

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 527/2012

Петар Д. Вранић

Примена ласера за гравирање

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. проф. др Богдан Недић, дипл.инж.-ментор

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да обради следеће:

У оквиру завршног рада потребно је извршити прикупљање и систематизацију података о машинама за гравирање са анцентом на опрему за гравирање помоћу ласера. Дати основне напомене о суштини процеса обраде ласером и операције које се могу изводити ласером.

У посебном делу рада детаљно описати машине за гравирање ласером које се налазе у предузећу „Застава оружје“ Крагујевац и Факултету Инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. На овој опреми извршити експериментална испитивања гравирања са различитим параметрима процеса и дати анализу добијених резултата.

Препоручена литература:

- [1] Лазић М. Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Драгоје Миликић, Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [3] Радовановић М. Аутоматизовано пројектовање технологије обраде ласером, Докторска дисертација, Машински факултет Ниш, 1995.
- [4] Недић Б. Обрада ласером, скрипта у рукопису, Факултет Инжењерских наука у Крагујевцу, 2008.

Крагујевац, септембар, 2016.

Ментор:
проф. др. Богдан Недић, дипл. инж.

Садржај

1.	Уводна разматрања	4
2.	Историјат гравирања	6
	Ручно гравирање	6
3.	Машине за гравирање	9
3.1.	Машинско гравирање-пантографи	9
3.2.	Гравирање CNC машином	9
3.2.1.	Област примене CNC машина	10
3.2.2.	Поузданост CNC машина	11
3.2.3.	Предност CNC система	11
3.3.	Ласерско гравирање	11
3.3.1.	Начин рада ласера који се користи за гравирање	12
3.4.	Материјали на којима се врши ласерско гравирање	13
4.	Анализа процеса обраде ласером	14
4.1.	Историјат ласера	14
4.2.	Принцип рада и опис ласера	14
4.3.	Особине ласерског зрачења	16
4.4.	Врсте ласера	18
4.4.1.	Чврсти ласери	19
4.4.2.	Полупроводнички ласери	21
4.4.3.	Течни ласери	21
4.4.4.	Ласери на бази неорганске течности	22
4.4.5.	Ласери на бази органских боја	22
4.4.6.	Гасни ласери	22
4.5.	Обрада материјала	25
4.6.	Технолошке операције обраде ласером	26
4.6.1.	Ласерско бушење	26
4.6.2.	Ласерско сечење	28
4.6.3.	Ласерско заваривање	30
4.6.4.	Ласерска термичка обрада	31
4.6.5.	Ласерско гравирање	32
5.	Опрема за ласерско гравирање испитаних узорака	35
5.1.	CNC машина „Laser Sisma BSS-3D“	35
5.1.1.	Принцип рада „Sisma BSS-3D“ ласера	36
5.1.2.	Опис техничког система	36
5.2.	CNC машина „LaserCut-107“	37

5.2.1. Принцип рада LaserCut-107	39
6. Упоредивање рада датих ласера кроз практични пример	41
6.1. Израда гравура на CNC машини „Laser Sisma BSS-3D“ и приказ њене дебљине и дубине	41
6.2. Израда гравуре на CNC машини „LaserCut-107” и приказ њене дебљине и дубине	53
7. Закључак	64
Литература	65

Резиме:

У оквиру овог рада описан је значај индустријских ласера са посебним освртом на технологију ласерског гравирања и њен историјски развој. Дате су основне информације о обрадама ласером као што су: бушење, термичка обрада, сечење, заваривање и гравирање. У раду је описана опрема за гравирање и њена примена. Описан је и експериментални део који се вршио на обе машине, дате су вредности дебљине и дубине добијених гравура које су приказане кроз табеле, слике и дијаграме.

Кључне речи: Ласер, Гравирање

Summary:

In this document its described the importance of industrial lasers with special focus on tehnology laser engraving and its historical evolution. This document give basic information about laser treatments such as drilling, heat treatment, cutting, welding and engraving. This document describe the equipment for laser processing and its application. It also describes the experimental part that is exercised on both machines, given the thickness and depth of engraving obtained which are presented in tables, figures and diagrams.

Key words: Laser, Engraving

1. Уводна разматрања

Како би задовољио своје потребе, човек од свог постојања тежи да што више искористи природне ресурсе и сировине, и притом развија производне и друге технологије. У настојању да побољша услове живљења открива нове технологије и усавршава постојеће. Ово је омогућило развој и стварање производа што је утицало на развој поступка обраде, технологија и технолошких поступака, односно техничких система и алата.

Потреба да се неким средством олакша живот довела је до низа фундаменталних открића – точка, хидрауличних склопова, електронских компоненти итд, што је омогућило огроман напредак у развоју комплексних машина.

Прве машине су настале усложњавањем ручних алата, па је управљање њима био више физички него интелектуални посао. Како су се машине развијале, тако се и начин управљања мењао. Израз "машина алатка", који генерално означава машине које обрађују неки материјал замењујући ручни алат, долази управо из описа намене тих машина.

Са почетком употребе уређаја за аутоматско управљање машинама алаткама, многе машине добијају нове могућности, нови изглед и производне особине. Смањује се физичко учешће човека у производњи и негативни утицаји људског фактора на управљање машинама, а повећава продуктивност, репетитивност и економичност.

Употребом разноврсних медија, којима се саопштава одређени програм уређајима за аутоматско управљање машином алатком постиже се већа тачност израде, уједначеност израђених комаду, док се трошкови производње по јединици производа смањују [1].

У последњих тридесет година дошло је до значајних промена како у машиноградњи, тако и у управљању машинама. Увођењем рачунара у управљачке процесе добијена је нова врста супер продуктивних машина, тзв. CNC (eng. *Computer Numerical Control*), односно машина са компјутерским нумеричким управљањем.

CNC машине контролише рачунар, на основу програма који задаје човек одговарајућим програмима или командама. Карактеришу се великом производношћу, прецизним радом, великим бројем радних функција и добрим репетитивним особинама.

CNC машине су се развиле од NC машина (нумерички управљивих машина) где се информације нису чувале као целокупни програми у контроли машине, већ делимично читавале са бушених трака. Време развијања CNC технологије почиње око средине 1970-их година. То је омогућавало рационализацију у масовној и појединачној производњи кроз брже и прецизније кретање оси и алата.

У данашње време индустрија је незамислива без савремених CNC машина. Свака CNC машина чита програм написан у G-коду, који креира корисник. Персонални компјутери се користе за дизајн делова и писање програма. Програми се пишу ручним куцањем G-кода или коришћењем CAM софтвера (Computer Aided Manufacturing).

CNC машине имају скоро исте делове као старе NC машине. Битна разлика је додатак контролне (CNC) јединице и серво мотора на све осовине. CNC рачуна координате где која осовина треба да буде и контролише серво моторе који кроз куглени шраф померају алат или обрађивани део [10].

Обрада ласером (Laser Beam Maching – LBM) се заснива на примени концентрисања фотонске енергије, фокусиране на малу површину материјала, за обраду загревањем, топљењем, сагоревањем или испаравањем. Веома интензиван развој ласерске технике и технологије обраде, учинио је да ласер постане универзалан

“алат” са којим се могу изводити најразличитије производне операције на скоро свим врстама материјала [5].

У раду се најпре приказује историјат гравирања, као и ручно гравирање јер је то прво гравирање које је постојало.

Затим се приказују машине које се користе за гравирање, пре свега пантографи јер су они заменили ручно гравирање. Пошто машине које врше ласерско гравирање спадају у врсту CNC машина, у овом делу су описане CNC машине и најпознатији примери CNC машина.

Након тога је описан сам ласер, његов историјат, подела, врсте, принцип рада, опис ласера, као и технолошке операције ласером и материјал који ласер може обрађивати.

Посебна пажња посвећена је опису и анализи рада датих ласера и њиховим карактеристикама.

Након детаљног описа ласерских машина, описан је и експериментални део обраде ова два ласера.

У раду су приказане фотографије технолошких операција и самих ласерских машина, ради лакшег разумевања и праћења.

2. Историјат гравирања

Гравирање је технички поступак урезивања (линија, украса, знакова, ликова) у тврду, обично равну површину прављењем канала у њој. Резултат гравирања може бити сам декорисани предмет ако се гравира сребро, злато, челик или стакло, или може омогућити израду дубоких штампарских плоча од бакра или другог метала за штампање слика на папиру као илустрације. Отисак урезаних слика назива се гравура или гравира.

Гравирање је кроз историју била важна метода стварања слика на папиру, како у уметничком штампању тако и за комерцијалне репродукције и илустрације у књигама и часописима. Због тежине учења технике, гравирање је дуго времена било замењено фотографијом у комерцијалним применама или је замењено неким другим техникама.

Традиционално гравирање резбарским длетом или употребом машина наставили су да користе златари, стакларски гравери, оружари и други, док модерније индустријске технике попут фотогравирања и ласерског гравирања имају многе важне примене [11].

Ручно гравирање



Слика 2.1: Длета за гравирање [12]

Гравери користе алат од ојачаног челика названог бурин за урезивање дизајна у површину која је традиционално најчешће бакарна плоча. Длета постоје у много облика и величина од којих сваки даје различите врсте линија. Бурин производи јединствен и препознатљив квалитет линије која је карактерисана својом постојаношћу, одмереним изгледом и чистим ивицама. Угаони алат има благо закривљен врх који се обично користи у штампи. Фирентинска длета представља алат равног дна са многоструким урезаним линијама, а користи се за процес испуне на већим површинама. Равна длета се користе за обављање испуне на словима као и код највећег дела гравирања музичких инструмената.

Округла длета обично се користе на сребру за стварање јасних резова (што се назива гравирање јасним резом) као и на другим металима тешким за урезивање попут никла и челика. Бурины су четвртастог облика или у облику издуженог дијаманта где се користе за урезивање равних линија. Остали алат попут меззотинтних длета, рулета и лаштила користи се за текстурне ефекте. На слици 2.2 је приказан уређај за пнеуматско гравирање [11].



Слика 2.2: Алат за пнеуматско гравирање [13]

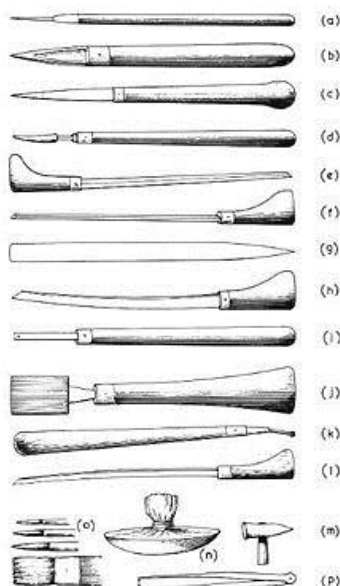
У почетку је постојало само ручно гравирање. У том се процесу бурин држи руком тако да се дршка обухвата дланом руке. Пнеуматско гравирање се састоји од комбинације штампе и манипулације делом. Овај се процес данас још увек изводи, а модерна технологија омогућила је разне механичке системе гравирања. У суштини они имају дршку сличну као бурин. Унутар њих је пнеуматски пистон који дуби тачку попут пнеуматске бушилице са брзином до 15.000 удараца у минуту, редукујући тако напор потребан код традиционалног ручног гравирања.

Сваки алат за гравирање је посебан и користи се за одређену сврху. На пример, постоје кружни алати за гравирање који раде кружне резове, и угаони алати за гравирање који раде правоугаоне резове. Ови алати имају врло мале резне тачке, па су неке резне линије толико мале да су широке 1 mm. Линије широке 3 mm представљају огроман рез за ручног гравера.

Ручно гравирање се користи за персонализацију или украшавање драгуља, оружја, трофеја, ножева и осталих ствари направљених од финих метала. Понекад се ручно гравирају и калупни делови због додвања одређених информација као што су бројеви делова. На слици 2.3 су приказани алати за ручно гравирање.

Једино гравирање метала које се могло изводити у античком добу видљиво је у плитким жлебовима пронађеним на неким драгуљима након почетка 1. миленијума п.н.е. Главнина такозваних гравираних дизајна на античким златним прстеновима или другим предметима израђивала се удубљивањем или понекад комбинацијом технике удубљивања.

Употреба гравирања за урезивање декоративних сцена или фигура на стаклено посуђе појавило се тек у раном првом веку после Христа, а наставило се све до четвртог века нове ере у градским центрима попут Келна и Рима, те је ишчезло негде у петом веку. Декорација се у почетку заснивала на грчкој митологији, пре него што су сцене лова и циркуса постале популарне, као и на сликама исцртаним из Старог и Новог завета. Чини се да се користило за опонашање изгледа судова од племенитих метала из истог периода укључујући примену златних листића, а вероватно је урезивани голом руком или помоћу штапића. До сада је идентификовано 20 одвојених стилистичких радионица и чини се вероватним да су занимања гравера и произвођача судова била одвојена један од другог [11].



Слика 2.3: (а) игла за нагризање, (б) стругач, (ц) и (д) лаштило, (е) длето, (ф) црпилица, (г) стругач за мецотинта, (х) закривљени стругач, (и) рулет за мецотинта, (ј) сенку за мецотинта, (к) рулет за мецотинта, (л) длето са сувим врхом, (м) чекић, (н) држач језгра за примену 'основе', (о) четкице за примену лака, (п) калиперни компаси [11]

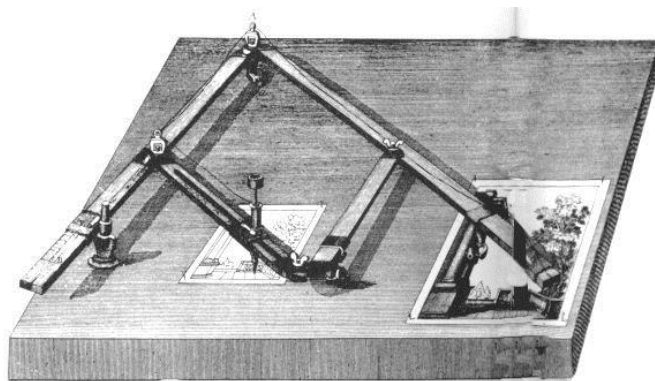
У средњем веку у Европи су златари користили гравирање за декорисање и инскрипцију металних радова. Мисли се како су започели штампати импресије својих дизајна ради њихова записивања. Из тога је произашло гравирање бакарних штампарских плоча за стварање уметничких слика на папиру које су биле познате као штампа старих мајстора у Немачкој током тридесетих година 15. века. Убрзо се проширило у Италију. Многи рани гравери имали су златарску позадину. Први и највећи период гравирања трајао је од 1470. до 1530. са мајсторима попут Мартина Сцхонгауер, Албрехта Дирера и Луцаса ван Леиден.

Након тога гравирање је почело губити трку са јеткањем, много лакшом техником у уметничком образовању. До деветнаестог века већина техника гравирања се користила за комерцијалне илустрације. Пре открића фотографије, гравирање се користило за репродукцију осталих уметничких облика, на пример слика [11].

3. Машине за гравирање

3.1. Машинско гравирање-пантографи

Постоје машине за гравирање које се обично користе за штампу слова употребом пантографског система. Такви уређаји се обично користе за инскрипцију на прстењу, медаљонима и украсним предметима. На слици 3.1 је приказан пантограф.



Слика 3.1: Пантограф [15]

Пантографски систем гравирања настао је у другој половини 19. века, а пуни процват доживео је почетком 20. века. Потиснуо је у великој мери ручно гравирање, као што ће и њега потиснути нумеричко CNC гравирање, крајем 20. века.

Главни део машине за гравирање је пантограф механизам. Састоји се од четири међусобно повезана дела који омогућава да се облик копира, смањи или увећа. Пантограф је врло лак за прављење и може бити претворен у машину за гравирањем додавањем електричног мотора који ће преносити обртни момент алату за гравирање [14].

3.2. Гравирање CNC машином

Будући да висок ниво микроскопских детаља мође постићи само врхунски гравер, фалсификовање гравирних дизајна је готово немогуће, па се штампање новца, плоча за штампање новца, чекова, обвезница и остале вредносни папири увек гравирају ручно. Гравирање је толико прецизно да гравери не могу створити исти детаљ на ручно гравираним сликама.

Ручно гравирање се може видети само на специјализованим пољима. Ручно гравирање се најчешће користи да би се предмету задала већа цена. Ручно гравирање се може видети на пушкама и другом металном оружју, драгуљима и музичким инструментима. У већини индустријске употребе попут производње интаглио плоча за комерцијалну примену, ручно гравирање је замењено гравирањем CNC машинама [4].

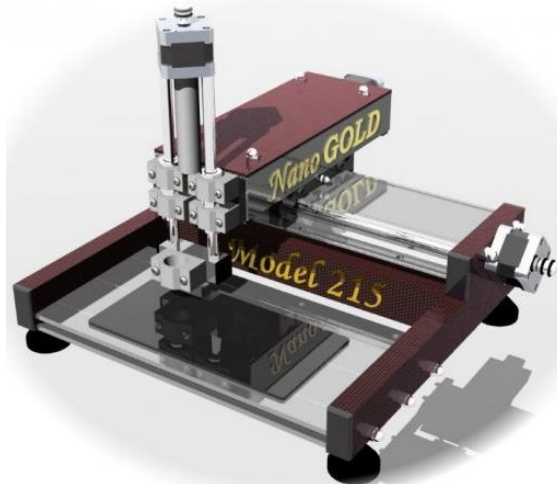
3.2.1. Област примене CNC машина

Технологија CNC машина, у данашњој индустрији има велику примену. Могло би се рећи да се CNC машине данас користе у свим производним делатностима. Од краја двадесетог века, CNC технологија је постала стандардна и незаменљива због своје поузданости и прецизности. [16]

Најчешће области примене CNC машина:

- обрада дрвета
- обрада метала
- обрада пластике
- гравирање
- израда алата
- моделирање
- хоби
- наставна средства

На слици 3.2 приказана је једна CNC машина за гравирање.



Слика 3.2: CNC машина за гравирање [17]

CNC системи су се доста променили у протеклих 10-15 година. Од самосталних (black box) компоненти до потпуно интегрисаних, РС вођених, умрежених ћелија. Данас се CNC системи састоје од машине (струг,глодалица, рутер,...), степ-мотора, драјвера, РС рачунара и софтверског система, односно софтвера. На сликама 3.3 и 3.4 су приказани CNC рутер, CNC глодалица [16].



Слика 3.3: CNC рутер [18]



Слика 3.4: CNC глодалица [19]

3.2.2. Поузданост CNC машина

CNC технологија и машине су веома поуздане јер су смањене могућности грешака приликом рада. Људски фактор је присутан али је могућност грешака далеко мања него код мануелног система контроле машина. CNC машине омогућују да се „Систем контроле квалитета“ подигне на највиши могући ниво. У данашњим условима пословања ово је јако битан фактор [16].

3.2.3. Предност CNC система

Предност CNC система се огледа у следећим:

- Велика прецизност израде и обраде.
- Компатибилност у оквиру нумеричког програмирања (стандардизованост).
- Широка примена, односно заступљеност у свим производним делатностима.
- Мали трошкови производње. Када се машина програмира, понавља задато и захтев минималне интервенције човека
- Поузданост рада
- Конкурентска предност због брзог и лаког опслуживања купаца
- Лака и брза едукација запослених [16]

3.3. Ласерско гравирање

Ласерско гравирање је процес урезивања помоћу ласера. Ласерско обележавање је дакле метода која оставља трагове на објекту, који укључује и промену боје због хемијске односно молекуларне промене, нагорености, пењења, растворљивости, аблације, и других фактора. Техника не укључује коришћење мастила, нити алата који троше површину. Та својства разликују ласерско од алтернативног гравирања, или осталих технологија, у којима се мастила морају редовно мењати.

Ласерско гравирање користи се за посебно дизајниране материјале, као и за неке боје. То укључује и ласерски осетљиве полимере и нове металне легуре.

Појам ласер такође се користи и као генерички појам, који покрива широк спектар техника, укључујући штампу, маркирање и ласерско штампање. Маchine за

ласерско гравирање и ласер су слични, па они који немају искуства понекад их могу заменити [21].

Ласерско гравирање (слика 3.5) је процес који помоћи ласерске зраке светлости утискује узорак или слику у предмете попут стакла, пластике, дрвета, метала и осталих тврдих материјала. Слика или узорак предмета који се гравира обично се налази у рачунару како би се на тај начин контролисале ласерске зраке те што прецизније означио желејни објекат. Интензитет ласерске зраке зависи од врсте материјала на којој се врши гравирање. Као што је раније поменуто ова техника не користи мастило, него се гравирање врши помоћу светлости. Процес гравирања такође не укључује употребу никаквих додатних алата. Дакле ради се о врло сигурној методи означавања објеката. Чак се и врло крхко стакло може без оштећења гравирати овим поступком [21].



Слика 3.5: Пример ласерског гравирања [20]

3.3.1. Начин рада ласера који се користи за гравирање

Ласерска машина за гравирање може се поделити на три дела: ласер, контролер и плочу. Ласер је попут оловке; зраке које произлазе из њега омогућавају регулатору да исписује знакове на површину. Контролер контролише смер, интензитет, брзину кретања, те ширење ласерских зрака које се усмеравају према површини. Плоча одређује на коју површину ласер може деловати.

Постоје три главна начина гравирања. Први и најчешћи је гравирање помоћу ХУ стола, где плоча мирује, а ласерско око се креће у Х и У правцима, усмеравајући притом ласерски зрак на жељени објекат. Други начин рада је путем цилиндричног или равног додатка који је монтиран око цилиндра, како би ласер ефикасно произвео fine спирале и укључивањем и искључивањем пулсирао, те на тај начин произвео жељену слику. У трећем поступку, ласер и обратник су стационирани тако да је ласерски зрак померена изнад површине објекта.

Место на којем ласерски зрак дотиче површину треба бити у равни ласерског оптичког система. Ова тачка је мала, можда и мања од делића милиметра (зависно од оптичке таласне дужине). Само подручје унутар овог жаришта је значајно, када

ласерски сноп прелази преко површине. Енергија ласера мења површину материјала. То се може урадити на два начина, тако да се површина загреје, а материјал потом испари, или на начин да се материјал ломи резањем и ољушти са површине [4].

3.4. Материјали на којима се врши ласерско гравирање

Треба напоменути да се ласерско гравирање може радити само на ласерски осетљивим полимерима, и металним легурама. Неки од популарних материјала на којима се гравирање може направити помоћу ласерских светала су:

Дрво:

Директно „спаљивање“ слике да дрвету је једно од првих начина коришћења гравирања ласером. Ласер ради снагом мањом од 10W, али и сама снага зависи од материјала који се гравира: орац, буква, хрст..

Пластика:

Ласер се користи за гравирање пластике, ливене смоле, двослојне граверске пластике, натписне плоче и слично. Како је ласер извор топлоте, разни облици састави пластике реагују различито. Код неких врста пластике могуће је да дубоко гравирани пластике буду истопљене, тако да пластику треба другачије третирати и обрађивати.

Метали

За гравирање метала користе се ласери са кратким таласним даљинама. На тај начин је решен већи део проблема, али још увек постоје материјали који се овм саставом не могу гравирати, већ се код њих приступа начином „маркирања“.

Обложени метали

Обложени (обојени) метали су одлични за гравирање, јер се код њих самим гравирањем скида само површинска боја. Уколико су метали обојени константним слојем боје, онда је резултат још бољи. Најчешће се примењује за идентификационе плочице, кућне бројеве, разне натписе и др.

Камен и стакло

Ласер својим ударањем у камен ствара ефекат чекића где разбија ситне делове камена. таквим начином могуће је у камену изгравирати слова, слику па чак и фотографију.

Тврдоћа стакла се мери са поређењем са тврдоћом челика. Код стакла се добија ефекат топлена при великој температури коју ласер производи. На стаклу је, исто као и на мермеру изгравирати текст или фотографију како на равним површинама тако и на ваљкастим предметима као што су чаше, вазе и слично. Захваљујући новим технологијама и машинама могу се угравирати и дводимензионални и тродимензионални облици [21].

4. Анализа процеса обраде ласером

4.1. Историјат ласера

Реч ласер је настала од речи „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ и представља појачање преко стимулисане емисије зрачења. Иако на први поглед физика ласера звучи компликовано, развојем технологије ласери нас данас у великом броју окружују у нашем свакодневном животу. 1704. године, Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Јангов експеримент објављен 1803. године и непосредно откриће поларизације светлости убедило је научнике у оно време да светлост има способност да таласа. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица. Први ласер је настао маја 1960. године. Ласер је емитовао светлост таласне дужине 694 nm у пулсном режиму, а ласерску емисију је постигао стимулисаном емисијом из рубинског кристала побуђеног лампом. Након тога, ласери почињу на велико да се производе широм света – први уранијум ласер у IBM (новембар 1960. године), први хелијум-неонски ласер (1961. године), први Nd ласер: YAG-ласер и CO₂ ласер (1964. године), Ar ласер (1964. године), хемијски ласер (1965. године), и развојем технологије данас имамо праву ласерску револуцију.

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

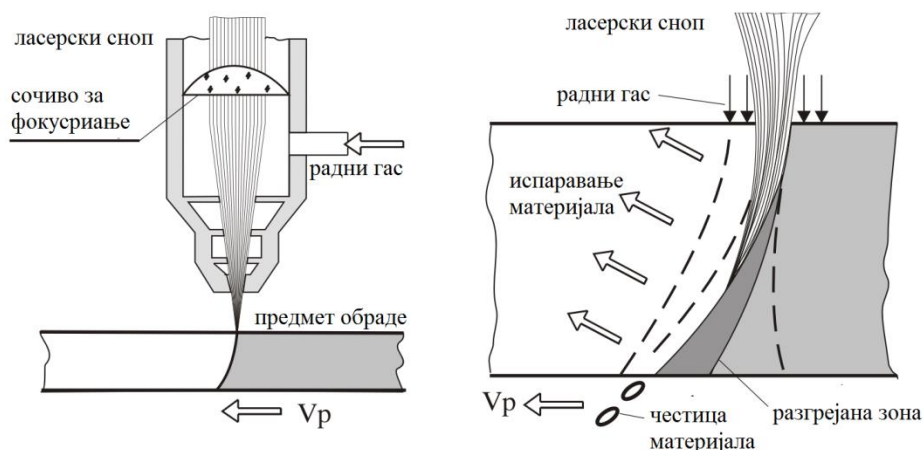
- ласерски зраци су монохроматски тј. имају само једну одређену таласну дужину;
- ласерски зрак је висококохерентан, са паралелним зрацима исте фазе;
- ласерски зрак може да се фокусира на малу површину и да обезбеди велику густину.

За последњих 20 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 [4].

4.2. Принцип рада и опис ласера

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине *чврсто тело, течност, гас* и да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитује у облику светлосног зрачења део предходно уложене енергије. Код ласера са чврстим емитером, побуђивање зрачења обично се врши предходним обасјавањем активне средине светлошћу лампе бљескавице. Код рубинског ласера, на пример, користи се импулсна ксенонова лампа, иако ова лампа митује светлост у широком интервалу таласних дужина, блиску сунчевој, за постизање ласерског ефекта користи се само уска плавозелена област $\lambda=560$ 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

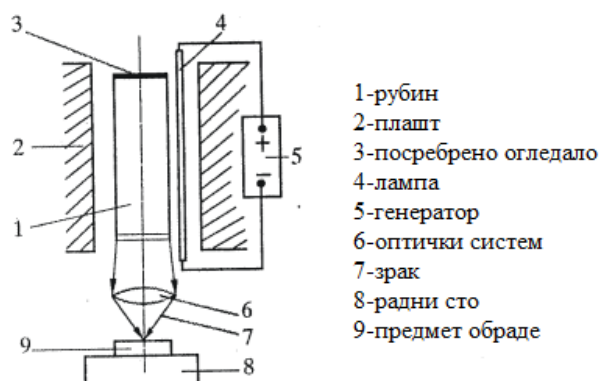
оловке $\phi=7\text{ mm}$ и $l=125\text{ mm}$, ставља се унутар спиралне импулсне лампе или паралелно са правом лампом. Горње чело кристала је посребрено, а доње је полупосребрено, или се близу чела кристала ставе два квалитетна огледала, строго паралелна и нормална на осу кристала, која представљају 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 κW . Импулсни генератор састоји се од извора напајања високог напона, од 1000 V и више, који преко исправљача напаја батерије кондензатора. Принцип рада ласера дат је на слици 4.1.



Слика 4.1: Принципијелна шема формирања ласерског снопа [4]

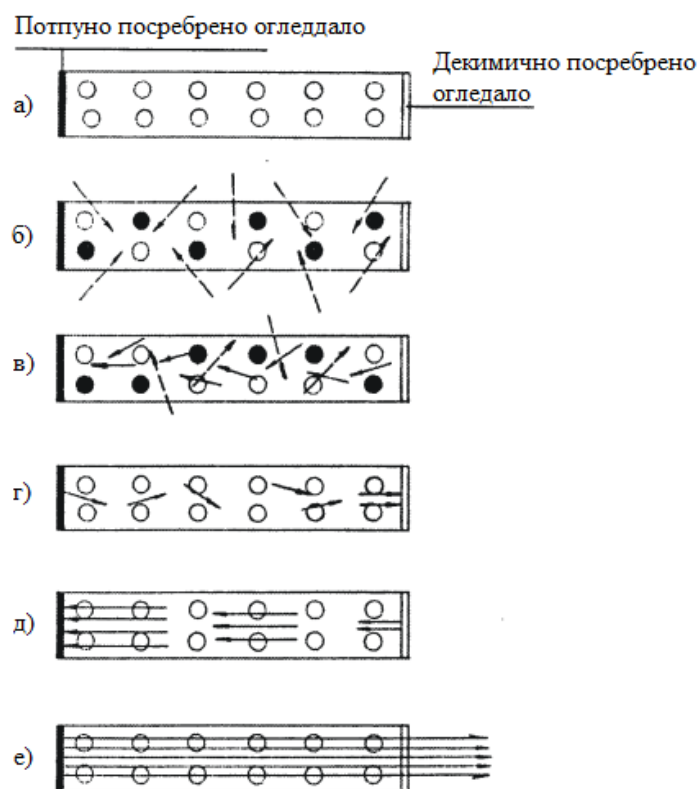
Помоћу оптичког система фокусира се ласерски сноп на предмет обраде постављен на радном столу [4].

Шема обраде и ласер са чврстим емитером од рубинског кристала дати су на слици 4.2.



Слика 4.2: Шема обраде рубинског ласера [4]

Појаве које се дешавају у рубинском ласеру приказане су на слици 4.3.



Слика 4.3: Појаве које се дешавају у рубинском ласеру [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 (б,в - 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 (г, д). Након неколико узастопних рефлексија на чеоним плочама снажни флуks фотона пролази кроз полупосребрено оледало (е) [4].

4.3. Особине ласерског зрачења

Ласерска светлост је монохроматична, тј. сва светлост из једног извора је потпуно исте таласне дужине (па стога и исте боје). Таласна дужина светлости појединог ласера одређена је количином енергије коју електрон отпушта при прелазу на нижи енергетски ниво. Ласерска светлост је кохерентна, тј. сви фотони се крећу у једном смеру. Због тога и талас ласерске светлости изгледа попут правца, а није сачињен од удубљења и испупчења као талас код осталих облика светлости.

Ласерска светлост је усмерена, тј. ласерски зрак светлости је врло танак али је зато „концентрисан“, тј. високог је интензитета [4].

-Степен монохроматичности за неку спектралну линију са таласном дужином λ_0 (фреквенција ν_0) одређује се изразом:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \quad (4.3.1)$$

где је:

$\Delta\lambda$ - ширина спектра.

Монохроматичност је уско повезана са кохерентношћу снопа ласерских зрака (фаза и амплитуда електромагнетних осцилација једнаке су или је разлика међу њима константна). Високи степен кохеренције осигурава сам механизам стимулисане емисије.

-Дивергенција (разилажење) снопа ласерских зрака одређује се из израза:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (4.3.2)$$

где је:

d - пречник ласерског материјала (активне средине),

λ - таласна дужина зрачења.

Дивергенција утиче на пречник фокусираног снопа ласерских зрака, а стога и на максималну густину снаге која се може добити при фокусирању.

-Пречник фокусираног снопа ласерских зрака, тј. светлосне мрље на површини обратка је:

$$d_r = 2 \cdot \theta \cdot f_s = 2.44 \frac{\lambda \cdot f_s}{d} \quad (4.3.3)$$

где је:

θ - ствами угао дивергенције,

f_s - жижна даљина сочива.

-Густина снаге у зони обраде, код импулсног ласерског зрачења, дата је изразом:

$$q = \frac{E}{A_f \cdot t_i} = \frac{4E}{\pi d} \quad (4.3.4)$$

где је:

E - енергија импулса ласерског зрачења,

t_i - трајање импулса зрачења и

A_f - површина светлосне мрље.

Густина снаге је значајна карактеристика процеса обраде која утиче на карактер разарања(ерозије) материјала под дејством ласерског зрачења. Од густине снаге зависи температура загревања материјала обраде.

-Енергија импулса ласерског зрачења је:

$$E = \int P_l(t) dt \quad (4.3.5)$$

где је:

$P_l(t)$ -снага ласерског зрачења у моменту t и

t_i -трајање импулса.

-Средња снага импулса ласерског зрачења је:

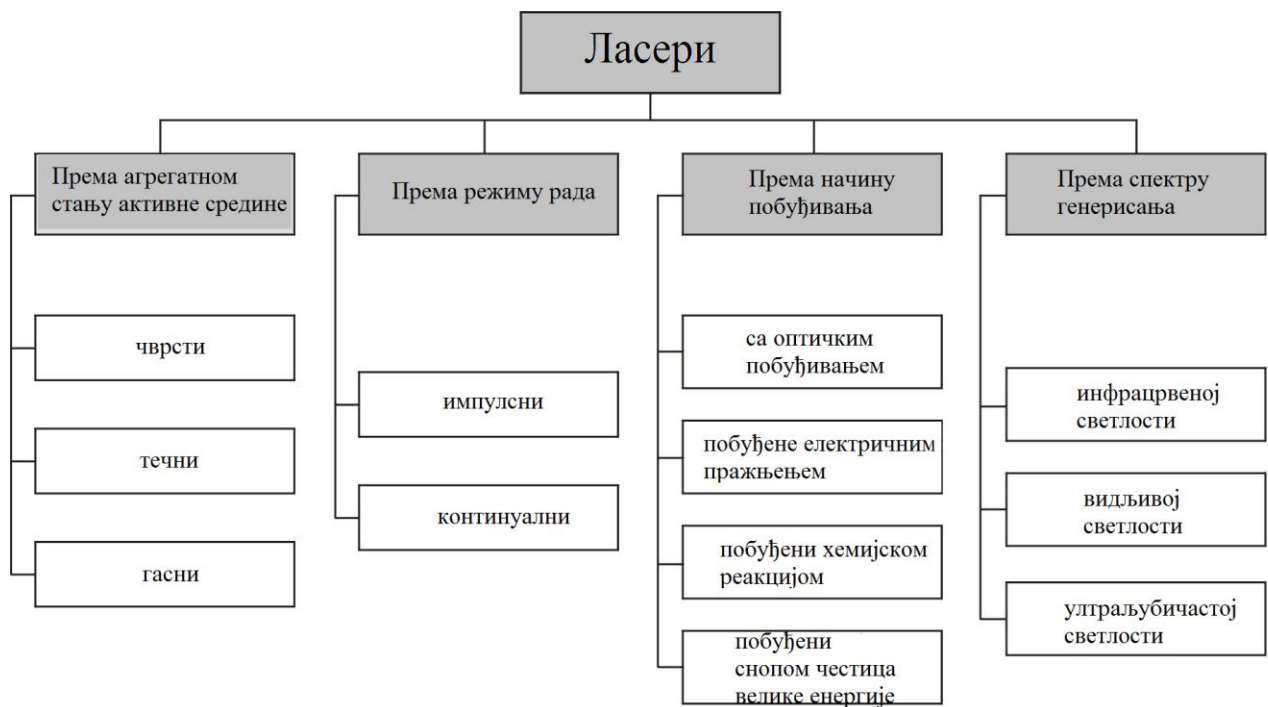
$$P_{lsr} = \frac{E}{t_i} \quad (4.3.6)$$

-Трајање једног импулса ласерског зрачења је:

$$t_i = \frac{P_{lsr}}{E} \quad (4.3.7)$$

4.4. Врсте ласера

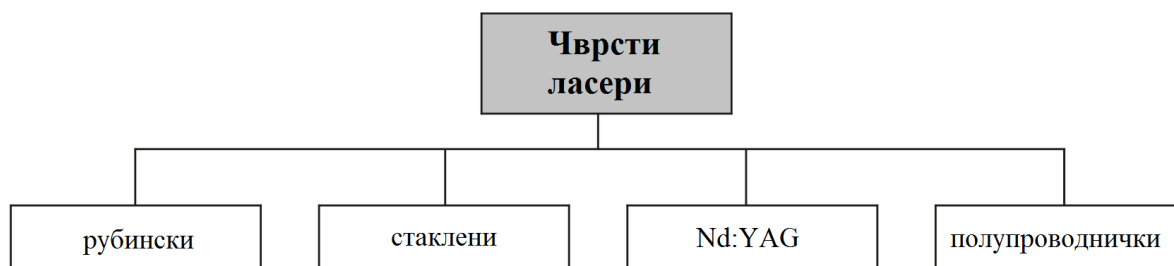
Постоји више подела ласера. На слици 4.4 је најчешћа подела [4]:



Слика 4.4: Подела ласера [4]

4.4.1. Чврсти ласери

Ласери са чврстим телом нашли су примену у обради метала и неметала. На слици 4. 5 дата је подела чврстих ласера [4].



Слика 4.5: Подела чврстих ласера [4]

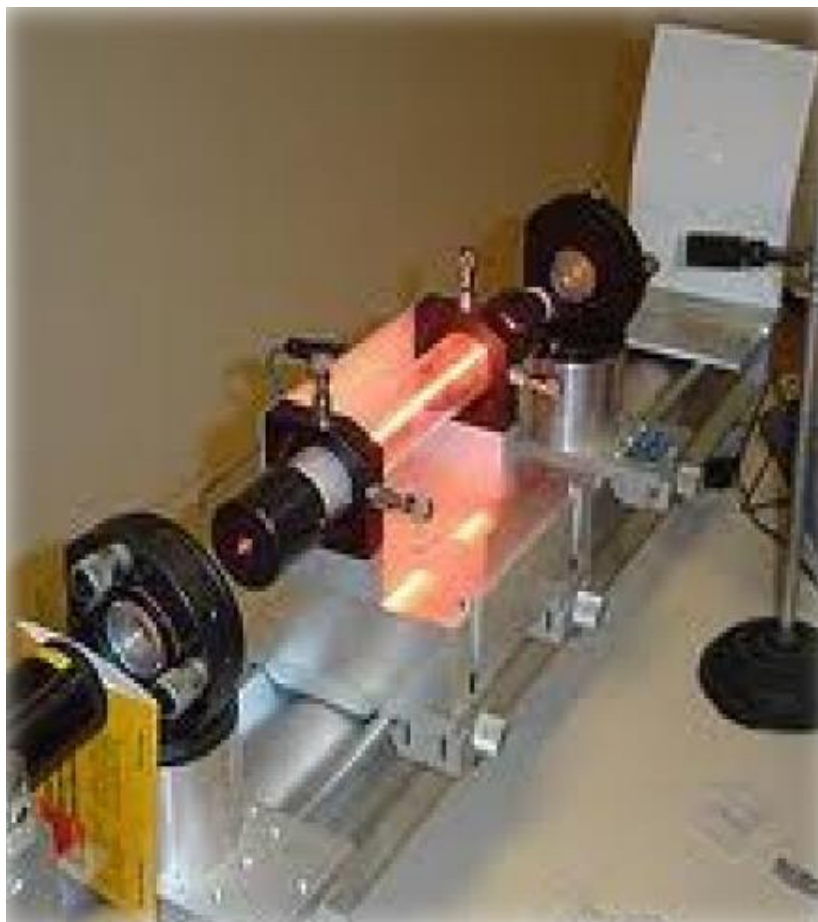
Као активна средина код ласера на бази чврстих тела користи се кристално или аморфно тело. Чврста тела имају знатно већу концентрацију активних честица него гасови. Због тога је насељеност енергетских нивоа у чврстим телима много већа од насељености енергетских нивоа у гасовима. Чврсто тело као оптичка 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.

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 (10 x 10 mm) 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 100 J). Због великог загревања 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 и алата за извлачење танке жице. Овај ласер у машинству се користи за бушење малих отвора код различитих материјала и за тачкасто заваривање. Рубински ласер је приказан на слици 4.6 [4].



Слика 4.6: Рубински ласер

Стаклени ласер

Стаклени ласери се састоје од високопрозрачног 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 са $\lambda = 1.054 \mu\text{m}$.

Стаклени ласери имају релативно висок коефицијент корисног дејства (до 3 %) при малој енергији импулса од 20 J. 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 J. 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 $1 \div 1000 \text{ J}$. Постоје стаклени ласери и са такозваним гигантским импулсом са енергијом од 10^4 до 10^5 J [4].

Nd: YAG laser

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 тврдих 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÷50 Hz. 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 [4].

4.4.2. Полупроводнички ласери

Полупроводнички ласери 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.

4.4.3. Течни ласери

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 зрачења 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÷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 [4].

4.4.4. Ласери на бази неорганске течности

Сада се развијају углавном ласери на бази растворених соли неодијума у неорганским течностима. Као растварачи користе се течности као што су: SeOCl_2 и SnCl_4 , што се пише у облику: $\text{Nd}^{3+}:\text{SeOCl}_2:\text{SnCl}_4$. Исто тако постоје раствори: $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{SnCl}_4$. Као емисиони прелази на овим једињењима користе се исти прелази јона као и у Nd ласерима на бази стакла.

Апсорпциони и емисиони спектри Nd ласера на бази течности и Nd ласера на бази стакла веома су слични, тако да ову врсту течних ласера можемо третирати као варијанту YAG ласера.

4.4.5. Ласери на бази органских боја

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 6G, родамин 6, кумарин 2, кумарин 6, итд.

Органске боје су сложена органска једињења која јако апсорбују видљиву светлост. Обично се састоје из бензенских (C_6H_6), пиридинских ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$), азотних ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$) и других прстенова. 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 [4].

4.4.6. Гасни ласери

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 [4].

CO₂ ласер

Први гасни ласер употребљен је 1964. године али се није много користио јер је био мале снаге. Упркос његовом труду да нађе користан начин тог уређаја, CO₂ ласер своју практичну примену има тек данас. На слици 4.7. је приказан CO₂ ласер [7].



Слика 4.7 : CO₂ ласер [6]

Принцип рада CO₂ ласера

Ласер је плинско-молекуларни, који као активни медиј користи молекуле CO₂. За његову реакцију употребљава се електрични спој, оптичко, хемијско и топлотно пумпање.

Ласер се састоји од:

- стаклене цеви у којој се налази смеша плинова: угљендиоксида, азота, хелијума и евентуално неког другог гаса.
- на крајевима цеви се налазе два паралелна огледала, која су премазана слојем силикона, молибдена или злата, која рефлектују ласерски зрак натраг у цев и формирају резонатор.

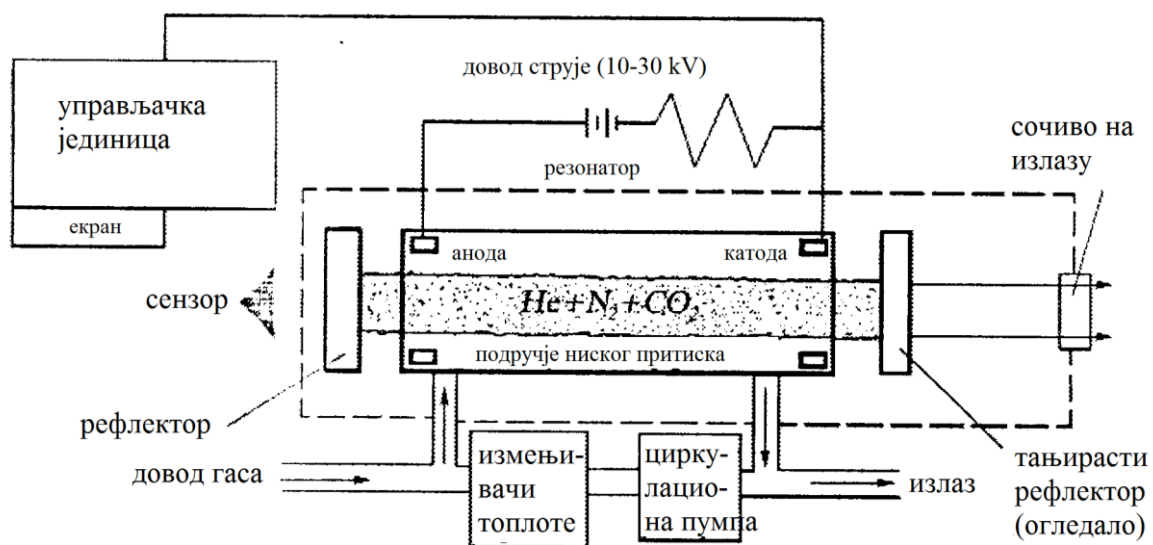
Сочива и прозори су направљени од германијума и цинк-селенида ZnSe. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон. Високи напон производи мноштво брзих електрона у цеви који сударима предају своју енергију молекулима гаса.

CO₂ ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину светлости $\lambda = 10.6 \mu m$, која је десет пута већа од стаклених и YAG-ласера. Ови ласери могу да раде у импулсном и континуалном режиму, а као индустријски ласери имају снагу и до 15 kW. CO₂ ласерима може да се врши бушење, сечење, заваривање, маркирање, термичка обрада на различитим материјалима, наношење тврдох превлака итд.

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 при конвенционалном хлађењу, изменом гасне смеше у ласерском телу а потом њеним хлађењем. На слици 4.8. је приказана шема CO₂ ласера [7].



Слика 4.8: Шема CO₂ ласера [4]

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 креће код других типова

ласера. Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина.

CO₂ ласер се примењује у:

- војна индустрија,
- медицина, хирургија,
- обрада материјала.

CO₂ ласери се најчешће употребљавају у металопрерађивачкој индустрији [7].

4.5. Обрада материјала

Најчешћа ласерска обрада материјала је обрада резањем, бушењем, заваривањем, гравирањем, маркирањем, површинска обрада...

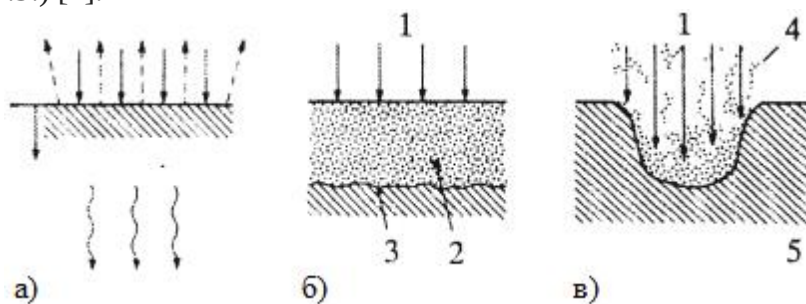
Принципи ласерске обраде

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 (4.9.) [4].



Слика 4.9: Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом

а) рефлексија и апсорпција, б) топљење, в) испаравање

1 - ласерски зраци, 2 - истопљени материјал, 3 - гранична зона између чврстог и истопљеног материјала, 4 - одношење материјала, 5 - предмет обраде [4]

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 [4].

У табели 4.1 дате су вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења.

Табела 4.1: Вредност коефицијената рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења [4]

Таласна дужина ласерског зрачења	Коефицијент рефлексије R						
	Au	Cu	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0.415	0.415	0.437	0.952	0.85	-	-	0.597
0.930	0.930	0.831	0.961	0.82	0.555	0.575	0.676
1.06	0.981	0.901	0.964	0.73	0.57	0.65	0.741
10.6	0.975	0.948	0.989	0.97	0.97	-	0.941

Према табели 4.1, за CO₂ ласере ($\lambda=10.6 \mu m$) коефицијент рефлексије R је много велики за све наведене метале, тако да се за обраду метала користи само мали део енергије ласерског млаза. Зато, ови ласери су непогодни за обраду метала.

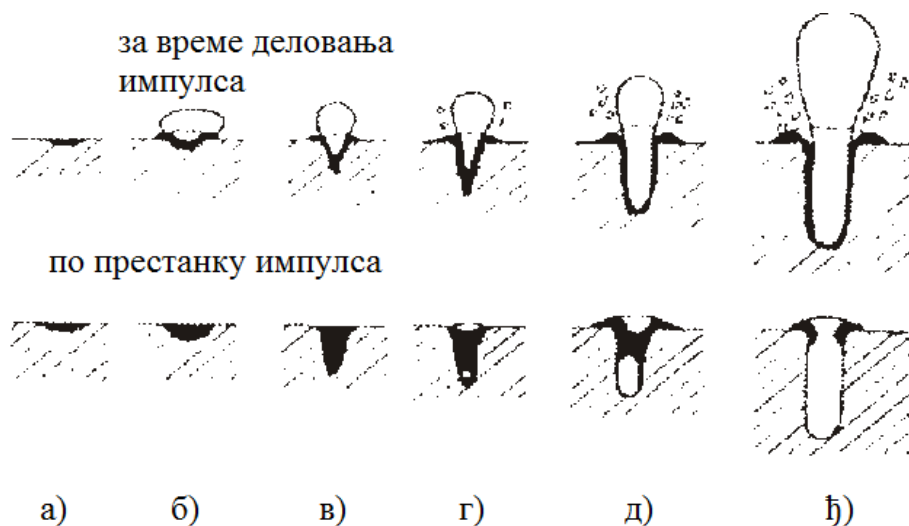
4.6. Технолошке операције обраде ласером

У зависности од подручја примене, количина скинутог материјала у јединици времена, може зависити о врсти и димензијама материјала који се обрађује, карактеристикама интензитета ласерских зрака у фокусу, геометријским величинама ласерских зрака, брзини помоћног кретања, врсти и притиску помоћног гаса и др. Ласером се могу обрађивати сви материјали, али не подједнако ефикасно. Обрадивост зависи од разних својстава материјала, а првенствено од његових физичких карактеристика (специфични температурни капацитет, коефицијент температурне проводљивости, температура топљења, коефицијент рефлексије и др.). Производност обраде директно зависи од енергетских карактеристика ласера. Повећањем специфичне снаге ласерских зрака у фокусу, тј. концентрације енергије и броја импулса, врши се испаравање и разарање материјала који се обрађује [4].

4.6.1. Ласерско бушење

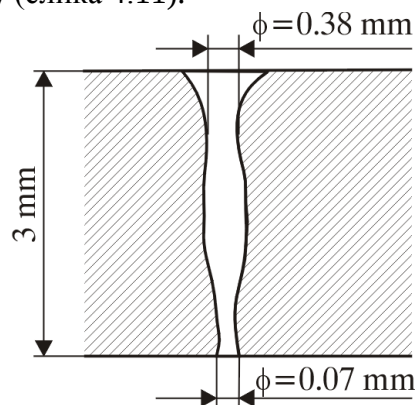
Ласерско бушење је типична операција ласерске обраде која представља основу за друге технолошке операције обраде ласером. Процес обраде се заснива на стварању рупе или отвора на материјалу предмета обраде деловањем фокусираног ласерског зрачења при чему се материјал уклања испаравањем. Количина материјала која ће бити одстрањена испаравањем зависи од густине снаге ласерског зрачења и латентне топлоте испаравања материјала предмета обраде. При деловању ласерског

зрачења мале густине снаге ($q_{\text{ц}} \leq 10^5 \div 10^6 \text{ W/цм}^2$ за челик), врши се само локално топљење површинских слојева метала на незнатној дубини, без стварања отвора (сл. 4.10,а). Са повећањем густине снаге ($q_{\text{ц}} \geq 10^5 \div 10^6 \text{ W/цм}^2$) почиње, поред топљења и испаравање у центру светлосне мрље на материјалу. У том случају је највећа густина ласерског импулса и врло висока температура. Под притиском, долази до истискивања течне масе, која се помера на бокове и почетак рупе (сл. 4.10,б) тј. ствара се иницијална рупа [4].



Слика 4.10: Процес стварања рупе у материјалу предмета обраде са променом густине снаге ласерског бушења [4]

При бушењу отвора у лимовима улазни пречник је већи од излазног, а кратер има улазни конус и венац на почетку (слика 4.11).



Слика 4.11: Попречни пресек отвора у челику добијен ласерским бушењем [4]

У току избацивања материјала у гасовитом стању из зоне бушења, могуће је да дође до кондензације и поновног очвршћавања материјала, нарочито при обради метала, по ободу отвора. Настале ивице по ободу могу бити лако уклоњене али се ипак захтева додатна обрада која се негативно одражава на економску страну процеса. Са друге стране, избушени отвори скоро увек имају један коничан део са нежељеном храпавошћу, па је код чврстих материјала неопходан један завршни пролаз [4].

Квалитет обраде

Квалитет обраде код ласерског бушења одређен је:

- тачношћу обраде,
- квалитетом обрађене површине и
- физичко-хемијским особинама материјала у зони обраде.

Тачност обраде

Тачност обраде ласером првенствено зависи од интензитета и стабилности енергетских параметара ласерских зрака и геометријских карактеристика оптичког система. Како се ради о недефинисаној геометрији процеса обраде ласером (конусни облик зрака и топлотни механизам обраде), неизбежне су грешке димензија, облика и положаја. Одступање мера и профила обраде од прописаних су посебно изражена код грубе обраде робусних радних предмета. Ако се ради о завршној обради радних предмета мањих димензија, постиже се висока тачност $\pm(0,01 \div 0,001)$ mm.

Храпавост

Храпавост обрађене површине чине микрогеометријске неравнине по површини отвора добијеног ласерским бушењем. Храпавост зависи од режима обраде и карактеристика материјала предмета обраде.

Примена ласерског бушења

Ласерско бушење се користи за бушење отвора малих пречника (микроотвора) и бушење отвора у тврдим материјалима, који се класичним технологијама обраде не могу извести. Ласерима се буше отвори на ситима, дијафрагмама, филтрима за израду синтетичких влакана, иглама за ињекције и др [4].

4.6.2. Ласерско сечење

Најраспрострањенија примена ласера у подручју обраде материјала, управо је код производне операције сечења разних врста и дебљина материјала (Laser Cutting). Померањем радне главе или припремка по одређеној путањи, остварује се изузетно ефикасно исицање и просецање простих или сложених контура. Режу се готово све врсте материјала, метали дебљине до 10 mm и неметали до 30 mm.

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 (4.12) је приказано сечење ласером [4].



Слика 4.12: Ласерско сечење материјала

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 10^6 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.

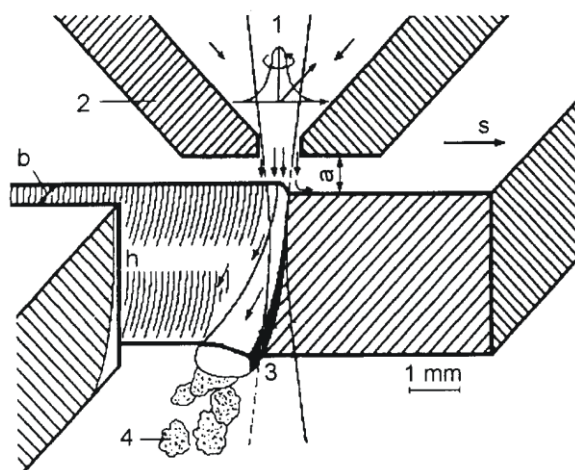
Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. Феноменологија сечења ласером је знатно сложена. Поступак се заснива на озрачењу радног предмета покретним, континуалним или импулсним снопом ласерских зрака, са локалним развојем такве густине снаге $q_c, \text{ W/cm}^2$, која је у стању да произведе најповољније термофизичке, термохемијске, хидродинамичке, гасодинамичке и ерозивне процесе за одвајање материјала.

Методe сечења ласером

Постоје три методе сечења ласером:

1. Са потпуним одстрањивање 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) [4].

На слици 4.13. дат је шематски приказ процеса сечења ласером.



Слици 4.13: Шематски приказ процеса сечења ласером [4]

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).

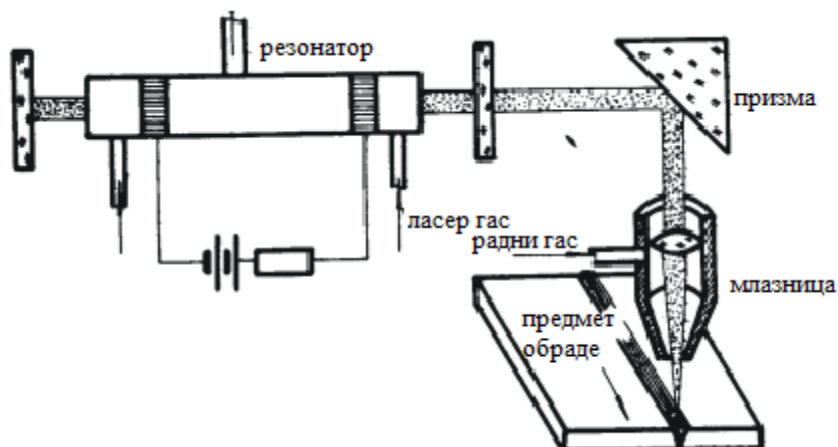
4.6.3. Ласерско заваривање

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 $1-10\text{ ms}$, са максималном снагом од $10-100\text{ kW}$. 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 [4].

CO_2 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 $10.6\text{ }\mu\text{m}$. Индустијски CO_2 ласери снаге неколико вати, могу

се користити за заваривање танких метала дебљине 1 mm (Al и Cu легуре). Међутим, такви материјали могу се заваривати економичније класичним методама.

На слици 4.14 дата је принципијелна шема заваривања ласером.



Слика 4.14: Шема заваривања ласером [4]

4.6.4. Ласерска термичка обрада

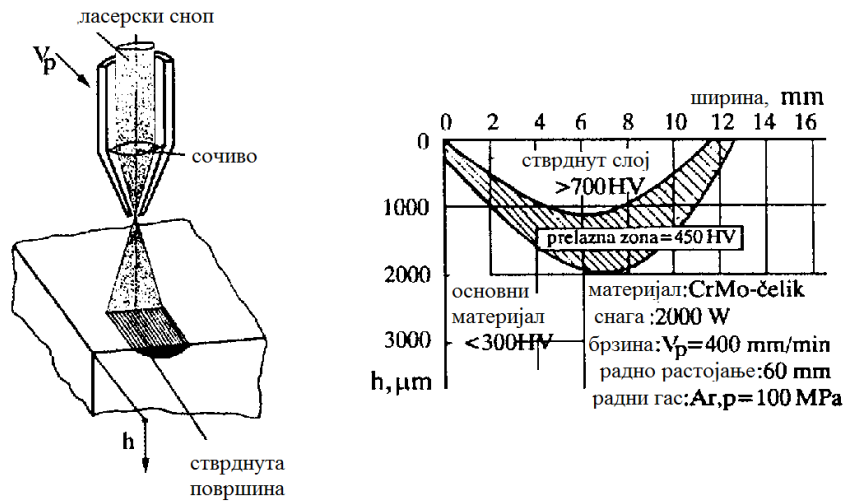
Отврдњавање или површинска термичка обрада снопом ласерских зрака заснива се на загревању, топљењу и ударном оптерећењу. Термичка обрада ласером је могућа како за поједине зоне посебно изложене хабању, тако и за површине у целини, уз хлађење различитим средствима.

Карактеристике отврднутог слоја зависе од карактеристика ласерског снопа и низа других параметара, а мењају се са дубином и ширином отврднутог слоја. Основни параметри отврдњавања 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 %. Отврдњавање површине метала ласером омогућује низ предности као што су:

- отврдњавање 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.

Погодност отврдњавања површине метала ласером састоји се не само у могућности побољшања особина површинских слојева, при чему особине основног материјала остају непромењене, већ и у могућности да се обрађују само они деливи површине који су одређени експлоатационим, естетским и другим карактеристикама.

На слици 4.15 приказан је принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврднутог слоја [4].



Слика 4.15: Принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврдутог слоја [4]

Зависно од густине снаге ласерског зрачења и времена његовог дејства, остварују се поједини поступци површинског отврдњавања:

- ласерско каљење;
- ласерско уситњавање зрна структуре материјала;
- ласерско покривање површине додатним материјалом;
- ласерско легирање површинског слоја и
- ласерско отврдњавање површине дејством ударног таласа.

4.6.5. Ласерско гравирање

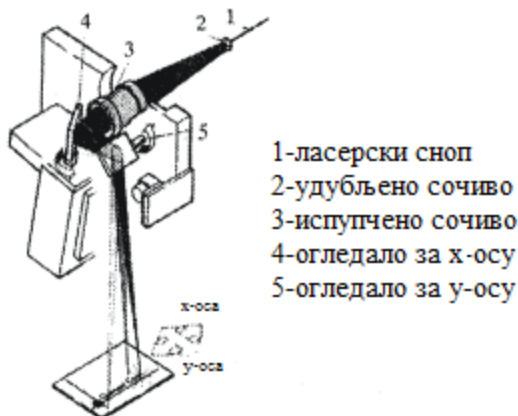
Гравирање ласером или ласерска контурна обрада се користи за различите намене:

- 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 просечном снагом до 50 W.

Поред YAG, користе се и CO₂ ласери за добро моделовање и веома квалитетно гравирање [4].

На слици 4.16. приказана је шема рада машине за гравирање ласером.



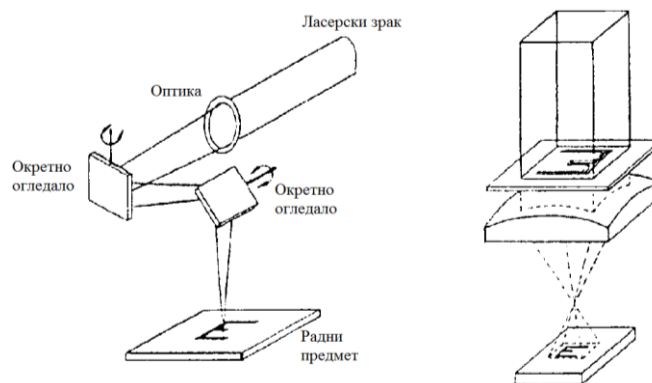
Слика 4.16: Шема рада савремене машине за гравирање ласером [4]

Померање ласерског снопа по програмираној контури врши се помоћу два огледала која се могу окретати, једно око вертикалне а друго око хоризонталне осе. При томе ласерски сноп може да се креће по одређеној линији (контури и др.) у једној равни. Метода гравирања вођењем ласерског зрака се користи у случајевима када је потребан висок квалитет гравирања и велика флексибилност. Критеријуми за оцену квалитета гравирања су: контраст, оштрина контуре, храпавост површине, отпорност на механичке и хемијске утицаје и др.

Поред наведене методе, велику примену има и метод гравирања маском, који је нарочито погодан за означавање радних предмета у масовној производњи.

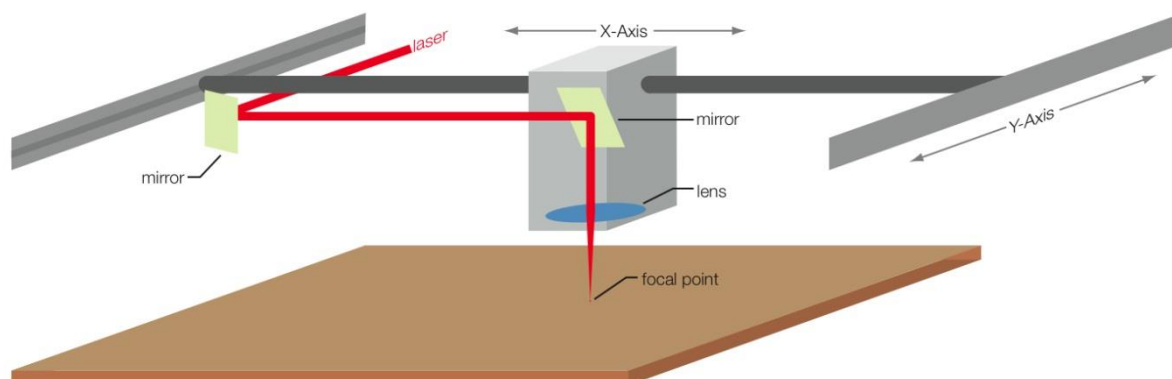
За гравирање маском користе се импулсни ласери. Ласерски зрак осветљава маску на којој се налазе све информације које треба пренети на радни предмет. Пресликавање се врши уз помоћ сочива, једним импулсом ласера на површину радног предмета.

Сви процеси ласерског гравирања су праћени термичким дејством ласерских зрака. Најважнији параметри код методе ласерског гравирања маском су снага и енергија ласерског импулса. Обзиром да се гравирање врши једним импулсом, учесталост импулса није битна. Код методе гравирања вођењем ласерског зрака учесталост ласерског импулса је веома битна, јер се гравирање врши низом појединачних импулса са одређеним временским размаком. На слици 4.17 приказан је метод гравирања маском [4].



Слика 4.17: Шематски приказ ласерског гравирања маском [4]

На предходне две слике приказано је гравирање помоћу огледала (сочива) које се помера и ствара гравуру. Поред овог метода гравирања постоји и гравирање где долази до померања главе ласера. Овај метод је приказан на слици 4.18.



Слика 4.18: Шематски приказ ласера који врши гравирање померањем главе ласера [23]

Предности гравирања ласером су следеће:

- висока брзина обраде;
- нема механичког контакта са предметом обраде па су избегнута механичка оштећења и прљање;
- могућност гравирања и на неприступачним површинама, на тврдим, сјајним и неравним површинама;
- могућност повезивања са рачунарским системом, итд.

Највећи недостатак гравирања ласером је скупа опрема. Међутим, овом опремом се постиже висока продуктивност, флексибилност и жељени квалитет гравирања, те је стога знатно исплатива.

5. Опрема за ласерско гравирање испитаних узорака

Машина за ласерско гравирање се може поделити на три главна дела: ласер, контролер и површина. Ласер је као оловка-емитује ласерске зраке који омогућавају контролеру гравирање узорака. Контролер (обичан рачунар) контролише смер, интензитет, брзину кретања и ширења ласерских зрака усмерених на површину. Површина је усмерена тамо где ласер може деловати.

У овом делу рада су дате машине за ласерску обраду, њихове техничке карактеристике и могућности, као и примери примене. Маchine за ласерско гравирање које су обухваћене су:

- CNC машина „Laser Sisma BSS-3D”, Застава оружје, Крагујевац
- CNC машина „LaserCut-107”, Факултет инжењерских наука, Крагујевац

5.1. CNC машина „Laser Sisma BSS-3D“

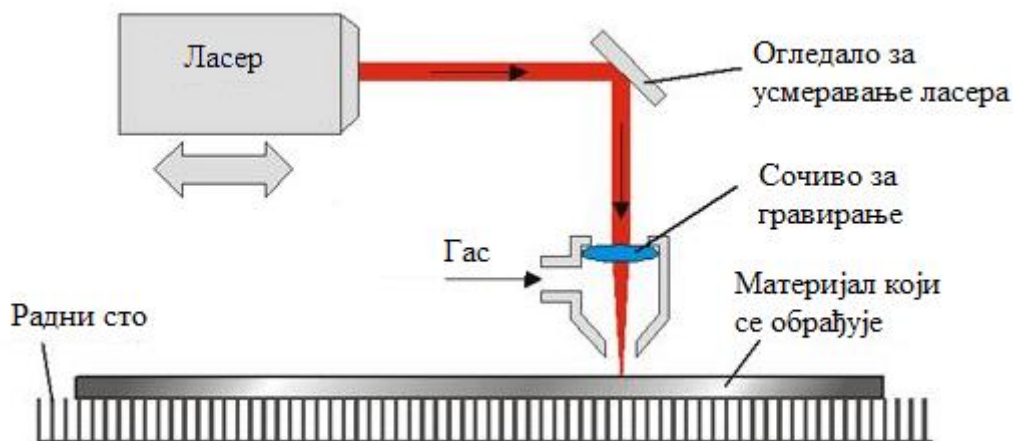
CNC машина „Laser Sisma BSS-3D“ фирме „Сисма“ (слика 5.1) је намењена искључиво за гравирање. Машина може гравирати плочасте и цилиндричне материјала. Гравура добијена овим ласером је веома високог квалитета, и оставља неизбрисив траг на материјалу. Систем обележавања ласером се састоји од главе ласера, која је непокретна, огледала, сочива, које је покретно и које својим кретањем преноси ласер од главе на површину која се обрађује и ствара жељену гравуру, и контроле софтвера. Ова машина за гравирање омогућава гравирање текстова, графика, логотипа, баркодова, матрице кодова... [24]



Слика 5.1: CNC машина Laser Sisma BSS-3D [24]

5.1.1. Принцип рада „Sisma BSS-3D“ласера

Приликом гравирања, машина у виду ласера ослобађа велику количину енергије у тренутку када је ласер на повшини материјала који се обрађује. Материјал се топи ласером а истопљени део материјала се склања са површине тако што се одува подсредством гаса. Ласер је фокусиран у једну тачку па због тога и мала количина снаге може довести до деформације материјала. Ласер је веома прецизан при раду па због тога материјал не захтева даљу обраду. Принцип рада ласера је приказана на слици 5.2.



Слика 5.2 : Шема рада сисма ласера [25]

Ласер се од његовог изворишта, преко огледала преноси на радну површину. Број огледала зависи од величине машине али и положаја ласера. Ласер се одбија од огледала и долази до сочива за гравирање. Сочиво врши померање и усмерава ласер ка материјалу који се обрађује и на тај начин се ствара унапред задата гравура. Ова врста ласера се разликује од осталих зато што су глава ласера и радни сто непокретни, већ је само сочиво покретно [25].

5.1.2. Опис техничког система

Ласерски извор:

• врста кристала	Nd: YAG
• врста испуњавања кристала	ласерска диода
• снага	(70W)
• таласна дужина	1064 nm
• пулсна фреквенција	3-100 Khz
• систем за хлађење	водено хлађење са затвореним колом

Глава за скенирање:

- Систем галванометријског скретања са две осе
- Стандардни тип фокусног сочива са равним пољем (mm. 254)
- Радна површина (са стандардним фокусним сочивом) 180x180 mm
- Максимална брзина обележавања 2000 mm/sec [8]

Снабдевање струјом и механички склоп

- челична структура, полица, која носи рачунар, хладњак
- потребна енергија 230V 50-60 Hz

Основне карактеристике

- SVG, PLT, HTLM графичке платформе су подржане
- Једна слика може бити обележена у десет различитих нијанси сиве. За сваки појединачан тон се могу подесити параметри ласера као што су: снага, фреквенција, пуњење, време, број пролаза, број завршних пролаза..
- Систем двоструког режима рада: путем софтвера могуће је одредити карактеристике ласерског зрака у функцији перформанси самог ласерског зрака: врло "фина линија" за високу резолуцију или „нормална линија“ за ефекат попуњавања високом брзином.
- Операција „брзи текст“: програм омогућава маркирање повезаног текста у једном пролазу на тај начин избегавајући пуњење и/или ивице
- Обележавање на цилиндричним површинама дељењем повезаног текста/слика у функцији закривљености радијуса
- Матрично обележавање: омогућава различите објекте на истој површини, једноставним подешавањем екстерних димензија појединачног објекта, димензија површине за обележавање, колона и веза. Овај систем ради само на површинама дефинисаним прилагођеним фокусним сочивом.
- Програм омогућује уношење било које опште кинфигурације у систем, као што су подешавање нијанси сиве, слике, висину Z осе.

Персонални рачунар

Карактеристике рачунара потребне за рад ласера су:

- Microsoft Windows XP Professional
- Процесор 2.8 Ghz
- RAM меморија 512 MB
- Хард диск ultra DM 100 40GB
- CD rom јединица
- Floppy disc јединица
- Мрежни адаптер 1GB
- Монитор
- Миш и тастатура
- Interface плоча SLC-глава за скенирање.[8]

5.2. CNC машина „LaserCut-107”

CNC машина „LaserCut-107” фирме Арпел, Београд, (слика 5.3) је ласерски гравер направљен да задовољи ригорозне захтеве индустријске производње. Намене је првенствено гравирању и резању плочастих неметалних материјала. Ова машина врши резање, односно гравирање тако што јој се глава ласера помера по одређеној путањи и тако врши резање тј. гравирање [9].



Слика 5.3: CNC машина LaserCut-107 [9]

Механички склоп машине

Носећа структура је носећи и потпорни елемент машине. Сви мотори, преносни и други функционални делови машине, повезани међусобом, чврсто су везани за носећу структуру машине. Израђена је од дебелозидног челика, а сви њени елементи су машински обрађени како би се обезбедила правилна геометрија система и елиминисале вибрације и остали штетни ефекти.

Вођице

Вођице на машини обезбеђују :

- Управљање правцем и смером кретања подсклопа за који је алат причвршћен
- Апсорбцију свих статичких и динамичких сила

Као такве, имају велики утицај на квалитет обраде, стога је приликом пројектовања машине посебна пажња посвећена одабиру одговарајућих клизних елемената. Машина LaserCut-107 остварује кретања дуж X, Y и Z оса преко високо каљених вођица. Коришћени су висококвалитетни линеарни лежајеви са рециркулирајућом постељицом опремљени брисачима [9].

Погон

Функција погонског дела код CNC машина је да обезбеди кретање клизача преко наредби за кретање. Да би се обезбедио висок степен тачности, развијен је погонски део који одликују висока ефикасност и одзив. Погонски део машине LaserCut-107 се састоји од:

- Хибридног АС Серво мотора,
- Механичког преносног система

LC серија опремљена је висококвалитетним АС Серво моторима који обезбеђују високу тачност позиције и брз одзив. Коришћењем **micro АС Серво** технологије омогућено је линеарно кретање без вибрација и буке чиме се повећава поузданост система. Механички преносни систем састоји се од назубљеног ремена напрегнутог узубљења и као главни задатак има повећање тачности, као и смањење трења и вибрација.

Управљачка јединица

Машина LaserCut-107 је предвиђена за управљање управљачким рачунаром на коме је инсталирана лиценцирана копија **Windows XP** оперативног система, као и управљачки софтвер **PHCAD**. Уз машину се испоручују и CD-ови са демо инсталационим софтвером.

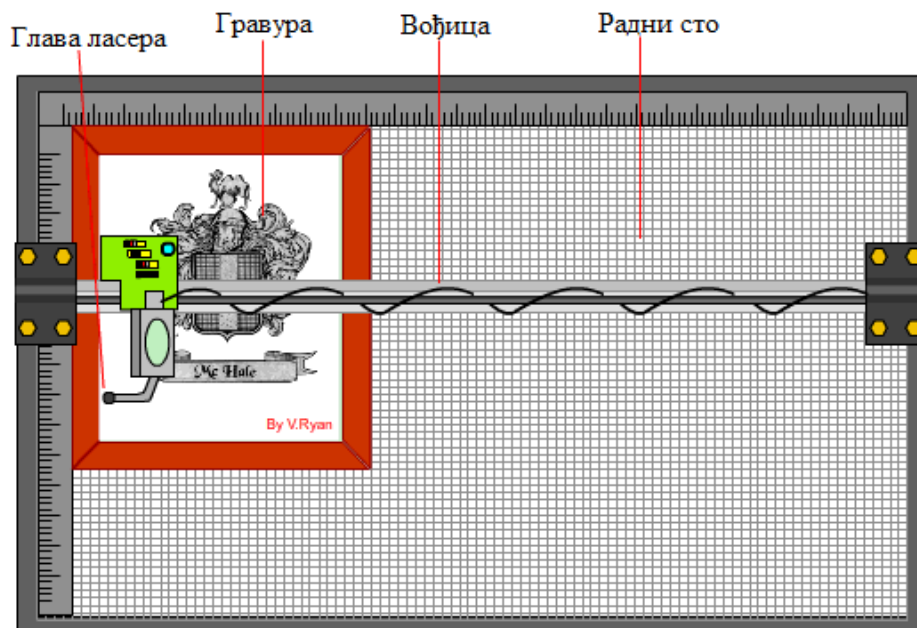
Управљачки софтвер **PHCAD** служи за контролу процеса обраде прослеђујући податке које добија из G-кода ка управљачкој јединици [9].

Техничка спецификација машине

- | | |
|------------------------------------|---------------------------|
| • Спољни габарити (ШхДхВ) | 1.600mm x 1.150mm x 875mm |
| • Тежина: | 450 Kg |
| • Радни ходови алата (X, Y, Z) | 1.000mm x 700mm x 300mm |
| • Максимална брзина кретања алата: | 70.000mm/min |
| • Максимална снага ласера: | 80W [9] |

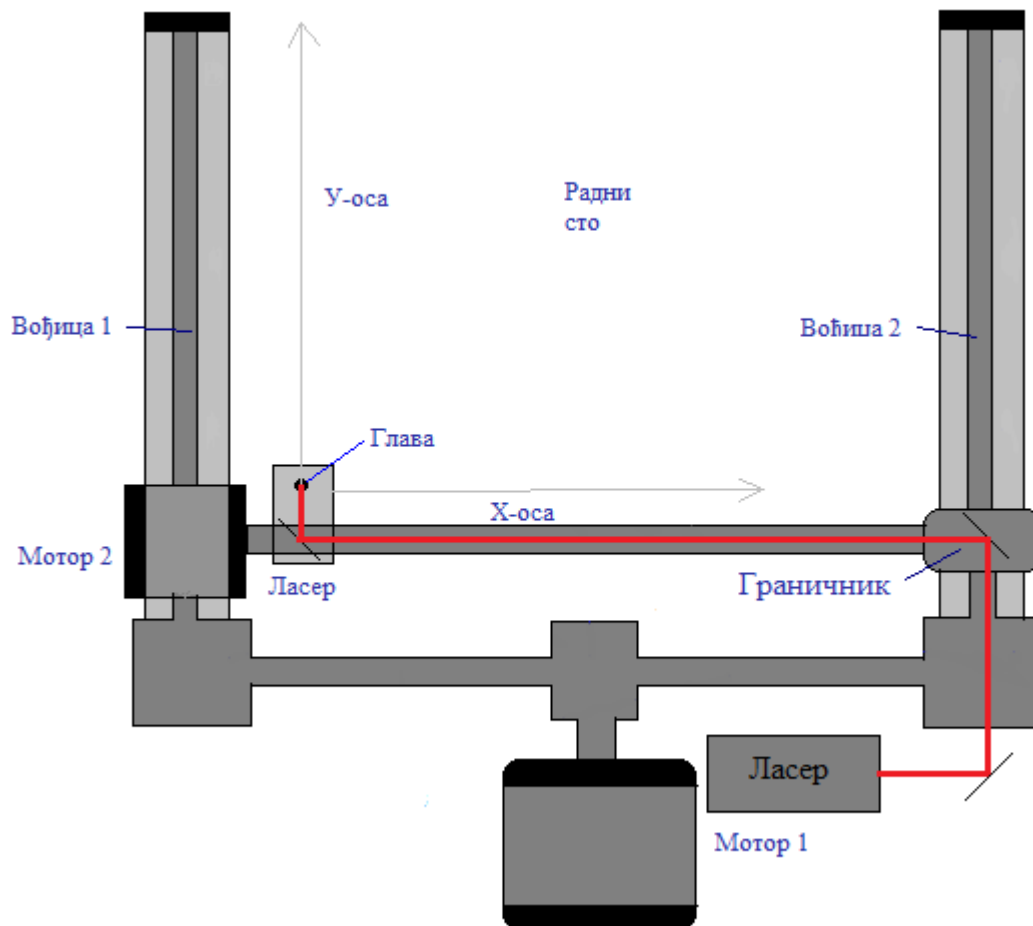
5.2.1. Принцип рада LaserCut-107

Машина сече или гравира материјал који је постављен на радни сто. Поред тога што се сто може померати по 3 оси, улога овог стола је и да врши ваздушно хлађење ласерске главе али и материјала који се обрађује. Пошто машина ради у три осе, горњи леви угао се сматра координатним почетком (0, 0, 0), и то се назива нулта или полазна тачка. На слици 5.4 је приказан радни сто са главом ласера и вођицама [26].



Слика 5.4: Поглед на радни сто са горње стране [26]

Принцип рада ове машине је веома једноставан. Ласер се од свог извора преко огледала допрема до главе ласера и даље се фокусира на тачно одређено место на ком се врши гравирање, односто сечење. Глава ласера се може кретати по Х и Y осима. Глава се креће преко вођица машине које покрећу серво мотори. Принцип рада је приказан на слици 5.5.



Слика 5.5: Шема рада LaserCut-107 [26]

Ако је потребно гравирати или сећи кружни или закривљени производ онда се користи моторизовани ваљак. Ваљци контролишу микропроцесор који кретањем главе ласера правом брзином врши нормално гравирање као да је равна површина [26].

6. Упоредивање рада датих ласера кроз практични пример

Како би прецизније одредили која је од ове две машине боља, прецизнија, бржа, одрађен је експериментални део гравирања. Гравирање се вршило на металним плочицама (слика 6.1) димензија (50mm x 40mm x 4mm). Одрађено је седам линија различитих дебљина и са различитим бројем пролаза као и са различитом снагом ласера.

Линија које су се користиле за гравирање дебљине су 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm, 0.7mm и 1.0mm.

6.1. Израда гравура на CNC машини „Laser Sisma BSS-3D“ и приказ њене дебљине и дубине

На првој плочици гравирање линија се вршило са 20% снаге ласера и 30 пролаза ласера, односно са 50% снаге ласера и 30 пролаза ласера. Плочица је приказана на слици 6.1.



Слика 6.1: Плочица 1

Дебљине гравура дате су у табели 6.1.

Табела 6.1:

Плоча 1		
Дебљина линије(mm)	30 пролаза 20% снага	30 пролаза 50% снага
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0,024	0,099
0,2	0,242	0,132
0,3	0,345	0,296
0,4	0,420	0,421
0,5	0,455	0,564
0,7	0,622	0,681
1,0	1,024	1,067

На другој плочици гравуре су одрађене са 70% снаге ласера и 30 пролаза ласера, односно 100% снаге ласера и 30 пролаза ласера. Плочица је приказана на слици 6.2.



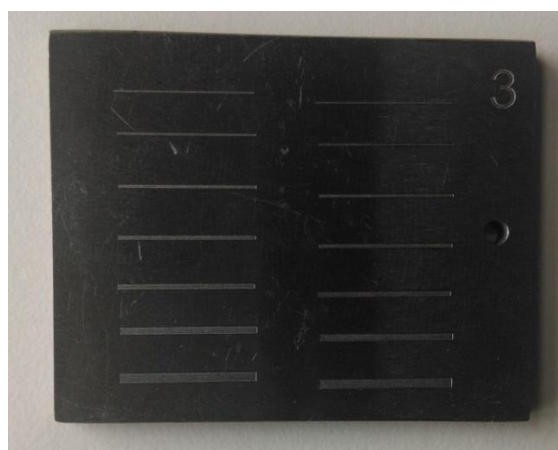
Слика 6.2: Плочица 2

Дебљина гравуре дате су у табели 6.2.

Табела 6.2:

Плоча 2		
Дебљина линије(mm)	30 пролаза 70% снага	30 пролаза 100% снага
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0,169	0,280
0,2	0,258	0,607
0,3	0,388	0,772
0,4	0,470	0,844
0,5	0,511	0,897
0,7	0,722	0,947
1,0	0,977	1,088

На трећој плочици гравуре су одрађене са 100% снаге ласера и 10 пролаза ласера, односно 100% снаге ласера и 20 пролаза ласера. Плочица 3 је приказана на слици 6.3.



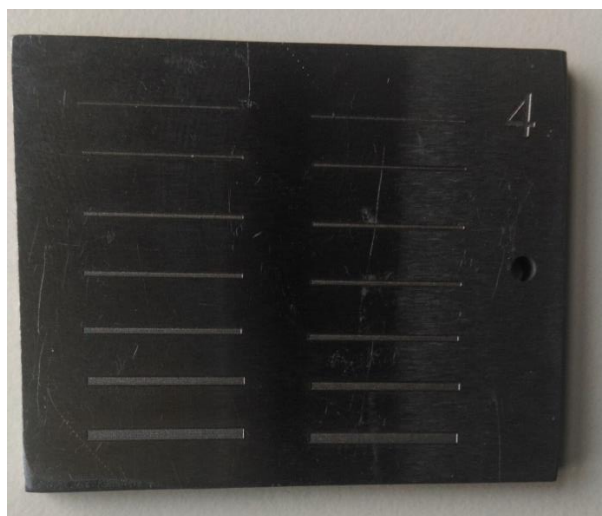
Слика 6.3: Плочица 3

У табели 6.3 дате су дебљине гравуре .

Табела 6.3:

Плоча 3		
Дебљина линије(mm)	10пролаза 100% снага	20 пролаза 100% снага
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0,177	0,177
0,2	0,285	0,255
0,3	0,337	0,324
0,4	0,436	0,448
0,5	0,527	0,510
0,7	0,719	0,696
1,0	1,010	1,083

На четвртој плочици гравуре су одрађене са 100% снаге ласера и 25 пролаза ласера, односно са 100% снаге ласера и 30 пролаза ласера. Плочица 4 је приказана на слици 6.4.

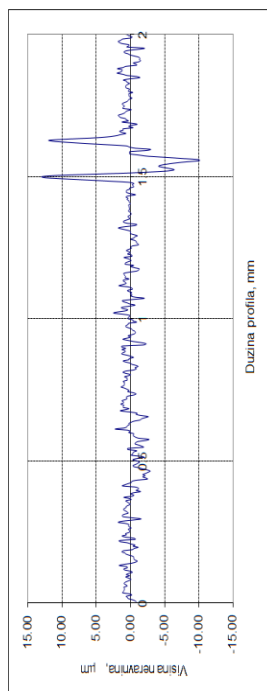


Слика 6.4: Плочица 4

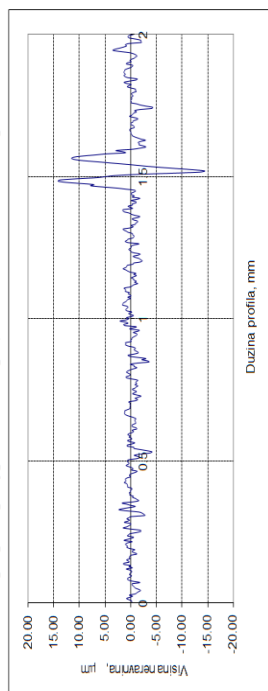
У табели 6.4 дате су дебљине графуре.

Табела 6.4:

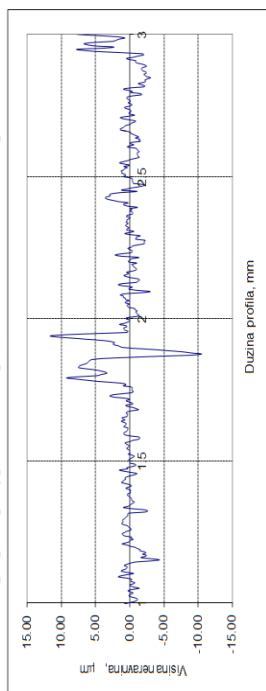
Плоча 4		
Дебљина линије(mm)	25пролаза 100% снага	30 пролаза 100% снага
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0,154	0,280
0,2	0,253	0,607
0,3	0,313	0,772
0,4	0,359	0,844
0,5	0,512	0,897
0,7	0,679	0,947
1,0	0,991	1,088



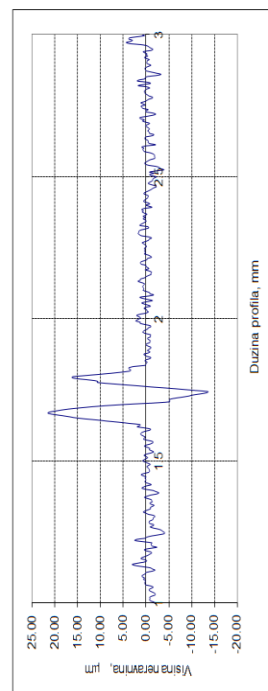
Слика 6.5: Профил грауре 0.1mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



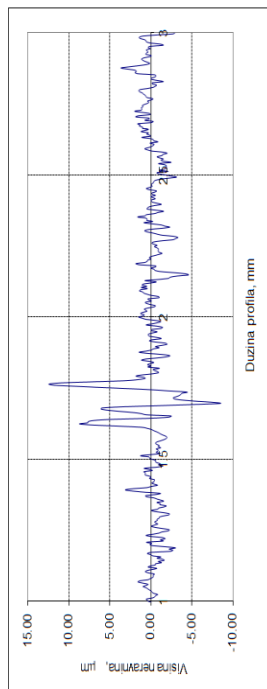
Слика 6.6: Профил грауре 0.1mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



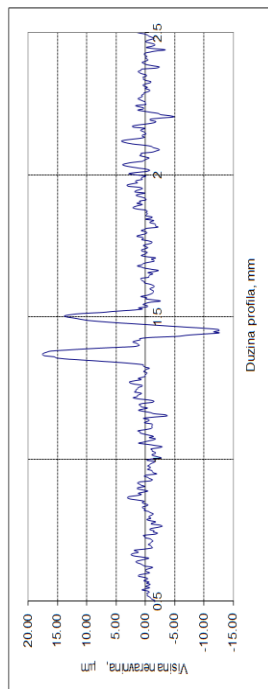
Слика 6.7: Профил грауре 0.1mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



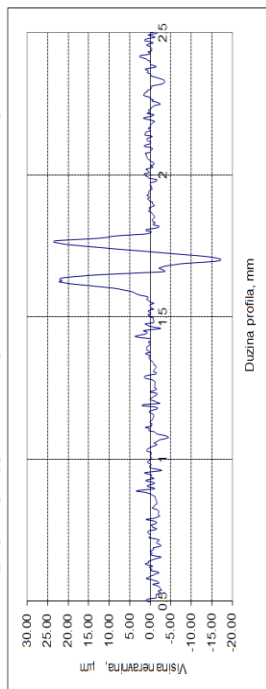
Слика 6.8: Профил грауре 0.1mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



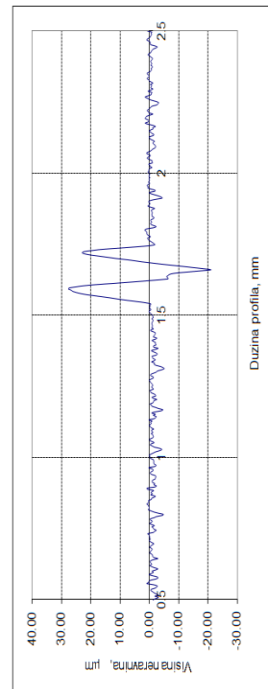
Слика 6.9: Профил грауре 0.1mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



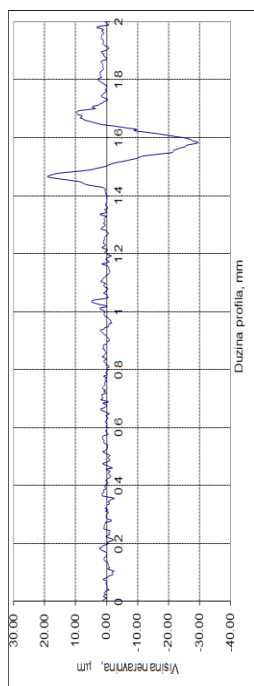
Слика 6.10: Профил грауре 0.1mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



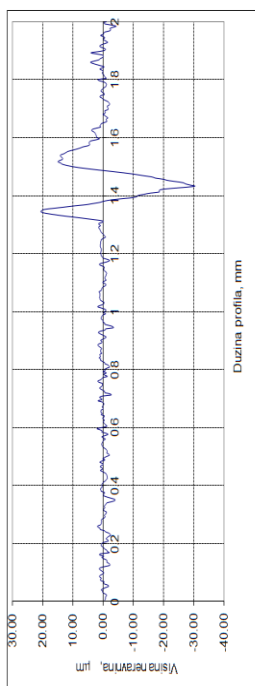
Слика 6.11: Профил грауре 0.1mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



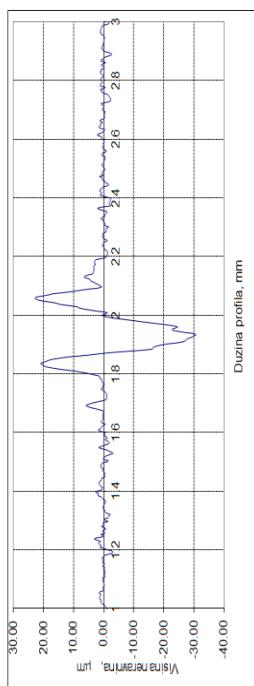
Слика 6.12: Профил грауре 0.1mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



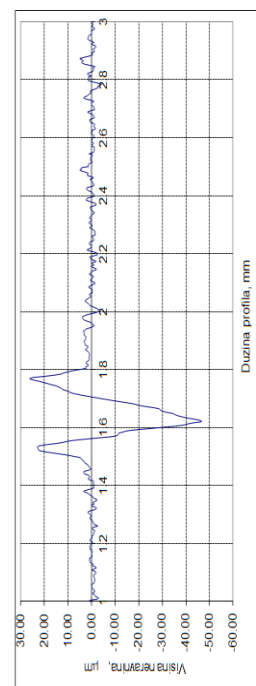
Слика 6.13: Профил грауре 0.2mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



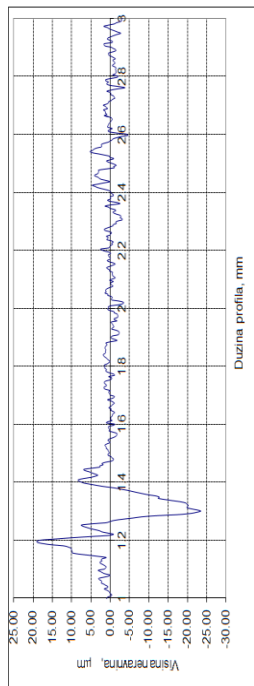
Слика 6.14: Профил грауре 0.2mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



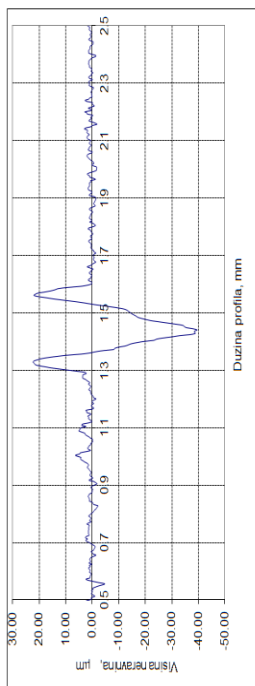
Слика 6.15: Профил грауре 0.2mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



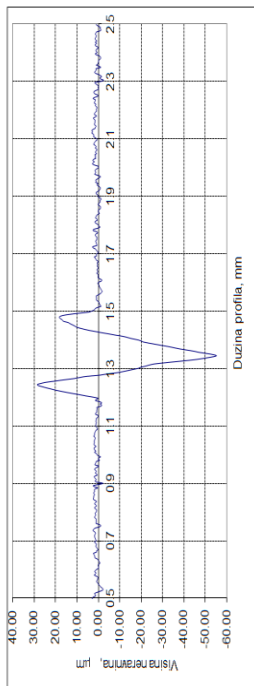
Слика 6.16: Профил грауре 0.2mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



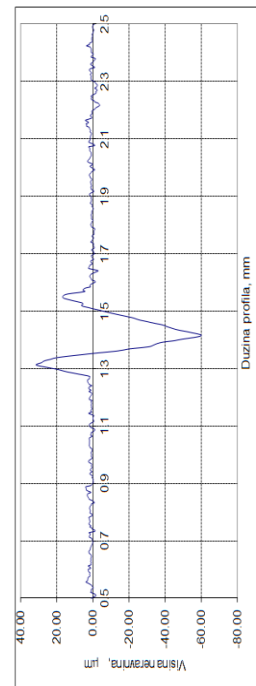
Слика 6.17: Профил грауре 0.2mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



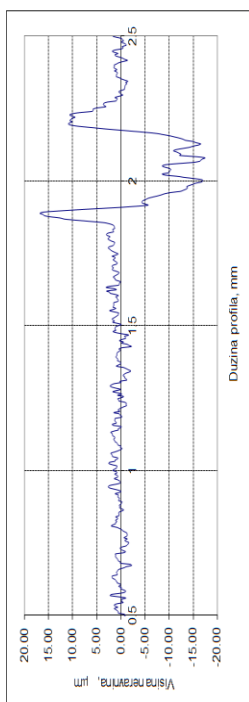
Слика 6.18: Профил грауре 0.2mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



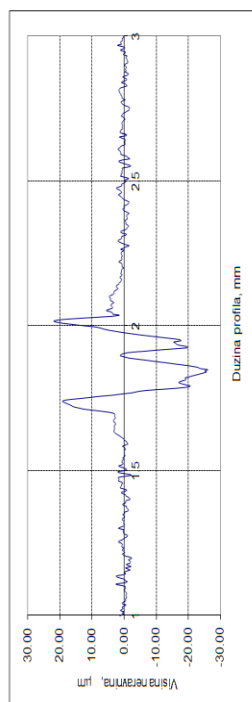
Слика 6.19: Профил грауре 0.2mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



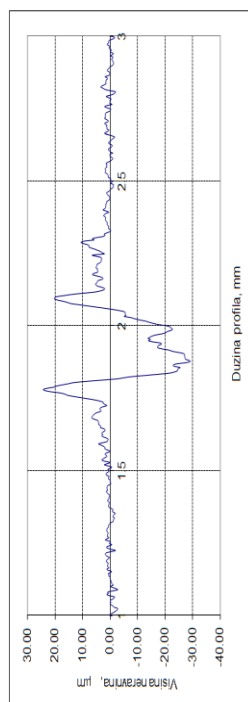
Слика 6.20: Профил грауре 0.2mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



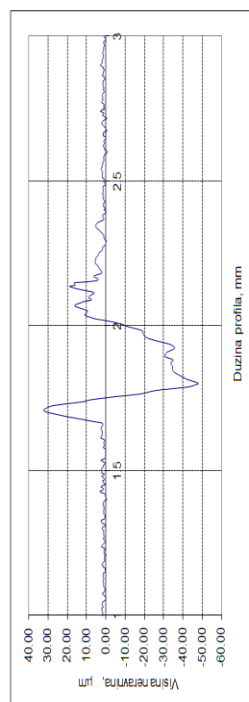
Слика 6.21: Профил грауре 0.3mm израђен са 20 % снаге и 30 пролаза



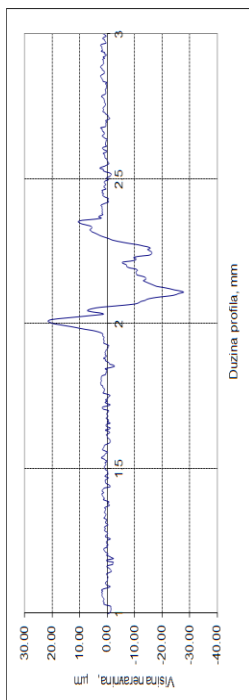
Слика 6.22: Профил грауре 0.3mm израђен са 50 % снаге и 30 пролаза



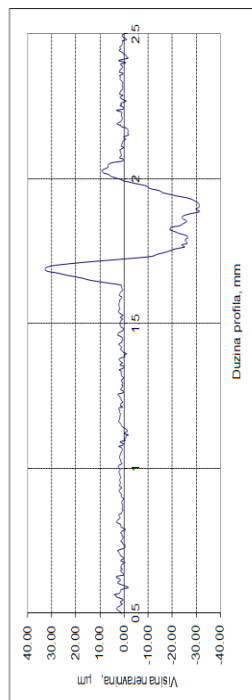
Слика 6.23: Профил грауре 0.3mm израђен са 70 % снаге и 30 пролаза



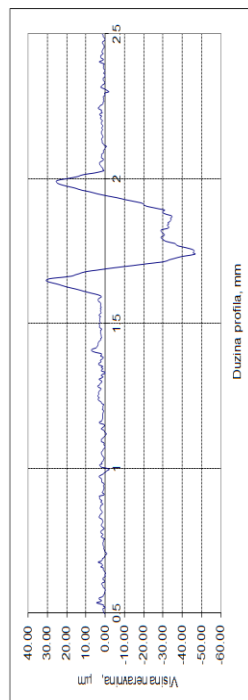
Слика 6.24: Профил грауре 0.3mm израђен са 100 % снаге и 30 пролаза



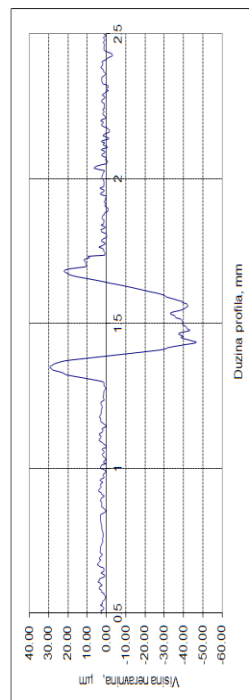
Слика 6.25: Профил грауре 0.3mm израђен са 100 % снаге и 10 пролаза



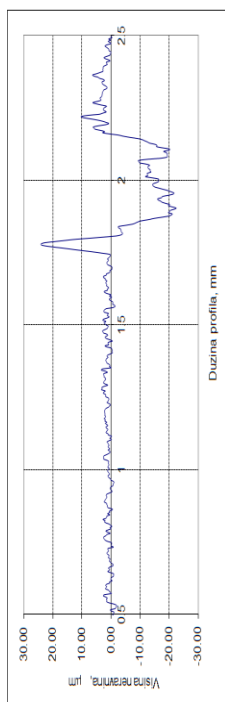
Слика 6.26: Профил грауре 0.3mm израђен са 100 % снаге и 20 пролаза



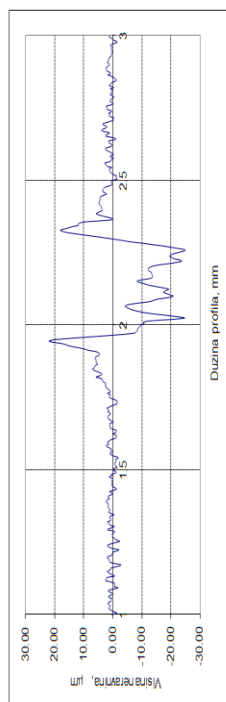
Слика 6.27: Профил грауре 0.3mm израђен са 100 % снаге и 25 пролаза



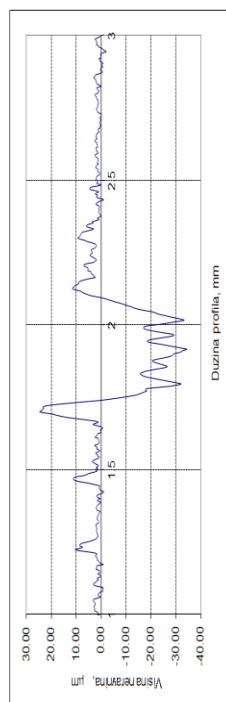
Слика 6.28: Профил грауре 0.3mm израђен са 100 % снаге и 30 пролаза



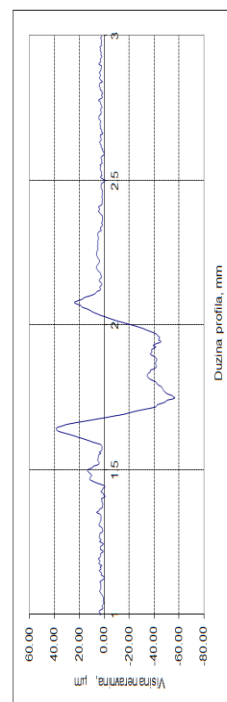
Слика 6.29: Профил гравуре 0.4mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



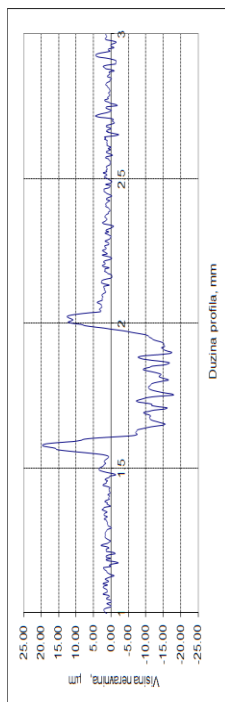
Слика 6.30: Профил гравуре 0.4mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



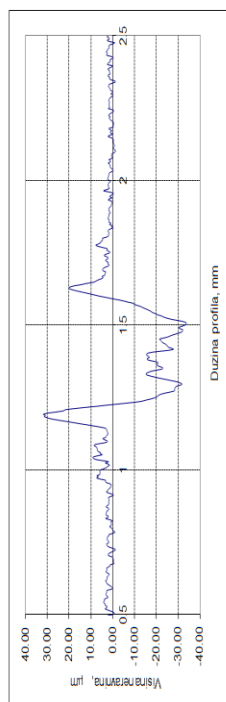
Слика 6.31: Профил гравуре 0.4mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



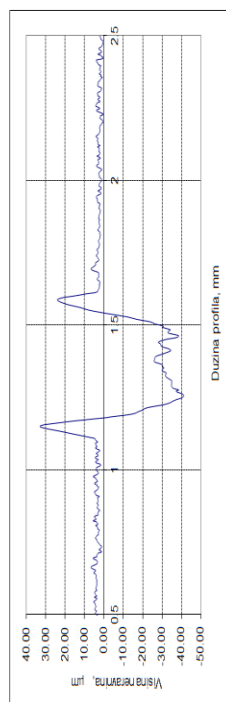
Слика 6.32: Профил гравуре 0.4mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



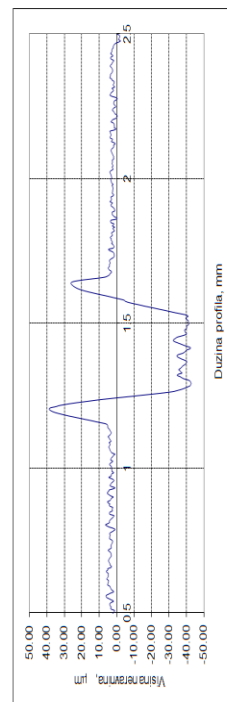
Слика 6.33: Профил гравуре 0.4mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



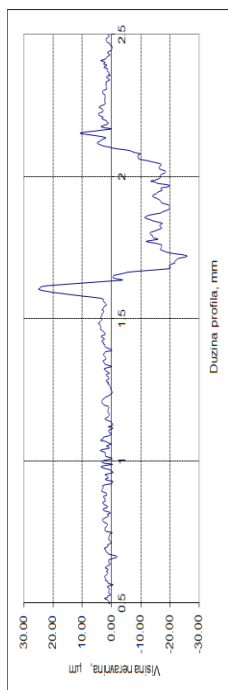
Слика 6.34: Профил гравуре 0.4mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



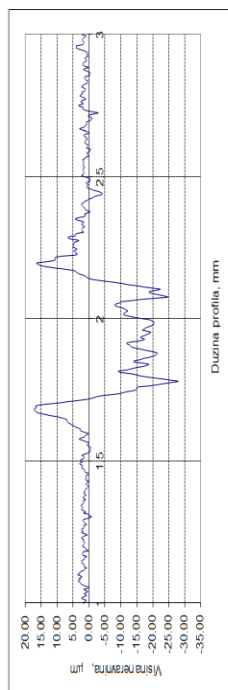
Слика 6.35: Профил гравуре 0.4mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



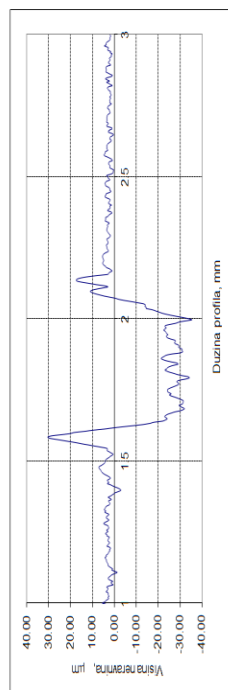
Слика 6.36: Профил гравуре 0.4mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



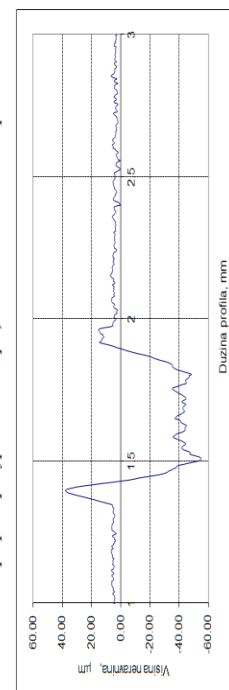
Слика 6.37: Профил грауре 0.5mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



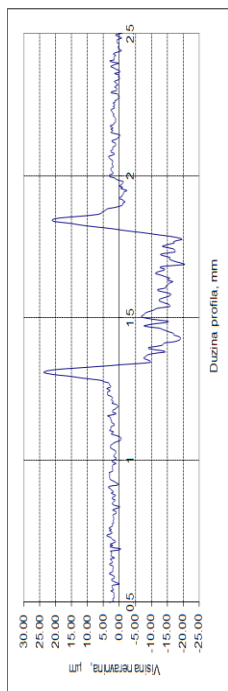
Слика 6.38: Профил грауре 0.5mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



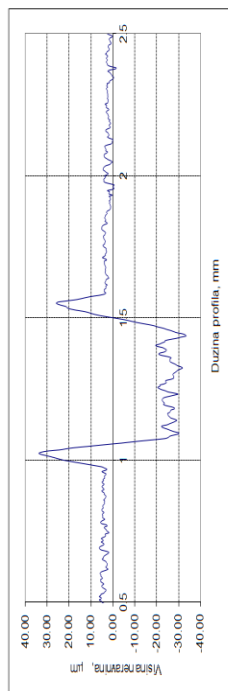
Слика 6.39: Профил грауре 0.5mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



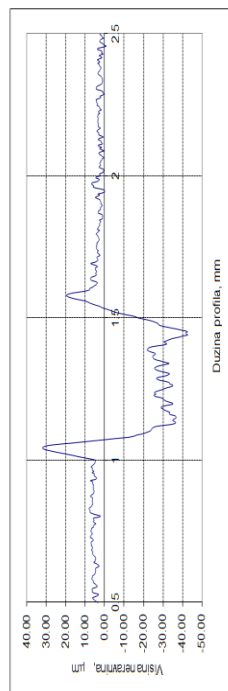
Слика 6.40: Профил грауре 0.5mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



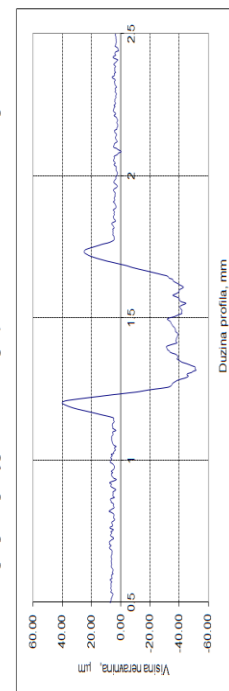
Слика 6.41: Профил грауре 0.5mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



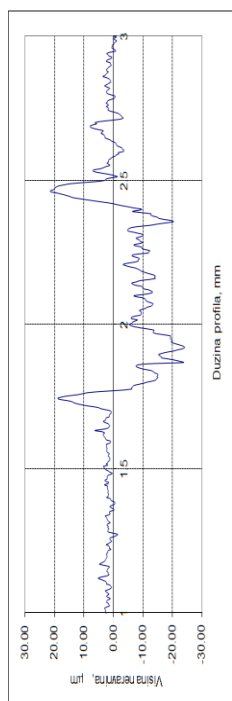
Слика 6.42: Профил грауре 0.5mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



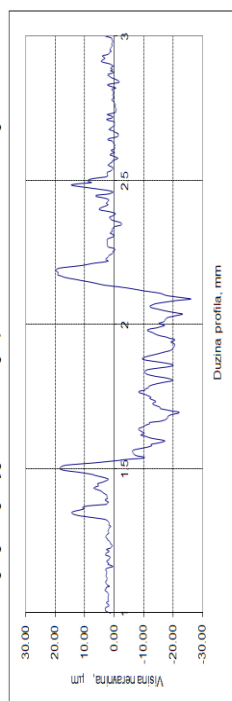
Слика 6.43: Профил грауре 0.5mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



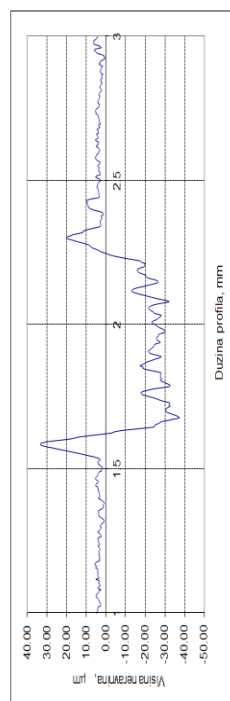
Слика 6.44: Профил грауре 0.5mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



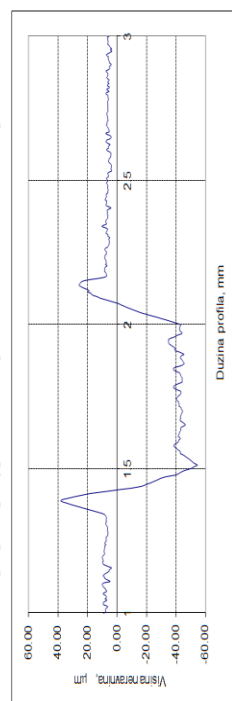
Слика 4.45: Профил грауре 0.6mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



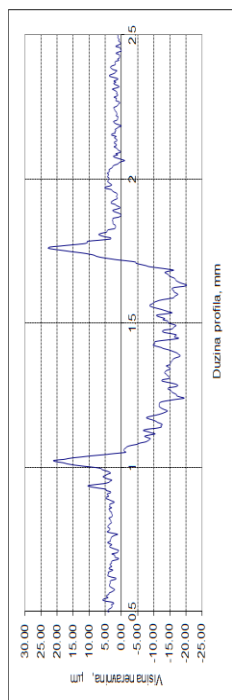
Слика 4.46: Профил грауре 0.6mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



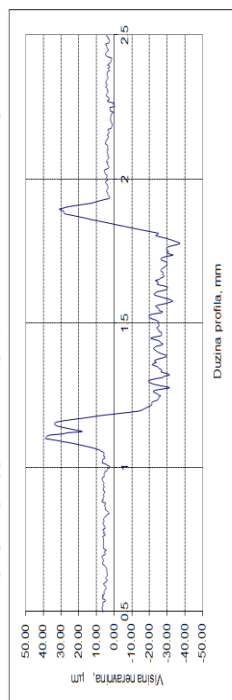
Слика 4.47: Профил грауре 0.6mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



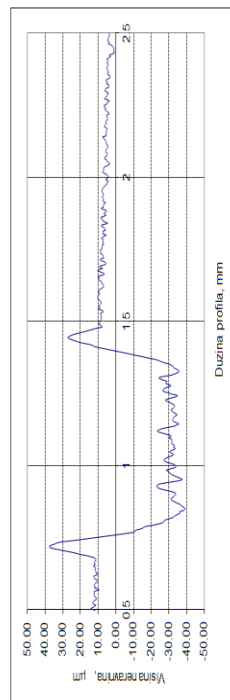
Слика 4.48: Профил грауре 0.6mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



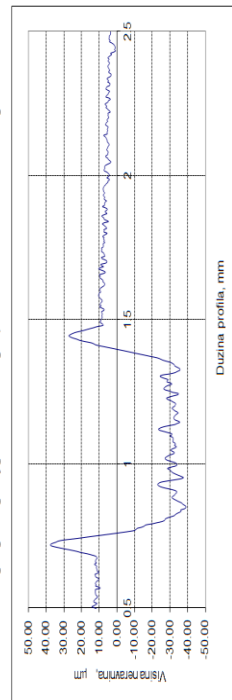
Слика 4.49: Профил грауре 0.6mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



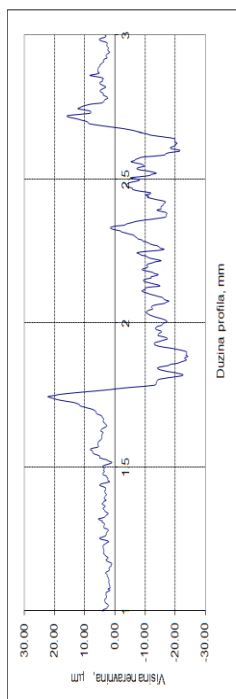
Слика 4.50: Профил грауре 0.6mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



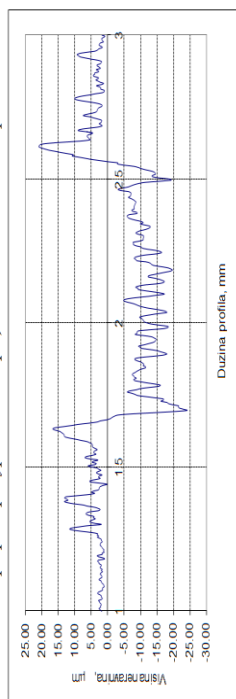
Слика 4.51: Профил грауре 0.6mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



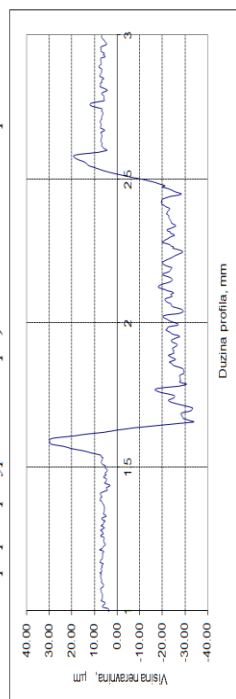
Слика 4.52: Профил грауре 0.6mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



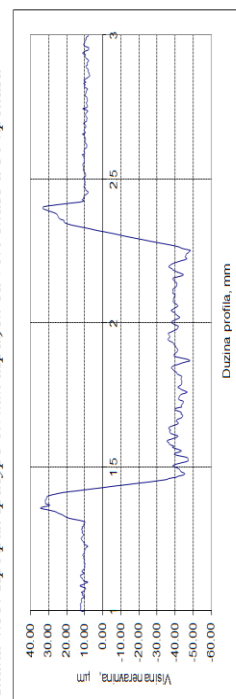
Слика 4.53: Профил графуре 0.7mm израђен са 20% снаге и 30 пролаза



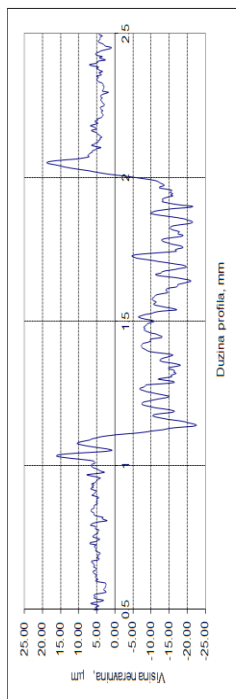
Слика 4.54: Профил графуре 0.7mm израђен са 50% снаге и 30 пролаза



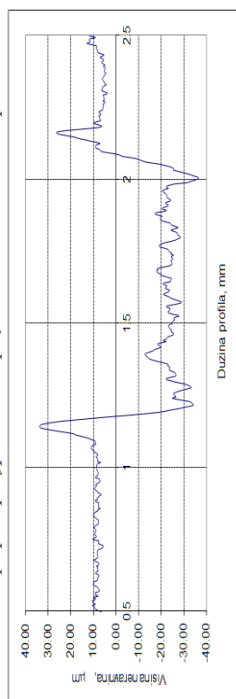
Слика 4.55: Профил графуре 0.7mm израђен са 70% снаге и 30 пролаза



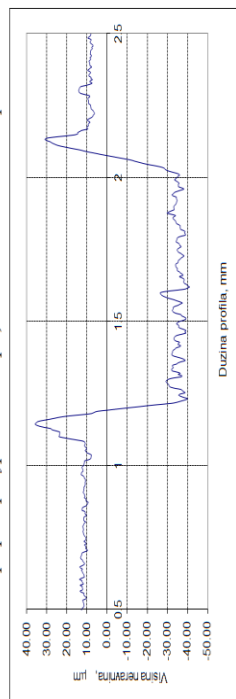
Слика 4.56: Профил графуре 0.7mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза



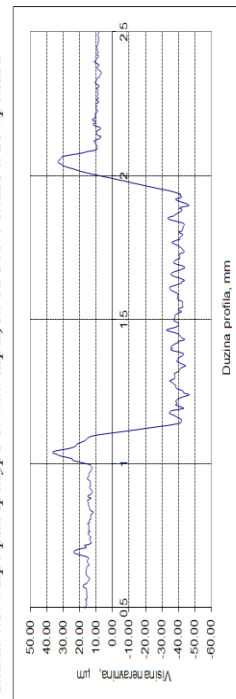
Слика 4.57: Профил графуре 0.7mm израђен са 100% снаге и 10 пролаза



Слика 4.58: Профил графуре 0.7mm израђен са 100% снаге и 20 пролаза



Слика 4.59: Профил графуре 0.7mm израђен са 100% снаге и 25 пролаза



Слика 4.60: Профил графуре 0.7mm израђен са 100% снаге и 30 пролаза

На сликама од 6.5 до 6.60 су приказани профили гравуре израђени на машини „Laser Sisma BSS-3D“.

На сликама од 6.5 до 6.12 су приказани профили гравуре дебљине 0.1 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.084mm до 0.21mm

На сликама од 6.13 до 6.20 приказани су профили гравуре дебљине 0.2 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.23 mm до 0.59 mm.

На сликама од 6.21 до 6.28 приказани су профили гравуре дебљине 0.3 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0,13 mm до 0.40 mm.

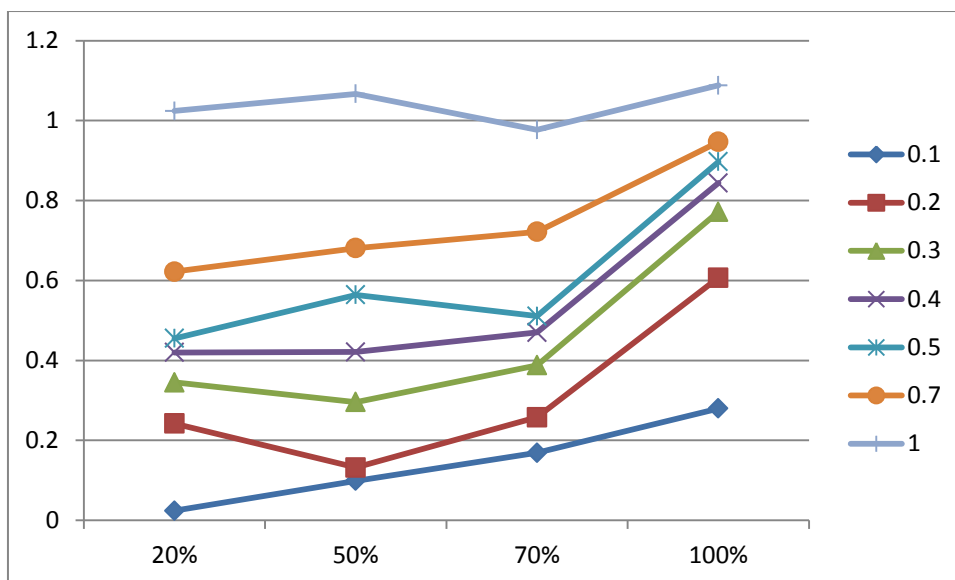
На сликама од 6.29 до 6.36 приказани су профили гравуре дебљине 0.4 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.14 mm до 0.47 mm.

На сликама од 6.37 до 6.44 приказани су профили гравуре дебљине 0.5 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.14 mm до 0.42 mm.

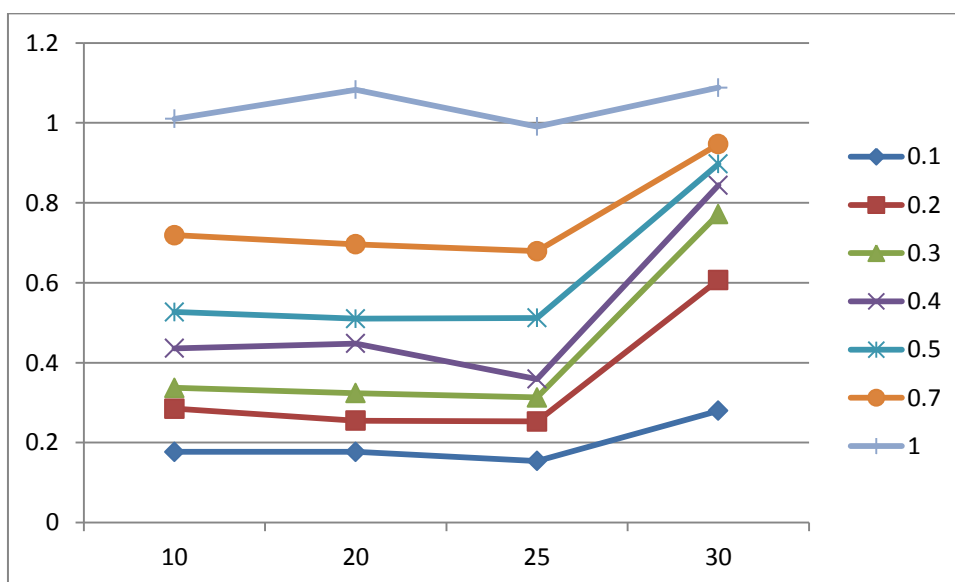
На сликама од 6.45 до 6.52 приказани су профили гравуре дебљине 0.6 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.12 mm до 0.48 mm.

На сликама од 6.53 до 6.60 приказани су профили гравуре дебљине 0.7 mm. У табелама 6.1 до 6.4 приказане су дебљине гравуре за различите снаге ласера и различити број пролаза. На графицима је приказана дубина гравуре која се за различите параметре ласера креће у вредностима од 0.11 mm до 0.42 mm.

На дијаграму 1 и дијаграму 2 приказана је зависност дебљине гравуре од снаге ласера, односно дебљина гравуре од броја пролаза.



Дијаграм 1: Зависност дебљине гравуре од снаге ласера



Дијаграм 2: Зависност дебљине гравуре од броја пролаза

Из дијаграма се може увидети да је са мањом снагом ласера гравура прецизнија. Како се снага ласера повећава повећава се и дебљина гравуре. Са дијаграма 2 можемо увидети да је ласер прецизнији до 25 пролаза. Све преко ове вредности доводи до повећања дебљине гравуре.

6.2. Израда гравуре на CNC машини „LaserCut-107” и приказ њене дебљине и дубине

На првој плочици гравирање линија се вршило са 90% снаге ласера, 1 пролаз ласера и брзином од 100mm/s, односно са 90% снаге ласера, 10 пролаза ласера и брзином од 100mm/s. Плочица је приказана на слици 6.61.



Слика 6.61: Плочица 1

Дебљине гравуре дате су у табели 6.5.

Табела 6.5:

Плоча 1		
Дебљина линије(mm)	1 пролаз 90% снага 100mm/s	10 пролаза 90% снага 100mm/s
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0.127	0.354
0,2	0.129	0.442
0,3	0.174	0.440
0,4	0.296	0.600
0,5	0.256	0.663
0,7	0.179	0.699
1,0	0.642	1.246

На другој плочици гравуре су одрађене са 90% снаге ласера и 20 пролаза ласера и брзином од 100mm/s, односно 90% снаге ласера и 30 пролаза ласера и брзином од 100mm/s. Плочица је приказана на слици 6.62.



Слика 6.62: Пластица 2

Дебљине гравуре дате су у табели 6.6.

Табела 6.6:

Пластица 2		
Дебљина линије(mm)	20 пролаза 90% снага 100mm/s	30 пролаза 90% снага 100mm/s
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0.445	0.425
0,2	0.451	0.445
0,3	0.684	0.523
0,4	0.637	0.655
0,5	0.742	0.702
0,7	0.893	0.933
1,0	1.170	1.148

На трећој пластици гравуре су одрађене са 90% снаге ласера и 20 пролаза ласера и брзином од 70mm/s, односно 90% снаге ласера, 20 пролаза ласера и брзином од 50mm/s. Пластица је приказана на слици 6.63.



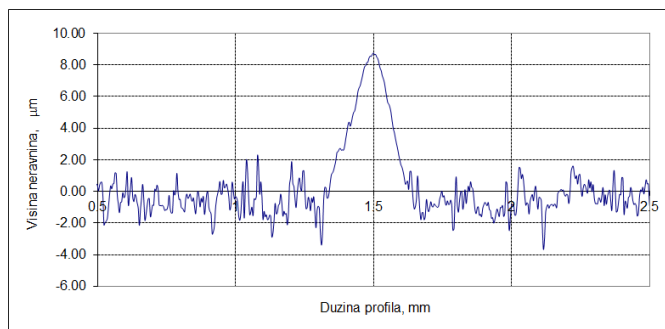
Слика 6.33: Пластица 3

Дебљине гравуре дате су у табели 6.7.

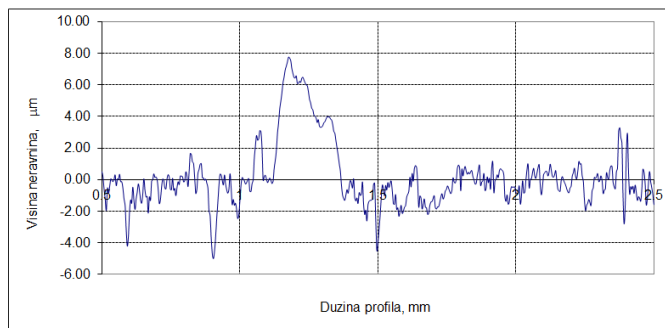
Табела 6.7:

Пластица 3		
Дебљина линије(mm)	20 пролаз 90% снага 70mm/s	20 пролаза 90% снага 50mm/s
	Дебљина гравуре (mm)	
0,1	0.433	0.469
0,2	0.434	0.489
0,3	0.545	0.552
0,4	0.626	0.766
0,5	0.763	0.839
0,7	0.992	1.036
1,0	1.203	1.291

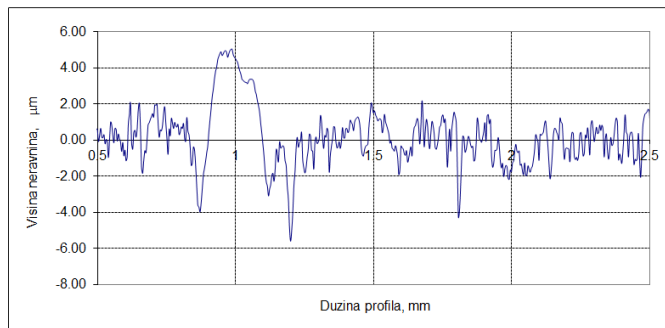
На сликама од 6.64 до 6.98 приказани су профили гравуре за различите дебљине. Ове гравуре су рађене на машини „LaserCut“. Због таложења истопљеног материјала на материјалу тешко је измерити дубину гравуре.



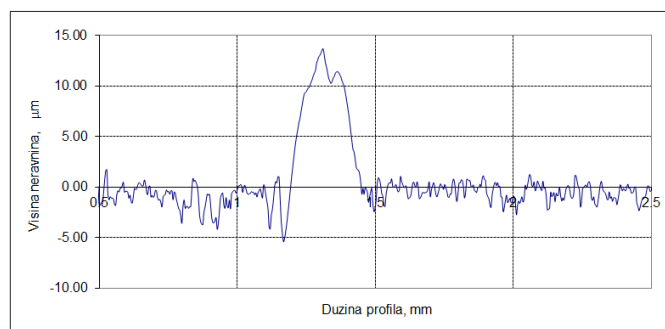
Слика 6.64: Профил гравуре 0.1mm израђен са 90% снаге, 10пролаза и брзином од 100mm/s



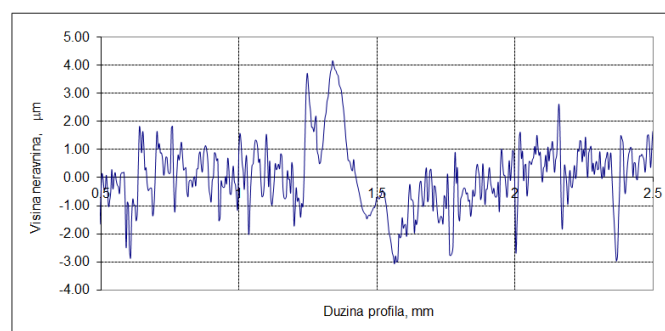
Слика 6.65: Профил гравуре 0.1mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



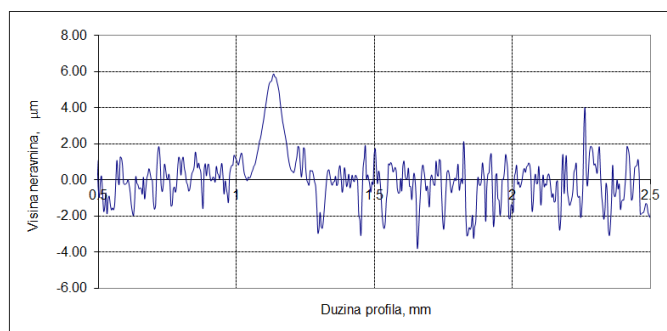
Слика 6.66: Профил гравуре 0.1mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



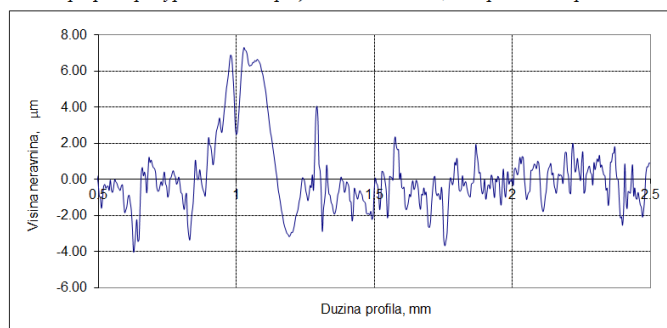
Слика 6.67: Профил гравуре 0.1mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



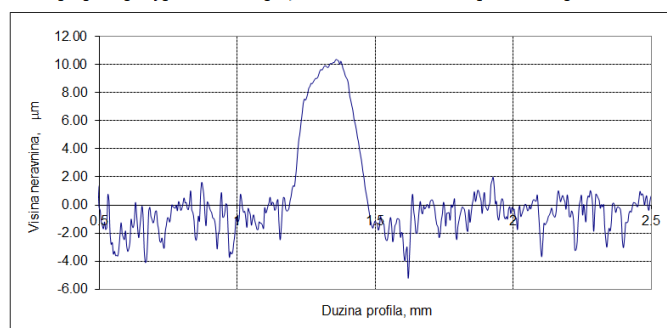
Слика 6.68: Профил гравуре 0.1mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



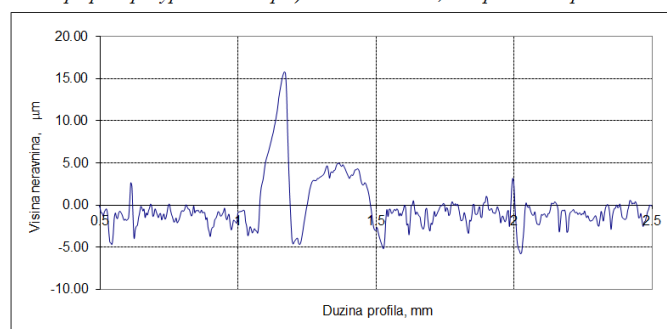
Слика 6.69: Профил гравуре 0.2mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



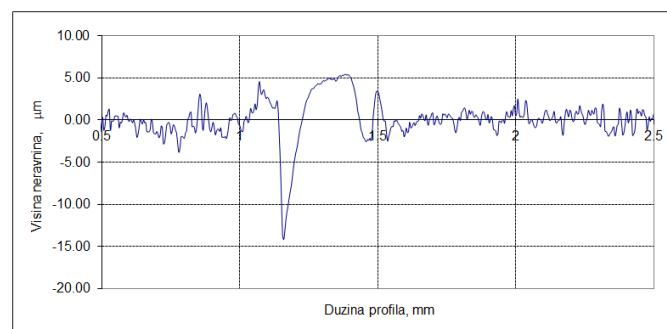
Слика 6.70: Профил гравуре 0.2mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



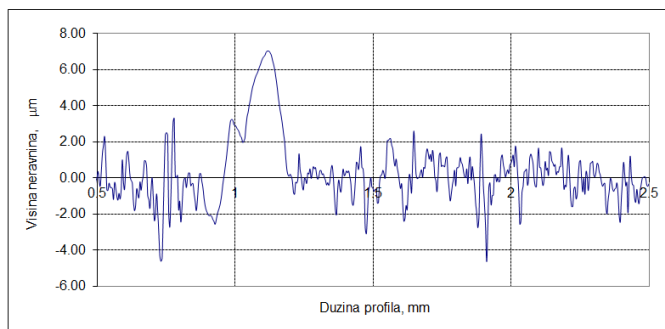
Слика 6.71: Профил гравуре 0.2mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



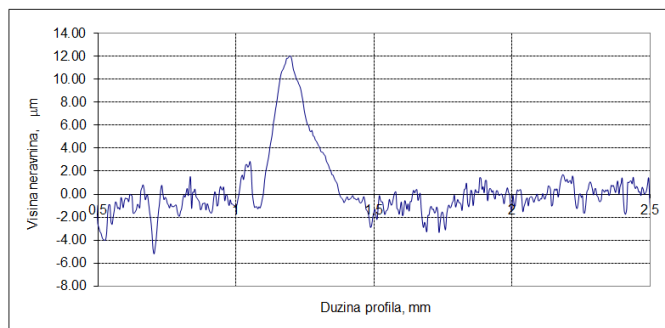
Слика 6.72: Профил гравуре 0.2mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



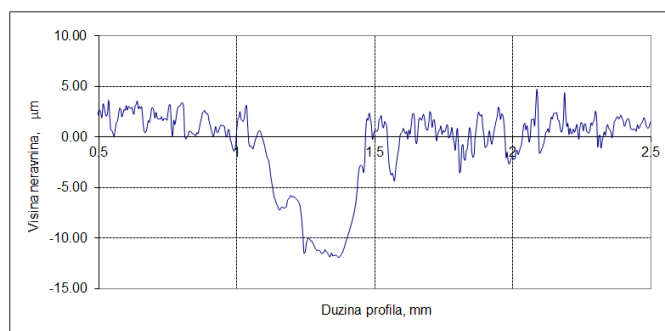
Слика 6.73: Профил гравуре 0.2mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



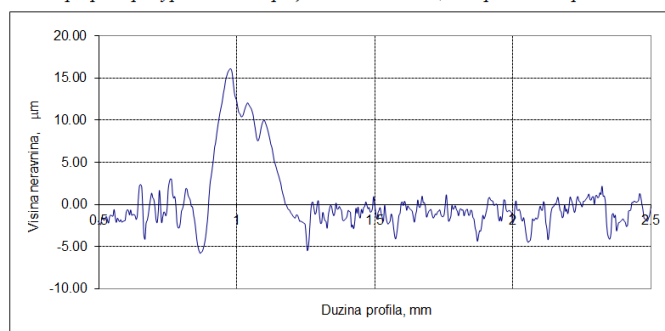
Слика 6.74: Профил гравуре 0.3mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



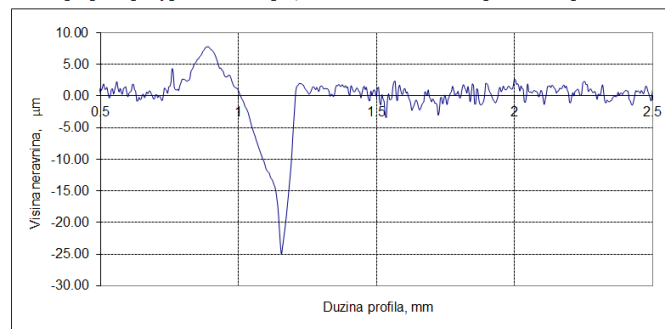
Слика 6.75: Профил гравуре 0.3mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



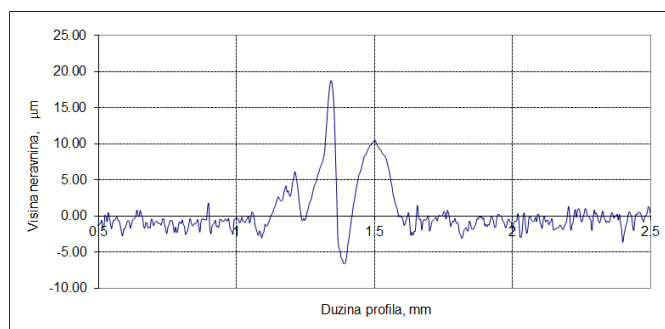
Слика 6.76: Профил гравуре 0.3mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



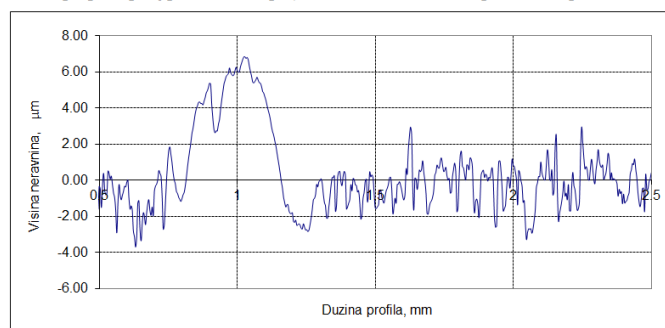
Слика 6.77: Профил гравуре 0.3mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



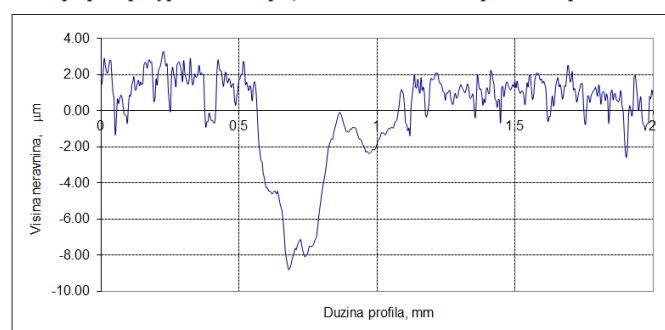
Слика 6.78: Профил гравуре 0.3mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



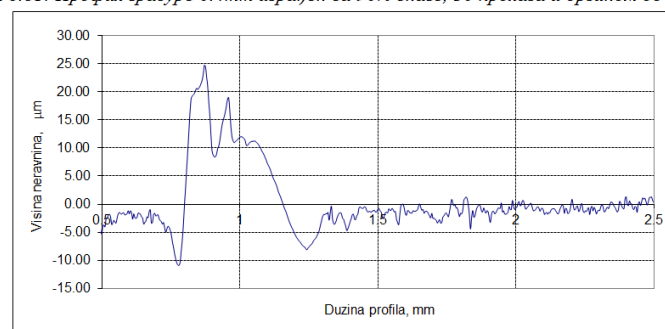
Слика 6.79: Профил гравуре 0.4mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



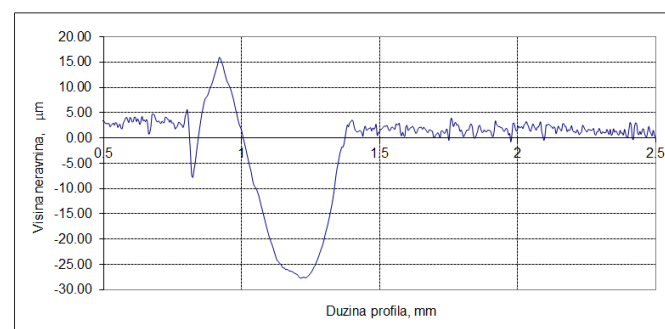
Слика 6.80: Профил гравуре 0.4mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



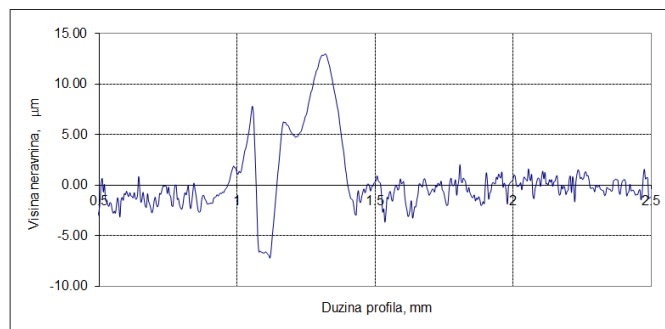
Слика 6.81: Профил гравуре 0.4mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



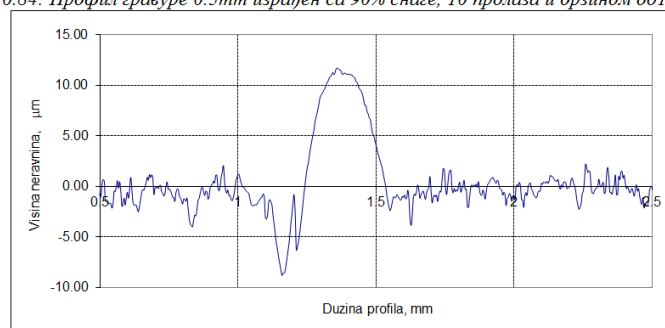
Слика 6.82: Профил гравуре 0.4mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



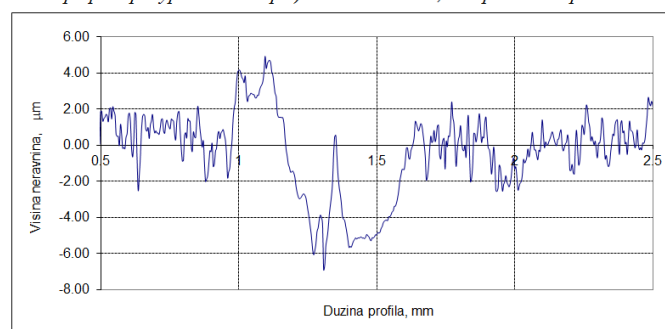
Слика 6.83: Профил гравуре 0.4mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



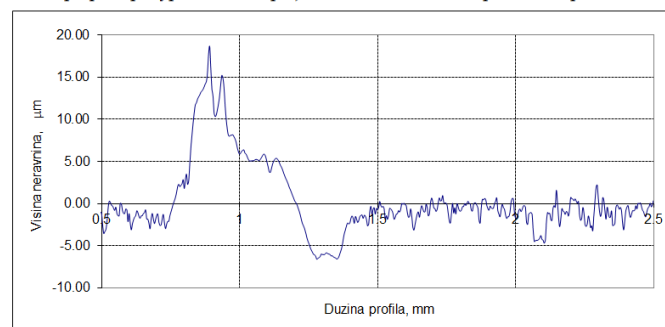
Слика 6.84: Профил гравуре 0.5mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



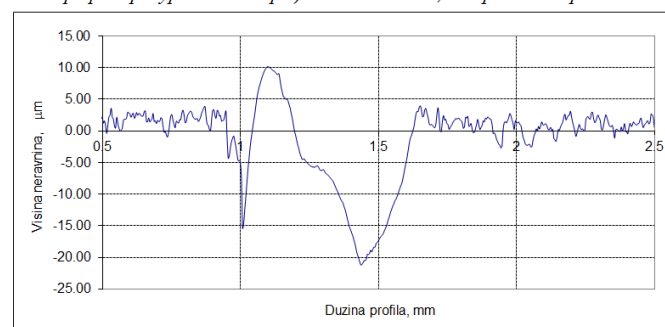
Слика 6.85: Профил гравуре 0.5mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



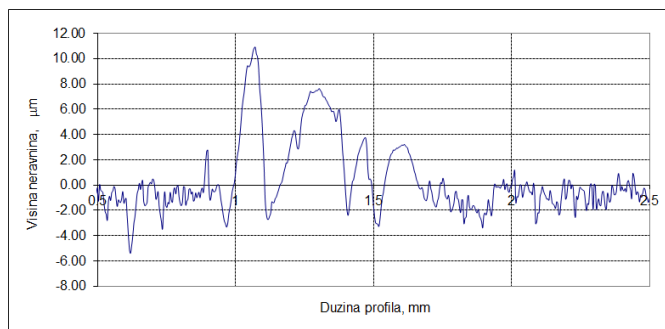
Слика 6.86: Профил гравуре 0.5mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



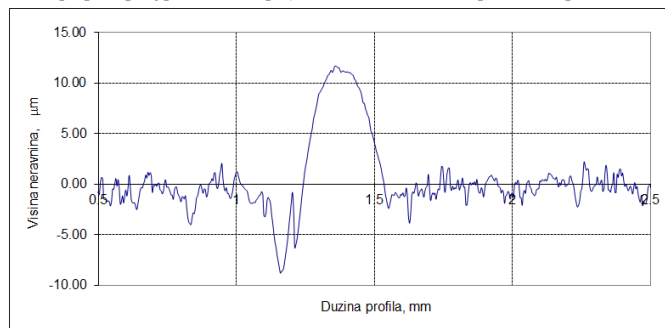
Слика 6.87: Профил гравуре 0.5mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



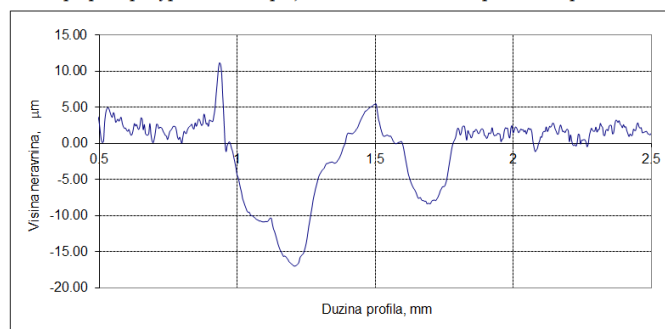
Слика 6.88: Профил гравуре 0.5mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



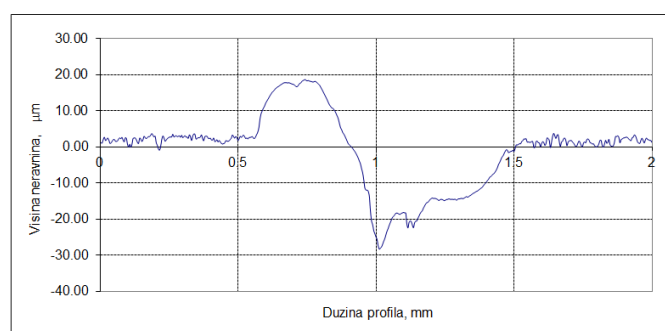
Слика 6.89: Профил гравуре 0.7mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



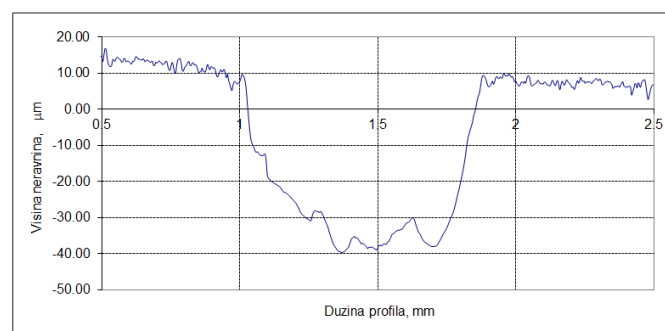
Слика 6.90: Профил гравуре 0.7mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



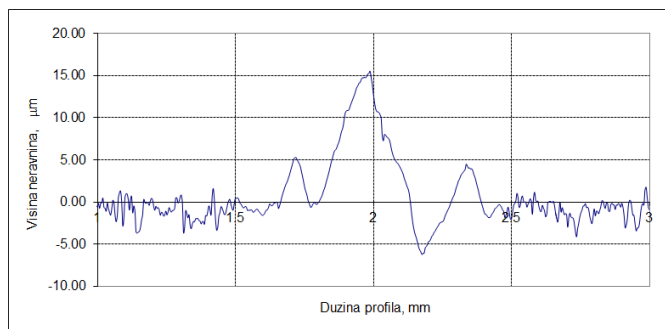
Слика 6.91: Профил гравуре 0.7mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s



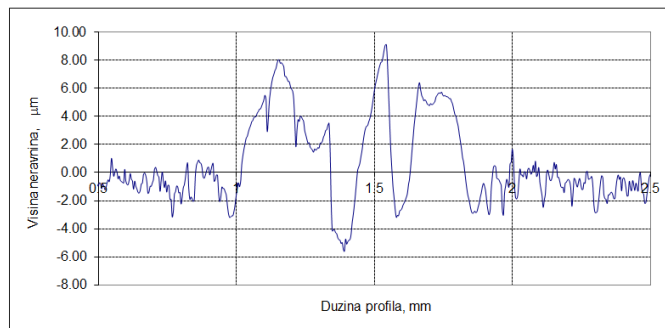
Слика 6.92: Профил гравуре 0.7mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s



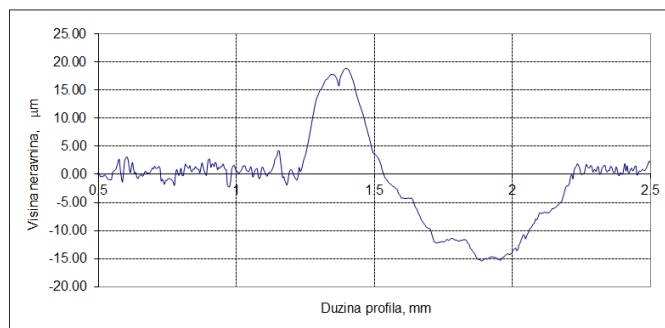
Слика 6.93: Профил гравуре 0.7mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s



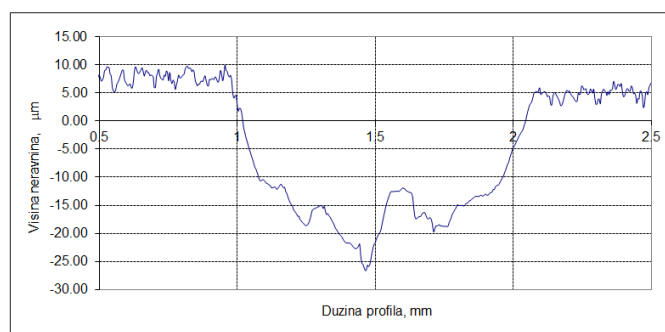
Слика 6.94: Профил гравуре 1.0mm израђен са 90% снаге, 10 пролаза и брзином од 100mm/s



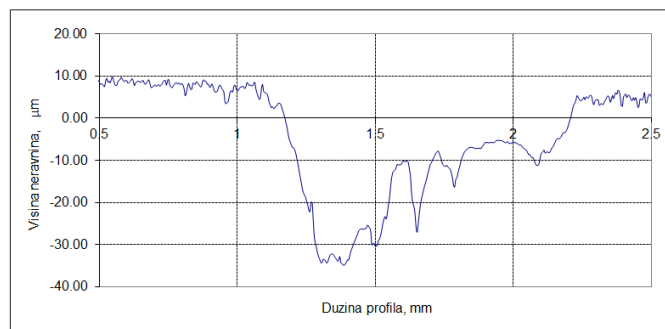
Слика 6.95: Профил гравуре 1.0mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 100mm/s



Слика 6.96: Профил гравуре 1.0mm израђен са 90% снаге, 30 пролаза и брзином од 100mm/s

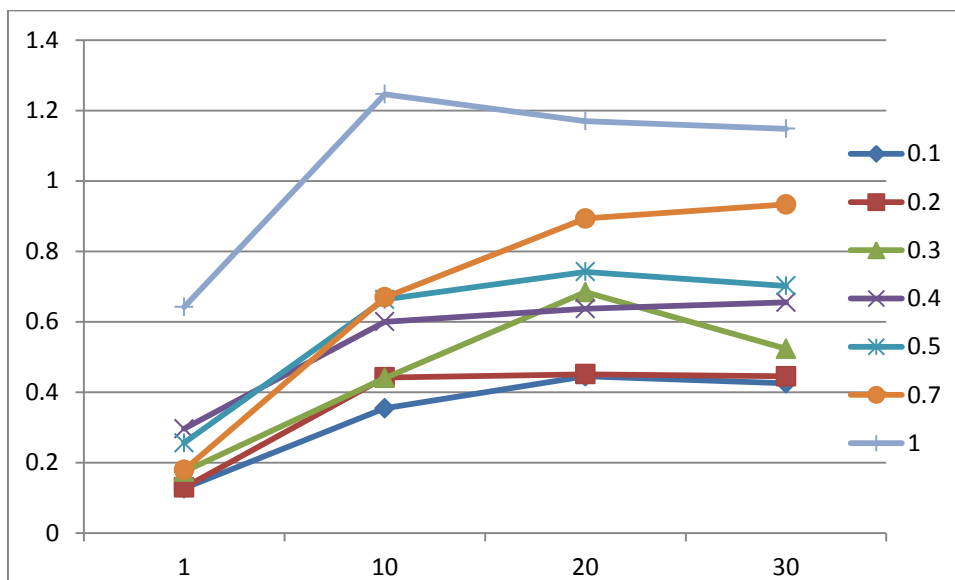


Слика 6.97: Профил гравуре 1.0mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 70mm/s

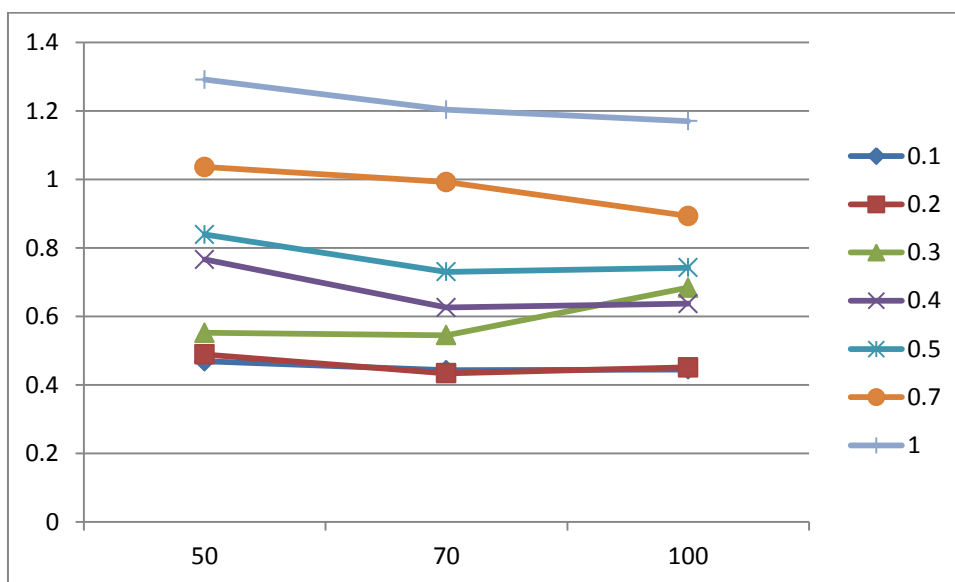


Слика 6.98: Профил гравуре 1.0mm израђен са 90% снаге, 20 пролаза и брзином од 50mm/s

На дијаграму 3 и 4 приказана је зависност дебљине гравуре од брзине ласера, односно дебљина гравуре од броја пролаза.



Дијаграм 3: Зависност дебљине гравуре од броја пролаза



Дијаграм 4: Зависност дебљине гравуре од брзине ласера

Као и код „Laser Sisma BSS-3D” тако и овде, број пролаза утиче на дебљину гравуре, док брзина ласера не.

7. Закључак

На темељу предходно изложеног може се закључити да се ласером може вршити гравирање са високом прецизношћу и квалитетом обраде. У раду су дати поступци обраде који се све више користе подсредством ласера.

Примена ласера на различитим пољима омогућава нам лакше, брже и ефикасније обављање послова. Сама заступљеност у медицини, астрономији и у војним сврхама говори о заступљености ласера.

Сама примена ласера убрзава развој технологије, развој ласера унапредио је и развој РС технологије, не само у изради рачунара већ и у изради меморије која временом добија све већи капацитет.

Сам рад је заснован на упоређивању карактеристика и самог рада датих машина. На почетку рада дат је историјат гравирања.

Затим се приказују машине које се користе за гравирање, пре свега пантографи јер су они заменили ручно гравирање. Пошто машине које врше ласерско гравирање спадају у врсту CNC машина, у овом делу су описане CNC машине и најпознатији примери CNC машина.

Након описа самог ласера и поступака обраде ласером, дата је опрема за гравирање експерименталних узорака, њихов опис као и принцип рада.

У предходној тачки описана је израда гравуре која се радила на обе машине. Кроз слике и табеле можемо дати коначну оцену о раду ове две машине. Из приложеног се види да је машина „SismaLaser BSS-3D” прецизније, квалитетније и брже одрадила гравуру.

Квалитет гравуре, код машине „LaserCut” је лошији због тога што је ова машина направљена за гравирање неметалних материјала. На квалитет гравуре утиче и непостојање компримованог гаса који би требао одувати истопљени материјал приликом рада ласера.

Треба напоменути да и поред овог сазнања не можемо рећи да је машина „LaserCut” лоша, да је машина лоша и неповољна за рад не би се користила.

Литература

- [1] Лазих М. Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [2] Драгоје Миликић, Неконвенционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [3] Радовановић М. Аутоматизовано пројектовање технологије обраде ласером, Докторска дисертација, Машински факултет Ниш, 1995.
- [4] Недић Б. Обрада ласером, скрипта у рукопису, Факултет Инжењерских наука у Крагујевцу, 2008.
- [5] Анте Мишковић, Данијел Согоровић, Обрада ласером, 2003.
- [6] Нумерички управљани алатни стројеви (поглавље о CNC машинама, књига у рукопису), проф. др. Младен Бошњакловић, 2006.
- [7] Нове производне технологије, (скрипта за ученике), 2009.
- [8] Каталог „Sisma“ машина и уређаја, 2013.
- [9] „LaserCut“ упуство за употребу, Београд, 2016.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control (22.09.2016.)
- [11] <https://sh.wikipedia.org/wiki/Graviranje> (22.09.2016.)
- [12] <http://www.samsvojmajstor.com/portal/forums/uradi-sam/obrada-drвета/rezbarenje-drвета-ili-duborez-alat-i-%C5%A1ablони> (22.09.2016.)
- [13] http://www.airgraver.com/engraving_evolution.htm (22.09.2016.)
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pantograph> (22.09.2016.)
- [15] <http://www.ealdormeregazette.ca/2015/04/illuminated-scroll-blank-featuring.html> (22.09.2016.)
- [16] <http://www.vemaels.co.rs/primena.html> (22.09.2016.)
- [17] <http://www.njuskalo.hr/obradni-strojevi-ostalo/zlatarski-cnc-stroj-graviranje-oglas-413000> (22.09.2016.)
- [18] <http://www.multicamusa.com/routers.html> (22.09.2016.)
- [19] <http://web-trgovina.metal-kovis.hr/cnc-glodalica-x7-linear/x7/cnc-strojevi> (22.09.2016.)
- [20] <http://www.vsi.si/irtis/lasersko-graviranje> (22.09.2016.)
- [21] https://bs.wikipedia.org/wiki/Lasersko_graviranje (22.09.2016.)
- [22] http://www.medelux.com/products_detail/&productId=1ef72a82-8795-4644-b663-e6aa37cf7ece.html (22.09.2016.)
- [23] http://mchalegentile.com/iduartsshop/lc_howto.html (22.09.2016.)

- [24] <http://www.sisma.com/eng/jewellery/laser/marking-laser-for-big-pieces/bss-3d.php>
(22.09.2016.)
- [25] <https://www.linkedin.com/pulse/work-theory-laser-cutting-machine-apple-he>
(22.09.2016.)
- [26] <http://www.technologystudent.com/laser1/laser8.html> (22.09.2016.)