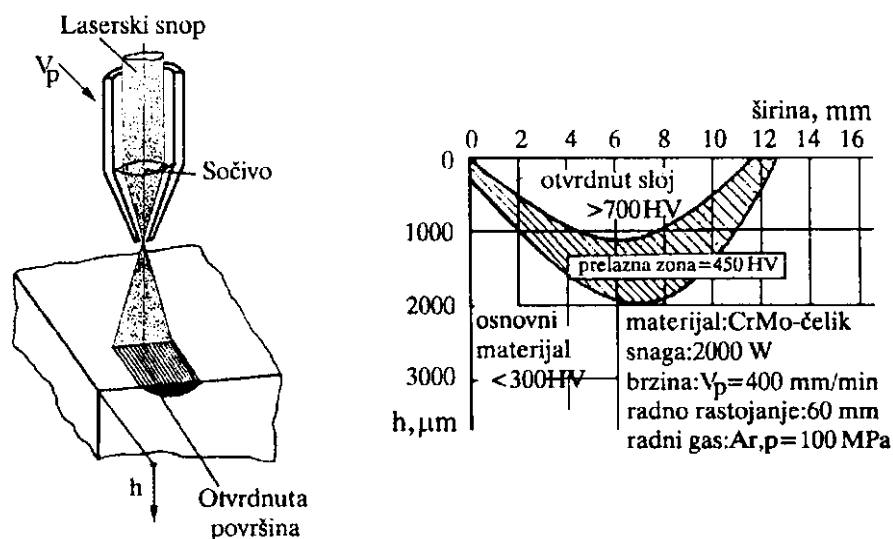
Отврдњавање или површинска термичка обрада снопом ласерских зрака заснива се на загревању, топљењу и ударном оптерећењу. Термичка обрада ласером је могућа

како за поједине зоне посебно изложене хабању, тако и за површине у целини, уз хлађење различитим средствима.

Карактеристике отворднутог слоја зависе од карактеристика ласерског снопа и низа других параметара, а мењају се са дужином и ширином отворднутог слоја. Основни параметри отвордњавања ласерским снопом, у односу на индукционо каљење, су значајно повећање тврдоће површинских слојева (3-5 пута), отпорности на хабање и повећање производности обраде за 70-90%. Отвордњавање површине метала ласером омогућује низ предности као што су:

- отвордњавање површине радних предмета сложене конфигурације које су неприступачне за обраду класичним методама;
- примена за завршну обраду при чему се постиже висок квалитет обрађене површине;
- могућност аутоматизације процеса, итд.

На слици 3.12. приказан је принцип отвордњавања ласером и облик и димензије отворднутог слоја.



Слика 3.12. Принцип отвордњавања ласером и облик и димензије отворднутог слоја

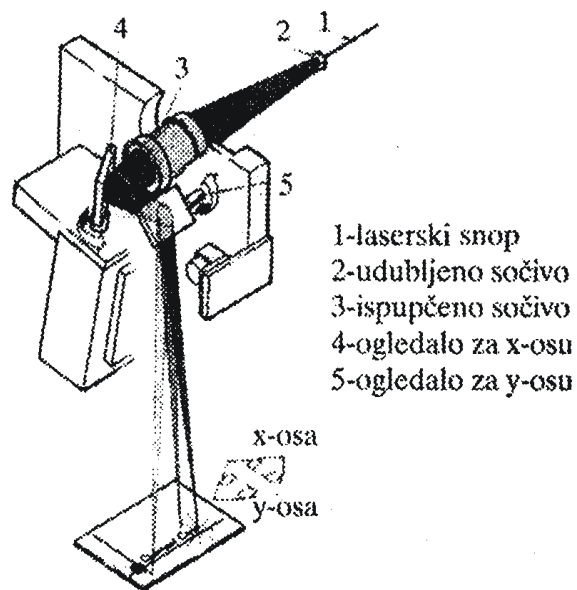
3.4. Ласерко гравирање

Гравирање ласером или ласерска контурна обрада се користи за различите намене:

- маркирање или обележавање на предметима са наношењем серије бројева или других ознака за идентификацију, укључујући и израду логаритамских скала;
- израда печатерских ваљака;
- израда шема различитих танких превлака од различитих материјала које се наносе на изабрану подлогу, итд,

При коришћењу ласера за маркирање, најчешће се користи YAG-ласер са акустичним оптичким модулатором. Режим рада је пулзирајући. За ову намену довољни су ласери са про-сечном снагом до 50W. На слици 3.13. приказана је шема

рада машине за гравирање ласером, док слика 3.14. представља машину за ласерско гравирање.



Слика 3.13. Шема рада савремене машине за гравирање ласером



Слика 3.14. Машина за ласерско гравирање

4. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ПОСТОЈЕЋИХ МОДЕЛА ЗА ПРОРАЧУН ТРОШКОВА

Да бих најбоље проценили цену трошкова и одредили тржишну цену израђеног дела, потребно је обрадити податке трошкова материјала, радника и опреме која се користи са њеним потрошним материјалом. За ту процену постоји више прорачуна и модела по којем се они обрачунавају. Овде сам навео неке од њих и сви су развијани на различите начине у зависности од времена трајања сечења или дужине пута сечења. Неки од ових модела се могу користити и за прорачуне обраде на плазми и „water jet“ технологији.

4.1. Модел 1

Ласер са изузетно ниским ценама је у рангу са конвенционалним методама производних процеса. Потребно је пронаћи одговарајућу методу рачунања како би се оправдало коришћење ласера које је засновано на могућим трошковима. У овакав вид обрачуна се укључују трошкови стопе машинског сата и стопа трошкова производње, као и обрачун трошкова по метру или трошкова по компоненти за процес ласерске обраде.

Разматрање трошкова по метру не узима у обзир секундарне карактеристике при обради приликом прорачуна. Међутим, оне се морају узети у обзир у трошкове по компоненти, јер су секундарне карактеристике процесног времена веома битне и уједно зависне од типа машине. Веома је тешко користити реалне вредности као и уврстити их у обрачун у целом процесу поређења. У овом моделу нису разматрани трошкови специфичних машина, већ се обрачун базира на обрачуну трошкова по метру сечења ласерске обраде.

Табела 1 приказује општи пример обрачуна трошкова сечења ласером и наводи све релевантне тачке.

Табела 2 приказује пример како се рачунају трошкови сечења по метру сечења челичне конструкције у једној смени и у три смене производње. Овај пример показује да стопа машинског часа представља највећи део укупних трошкова. Трошкови се знатно смањују уколико машина ради у пуном капацитету:

Табела 1 :Обрачун по машинском сату и стопе трошкова производње базиран на ласерском сечењу у једној смени производње и у три смене производње

Pos.					325.000	
Улагања (Променљива вредност ПВ)					продуктивност у једној смени	породуktivност у три смене
Искоришћеност радне машине	100	%		h/год	1300	3900
(2) Време коришћења	50	% КОРИСТ		h/год	1170	3510
(3) Израчуната депресијација	5	година	(1): (2): (3)	€/h	55,56	18,52
(4) Обрачуната камата	10	% of 1/2 RV	[(1):2]x[(4):100]:2	€/h	13,89	4,63
(5) Осигурање	0,25	% of RV	[(1)x(5): (2)]: 100	€/h	0,69	0,23
(6) Захтеви за градњу	120	m ²				
(7) Месечни торшкови градње	8	€/m ²	(6) X (7) X 12Mo : (2)	€/h	9,85	3,28
(8) Одржавање	2	% of ПВ	(1) X 0,02 : (2)	€/h	5,56	5,56
(9) Операције и другиторшкови				€/h	10,50	0,50
(10) Опрема						
Машина за вођење				€/h	0,50	0,50
Машина за вађење				€/h	0,30	0,30
Систем за хлађење				€/h	0,60	0,60
(11)Трошкови алата				€/h	0,50	0,50
(12) Кран или виљушкар				€/h	0,50	0,50
(13) НЦ програмирање				€/h	2,00	2,00
(14) цена по сату рада машине			укупно (3) to (13)	€/h	90,45	37,12
(15) Трошкови рада				€/h	10,00	10,00
(16) Трошкови рада без зараде	80	%	(16)x(17)/100	€/h	8,00	8,00
(17) Закупнина смене				€/h		5,00
(18) цена по сату рада машине			укупно (14) to (17)	€/h	108,45	60,12
(19) општи трошкови				€/h	8,00	8,00
(20) Производња стопа трошкова			укупно (18) + (19)	€/h	116,45	68,12

4.2. Модел 2

Постоје две најчешће коришћене врсте индустријског сечења ласером: CO₂ и Nd:YAG.

Разликују се по томе што је произведена таласна дужина инфрацрвеног зрака за CO₂ 10,6μm , а за Nd: YAG 1,06μm. Обе ове врсте секу фокусирајући сноп монохроматске светлости на веома уском месту у односу на сочиво и огледало давајући густину снаге 10⁵W/mm² . Ова густина снаге је довољна да топи локално место сечења, па чак и да испарава делове материјала.

Разлика између ових таласних дужина је значајна – краћа таласна дужина Nd: YAG омогућава светлости да буде пренешена до радног дела путем оптичких каблова и омогућава тродимензионално сечење и скраћивање делова.

Светлост од CO₂ ласера са друге стране, преноси се на радни комад путем огледала или трансмисионе оптике. Зато се ови ласери најчешће користе за дводимензионално сечење.

Основне карактеристике сечења се односе на чињеницу да сноп светлости може бити фокусиран на месту пречника мањег од 0,5mm при чему се постиже огромна снага. Резултат резних ивица је правилан квадрат, а процес може да се одвија великим брзинама. Оваква комбинација интезивно концентрисаног извора топлоте и велике брзине сечења резултује врло мало расуте топлоте по локалним местима радног дела и самим тим, врло мало термичких деформација.

Табела 2. Трошкови сечења по метру сечења

Pos		Продуктивност у једној смени 3,00 mm	Продуктивност у три смене 3,00 mm
(1)	Дебљина лима		
	Измерене вредности		
(2)	Ласерски гас	75 l/h	75 l/h
(3)	Гас за сечење	3000 l/h	3000 l/h
(4)	Електрична енергија	30 kW	30 kW
(5)	Брзина сечења	3,00 m/min	3,00 m/min
(6)	Брзина сечења	(5) X 60	180,00 m/h
(7)	Животни век сочива	1000h/сочиво	1000 h/сочиво
(8)	Животни век бризгалке	1000h/бризгалка	1000 h/ бризгалка
(9)	Дужина сечења по сочиву	(6) X (7)	180000 m/сочиво
(10)	Дужина сечења по бризгалки	(6) X (8)	180000 m/ бризгалка
	Потрошња ел. енергије и гаса		
(11)	Ласерски гас	(2): (6)	0,42 l/m
(12)	Гас за сечење	(3): (6)	16,67 l/m
(13)	Електрична енергија	(4) X 1000: (6)	166,67 Wh/m
	Основни трошкови		
(14)	Ласерски гас	20,00 €/m³	20,00 €/m³
(15)	Гас за сечење	1,00 €/m³	1,00 €/m³
(16)	Електрична енергија	0,13 €/kWh	0,13 €/kWh
(17)	Сочива	750,00 €/комад	750,00 €/комад
(18)	Бризгалке	15,00 €/комад	15,00 €/комад
(19)	Трошкови рада машине по сату	90,45 €/h	37,12 €/h
(20)	Трошкови рада	18,00 €/h	23,00 €/h
(21)	Општи трошкови	8,00 €/h	8,00 €/h
	Трошкови по метру сечења		
(22)	Ласерски гас	(14) X 0,1 X (11)	0,84 cent/m
(23)	Гас за сечење	(15) X 0,1 X (12)	1,67 cent/m
(24)	Електрична енергија	(16) X 0,1 X (13)	2,17 cent/m
(25)	Сочива	(17) X 100: (9)	0,42 cent/m
(26)	Бризгалке	(18) X 100: (10)	0,01 cent/m
(27)	Сума	(20) bis (24)	5,11 cent/m
(28)	Трошкови рада машине по сату	(19) X 100: (6)	20,62 cent/m
(29)	Трошкови рада	(20) X 100: (6)	12,78 cent/m
(30)	Општи трошкови	(21) X 100: (6)	4,44 cent/m
(31)	Укупни трошкови	(27) + (31)	42,95 cent/m
(32)	Трошкови сечења по метру реза	(31): 100	0,43 €/m

(Laser in material processing - Evaluation of cost efficiency

Juergen Scholz, GER-Unterschleißheim)

Nd:YAG ласери за сечење обично раде у импулсном режиму, мада неки су направљени да раде у континуалном режиму. Када раде у континуалном режиму, сечење је врло слично сечењу ласера CO₂, односно једнако је трајање процеса, а процес сечења је стабилнији.

Nd:YAG пулсирајући ласер ради на принципу продуженог бушења рупе у материјалу, али је снага јако велика па се материјал односи заједно са зраком.

Овај модел садржи уопштене обрасце и обрасце предвиђене за ласерско сечење. Овде је дат уопштени образац за све типове сечења:

Показано је неколико променљивих које различити обрачуни имају као заједничке карактеристике.

N_p = број делова

N_{stp} = број стартних резова по делу. Пример: када се сече део са рупом, операција започиње сечење 2 пута: прво за рупу, затим за ивице.

L_{cutp} = дужина резања по компоненти (m)

N_{sh} = број смена

P_{lab} = трошкови рада

P_{cap} = уложени капитал

U = употреба (%)

N_{op} = број сати рада по години и смени

T_{mach} = животни век машине

Int = годишња камата

Ins = осигурање

S_{req} = потребан простор (m²)

P_{rent} = изнајмљивање

$Maint$ = одржавање

T_{prep} = време за припрему, NC-програмирање. (h)

P_{el} = цена струје

E_{lp} = потрошња електричне енергије (kW)

Такође, потребне су информације о врсти материјала и његовој дебљини. Ове променљиве нису директно урачунате у обрачун, али се користе за потпуно одређивање брзине сечења и потрошње гасова.

У зависности са горе наведеним променљивим, укључују се и специфичне променљиве које се односе на сечење ласером у следећем обрачуну:

P_{cgas} = цена гаса за резање. (€/m³)

P_{lgas} = цена ласерског гаса (€/m³)

T_{tip} = животни век горионика.

P_{tip} = цена горионика.

T_{lens} = животни век објектива

P_{lens} = цена објектива

C_{utsp} = брзина резања (m/min)

T_{st} = стартно време резања, продирања и померања (s)

Con_{cgas} = потрошња гаса за сечење

Con_{lgas} = потрошња ласерског гаса

Укупни трошкови за ласерско сечење су приказани:

Трошкови гасова: $(Con_{cgas} * P_{cgas} + Con_{lgas} * P_{lgas}) / 1000 = C_{gash}$ (€/h)

Трошкови струје: $E_{lp} * P_{el} = C_{elh}$ (€/h)

Број радних сати машине на годишњем нивоу:

$$Nop * Nsh * U * 0.01 = Nopy \text{ (h)}$$

$$\text{Трошкови камате: } Pcap * 0,5 * Int * 0,01 = Cint \text{ (€/year)}$$

$$\text{Трошкови амортизације: } Pcap / Tmach = Cdep \text{ (€/year)}$$

$$\text{Трошкови осигурања: } Pcap * Ins * 0,01 = Cins \text{ (€/year)}$$

$$\text{Трошкови простора: } Sreq * Prent * 12 = Cs \text{ (€/year)}$$

$$\text{Трошкови одржавања: } Pcap * Maint * 0,01 = Cmaint \text{ (€/year)}$$

$$\text{Цена по сату машине: } (Cint + Cdep + Cins + Cs + Cmaint) / Nopy = Rmh \text{ (€/h)}$$

$$\text{Број горионика: } 1 / Ttip = Contip \text{ (tip/h)}$$

$$\text{Цена горионика: } Contip * Ptip = Ctiph \text{ (€/h)}$$

$$\text{Број објектива: } 1 / Tlens = Conlens \text{ (tip/h)}$$

$$\text{Цене објектива: } Conlens * Plens = Clensh \text{ (€/h)}$$

$$\text{Укупна дужина сечења: } Lcutp * Np = Lcuttot \text{ (m)}$$

$$\text{Укупно време покретања сечења: } (Nstp * Tst * Np) / 3600 = Tsttot \text{ (h)}$$

$$\text{Укупно време сечења: } Lcuttot / (Cutsp * 60) + Tsttot = Tcuttot \text{ (h)}$$

$$\text{Укупнитрошкови рада: } Plab * (Tprep + Tcuttot) = Clabtot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови потрошње струје: } Celh * Tcuttot = Celtot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови гасова: } Cgash * Tcuttot = Cgastot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови машинског сата: } Rmh * Tcuttot = Cmhtot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови горионика: } Ctiph * Tcuttot = Ciptot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови објектива: } Clensh * Tcuttot = Clenstot \text{ (€)}$$

$$\text{Укупни трошкови целокупног сечења}$$

$$Clabtot + Celtot + Cgastot + Cmhtot + Ciptot + Clenstot = Ctot \text{ (€)}$$

Закључно :

Стандардне променљиве које морају бити посебно истакнуте за ласерско сечење су:

- Животни век машине, време амортизације
- Ротребан простор
- Одржавање
- Време за припрему
- Потрошња електричне енергије
- Цена гаса за резање
- Цена ласерског гаса
- Век горионика
- Трошкови горионика
- Век објектива
- Трошкови објектива

(Master's thesis –Cut Cost Calculation – Johan Berglund)

4.3. Модел 3

Трошкови ласерски исечених делова су одређени дужином трајања сечења и у зависности од количине посла у смислу утовара и верификовања делова, али такође и у

зависности од ризика при сечењу захтевнијих делова (више делова средњих величина су мање ризични од сечења једног великог дела који захтева обраду која траје сатима).

Ово су неки од фактора који утичу на формирање цене при ласерској обради:

Трошкови сечења ласером су базирани на укупном времену које је потребно за сечење делова, и они претежно зависе од врсте материјала и његове дебљине. Постоји минимална цена од 3 долара по јединственом комаду као и минимална цена од 1 долар за додатне копије сваког дела. Такође, цене могу да се смање уколико се секу једноставнији делови или велике количине делова.

Постоји и фактор минималне поруџбине од 25 долара по материјалу (обухвата и трошкове обраде и материјала). Узимају се у обзир и фактори преноса, испоруке, верификације, итд.

4.3.1. Трошкови:

Убрзани сервис: Убрзање поруџбине кошта 20-50% више по дану убрзања, у зависности од стандардног времена. Стандардно време за обраду је од 3–5 радних дана.

Изузеци: Узимају се у обзир промена минималне цене и уопштено формирање цене у зависности од захтева поруџбине. Уколико је део једноставнији за сечење, ствара се мања цена. Уколико су делови сложеније грађе, и уколико су ризичнији за обраду цене се формирају другачије.

Делови већег ризика су:

- Делови који су великих кабарита где је потребно вишесатно сечење
- Делови који захтевају нежније и обазривије руковање – јако мали и крхки делови, што аутоматски значи да ће обрада дуже трајати
- Делови који имају мноштво мањих облика и углова и мноштво детаља, као и материјали који имају тенденцију да се топе више па захтевају накнадну обраду
- Делови који имају неповезане облике и резове где машина мора да изврши више покретања и прекидања којих нема при континуалном сечењу

Основне цене за убрзан сервис на тродневну стандардну услугу при наруџбини:

(уз услов да се не ради о количинама од пар стотина до пар хиљада комада по дану)

Време услуге	Цена
3 радна дана	\$25 за стандардно време услуге
2 радна дана	\$33.25, додатних 33% (\$8.25) на основну цену
1 радни дан	\$41.50, додатних 66%

Услуга истог дана \$50, додатних 100% (дупла цена од стандардне наплате)

Цене за петодневну услугу

Време услуге	Цена
5 радних дана	\$25 за стандардно време услуге
4 радна дана	\$30, додатних 20% (\$5) на основну цену
3 радна дана	\$35, додатних 40%
2 радна дана	\$40, додатних 60%
1 радни дан	\$45, додатних 80%
Услуга истог дана \$50, додатних 100% (дупла цена од стандардне наплате)	

(<http://www.pololu.com/catalog>)

4.4. Модел 4

Овај модел је развијан на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу. Он приказује систематизоване обрачунае за сечење различитим типовима машина, приказује заједничке обрасце које је могуће применити на било коју од доле наведених операција, као и приказ модела прорачуна трошкова сечења специјално за ласерско сечење.

4.4.1. Прорачун трошкова обраде код ласерског сечења

За технологије обраде ласерским сечењем приликом прорачуна трошкова обраде могу се усвојити заједнички полазни подаци и означавање слични онима који се користе код обраде плазмом, воденим абразивним млазом и гасним сечењем, а то су:

n	број делова који се израђује,
n_s	број сечења по једном делу (нпр. ако део има рупу у себи, тада је $n_r=2$, једно за сечење контуре рупе у делу и друго за сечење периферне контуре дела),
L_{cut}	дужина реза за један део, mm,
N_{sm}	број смена рада радника,
P_r	трошкови рада радника, дин/часу (€/часу)
P_m	уложени капитал (цена опреме - машина и др.), дин (€)
p	временски степен искоришћења, %
n_h	број радних сати у једној смени годишње, час
T_m	век машине, амортизационо време, година,
I_{nt}	камата на годишњем нивоу, %/годишње
I_{ns}	осигурање (% од уложеног капитала)
S	потребни простор, m ² ,
P_z	цена закупа простора, дин/m ² (€/m ²) на месечном нивоу
I_m	одржавање, % од уложеног капитала на годишњем нивоу
T_{pr}	припремно време (обухвата време програмирања и др.),

P_{el}	цена електричне енергије, дин/kWh (€/kWh)
E_l	потрошња електричне енергије, kW.

v_{cut}	брзина резања, m/min
T_{sp}	време припреме за сечење (време за позиционирање, продирање и прилаз до контуре), sec
n_{ml}	број млазница (које истовремено врше обраду)
T_{ml}	век једне млазнице, часова/млазници
P_{ml}	цена једне млазнице, дин/млазници (€/млазници)

Заједнички прорачун :

Трошкови електричне енергије	$C_{el} = E_l \cdot P_{el}$	дин/час (€/час)
Трошкови камате	$C_{int} = C_c \cdot 0,5 \cdot I_{nt} \cdot 0,01$	дин/годишње (€/годишње)
Трошкови амортизације	$C_{am} = P_m / T_m$	дин/годишње (€/годишње)
Број часова рада машине	$n_r = n_h \cdot p \cdot N_{sm} \cdot 0,01$	часова
Трошкови осигурања	$C_{ins} = P_m \cdot I_{ns} \cdot 0,01$	дин/годишње (€/годишње)
Трошкови простора	$C_s = S \cdot P_z \cdot 12$	дин/годишње (€/годишње)
Трошкови одржавања	$C_o = P_m \cdot I_m \cdot 0,01$	дин/годишње (€/годишње)
Трошкови машине по часу	$C_m = (C_{int} + C_{am} + C_{ins} + C_s + C_o) / n_r$	дин/час (€/час)
Ротрошња млазница на једној обрадној глави	$H_{ml} = 1 / T_{ml}$	млазница/час
Трошкови млазница	$C_{ml} = H_{ml} \cdot P_{ml} \cdot n_{ml}$	дин/час (€/час)

Укупна дужина резања	$L_{Ucut} = n \cdot L_{cut}$	mm
Укупно време припреме и кретања пре сечења	$T_{Usp} = (n_s \cdot T_{sp} \cdot n) / 3600$	час
Укупно време сечења	$T_{Ucut} = (L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}) / n_{ml}$	час
Укупно време сечења (ласер)	$T_{Ucut} = L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}$	час
Укупни трошкови рада	$C_{Ur} = P_r \cdot (T_{pr} + T_{Ucut})$	дин (€)
Укупни трошкови електричне енергије	$C_{Uel} = C_{el} \cdot T_{Ucut}$	дин (€)
Укупни трошкови рада машине	$C_{Um} = C_m \cdot T_{Ucut}$	дин (€)
Укупни трошкови млазница	$C_{Uml} = C_{ml} \cdot T_{Ucut}$	дин (€)

T_l	век објектива, час/сочиву
P_l	цена објектива,
P_{rg}	цена радног гаса, дин/м ³ (€/м ³)
Q_{rg}	потрошња радног гаса, l/min
P_{lg}	цена ласерског гаса, дин/м ³ (€/м ³)
Q_{lg}	потрошња ласерског гаса, l/min

Трошкови гасова	$C_q = (Q_{rg} \cdot P_{rg} + Q_{lg} \cdot P_{lg})/1000$	дин/час (€/час)
Ротрошња сочива	$H_l = 1 / T_l$	сочива/час
Трошкови сочива	$C_l = H_l \cdot P_l$	дин/час (€/час)
Укупни трошкови гасова	$C_{Uq} = C_q \cdot T_{Ucut}$	дин (€)
Укупни трошкови сочива	$C_{Ul} = C_l \cdot T_{Ucut}$	дин (€)
Укупни трошкови сечења	$C_{cut} = C_{Ur} + C_{Uel} + C_{Uq} + C_{Um} + C_{Uml} + C_{Ui}$	дин (€)

(Факултет инжењерских наука, Богдан Недић – Скрипта)

4.5. Модел 5

Овај модел приказује различите типове образаца за прорачун обраде сечењем ласера. Уопштени образац приказује укупне трошкове сечења, затим укупно време за које се извршава обрада. Оно што је битно, обрасци приказују и трошкове радника као и потрошног материјала, одржавања и остало.

4.5.1. Укупни трошкови сечења:

$$C_{cut} = C_{Ur} + C_{Uel} + C_{Uq} + C_{Um} + C_{Uml} + C_{Ui}$$

Где су:

C_{Ur} - укупни трошкови рада радника

C_{Uel} - укупни трошкови електричне енергије

C_{Uq} - укупни трошкови гасова (или абразива код WJM)

C_{Um} - укупни трошкови машине и осталих инвестиција у опрему

C_{Uml} - укупни трошкови млазница

C_{Ui} - укупни остали трошкови специфични за поједине врсте обраде

Пре него што се приступи прорачуну укупних трошкова потребно је одредити укупно време сечења. Оно је директно везано за број истовременог рада већег броја обрадних глава, односно већег броја млазница. Код обраде ласером користи се само једна обрадна глава. Укупно време сечења је једнако збиру времена сечења и припремног времена:

$$T_{Ucut} = (L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}) / n_m, \text{ часова}$$

за сечење са више млазница. У случају сечења ласером, укупно време је:

$$T_{Ucut} = L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}, \text{ часова}$$

У изразу је:

T_{Usp} - укупно помоћно време потребно за позиционирање, помоћна кретања млазница и времена потребног за пробијање предмета обраде.

$$T_{Usp} = (T_{sp} \cdot n) / 3600, \text{ часова}$$

L_{Ucut} – укупна дужина резања

$$L_{Ucut} = n \cdot L_{cut}, \text{ m}$$

4.5.2. Укупни трошкови радника

$$C_{Ur} = P_r \cdot (T_{pr} + T_{Ucut}), \text{ €}$$

Укупни трошкови електричне енергије $C_{Uel} = C_{el} \cdot T_{Ucut}$

Трошкови електричне енергије $C_{el} = E_l \cdot P_{el}$

Укупно време сечења T_{Ucut}

Цена електричне енергије, €/kWh P_{el}

Потрошња електричне енергије, kW E_l

укупни трошкови гасова $C_{Uq} = C_q \cdot T_{Ucut}, \text{ RSD}$

чине их трошкови радног гаса и трошкови ласерског гаса

$$C_q = (Q_{rg} \cdot P_{rg} + Q_{lg} \cdot P_{lg}) / 1000, \text{ RSD/час}$$

Укупни трошкови машине и осталих инвестиција у опрему

$$C_{Um} = C_m \cdot T_{Ucut}, \text{ RSD}$$

Где су C_m трошкови машине по часу

$$C_m = (C_{int} + C_{am} + C_{ins} + C_s + C_o) / n_r, \text{ RSD/час}$$

У изразу су:

- Трошкови камате: $C_{int} = C_c \cdot 0,5 \cdot I_{nt} \cdot 0,01$, RSD/час
- Трошкови амортизације: $C_{am} = P_m / T_m$, RSD/час
- Трошкови осигурања: $C_{ins} = P_m \cdot I_{ns} \cdot 0,01$, RSD/час
- Трошкови простора: $C_s = S \cdot P_z \cdot 12$, RSD/час
- Трошкови одржавања: $C_o = P_m \cdot I_m \cdot 0,01$, RSD/час
- Годишњи фонд часова рада машине: $n_r = n_h \cdot p \cdot N_{sm} \cdot 0,01$, час

$$\text{Укупни трошкови млазница} \quad C_{Uml} = C_{ml} \cdot T_{Ucut} \quad , \quad \text{RSD}$$

$$\text{Где су трошкови млазница} \quad C_{ml} = H_{ml} \cdot P_{ml} \cdot n_{ml} \quad , \quad \text{RSD/час}$$

$$\text{Потребан број млазница у јединици времена је:} \quad H_{ml} = 1 / T_{ml} \quad ,$$

Поред ових трошкова, укупни трошкови сечења, у зависности од врсте обраде садрже и трошкове специфичних делова опреме, чији је век мали и захтева честу замену.

4.5.3. Укупни остали трошкови

Код обраде ласером потребно је узети и укупне трошкове објектива код кога се често мења сочиво, односно комплет објектив:

$$C_{Ui} = C_{Ul} = C_l \cdot T_{Ucut} \quad , \quad \text{RSD}$$

Где су:

- Трошкови објектива $C_l = H_l \cdot P_l$, RSD/час
- Потрошња објектива: $H_l = 1 / T_l$, објектива/час
- Век објектива: T_l , часова
- Цена објектива: P_l , RSD

Додатни трошкови за континуално предгревање у току обраде:

$$\text{Трошкови гаса за предгревање} \quad C_{pg} = P_{pg} \cdot Q_{pg} \cdot 1000 \quad , \quad \text{RSD/час}$$

$$\text{Трошкови предгревања} \quad C_{Up} = (C_{pg} + P_r + C_m) \cdot (T_p / 60) \quad , \quad \text{RSD}$$

Постоји још доста модела за рачунање трошкова, а ово су неки од њих који се користе.

5. ОПИС МАШИНА ЗА СЕЧЕЊЕ ЛАСЕРОМ

5.1. Рутер машине за сечење ласером

Компјутерски контролисана машина за сечење има други назив CNC рутер. Уместо ручне контроле кретања алата, помоћу рутера се обезбеђује контрола преко компјутера. То је компјутерски контролисана машина за сечење свих врста материјала. Они се најчешће састоје из неколико посебних делова: CNC контролер, серво мотора, корачни мотор, серво појачала, АС регулатори, линеарна вођења. Поред тога могу имати и вакум пумпе са решетком радне плоче да држи делове за сечење.

5.1.1. CNC контролер

Он представља мозак CNC машина. Термин „контролер“ се односи на све електронске и електричне уређаје који омогућавају рад машине.

Данас постоје две врсте контролера на машинама: Гарнитурни контролери и отворена архитектура, лични рачунар.

Неки произвођачи тврде да тражена сигурност и поузданост CNC машина могу бити поуздани само кроз доказе власника технологије. Са друге стране процесори су велике брзине, тако да је данас рачунаром омогућено више сложена израчунавања кретања у реалном времену и простору, што доводи до равномернијих машина, боље распоређених делова, правилних покретима и веће брзине обраде.

5.1.2. Радни сто

Многи типови столова су доступни данас. Разликују се у зависности од врсте посла који се обавља и метода рада која се сматра да се користи.

Врсте радни столова:

1. Равни сто,
2. Т – сто,
3. Под и шина,
4. Универзални вакум и
5. Универзални сто.

5.1.3. Кретање

Кретање се дефинише као континуирана промена у положају тела (Сечење алат) у односу на референтну тачку (дела), у одређеном референтном оквиру. Референтни оквир је перспектива из које се посматра простор.

Тачније, пружа скуп оса од којих посматрак може да мери положај и кретање свих тачака у систему и помоћу којих може да се оријентише. Ово је важно јер сваки покрет мора бити измерен и израчунат.

Најчешће врсте кретања које се користе су: Декартов координатни систем, основно кретање и 3 – основно и 5 – основно кретање.

Декартов координатни систем (x, y и z) је познат као правоугаони координатни систем и користи се за дефинисање тачке у простору.

Код основног кретања постоје две врсте кретања, линеарно кретање и ротационо кретање. Линеарно кретање су произведени од стране различитих оса покретних дуж шине. Дијагоналне линије, и лукови настају као резултат две или више оса, у којим се креће алат истовремено. Ротационо кретање настаје као резултат окретања алата (главе) око своје осе.

Док код 3 – основног и 5 – основног кретања, принцип је сличан декартовом координатном систему. 3 - основна машина креће се по принципу Декартовог координатног система дуж x, y и z осе. 4 – оса се односи на ротирање алата око своје осе. 5 - оса омогућава машини да имају много већи опсег покрета и може да се креће на начин сличан као и људске рука.

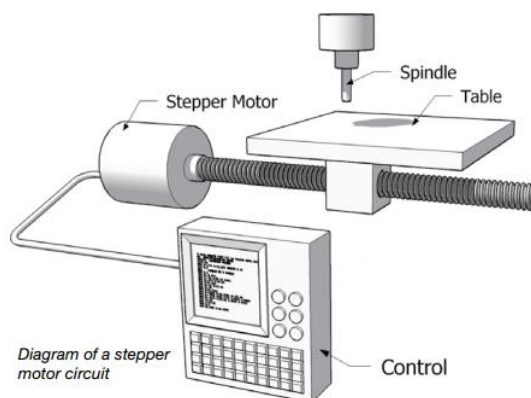
Постоје 6 могућих праваца кретања, 3 линеарна и 3 ротациона кретања. CNC машина мора израчунати правац, брзину и убрзање по свакој оси да би се обезбедило правилно кретање. То се ради уз помоћ алгоритама.

5.1.4. Погонски систем

То су уређаји који обезбеђују кретање машине. Постоје три различита система за погон CNC рутера:

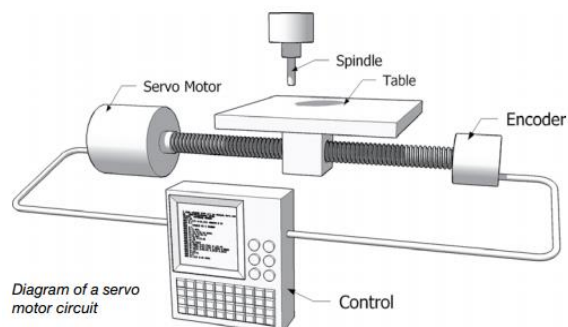
- а) Корачни мотори,
- б) DC серво погони и
- в) AC Серво регулатори .

Корачни мотори раде у отвореном окружењу, када се врши рад, није омогућено да се примају повратне информације. Ово може негативно да утиче на тачност делова. Такође је тешко наћи корачне моторе који нуде и високе брзине и обртни моменат.



Слика 5.1. Корачни мотор CNC рутера

Серво мотор ради у затвореном окружењу и упарен је са енкодером што обезбеђује појачане повратне информације, чиме константно исправља своју позицију на машини. Поседују већу прецизност, већу снагу и мање су бучни, док им је једини недостатак цена, јер су знатно скупљи од корачних мотора.

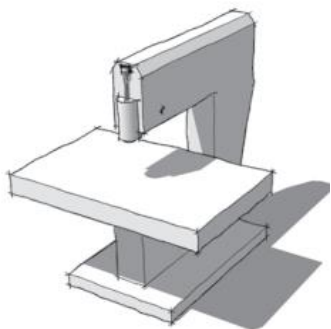


Слика 5.2. Серво мотор CNC рутера

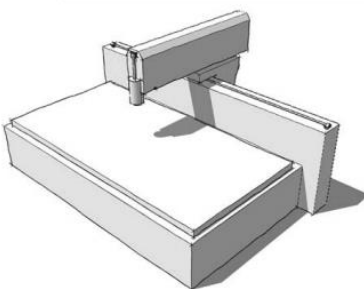
5.1.5. Постављање алата

Највећи утицај на квалитет сечења и брзину резања има алат. Резни алати се обично раде у три различита материјала: брзи челик, карбид и дијамант. Брзи челик (HSS) HSS је најоштрији од тих материјала, а и најјефтинији.

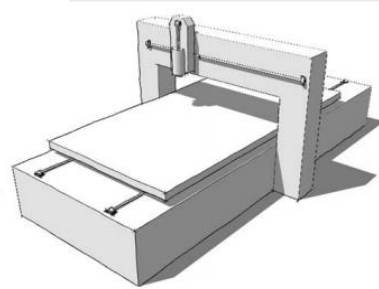
5.2. Конфигурација рутера:



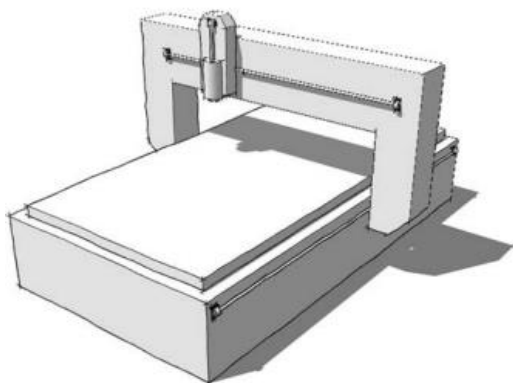
Слика 5.3. X – Y сто рутера



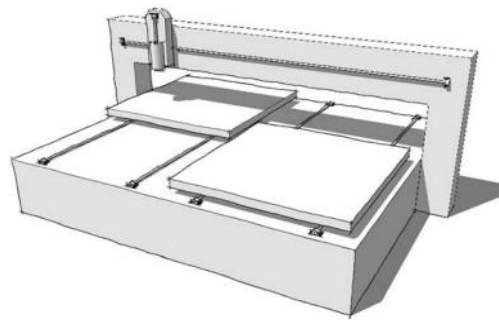
Слика 5.4. Конзолна рука рутера



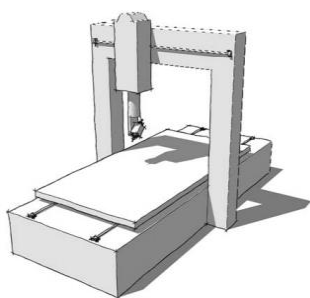
Слика 5.5. Покретни сто рутера



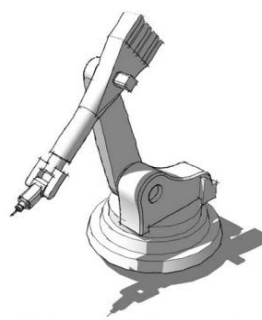
Слика 5.6. Покретно постолје рутера



Слика 5.7. Клатно или дупли сто рутера



Слика 5.8. 5 – осни CNC рутер



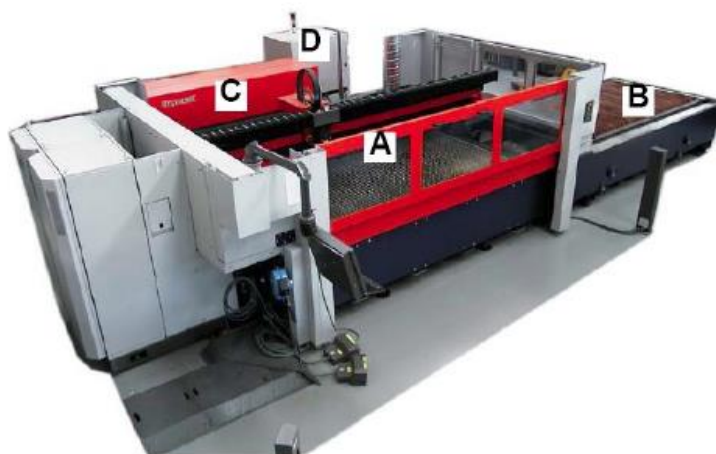
Слика 5.9. индустријски робот

5.3. Основни делови ласерске машине

Ласерско постројење има задатак да обезбеди генерисање ласерског зрака одређених карактеристика, као и да осигура његово вођење и обликовање пре самог усмеравања на површину обратка. Осим тога оно мора да обезбеди прихватање и стезање обрадака, као и потребна кретања при обради слично као код машина за обраду резањем. Ласерска постројења сачињава низ јединица које обављају одређене задатке, а све су преко контроле и управљања повезане у једну функционалну целину.

У састав ласерских постројења улазе следеће јединице:

1. Управљачка јединица
2. Управљачки терминал
3. Ласерски резонатор
4. Глава за сечење (резна глава)
5. Радни сто
6. Кориснички интерфејс



Слика 5.10. ласерска машина BYSTAR 3015

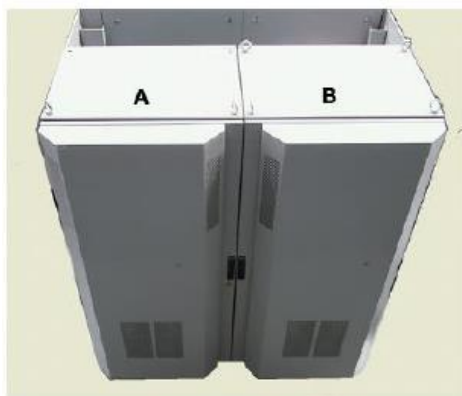
A – Ласерска машина, B – Радни сто, C – Ласер, D – Резонатор

5.3.1. Управљачка јединица

CNC и STL управљачка јединица заједно са напајањем чине управљачко језгро ове ласерске машине, слика 5.11. У посебно одвојеним комадним орманима налазе се контролери који управљају целокупним радом ласерске машине. Врата са посебним системом за хлађење одржавају температуру на одређеном нивоу што повећава поузданост система.

STL - управљачка јединица врши управљање заменом радних столова и контролом заштитних система на ласерској машини. У овој управљачкој јединици је смештен и главни прекидач напајања ласера.

CNC – управљачка јединица садржи CNC (Computer numeric control) контролер. CNC контролер врши конвертовање планове сечења у координате по осама. Контролише кретање главе ласера преко предмета обраде. Аутоматски прилагођава брзину кретања главе сечања као и снагу ласера према задатој контури предмета обраде. Ласерска машина извршава програм независно од управљачког терминала што омогућава креирање и модификовање геометријских контура у току самог извршавања програма.



Слика 5.11. Управљачка јединица

A – STL управљачка јединица

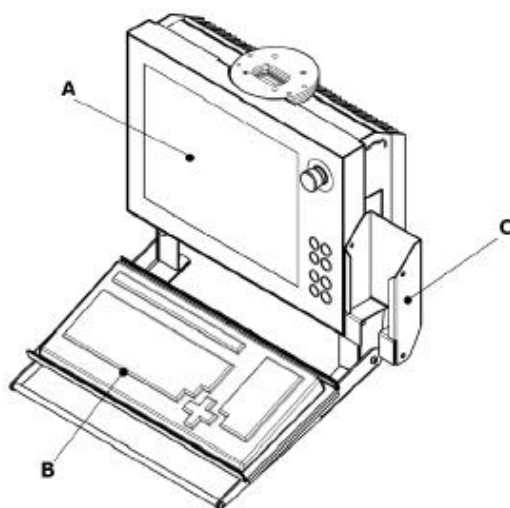
B – CNC управљачка јединица

5.3.2. Управљачки терминал

Управљачки терминал се налази на обртном носачу који је причвршћен за ласерску машину. Носач му омогућава обртање око осе носача као и хоризонтално померање. Управљање машином се врши преко екрана осетљивог на додир или преко тастатуре.

Пренос података се може вршити преко мрежне картице директним учитавањем података у управљачки терминал или преко улазно излазних уређаја DVD-а или USB порта.

Поред екрана налази се држач за ручни терминал који се користи приликом подешавања ласера, пробна сечења са различитим параметрима као и појединачних сечења из мањих табли лима.

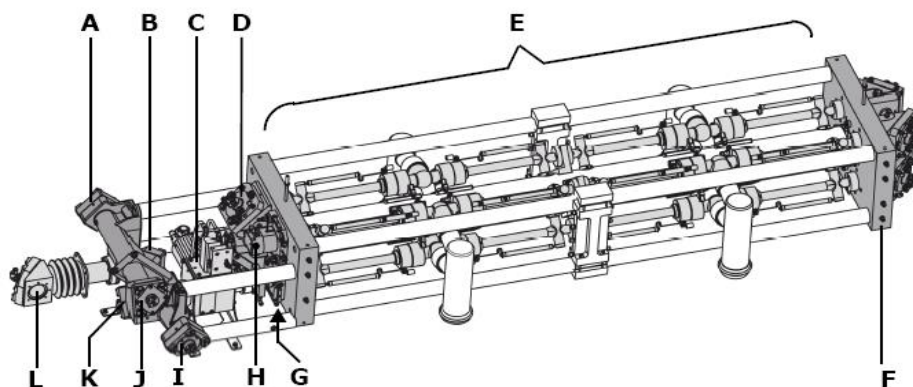


Слика 5.12. Управљачки терминал

A – Монитор осетљив на додир, B – Тастатура, C – Држач за ручни терминал

5.3.3. Ласерски резонатор

Ласерски сноп се генерише у цевима за пражњење, све у циљу постизања жељене снаге ласера. Цеви за пражњење су постављене у две нагнуте равни, што се може видети на слици. Крајње и излазно спојно огледало се монтирају на оба краја цеви за пражњење које заједно са хоризонталним и вертикалним поларизованим огледалима чине резонатор у коме настаје ласерски сноп.



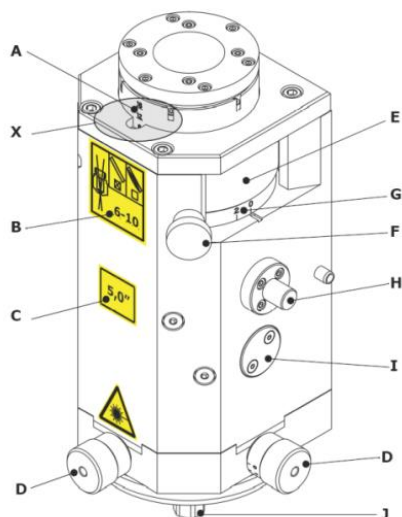
Слика 5.13. Резонатор

- | | |
|--|---|
| <i>A – Конкавно телескопско огледало</i> | <i>G – Излазно спојно огледало</i> |
| <i>B – Поларизовано огледало</i> | <i>H – Крајње огледало</i> |
| <i>C – Бленда (затварач)</i> | <i>I – Конвексно телескопско огледало</i> |
| <i>D – Предња плоча са два вертикална огледала</i> | <i>J – Огледало за усмеравање</i> |
| <i>E – Резонатор са DC цевима за пражњење</i> | <i>K – Огледало за усмеравање</i> |
| <i>F – Крајња плоча са 4 хоризонтална огледала</i> | <i>L – АРЦ огледало</i> |

Усмеравање ласерског снопа ван резонатора врши се огледалима са могућношћу подешавања односно ARC огледалима (Adaptive Radius Control). Ова огледала оптимизују пречник ласерског снопа и обезбеђују скретање ласерског снопа за 90°.

5.3.4. Глава за сечење

У глави за сечење се налази сочиво које фокусира ласерски сноп према предмету обраде. У зависности од врсте материјала који се сече бира се глава за сечење са сочивом одговарајуће жижне даљине.



- A – Скала позиције фокуса
- B – Референтна позиција за мерење позиције фокуса
- C – Жижна даљина у инчима
- D – Вијци за центрирање млазнице
- E – Прстен за подешавање позиције фокуса
- F – Вијак за блокирање прстена за подешавање
- G – Скала на прстену за подешавање
- H – Прикључак
- I – Елемент за фиксирање
- J – Млазница

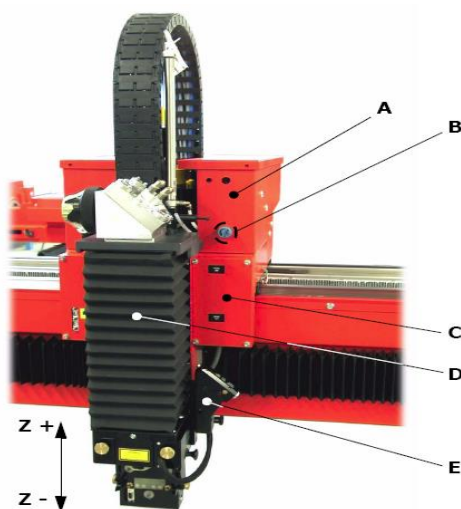
Слика 5.14. Глава за сечење

Облик и пречник млазнице које се монтира на глави за сечење зависи од:

- а) типа материјала,
- б) дебљине материјала,
- в) процеса сечења.

5.3.5. Носач главе за сечење

Налази се на покретном мосту који омогућава кретање главе за сечење преко радног комада у правцу Y осе. Ласерски зрак се усмерава са Y осе према X осе помоћу огледала монтираних на покретном мосту.



Слика 5.15. Носач главе за сечење

Сам носач главе за сечење омогућава померање главе за сечење у правцу X осе као и вертикално померање у правцу Z осе. Подешавање положаја главе за сечење по Z осе је веома значајно у процесу сечења јер обезбеђује константан размак између млазнице и предмета обраде чак и када предмет обраде није раван.

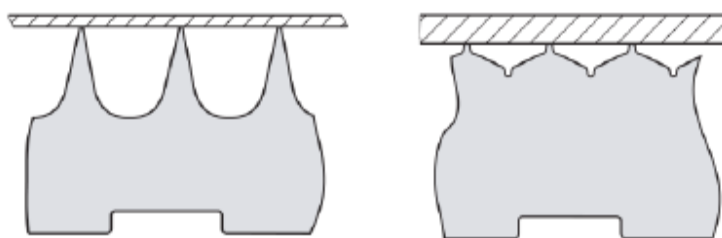
5.3.6. Радни сто

Радни сто ове ласерске машине састоји се од две решетке за прихват радних комада и погонске јединице. Замена решетки на радном столу се може вршити аутоматски након завршетка задатог плана сечења или ручно притиском на одговарајуће дугме. Овај систем омогућава процес сечења материјала на једној решетки док је на другој могуће вршити припремање материјала за следеће сечење.



Слика 5.16. Радни сто са измењивим решеткама Salvagnini ласер

Решетке служе за придржавање радног комада у току процеса сечења. Могу бити направљене од различитих материјала. Бакар се показао као најпогоднији за ту намену јер решетке направљене од овог материјала трају најдуже, а и шљака се најлакше скида са решетака направљених баш од овог материјала.



Слика 5.17. Решетка за тање и дебље лимове

6. ОПИС CO₂ ЛАСЕРА НА КОМЕ ЋЕ БИТИ ИЗВРШЕНО СЕЧЕЊЕ

У предузећу „Ковач-монт“ из Старих Бановаца се налази машина за сечење ласером BYFLEX произвођача BYSTRONIC снаге 1.5kW са радном таблом димензија 4x2 метра. Ласерски зрак се преноси до главе ласера преко флексибилног оптичког кабла без промене квалитета сечења (сечење је истог квалитета у било ком делу радне табле). Гасови које уређај користи за рад су: угљен диоксид (CO₂), азот (N), хелијум (He) и помоћни гас кисеоник (O).



Слика 6.1. CO₂ ласер са управљачком јединицом



Слика 6.2. CO₂ ласер рутер машина

Софтвер који овај ласер користи назива се BYBASE и то је специјализовани софтвер за програмирање ласера, направљен од стране произвођача ласера. Створен је да олакша прилаз инжењерима и убрза услуге сечења, као и да економичније искористи сечење делова.

Све опције у оквиру овог програма су потпуно интегрисане : дизајнирање радног комада, увоз података, нестинг, генерисање резова, генерисања CNC кода итд. и све може да се одради у оквирима овог програма. Програм је прилагодљив осталим сличним програмима и има могућност повезивања. Сви делови се складиште унутар програма и сви су организовани тако да је олакшан приступ њиховим локацијама као и олакшано извлачење параметара попут дебљине и врсте материјала. Сви подаци се аутоматски чувају како би могли бити коришћени у будућности.

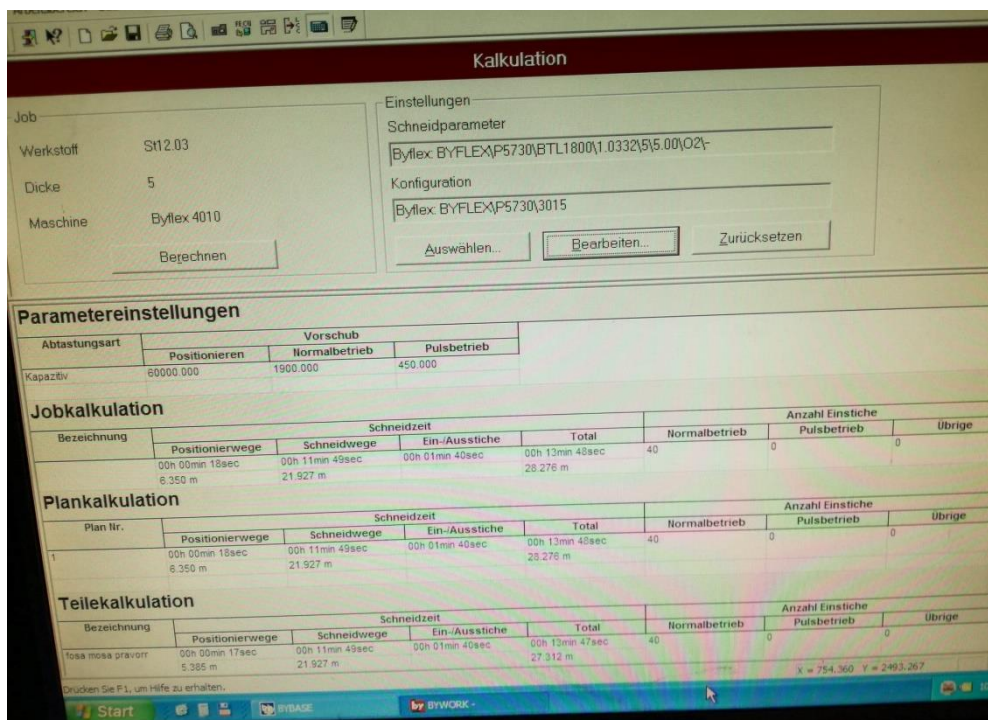
Програм аутоматски рачуна време обраде и трошкове обраде исеченог дела или сечења целе плоче. Такође рачуна дужину укупног реза, обележавање путања, трошкове материјала, њихову тежину, трошкови машине по сату, цене потрошне робе базиране на технологичности

Да би цртеж био увезен претходно је сачуван у .DXF фајлу како би се могао применити у софтверу. Бира се адекватна димензија радне плоче која се сече како би плоча била максимално искоришћена.

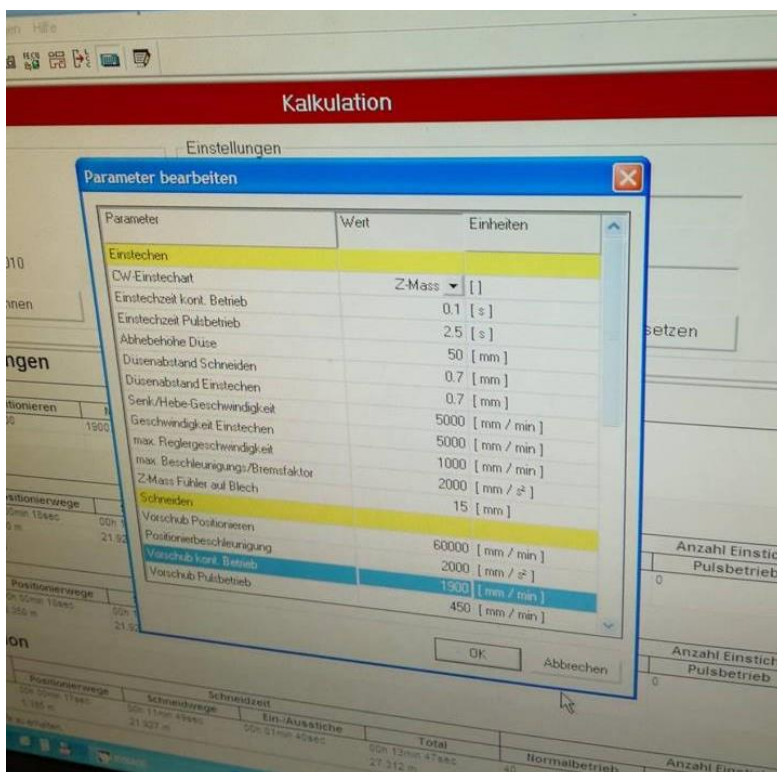
Програм аутоматски исцртава путање пролаза ласера, као и почетне зарезе, оптимално искоришћење радне плоче, излаз зрака ласера. Постоји могућност мануалног избора положаја радног дела, као и избор тачке улаза/излаза ласера и померање путање кретања ласера. Када се ради о малом броју радних комада и само једном делу, непотребно је померати путању, и предмет се поставља на жељену позицију, у зависности какав положај диктира плоча. Уколико се ради о већем броју радних делова, путања је компликована и изискује различита померања и премештања. Неопходно је оставити пар милиметара по маргинама како би ласер могао да уђе, такође, потребан је довољан размак између делова како не би дошло до деформације.

Програм аутоматски бира најоптималнију путању ласера и тежи да успостави максимално искоришћење радне плоче. При обради сечења ласером, ласерски зрак првенствено сече отворе како би се избегле додатне и непредвиђене деформације, а затим додатне контуре и то по устаљеном реду. Уколико дође до непредвиђеног кривљења радног дела или искакања дела из равни табле, оптика ласера аутоматски препознаје неправилност и машина се сама зауставља као не би дошло до оштећења главе ласера или неког од радних комада. Утолико, радна плоча мора да се деинсталира, аномалија мора да се отклони врши се поновно програмирање након враћања радне плоче на ради сто.

Програм у себи поседује и калкулатор (слика 6.3. и слика 6.4.) обраде података попут брзине резања за задату дебљину и врсту лима, потребно време за израду дела и остале податке потребне да би добили цену коштања дела.



Слика 6.3. програм калкулације обраде



Слика 6.4. основни параметри резања

6.1. Пример предмета обраде за сечење ласером

Пре почетка производње у индустрији је пожељно направити модел на основу кога се могу изнети различита испитивања и закључци. Данажњи основ инжењеринга

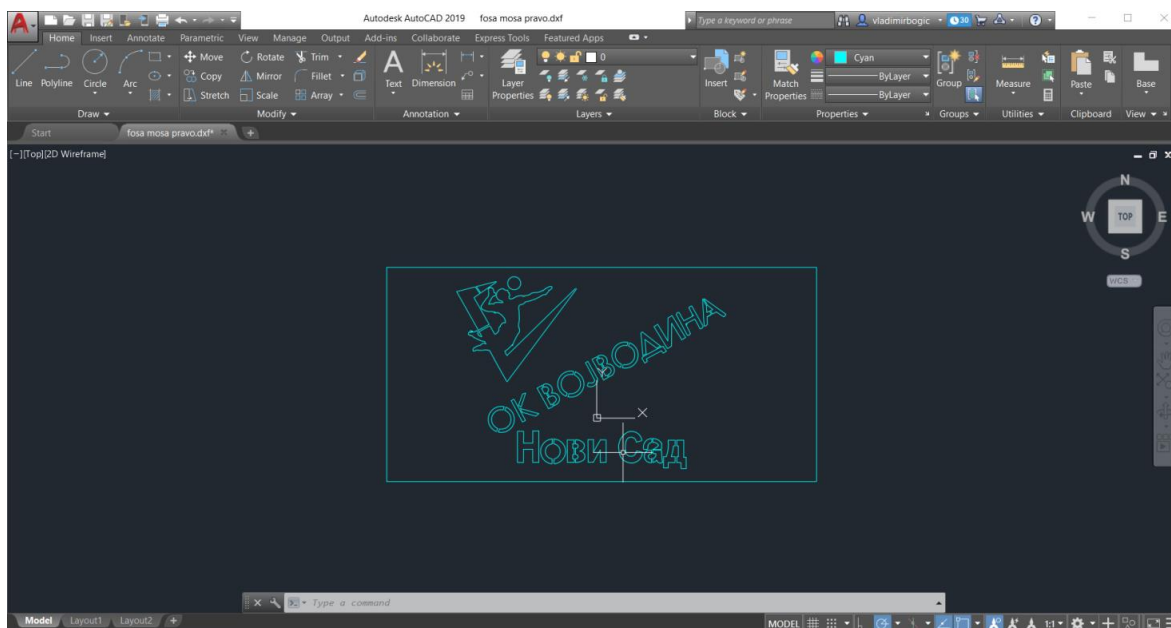
јесте рад у програмским језицима који ствара виртуелну средину за изабрани модел. Сврха испитивања је да се на моделу прикаже развој операција, могуће грешке оптерећења, савијања и остало пре физичког модела.

Овде је изабран модел меког челика, једноставне конструкције већих димензија који је предвиђен за појединачну производњу, а у случају потребе модел се може правити и у већој производњи. Део на себи нема савијања, али има тридесет седам отвора и представља обележје одбојкашког клуба „Војводина“ (слика 6.5).

Модел је неопходно моделирати у неком од софтверских пакета попут AutoCAD, Catia, Inventor, Solidwork или друго, како би рад на CNC машинама био могућ, а уједно олакшан и убрзан. У овом раду, део је моделиран у софтверском језику AutoCAD, као 2D цртеж пошто нема никаквих савијања. Да постоје савијања део би се радио као 3D модел пошто би био једноставнији за приказ.



Слика 6.5. обележје „ОК Војводина“



Слика 6.6. приказ 2D модела у AutoCAD

7. ПРИМЕР ПРОРАЧУНА ТРОШКОВА

У претходном поглављу је извршен приказздатог модела на коме ће бити извршена ласерска обрада сечењем. У овом поглављу ће бити обрађен поступак обраде ласером као и трошкови обраде. Пример је преузет из предузећа „Ковач-монт“ из Старих Бановаца.

7.1. Пример прорачуна производње

Прорачун трошкова за материјал дебљине 2 мм:

Цене се формирају на различите начине - у зависности од дебљине материјала, количине изрезаних комада, времена које је потребно за исецање.

Основна цена сечења на мале количине, односно за делове који заузимају једну просечну радну таблу (2 м x 1,5 м) или мање јесте 5200 динара, односно 44,07€ без ПДВ-а по сату резања.

Уколико се цене рачунају по секунди сечења, цена за материјал дебљине 2mm је 0,0123€ по секунди без ПДВ-а.

За задат део време сечења износи 828 секунди

Цена сечења за задат део износи 1196,00 динара или **10,14€** без ПДВ-а.

Цена је формирана без цене материјала која **износи 77 дин/кг**

7.2. Пример прорачуна производње по модулу 4

n	број делова који се израђује,	1
n_s	број сечења по једном делу (нпр. ако део има рупу у себи, тада је $n_r=2$, једно за сечење контуре рупе у делу и друго за сечење периферне контуре дела),	36
L_{cut}	дужина реза за један део, mm	28276
N_{sm}	број смена рада радника,	1
P_r	број смена рада радника,(€/часу)	2.3
P_m	уложени капитал (цена опреме - машина и др.), (€)	45000
p	временски степен искоришћења, %	55
n_h	број радних сати у једној смени годишње, час	2520
T_m	век машине, амортизационо време, година,	25
I_{nt}	камата на годишњем нивоу, %/годишње	/
I_{ns}	осигурање (% од уложеног капитала)	/

S	потребни простор, m^2 ,	40
P_z	цена закупа простора, ($€/m^2$) на месечном нивоу	/
I_m	одржавање, % од уложеног капитала на годишњем нивоу	2,2
T_{pr}	припремно време (обухвата време програмирања и др.), часова	0,5
P_{el}	цена електричне енергије, ($€/kWh$)	0,045
E_l	потрошња електричне енергије, kW.	27

v_{cut}	брзина резања, mm/min	1900
T_{sp}	време припреме за сечење (време за позиционирање, продирање и прилаз до контуре), sec	2,6
n_{ml}	број млазница (које истовремено врше обраду)	/
T_{ml}	век једне млазнице, часова/млазници	15
P_{ml}	цена једне млазнице, ($€/млазници$)	2,2

Заједнички прорачун :

Трошкови електричне енергије	$C_{el} = E_l \cdot P_{el}$	1,215($€/час$)
Трошкови камате	$C_{int} = C_c \cdot 0,5 \cdot I_{nt} \cdot 0,01$	/ ($€/годишње$)
Трошкови амортизације	$C_{am} = P_m / T_m$	1800 ($€/годишње$)
Број часова рада машине	$n_r = n_h \cdot p \cdot N_{sm} \cdot 0,01$	1386 часова
Трошкови осигурања	$C_{ins} = P_m \cdot I_{ns} \cdot 0,01$	/ ($€/годишње$)
Трошкови простора	$C_s = S \cdot P_z \cdot 12$	/ ($€/годишње$)
Трошкови одржавања	$C_o = P_m \cdot I_m \cdot 0,01$	990 ($€/годишње$)
Трошкови машине по часу	$C_m = (C_{int} + C_{am} + C_{ins} + C_s + C_o) / n_r$	2,013($€/час$)
Потрошња млазница на једној обрадној глави	$H_{ml} = 1 / T_{ml}$	0,067 млазница/час
Трошкови млазница	$C_{ml} = H_{ml} \cdot P_{ml} \cdot n_{ml}$	0,147($€/час$)

Укупна дужина резања	$L_{Ucut} = n \cdot L_{cut}$	28276 mm
Укупно време припреме и кретања пре сечења	$T_{Usp} = (n_s \cdot T_{sp} \cdot n) / 3600$	0,026 час
Укупно време сечења	$T_{Ucut} = (L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}) / n_{ml}$	0,27403 час
Укупно време сечења(ласер)	$T_{Ucut} = L_{Ucut} / (v_{cut} \cdot 60) + T_{Usp}$	0,27403 час
Укупни трошкови рада	$C_{Ur} = P_r \cdot (T_{pr} + T_{Ucut})$	1,78 ($€$)
Укупни трошкови електричне енергије (гасно нема)	$C_{Uel} = C_{el} \cdot T_{Ucut}$	0,333 ($€$)
Укупни трошкови рада машине	$C_{Um} = C_m \cdot T_{Ucut}$	0,552 ($€$)
Укупни трошкови млазница	$C_{Uml} = C_{ml} \cdot T_{Ucut}$	0,04 ($€$)

T_l	век објектива, час/сочиву	10000
P_l	цена објектива,	400
P_{rg}	цена радног гаса, (€/m ³)	0,1
Q_{rg}	потрошња радног гаса, m ³ /min	0,66
P_{lg}	цена ласерског гаса, (€/m ³)	2,36
Q_{lg}	потрошња ласерског гаса, m ³ /min	0,05

Трошкови гасова	$C_q = (Q_{rg} \cdot P_{rg} + Q_{lg} \cdot P_{lg})/1000$	0,01104(€/час)
Ротрошња сочива	$H_l = 1 / T_l$	0,0001 сочива/час
Трошкови сочива	$C_l = H_l \cdot P_l$	0,04(€/час)
Укупни трошкови гасова	$C_{Uq} = C_q \cdot T_{Ucut}$	0,00302 (€)
Укупни трошкови сочива	$C_{Ul} = C_l \cdot T_{Ucut}$	0,01086 (€)
Укупни трошкови сечења	$C_{cut} = C_{Ur} + C_{Uel} + C_{Uq} + C_{Um} + C_{Uml} + C_{Ul}$	<u>2,716 (€)</u>

7.3. Коментар на поређење прорачуна:

По приказаним примерима из предузећа и по моделу за прорачун трошкова примећује се да ласер доноси предузећу велику зараду. За део који у производњи кошта 2,72€ (без материјала) они остварују зараду од 7,42€. Највећи део зараде доприноси мали трошкови машине по часу који они наплаћују 44,07€, док они износе 2,013€. Овакво пословање је корисно због тога што предузеће послује у плусу, али због конкуренције на тржишту постоје велике шансе да изгубе кориснике њихових услуга, па је неопходно пратити цене на тржишту како би остали конкурентни осталим предузећима

8. ЗАКЉУЧАК

Ласерско резање метала има предности над плазма резањем због веће прецизности и знатно ужег реза, међутим, већина индустријских ласера не може да реже веће дебљине метала у поређењу са плазма резањем. Новије ласерске машине раде са већим снагама (6kW) и приближавају се плазма машинама у могућности резања дебелих материјала. Али, почетни трошкови таквих машина су много већи, него код плазма уређаја. Предност резања ласером у односу на остале термичке поступке је мало уношење топлоте у зону реза, а самим тим и смањење могућности деформације основног материјала, поготово када је реч о танким лимовима. Неки материјали се такође тешко или немогуће режу традиционалним начинима.

Главни недостатак резања ласером су велики губици енергије. Ефикасност индустријских CO₂ ласера креће се у опсегу од 5% до 15%. Утрошак енергије и ефикасност ласера зависе од типа ласера и варира зависно од излазне снаге и радних параметара. Захтевани удео снаге ласера за резање, познат као унета топлота, зависи од врсте материјала, дебљине, коришћеног процеса (реактиван/инертан) и жељене брзине резања.

На основу приказаних модела долази се до закључка да на обраду ласером утичу многобројни фактори као што су: дужина линије сечења, потребно време за обраду, трошкови набавке машине и потребне опреме и битне ставке попут њеног одржавања као и трошкова радника.

Многе фирме користе упрошћене обрасце или чак неке које су сам развили за прорачун трошкова, ради веће ефикасности. Најчешће се прорачун врши помоћу параметара попут дужине линије сечења обраде као и дужине времена обраде. Цене се формирају у зависности од броја захтеваних комада и од предузећа које врши услуге. Пример који је наведен је рад мале фирме „Ковач-монт“ из Старих Бановаца, и служи како би се приказо начин формирања цене.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић Богдан, Неконвенционални поступци обраде (поглавље о обради ласером, књига у рукопису), Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [2] Драгоје Миликић, Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002
- [3] Миодраг Лазић, Неконвенционални поступци обраде, Машински факултет, Крагујевац, 1990
- [4] Владо Мартиновски, Милица Антић, Заваривање и заварене конструкције, ДУЗС, Београд, 2011
- [5] Laser in material processing - Evaluation of cost efficiency Juergen Scholz, GER-Unterschleißheim
- [6] Master's thesis –Cut Cost Calculation – Johan Berglund
- [7] <https://www.pololu.com> (17.8.2018)
- [8] Факултет инжењерских наука, Богдан Недић – Скрипта
- [9] <http://sr.wikipedia.org/sr-el/Laser> (10.8.2018)
- [10] <https://www.scribd.com/document/293270634> (13.9.2018)
- [11] <https://www.scribd.com/document/198838814> (13.9.2018)
- [12] <https://okvojvodina.org/> (18.9.2018)
- [13] ценовник предузећа „Ковач-монт“ – за 2018 годину
- [14] <https://www.bystronic.com> (19.9.2018)
- [15] <http://www.weldflowmetal.com> (30.9.2018)
- [16] <http://www.diex.com> (30.9.2018)