

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: 519/2014

Слађана Г. Вукићевић

**ПРИМЕНА ЛАСЕРА ЗА ГРАВИРАЊЕ ДЕЛОВА
НАОРУЖАЊА**

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф. – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Слађана Вукићевић**

Број индекса: **519/2014**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Примена ласера за гравирање делова наоружања**

Задатак: У оквиру дипломског рада потребно је извршити прикупљање и систематизацију података о поступцима и машинама за гравирање. Дати основне напомене о суштини процеса обраде ласером и описати операције гравирања ласером. У посебном делу рада извршити гравирање у предузећу "Завод за испитивање оружја и муниције" Крагујевац, извршити гравирање делова од различитих материјала са различитим топографијама површине и различитом геометријом површине.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Историјат гравирања
3. Машине за гравирање
4. Анализа процеса обраде ласером
5. Технолошке операције обраде ласером
6. Машине за обраду ласером
7. Експериментална испитивања гравирања ласером
8. Закључак

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 13.03.2020.

Резиме:

Рад се заснива на испитивању утицаја услова обраде гравирања ласером на карактеристике обрађене површине. Циљ овог рада је упознавање са технологијом ласерског гравирања као и експериментално утврђивање зависности квалитета обраде од радних параметара ласерске машине. Дате су основне информације о начину рада и примени машине за ласерско гравирање на челику, месингу и алуминијуму. Испитивање утицаја параметара гравирања ласером на топографију површине гравуре је извршено ласерском машином „Zetalase™ XL“. Представљене су њене главне карактеристике, предности и недостаци. Главни део рада се односи на представљање резултата путем графика и табела у којима је видљиво како услови обраде гравирања ласерском машином утичу на квалитет добијене гравуре. Након сваког првог или поновљеног ласерског гравирања је мерена висина, дубина и ширина гравуре на материјалима.

Кључне речи: Ласер, Гравирање

Summary:

The paper is based on examining the influence of laser engraving processing conditions on the characteristics of the treated surface. The aim of this paper is the introduction with laser engraving technology as well as experimental determination of dependence of the processing quality on the operating parameters of the laser machine. The basic information about the working methods and use of machines for laser engraving for work on steel, brass and aluminium are provided. The testing of laser engraving parameters on the topography of the surface of engraving is done with the laser machine „Zetalase™ XL“. The main characteristics are presented as well as advantages and disadvantages. The main part of the paper is about the presentation of results through graphs and tables in which it is visible how processing conditions of engraving with laser machine are effecting the quality of the resulting gravure. The height, depth and width, of the engraving is measured on the materials after every first or repeated laser engraving.

Key words: Laser, Engraving

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	- 5 -
2. ИСТОРИЈАТ ГРАВИРАЊА.....	- 7 -
2.1. Ручно гравирање	- 7 -
3. МАШИНЕ ЗА ГРАВИРАЊЕ.....	- 10 -
3.1. Машинско гравирање-пантографи	- 10 -
3.2. Гравирање CNC машином.....	- 10 -
3.3. Област примене CNC машина	- 11 -
3.3.1. Поузданост CNC машина	- 12 -
3.3.2. Предност CNC система	- 12 -
3.4. Ласерско гравирање	- 12 -
3.4.1. Начин рада ласера који се користи за гравирање:	- 13 -
3.5. Материјали на којима се врши ласерско гравирање.....	- 14 -
4. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ.....	- 15 -
4.1. Историјат и развој ласера.....	- 15 -
4.2 Принцип рада и опис ласера	- 16 -
4.3 Врсте ласера.....	- 19 -
4.3.1 Чврсти ласери	- 19 -
4.3.2 Течни ласери.....	- 22 -
4.3.3 Гасни ласери	- 23 -
4.4 Принцип ласерске обраде.....	- 25 -
5. ТЕХНОЛОШКЕ ОПЕРАЦИЈЕ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ.....	- 28 -
5.1 Ласерско бушење	- 28 -
5.2 Ласерско сечење.....	- 29 -
5.3 Ласерско заваривање	- 35 -
5.4 Ласерско гравирање.....	- 37 -
6. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ ЛАСЕРОМ.....	- 40 -
6.1. Примери примене ласерског гравирања	- 50 -
7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ГРАВИРАЊА ЛАСЕРОМ.....	- 52 -
7.1 Услови испитивања.....	- 52 -
7.1.1 Карактеристике машине за гравирање „Zetalase TM XL”	- 52 -
7.1.2 Уређај за мерење топографије ISR-C002	- 55 -
7.3 Резултати испитивања	- 56 -
7.3.1 Гравирање на челику	- 56 -
7.3.2 Гравирање на алуминијуму.....	- 62 -
8. ЗАКЉУЧАК.....	- 74 -
ЛИТЕРАТУРА.....	- 75 -

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

У оквиру глобалне конкуренције на домаћем и светском тржишту савремена производња је изложена интензивним притисцима за повећањем квалитета, смањењем времена израде, смањењем цене и флексибилним променама производног програма у циљу задовољења променљивих и све сложенијих захтева купаца. Повећање конкурентности и обезбеђење потребног нивоа квалитета производње, као једног од врхунских захтева, директно је повезано са увођењем нових технологија. Ласерска обрада је у том смислу једна савремена технологија која је брзо постала потреба у скоро свим производним индустријама.

Ласери се налазе свуда око нас у дневној употреби од игрица за децу, читача баркодова по трговинама, банковног картичног пословања до софистицираних обрадних машина, високопрецизних медицинских уређаја, војне и свемирске технологије.

Ласерски уређаји за гравирање нам пружају могућност израде конкретних потребних обрадака попут маркирања и означавања производа, изрезивања задатих обрадака, а развили су се у високософистициране уређаје којима се развија и грана ликовне уметности – уметничка дела ласерским гравирањем.

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].

За примене у многим областима ласерска обрада је најпрецизнији и најекономичнији метод на располагању. За неке, ласерска обрада је једини метод. Од свих поступака ласерске обраде најраспрострањеније је ласерско сечење. Сноп ласерских зрака је нови универзални резни алат који може практично да сече готово све познате материјале. Произвођачи прототипова знају да је ласерско сечење економична алтернатива другим методама сечења. У односу на поступке гасног сечења, сечења тестером и просецања предности ласерског сечења су: узан рез, минимална зона топлотног утицаја, правилан профил реза, глатке и равне ивице, минимална или никаква деформација радног предмета, могућност обраде великим брзинама, израда сложених профила и брза адаптација на промену производног програма. Брзином, флексибилношћу и прецизношћу, које су карактеристике ласерског сечења, трошкови производње се рапидно смањују и брзо враћа инвестиција.

Технолошки проблеми у вези примене ласерског сечења су у недовољном познавању примене ласерске технике са једне стране и непостојању довољно поузданих практичних података и знања о утицајним параметрима на сам процес обраде са друге стране. Последица тога је недовољна искоришћеност технологије ласерске обраде с обзиром на могућности које она пружа. Ради даљег напретка и усавршавања процеса ласерског сечења почела су да се врше свестрана изучава теоретских основа и врше експериментална истраживања. Досадашња теоретска и експериментална истраживања бавила су се, углавном, могућношћу примене ласера за различите намене и врсте обрада. Мали број истраживача је објавио радове који обрађују проблематику технологије ласерског сечења, посебно квалитета обраде код ласерског сечења. Из тог разлога врше се истраживања у области ласерског сечења која имају за циљ да се установе и успоставе законитости између квалитета обраде и утицајних фактора процеса обраде.

Циљ овог рада је упознавање са технологијом индустријских ласера са посебним освртом на технологију ласерског гравирања као и експериментално утврђивање зависности квалитета обраде од радних параметара ласерске машине.

У другом поглављу је дат историјат гравирања.

У трећем поглављу су приказане машине за гравирање.

У четвртном поглављу су показана анализа процеса обраде ласером.

У петом поглављу дат је преглед основних технолошких операција ласерске обраде. Дате су основне информације о обрадама ласером као што су: бушење, сечење, термичка обрада, гравирање и заваривање.

У шестом поглављу су приказане машине за ласерско гравирање, њихова намена основне техничке карактеристике.

У седмом поглављу приказан је експериментални део гравирања. Представљени су резултати путем графика и табела у којима је видљиво како услови обраде гравирања ласерском машином утичу на квалитет добијене гравуре.

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.

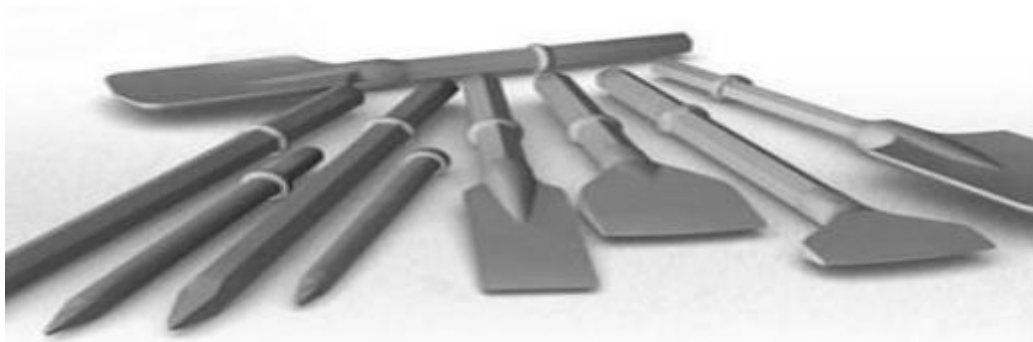
Традиционално гравирање резбарским длетом или употребом машина наставили су да користе златари, стакларски гравери, оружари и други, док модерније индустријске технике попут фотогравирања и ласерског гравирања имају многе важне примене [18].

2.1. Ручно гравирање



Слика 2.1 Асортиман ручног алата 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 (Слика 2.2).



Слика 2.2 Длета [20]

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. Бурини су четвртастог облика или у облику издуженог дијаманта где се користе за урезивање равних линија. Остали алат попут мезотинтних длета, рулета и лаштила користи се за текстурне ефекте. На слици 2.3 је приказан уређај за пнеуматско гравирање. [19]



Слика 2.3 Алат за пнеуматско гравирање [19]

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 минути, 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.

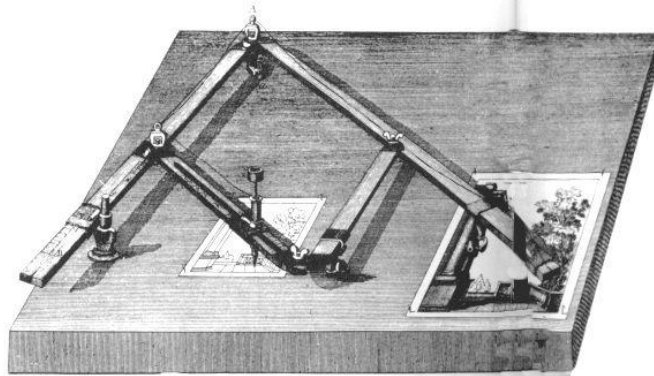
Једино гравирање метала које се могло изводити у античком добу видљиво је у плитким жлебовима пронађеним на неким драгуљима након почетка 1. миленијума п.н.е. Главнина такозваних гравираних дизајна на античким златним прстеновима или другим предметима израђивала се удубљивањем или понекад комбинацијом 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 [18].

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 [22]

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 [23].

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 остали 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 [24].

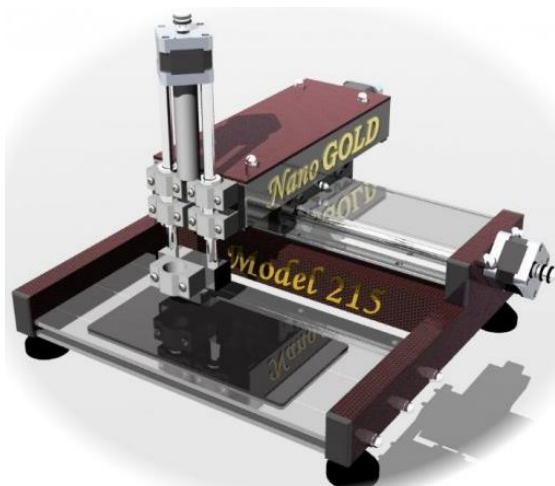
3.3. Област примене CNC машина

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. [28]

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 [25]

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 [28].



Слика 3.3 CNC рутер [26]



Слика 3.4 CNC глодалица [27]

3.3.1. 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 [28].

3.3.2. 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 [28]

3.4. 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, пеђења, 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 пољмере и нове металне легуре.

Појам ласер такође се користи и као генерички појам, који покрива широк спектар техника, укључујући штампу, маркирање и ласерско штампање. Машине за ласерско гравирање и ласер су слични, па они који немају искуства понекад их могу заменити [12].

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 тврдых 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 жељени објекат. Интензитет ласерских зрака 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 [12].



Слика 3.5 Пример ласерског гравирања [12]

3.4.1. 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 XY стола, где плоча мирује, а ласерско око се креће у X и Y 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 фине 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 [11].

3.5. 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, храст.

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 дужинама. На тај начин је решен већи део проблема, али још увек постоје материјали који се овим 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 топљења 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 [6].

4. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

4.1. Историјат и развој ласера

Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. 1704. године Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Јангов експеримент обављен 1803. године и непосредно откриће поларизације светлости су убедили научнике у оно време да светлост има способност таласања. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица.

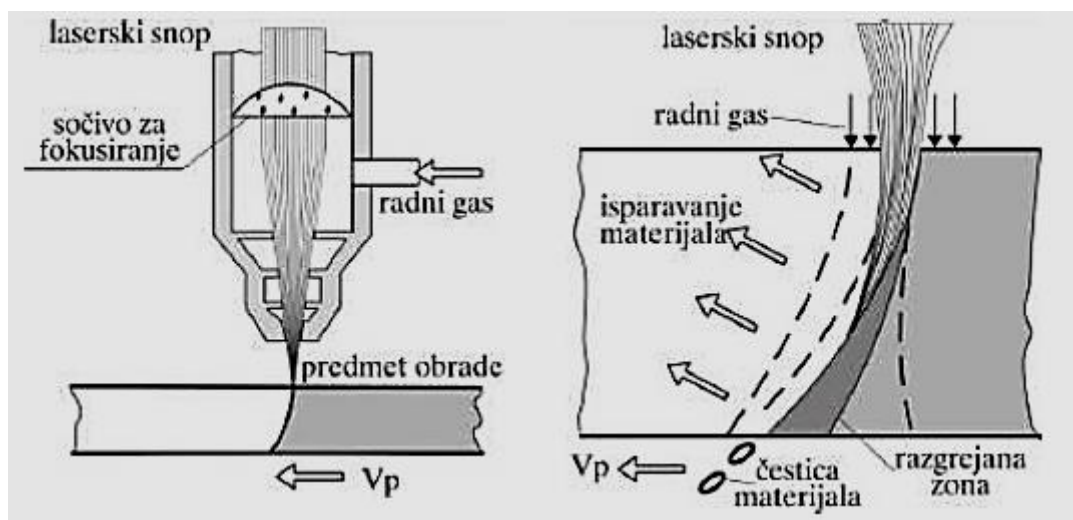
Први ласер је пронађен у Мајамију, маја 1960. године. То је био рубинов ласер изузетне чврстоће. Многе врсте ласера су пронађене ускоро после рубиновог ласера - први уранијум ласер у IBM (новембар 1960. године), први хелијум-неонски ласер 1961. године, први Nd ласер: YAG ласер и CO₂ ласер 1964. године, Ar ласер 1964. године, хемијски ласер 1965. године. Када познајемо принципе ласера, ово није исувише велико изненађење. Али широки и континуални развој и примена ласера су заиста изванредни и представљају преко чудо.

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

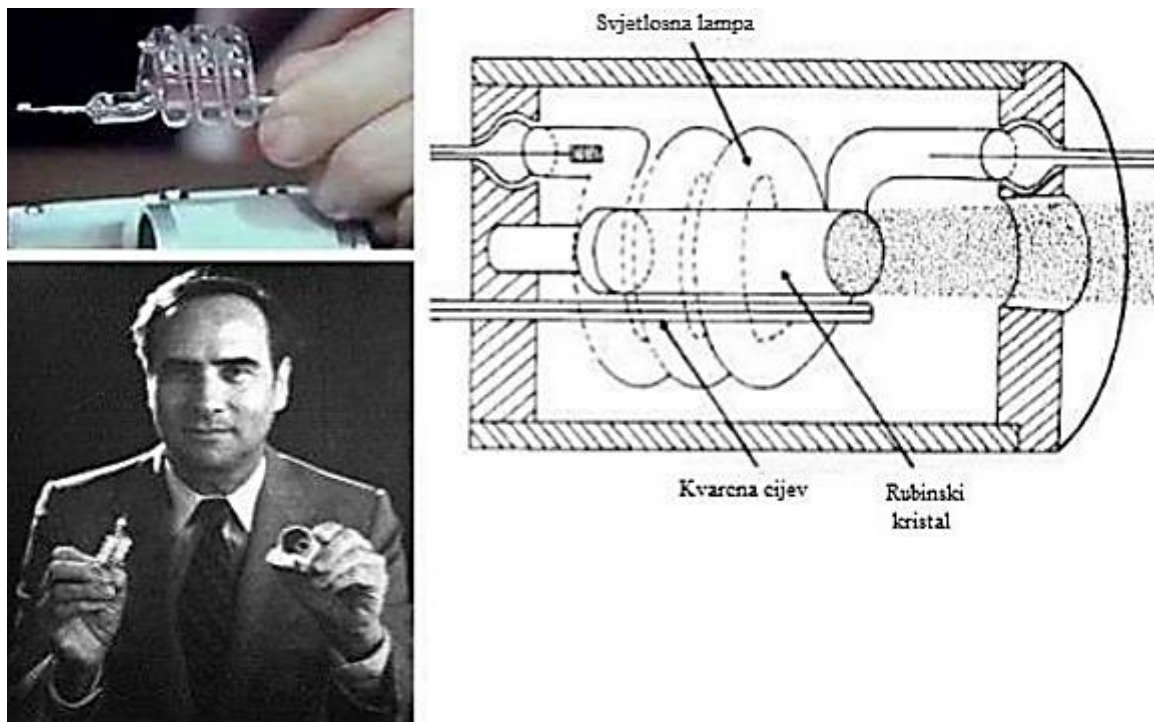
- ❖ ласерски зраци су монохроматски, тј. имају само једну одређену таласну дужину;
- ❖ ласерски зрак је висококохерентан, са паралелним зрацима исте фазе;
- ❖ ласерски зрак може да се фокусира на веома малу површину и да обезбеди високу густину.

За последњих 16 до 18 година технолошки процеси који се базирају на локалном загревању обрађиване површине помоћу ласера, добијају значајан развој и примену. Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде (слика 4.1).

Овај нови правац обраде материјала добио је назив **ласерска технологија**.



Слика 4.1. Принципијална шема формирања ласерског снопа [11]

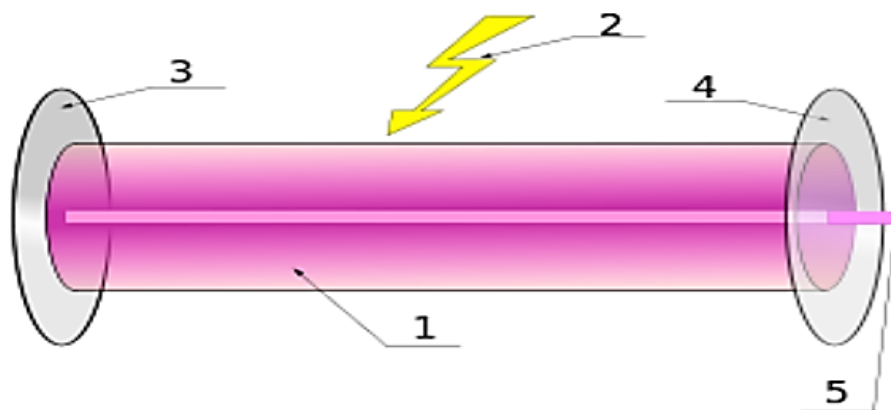


Слика 4.2 Theodore.H. Maiman грађа првог ласера [21]

4.2 Принцип рада и опис ласера

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитије у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије. Код ласера са чврстим емитером, побуђивање зрачења обично се врши претходним обасјавањем активне средине светлошћу лампе бљескавице.

Ласерски зрак се може произвести само ако се стимулише емисија доминира апсорпцијом и спонтаном емисијом зрачења. То се постиже инверзијом атомске популације у ласерском медијуму: Број атома у побуђеном стању мора бити већи од број атома у основном стању.



Слика 4.3 Грађа ласера [21]

На слици 4.3 приказана је грађа ласера коју чине:

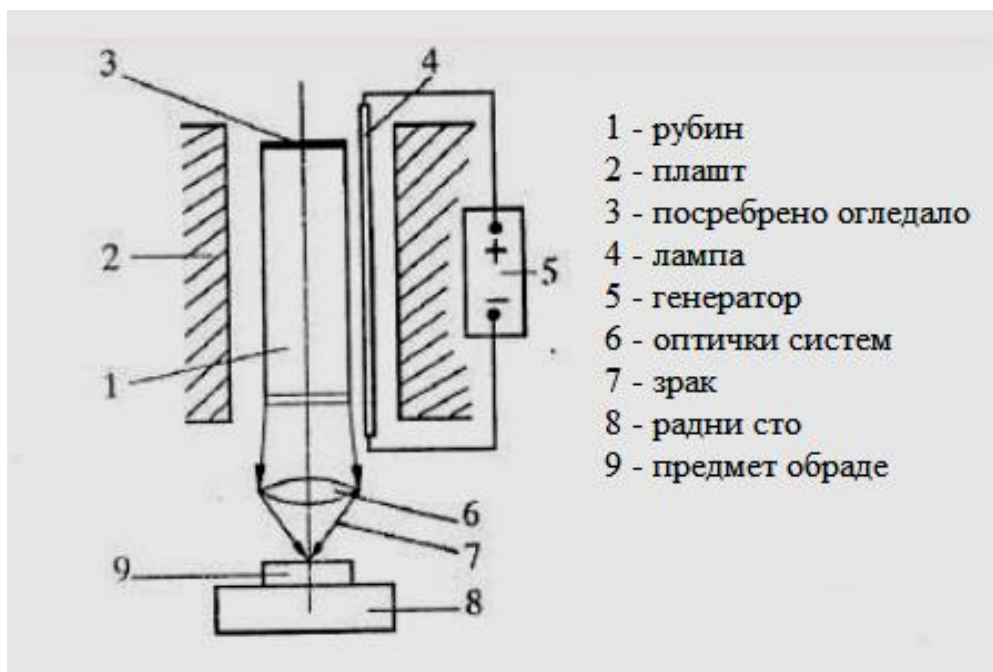
1. Ласерски емитер
2. Енергија за активирање емитера
3. 100% рефлектујуће огледало
4. 99% рефлектујуће огледало
5. Ласерски зрак

Код рубинског ласера, на пример, користи се импулсна ксенонова лампа, иако ова лампа емитује светлост у широком интервалу таласних дужина, блиску сунчевој, за постизање ласерског ефекта користи се само уска плавозелена област $\lambda=560 \text{ nm}$. 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 нормална на осу кристала, која представљају оптички резонатор. Око рубинског штапа и лампе налази се плашт са рефлектујућом површином.

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

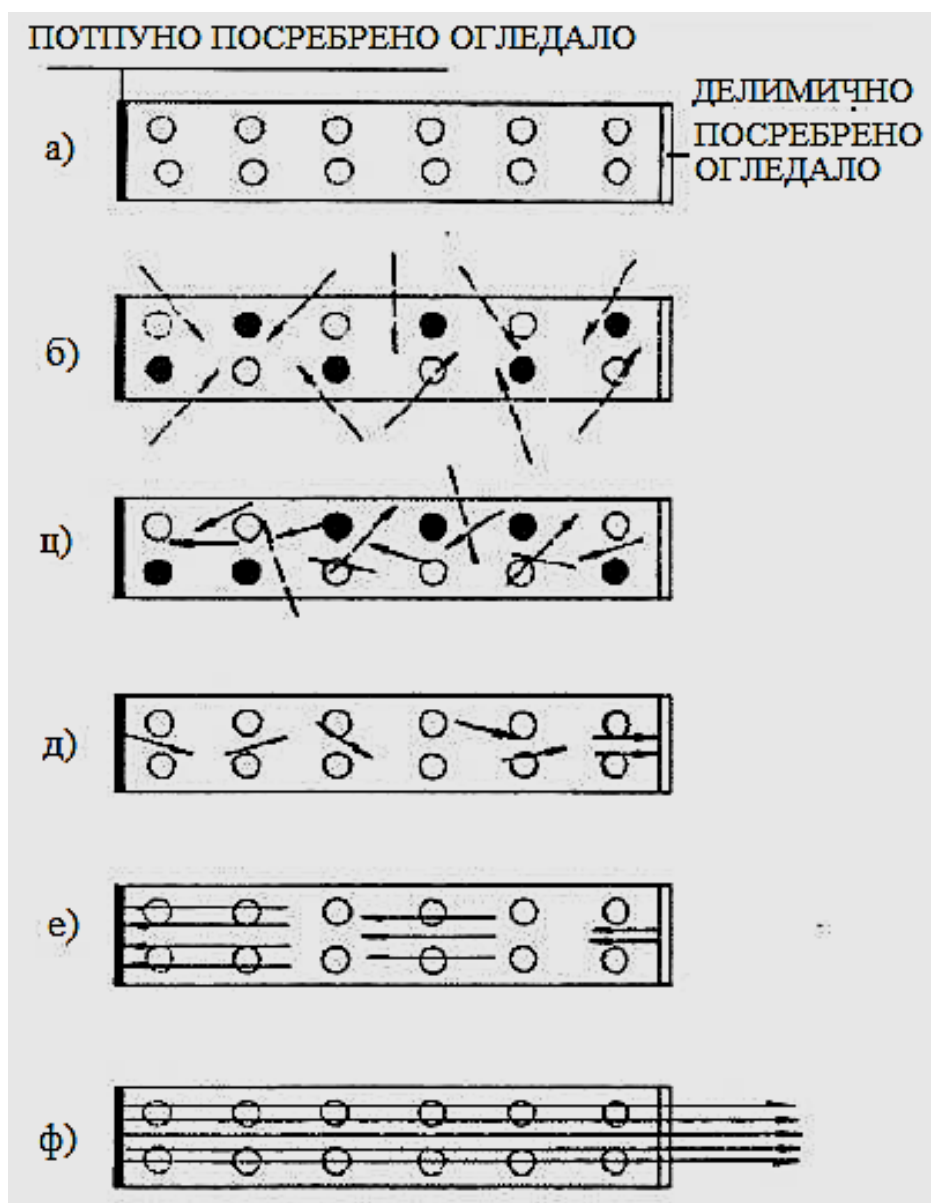
Шема обраде и ласер са чврстим емитером од рубинског кристала дати су на слици 4.4:



Слика 4.4. Шема обраде рубинског ласера [11]

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

До укључења импулсне лампе, јони хрома се налазе у основном стању (бели кружићи). Када се кристал рубина осветли снажном лампом (испрекидане стрелице) јони хрома апсорпцијом упадних фотона бивају побуђени на један од виших енергетских нивоа (слика 4.5.б, ц – црни кружићи). Са виших енергетских нивоа јони хрома прелазе не зрачећи светлост (вишак енергије се предаје кристалној решетци) на метастабилни ниво. Са метастабилног нивоа врше индуковане прелазе у основно стање и емитују фотоне одређене енергије. Сваки емитовани фотон (црна стрелица) индукује прелаз следећег јона и број фотона се повећава. Ефекат појачања постоји за оне фотоне који се крећу паралелно оси цилиндричног кристала (слика 4.5.д, е). Након неколико узастопних рефлексија на чеоним плочама снажни флуks фотона пролази кроз полупосребрено огледало (слика 4.5.ф).

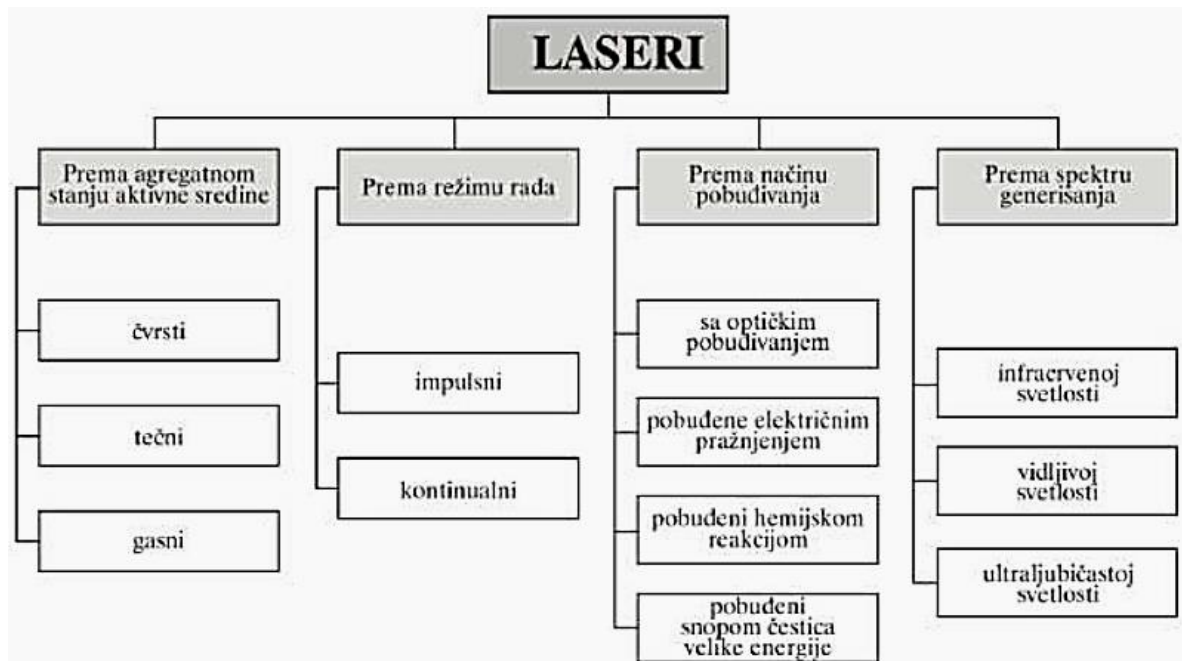


Слика 4.5. Појаве које се дешавају у рубинском ласеру [11]

4.3 Врсте ласера

Постоји више критеријума за поделу ласера. На слици 4.6 приказана је најчешћа подела.

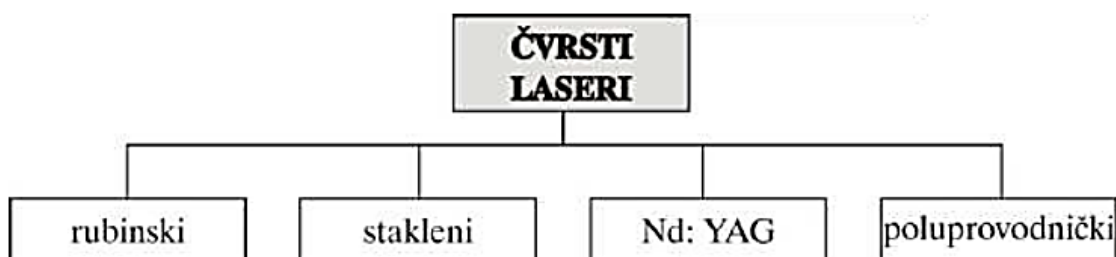
- ❖ **ЧВРСТИ ЛАСЕРИ:** Рубински ласер, Стаклени ласер, Nd: YAG ласер, полупроводнички ласери.
- ❖ **ТЕЧНИ ЛАСЕРИ:** Ласери на бази неорганске течности, Ласери на бази органских боја.
- ❖ **ГАСНИ ЛАСЕРИ:** CO₂ ласер.



Слика 4.6. Подела ласера [11]

4.3.1 Чврсти ласери

Ласери са чврстим телом нашли су примену у обради метала и неметала. На слици 4.7. дата је подела чврстих ласера.



Слика 4.7. Подела чврстих ласера [11]

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.

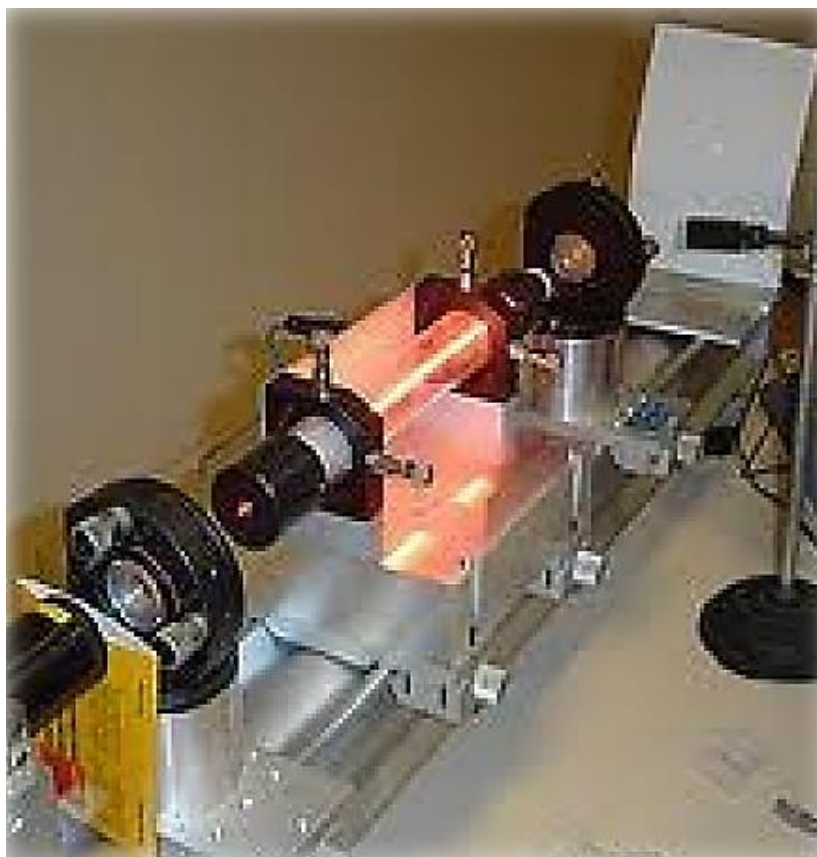
Због тога је насељеност енергетских нивоа у чврстим телима много већа од насељености енергетских нивоа у гасовима. Чврсто тело као оптичка средина има мању оптичку хомогеност него гасови, што условљава веће дисперзионе губитке светлости и смањење квалитета резонатора при његовој већој дужини, па зато 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 загеревања и малог степена искоришћења који износи 1%, рубински ласери се у већини случајева користе као импулсни. Ласери који раде у континуалном режиму обично се хладе посебним системом за хлађење.

Рубински ласер је први ласер који је почео да се користи за бушење дијаманта и алата за извлачење танке жице. Овај ласер у машинству се користи за бушење малих отвора код различитих материјала и за тачкасто заваривање (слика 4.8.). [11]



Слика 4.8. Рубински ласер

Стаклени ласер

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

Постоје два вида стаклених ласера:

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

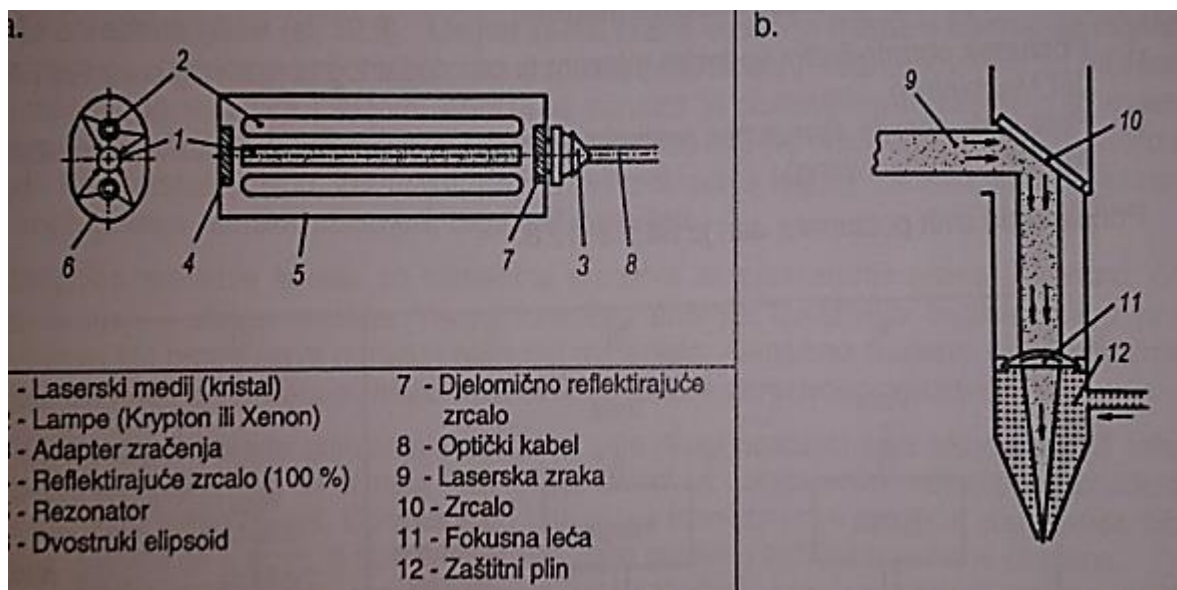
Већа заступљеност ових ласера у поређењу са рубинским је у нижој цени и могућности да раде у широком дијапазону енергије 1- 1000 J. Постоје стаклени ласери и са такозваним гигантским импулсом са енергијом од 10^4 до 10^5 J.

Nd: YAG laser

Један од најважнијих ласера који има многобројне индустријске и научне примене је Нд: YAG ласер (неодијумски ласер). YAG је скраћени назив за итријев алуминијев гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ који представља најчешћи извор ласерског зрачења. YAG спада у групу врло тврдох материјала.

Захваљујући високој тврдоћи обрада YAG -а је отежана, јер захтева дијамантска средства.

YAG ласер одликује висок а 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 mJ у основном моду, са фреквенцијом од 1 - 50 Hz. У континуалном режиму 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 [11] (Слика 4.9).



Слика 4.9. Принцип рада Nd:YAG – ласера с чврстим емитером: а) ласер, б) ласерска глава [17]

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.

4.3.2 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 представља 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.

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: $\text{Nd}^{3+}:\text{SeOCl}_2$ и $\text{Nd}^{3+}:\text{SnCl}_4$. 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.

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.

4.3.3 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.

CO₂ ласер

Тело CO₂ ласера се састоји од гасне смеше CO₂, He и N₂, при чему активну средину чине молекули CO₂. На слици 4.10. приказана је принципијелна шема CO₂ ласера. [11]

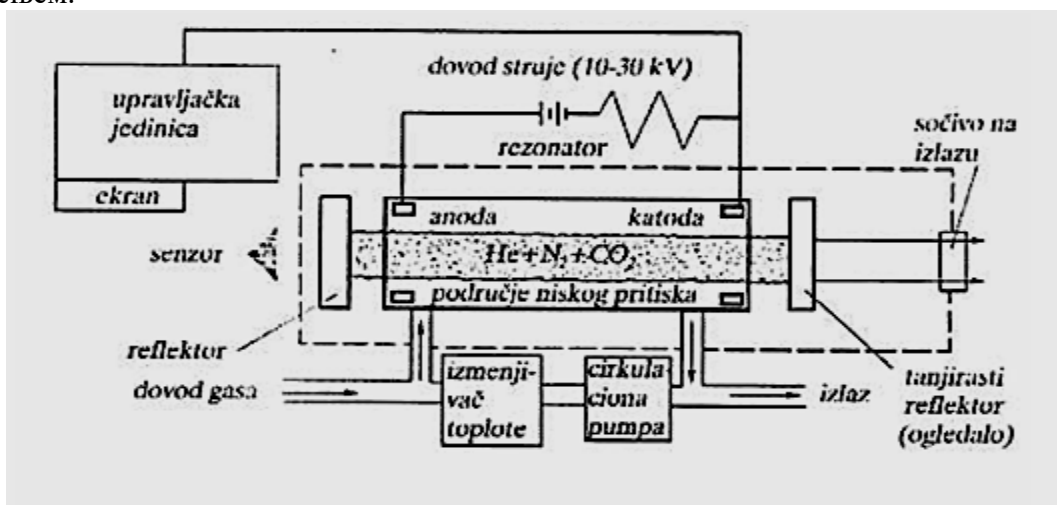
CO₂ ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину светлости $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, која је десет пута већа од стаклених и YAG-ласера. Ови ласери могу да раде у импулсном и континуалном режиму, а као индустријски ласери имају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



Слика 4.10. Принципијална шема CO₂ ласера[11]

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 CO_2 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.



Слика 4.11. Приказ CO_2 ласера [15]

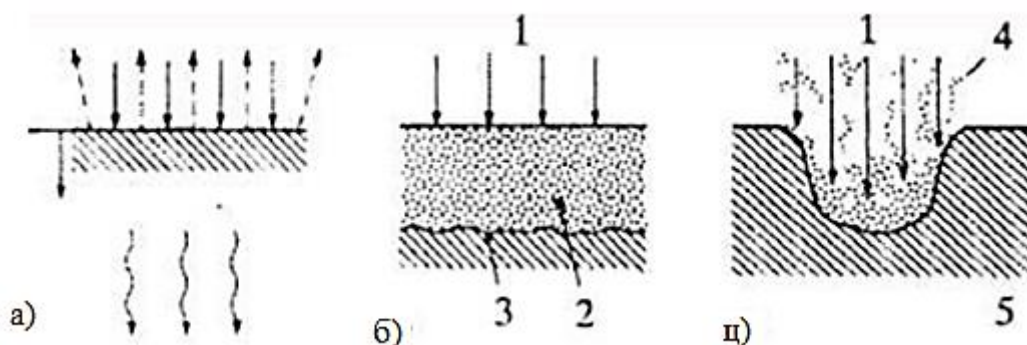
4.4 Принцип ласерске обраде

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 (слика 4.12.).



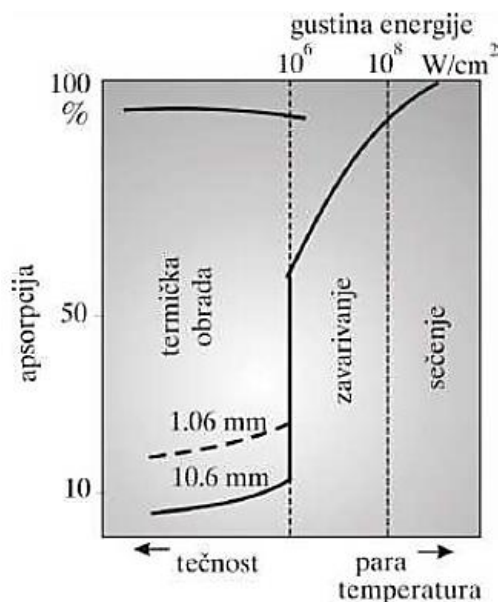
Слика 4.12. Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом

а) рефлексија и апсорпција, б) топлеење, ц) испаравање, 1 – ласерски зраци, 2- истопљени материјал, 3- гранична зона између чврстог и истопљеног материјала, 4- одношење материјала, 5- предмет обраде [12]

Количина ласерског снопа која се одбија, зависи од таласне дужине светлости, густине снаге ласерског зрачења, топлотне проводљивости материјала предмета обраде, специфичне енергије потребне за одређену обраду итд.

У одређеним случајевима, висока рефлексија на многе материјале при одређеној таласној дужини ласерског зрачења, доводи до тога да је материјал непогодан за обраду ласером.

На слици 4.13. приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 4.13. Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала [12]

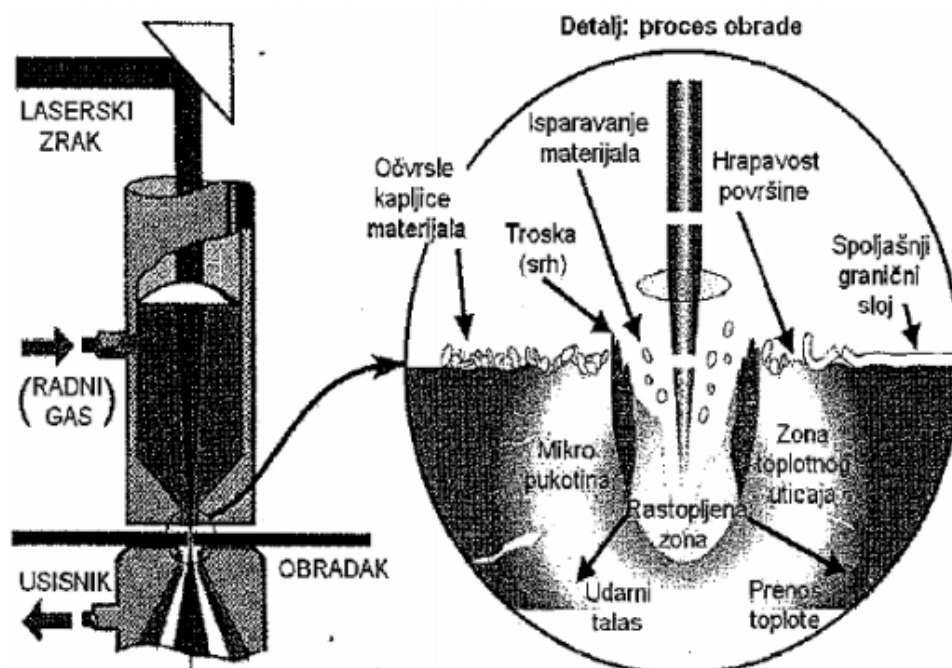
Битан утицај на коефицијент рефлексије има и густина ласерског млаза. Са повећањем густине од $10^7 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ за већи број метала коефицијент рефлексије се значајно повећава.

Повећање густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm^2 , доводи до знатног смањења коефицијента рефлексије.

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

5. ТЕХНОЛОШКЕ ОПЕРАЦИЈЕ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

Ласерски зрак фокусиран на радни пречник 0.15 - 0.2 mm постао је универзални алат који може практично да сече готово све познате материјале. За разлику од конвенционалног алата он је без облика, па се не мора специјално наручивати за производњу и не намеће трошкове везане за складиштење, оштрење и подешавање.



Слика 5. Шема процеса обраде ласером[17]

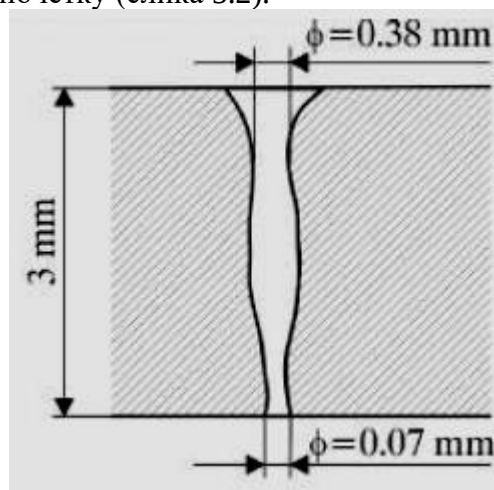
5.1 Ласерско бушење

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. При импулсу ласерског зрачења наступа снажно избацивање продукта испаравања материјала при чему се добија рупа или отвор кружног облика (сл. 5.1,f).



Слика 5.1. Процес стварања рупе у материјалу предмета обраде са променом густине снаге ласерског зрачења [12]

При бушењу отвора у лимовима улазни пречник је већи од излазног, а кратер има улазни конус и венац на почетку (слика 5.2).



Слика 5.2. Попречни пресек отвора у челику добијен ласерским бушењем [12]

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.

5.2 Ласерско сечење

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

- ❖ снага импулса P , W ,
- ❖ густина ласерског снопа q_c , W/cm^2 ,
- ❖ притисак гаса p , бар,
- ❖ врста гаса,
- ❖ величина фокусне тачке d , mm ,
- ❖ брзина сечења v , mm/s ,
- ❖ тачност померања ласерског снопа по предвиђеној контури и др.

Ласер производи кохерентан светлосни снап 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 5.3 приказано је сечење ласером.



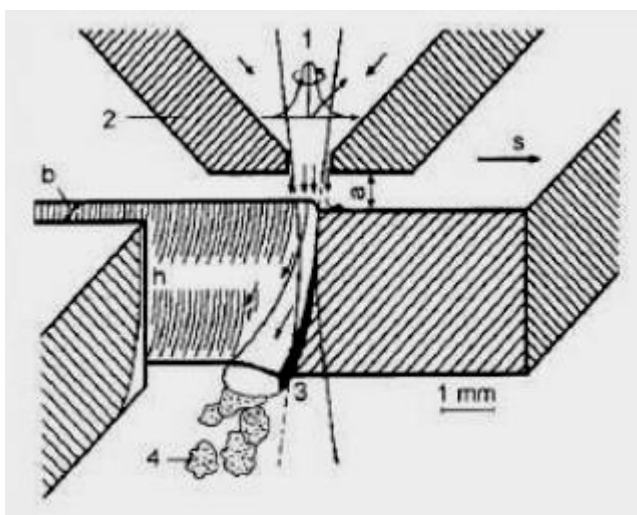
Слика 5.3. Сечење ласером [9]

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

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

Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом.

На слици 5.4 дат је шематски приказ процеса сечења ласером.



Слика 5.4. Шематски приказ сечења ласером [12]

Методe сечења ласером

Постоје три методе сечења ласером:

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

За сечење метала се најчешће користи реактиван помоћни гас O_2 , док се за сечење неметала користи неутрални гас N_2 или инертни гас Ar . [12]

Фактори процеса сечења ласером

На процес ласерског сечења утичу:

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

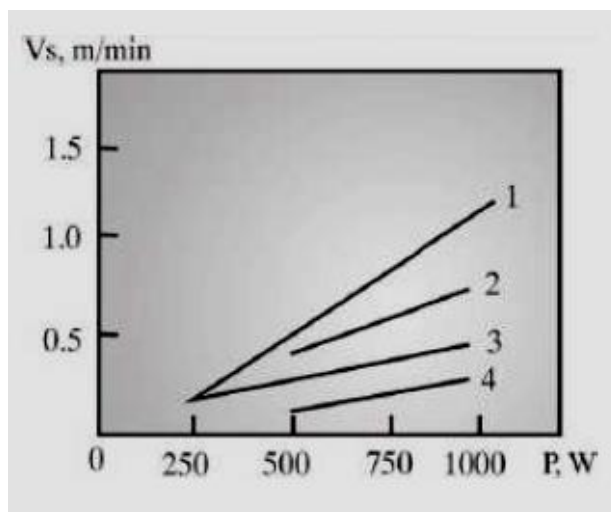
Режими обраде

Снага ласера

Најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине је снага ласера. На слици 5.5 приказана је зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.

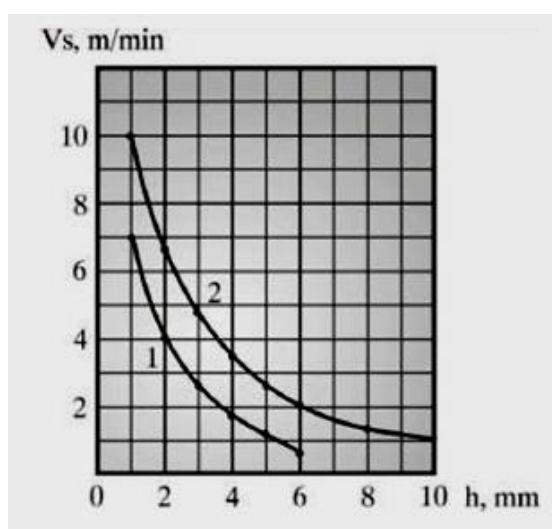
Брзина сечења

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



Слика 5.5 Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.

1. Нерђајући челик ($h=3,2\text{mm}$) 2. Алуминијум ($h=0,8\text{mm}$) 3. Нискоугљенични челик ($h=2,3\text{mm}$) 4. Титан ($h=1,5\text{mm}$) [9].



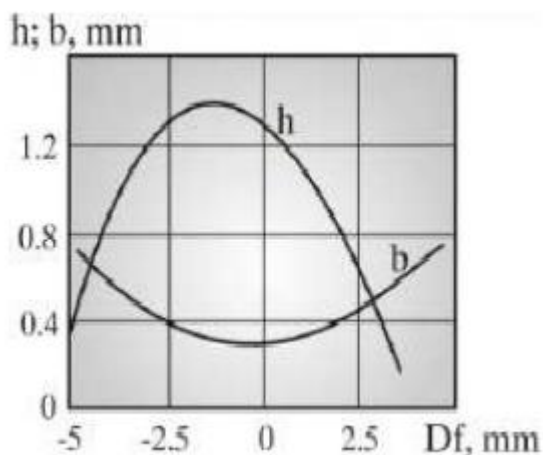
Слика 5.6. Зависност брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике [9]

P=625 W, 2. P=1250 W

Жижна даљина сочива

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

На слици 5.7 приказан је утицај дефокусације (положај жиже сочива за фокусирање у односу на површину предмета обраде) Δf , на ширину b и дубину h реза.

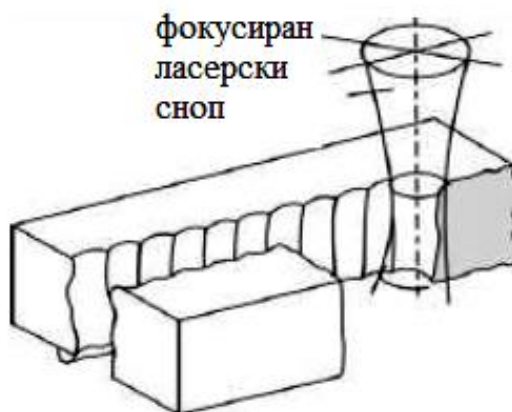
Слика 5.7. Утицај дефокусације Df на ширину b и дубину h реза [9]

Помоћни гас

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

Квалитет и тачност обраде

Квалитет обраде код сечења ласером је одређен квалитетом реза и тачношћу облика и димензија. Квалитет реза се обично дефинише геометријским карактеристикама (ширина реза, храпавост обрађене површине) и физичко-хемијским карактеристикама на израженој површини материјала предмета обраде. Квалитет и тачност обраде сечења ласером, у највећем степену зависе од: брзине резања, снаге ласерског млаза, врсте и притиска гаса, пречника и положаја млазнице у односу на површину предмета обраде. На слици 5.8 дат је шематски приказ ласерског млаза.

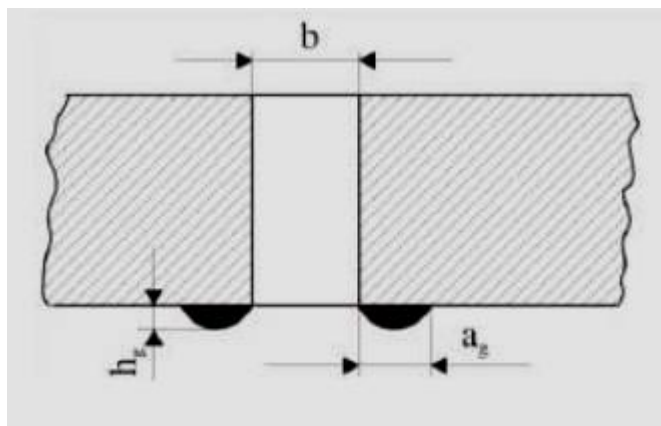


Слика 5.8. Шематски приказ ласерског млаза [12]

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

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

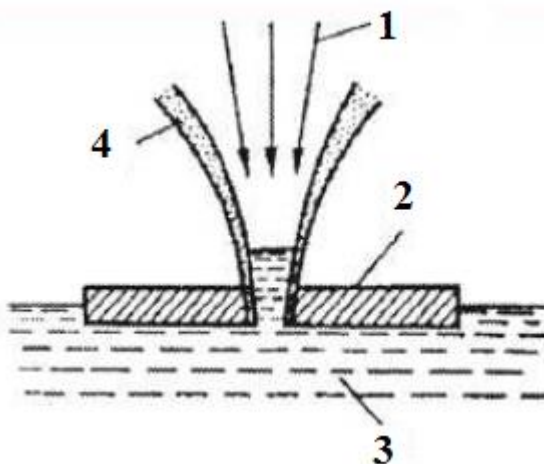
На слици 5.9 приказана је појава гребена приликом сечења метала.



Слика 5.9. Појава гребена при сечењу метала ласером [12]

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

На слици 5.10 приказана је шема сечења ласером у течној средини.



Слика 5.10. Шема сечења ласером у течној средини
1 – ласерски зраци, 2 – предмет обраде, 3 – течност, 4 – гасна струја [12]

Примена ласерског сечења

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

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

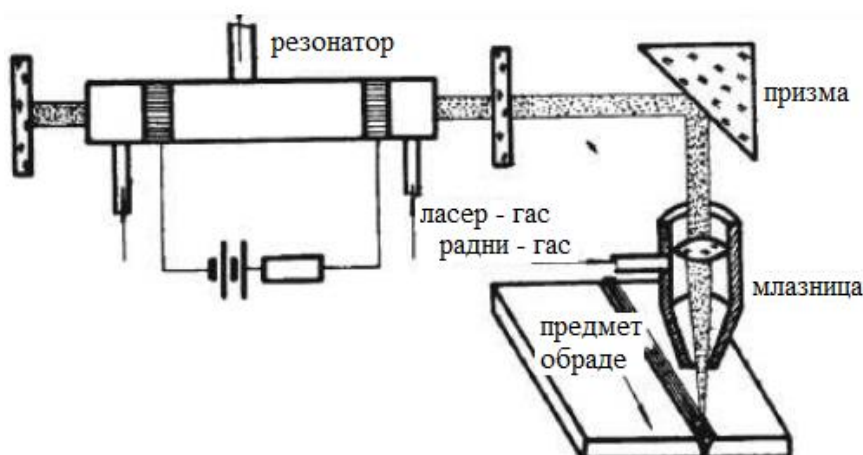
5.3 Ласерско заваривање

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 ms, са максималном снагом од 10-100 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.

CO₂ ласери се не користе код заваривања због великог коефицијента рефлексије, који се за већину материјала креће од 94-98 % на собној температури, за таласну дужину ласера од 10.6 μ m.

Индустријски CO₂ 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 5.11 дата је принципијелна шема заваривања ласером.



Слика 5.11. Принципијална шема заваривања ласером [12]

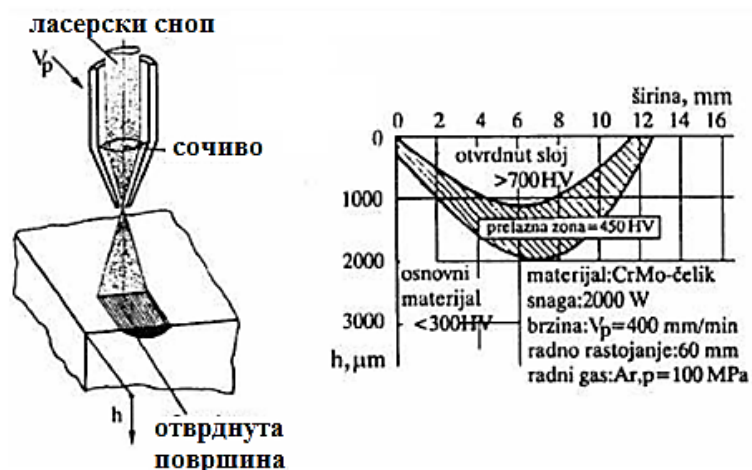
Отврдњавање или површинска термичка обрада снопом ласерских зрака заснива се на загревању, топљењу и ударном оптерећењу. Термичка обрада ласером је могућа како за поједине зоне посебно изложене хабању, тако и за површине у целини, уз хлађење различитим средствима.

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%.

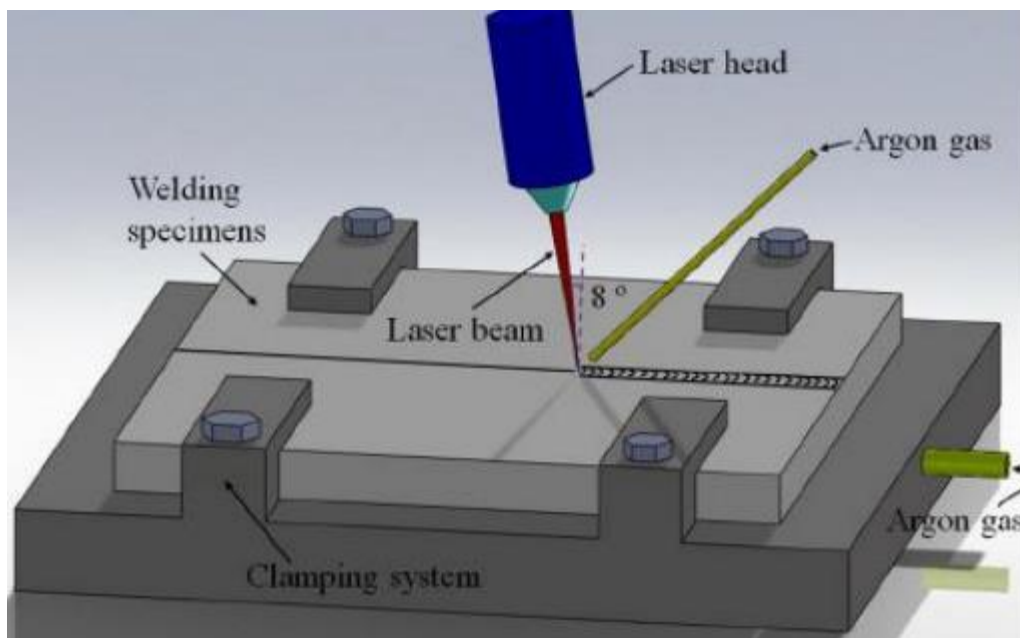
Отврдњавање површине метала ласером омогућује низ предности као што су:

- ♦ 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.

На слици 5.12 приказан је принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврдног слоја.



Слика 5.12. Принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврдног слоја [12]



Слика 5.13. Ласерско заваривање

5.4 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. Машине за ласерско гравирање и ласер су слични, па они који немају искуства понекад их могу заменити [12].

Ласерско гравирање (слика 5.14.) 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 [12].



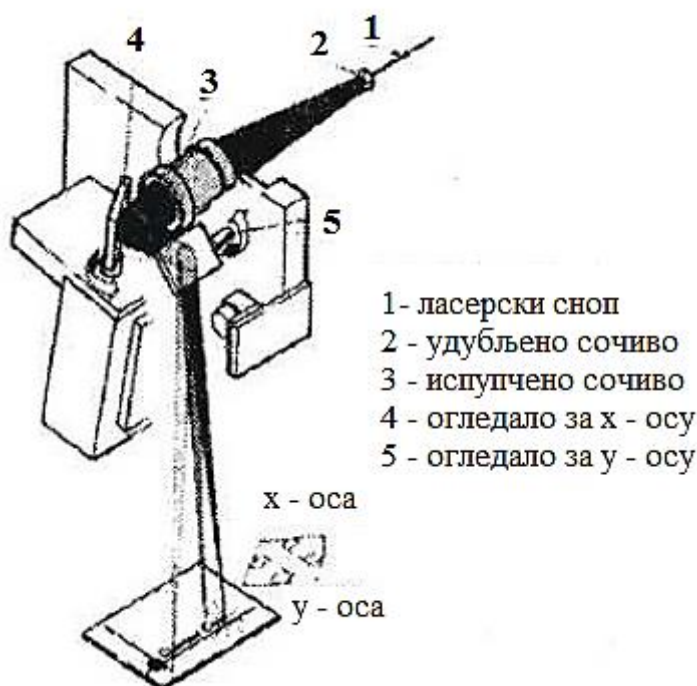
Слика 5.14. Пример ласерског гравирања [11]

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.

На слици 5.15 приказана је шема рада машине за гравирање ласером.

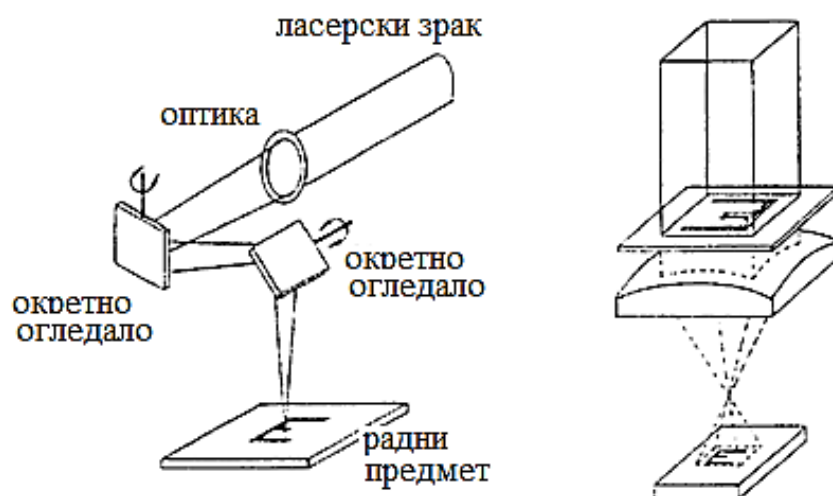


Слика 5.15. Шема рада савремене машине за гравирање ласером [12]

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) 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.

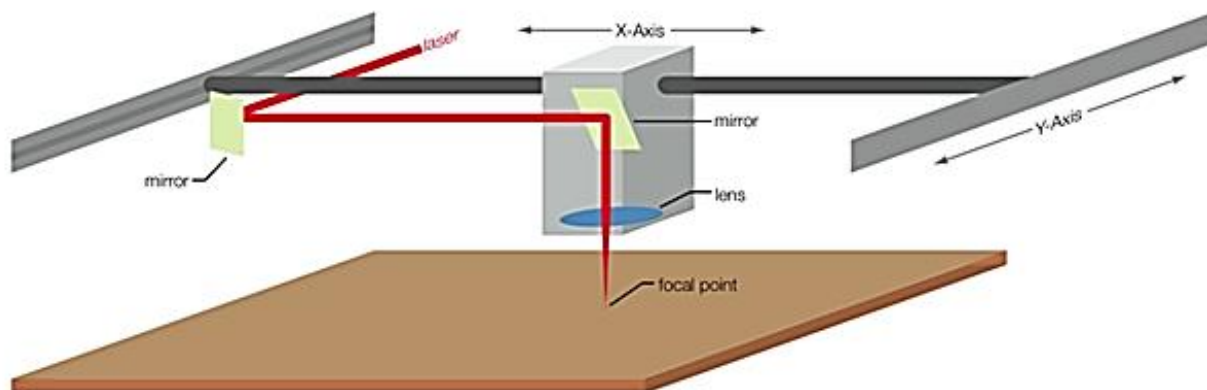
Поред наведене методе, велику примену има и метод гравирања маском, који је нарочито погодан за означавање радних предмета у масовној производњи.

На слици 5.16. приказан је метод гравирања маском.



Слика 5.16. Шематски приказ гравирања маском [9]

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 5.17.



Слика 5.17. Шематски приказ ласера који врши гравирање померањем главе ласера [9]

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. [9]

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.

6. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ ЛАСЕРОМ

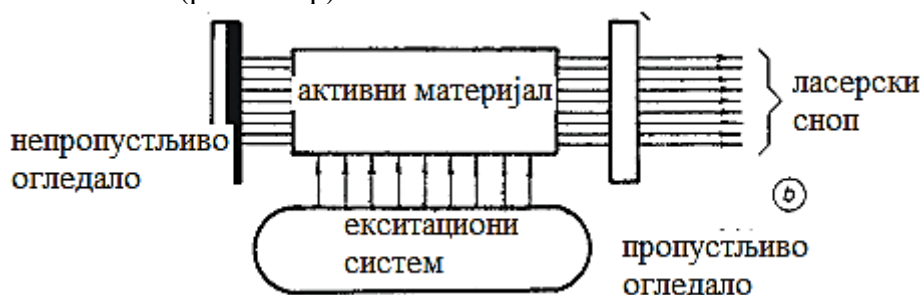
Савремене конфигурације ласерских машина подразумевају различите конфигурације ласерског уређаја, оптичког система за превођење снопа, обрадне главе, координатног радног стола, енергетског система и управљачког система у оквиру једне интегралне целине. Основна конфигурација савремене ласерске машине приказана је на слици 6.1. Савремени ласер машина за сечење метала је са фибер ласером и садржи: непокретни радни сто, покретну "П" платформу по у оси на којој се налази ласерска глава која се креће по x и z оси, управљачку јединицу, извор ласерског снопа, фибер кабал за усмеравање ласерског снопа, систем за доношење и одношење материјала који се обрађује, и др. Претходне ласер машине су биле са CO_2 извором ласерског снопа и поред наведених делова ласер машине, имале су посебан систем за пренос ласерског снопа огледалима и призмама од његовог извора до ласерске главе и посебан систем за хлађење извора ласера.



Слика 6.1. Савремена фибер ласер машина

Структурна шема ласерског уређаја (слика 6.2) садржи:

- активну или радну материју (тело ласера),
- побудни - ексцитациони систем и
- резонантни систем (резонатор).



Слика 6.2 Структура ласерског уређаја

Екситациони систем (најчешће лампа бљескавица) обезбеђује формирање светлости и осветљавање активне материје. Део светлости се троши на побуђивање атома радне материје и њихово превођење на виши енергетски ниво. На овом нивоу, побуђени атоми се задржавају врло кратко време (око $2 \cdot 10^{-7} \text{s}$), а затим се, у виду ланчане реакције, враћају у првобитно стање емитујући кохерентну и монохроматску светлост високе јачине - ласер. Као побудни системи користе се различите цеви са гасним пражњењем (лампа бљескавица) напуњене неким инертним гасом (аргон, криптон и сл.).

Код ласерских машина за обраду материјала (бушење, сечење, термичка обрада, заваривање) најефикаснији су CO_2 ласери са снагама од 100 W до 5 kW, као и Nd: YAG ласери до 400 W континуалне снаге. Оптички систем за пренос снопа представља погодан реализован манипулатор.

За велике снаге ласерског зрачења то су вишеосне телескопске цеви са водено хлађеним огледалима (скретачима зрака), док код ласера мање снаге веома су погодна оптичка влакна за дислоцирање места примене чак до 100 m. Манипулатори снопа преводе снап од ласера (извора) до обрадне главе.

Обрадна глава се састоји од система за фокусирање ласерског снопа и млазнице за продубљивање помоћног гаса. Обрадна глава може бити изменљива, чиме се обезбеђује оптимална адаптивност према концепцији машине.

Координатни радни сто најчешће представља вишеосни механички систем који омогућује транслаторна и ротациона кретања.

На избор ласерске машине утичу:

- ❖ врста обраде,
- ❖ облик радног предмета и
- ❖ димензије које треба обрадити.

У пракси се срећу различите врсте и конструкције ласерских машина. Највећу примену имају ласерске машине за гравирање које су приказане на сликама даље у тексту.

Позиционирање предмета обраде у односу на ласерски снап може се изводити на два начина:

- а) предмет обраде је непокретан, а светлосни снап се помера по захтеваној путањи,
- б) светлосни снап је непокретан, а предмет обраде се помера са координатним столом.

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.

Машина за ласерско гравирање LS 900

Ова снажна индустријска ласерска машина LS 900 (слика 6.3) долази као десктоп или верзија са сопственим постољем, и са својом гравирном површином од 610 x 610 mm је идеална машина за искусне мајсторе ласерског гравирања, са средњим до високим нивоом производње. Црвени ласерски зрак за праћење смањује могућност грешке тако што омогућава да се изврши симулација гравирања помоћу тог зрака, пре него што се приступи стварном гравирању.



Слика 6.3. Ласерска машина LS 900 [13]

Основне карактеристике машине су:

- Погодна машина за кориснике са средњим или високим обимом производње.
- Heavy duty шасија и механички склоп са опсегом снаге ласерског пуњења до 80 W.
- Машина са радним столом са гравирном површином 610 mm x 610 mm способна да прими велике предмете или врши матрично гравирање инвентарских плочица у великом обиму.
- Приступ радном столу са предње стране омогућава лако смештање и позиционирање предмета који се гравира.
- Црвени ласерски поинтер омогућава лако подешавање тако што врши симулацију гравирања, па оператер може лако да провери да ли ће коначна гравура стварно и бити на предвиђеном месту.
- Ауто фокус аутоматски подешава фокусну дужину у односу на предмет који се гравира (чак и у случају удубљених предмета).

Машина за ласерско гравирање MBL SD-1325

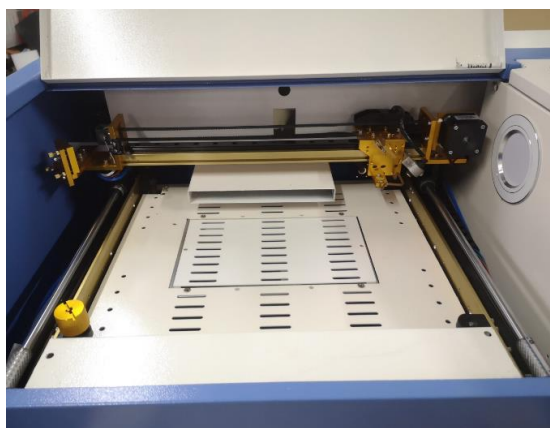
- Радна површина: 1250 x 2500 x 90mm
- Серво мотор, 2.2 kW са воденим хлађењем
- Брзина гравирања: 6000 mm/min
- Алати за гравирање: 3.175mm, 4mm, 6mm
- Формат: Dictate HPGL, G-code
- Брзина ротације мотора: 6000-24000 rpm
- Резолуција: 0.01mm
- Софтвер: Туре 3 (3D)
- Плексиглас/Гума/PVC/ABS/Дрво/Метал



Слика 6.4. Ласерска машина за гравирање MBL SD-1325 [13]

CNC Laser – AN 320

- Снага ласера: 40W
- Ласерска цев – “TONGLI” , трајност цеви 3.000 радних сати под пуном рандом снагом (до 6.000 с мањом снагом). “No name” цеви трају само око 800 сати.
- Софтвер : Corel Laser (рад директно из Corel Draw-a), компатибилан са свим “Corelima”
- Радна површина: 300 × 200 mm
- Помични сто: 50 mm горе-доле
- Дигитални дисплеј за приказ снаге
- Компресор за ваздух
- Пумпа за воду
- Вентилатор за одвод ваздуха са продужним цревом



Слика 6.5. Машина за ласерско гравирање CNC Laser – AN 320 [13]

CNC машина „Laser Sisma BSS-3D“

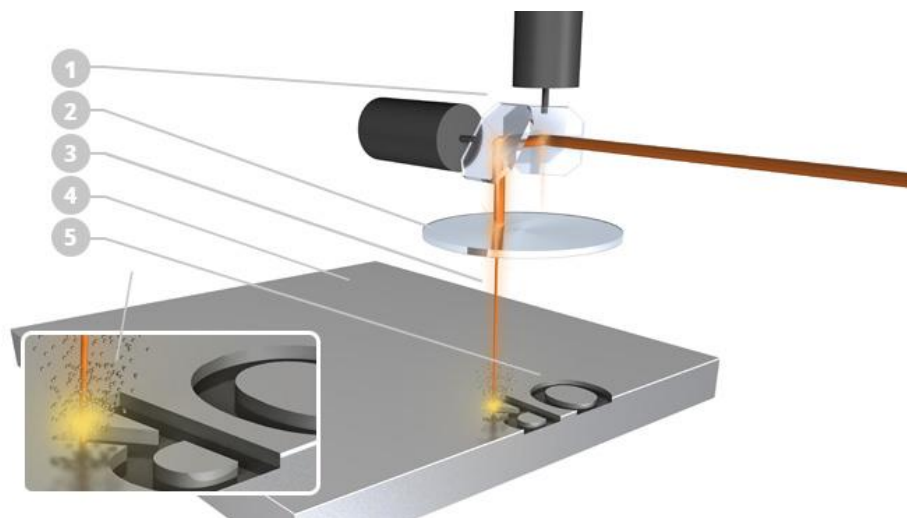
CNC машина „Laser Sisma BSS-3D“ (слика 5.6) је намењена искључиво за гравирање. Машина може гравирати плочасте и цилиндричне материјала. Гравура добијена овим ласером је веома високог квалитета, и оставља неизбрисив траг на материјалу. Систем обележавања ласером се састоји од главе ласера, која је непокретна, 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... [5]



Слика 6.6. Машина за ласерско гравирање Laser Sisma BSS-3D [8]

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 6.7.



Слика 6.7. Шема рада Laser Sisma BSS-3D [25]

1 - Мотори за ротацију призми са огледалима, 2 - објектив, 3 - ласерски сноп, 4 - предмет за гравирање, 5 - гравура

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 [5].

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, колоне 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]

CNC машина „LaserCut-107”

CNC машина „LaserCut-107” (слика 4.8.) је CO₂ ласер направљен првенствено за гравирање и сечење плочастих неметалних материјала. Ова машина врши резање, односно гравирање тако што јој се глава ласера помера по одређеној путањи [5]. Овом машином располаже Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.



Слика 4.8. CNC машина „LaserCut-107” [14]

Сви мотори, преносници и други функционални делови машине су повезани међусобом, чврсто су везани за носећу структуру машине.

Вођице на машини обезбеђују:

- Управљање правцем и смером кретања подскопа за који је алат причвршћен
- Апсорпцију 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 [5].

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.

Управљање машином LaserCut-107 се врши рачунаром и софтвер **PHCAD**.

Техничка спецификација машине обухвата:

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| • Спољне димензије | 1.600 mm x 1.150 mm x 875 mm |
| • Тежина: | 450 Kg |
| • Радни ходови алата (X, Y, Z) | 1.000 mm x 700 mm x 300 mm |
| • Максимална брзина кретања алата: | 70.000 mm/min |
| • Максимална снага ласера: | 80 W [5] |

Ласерска машина **Bystronic -Bystar 3015**

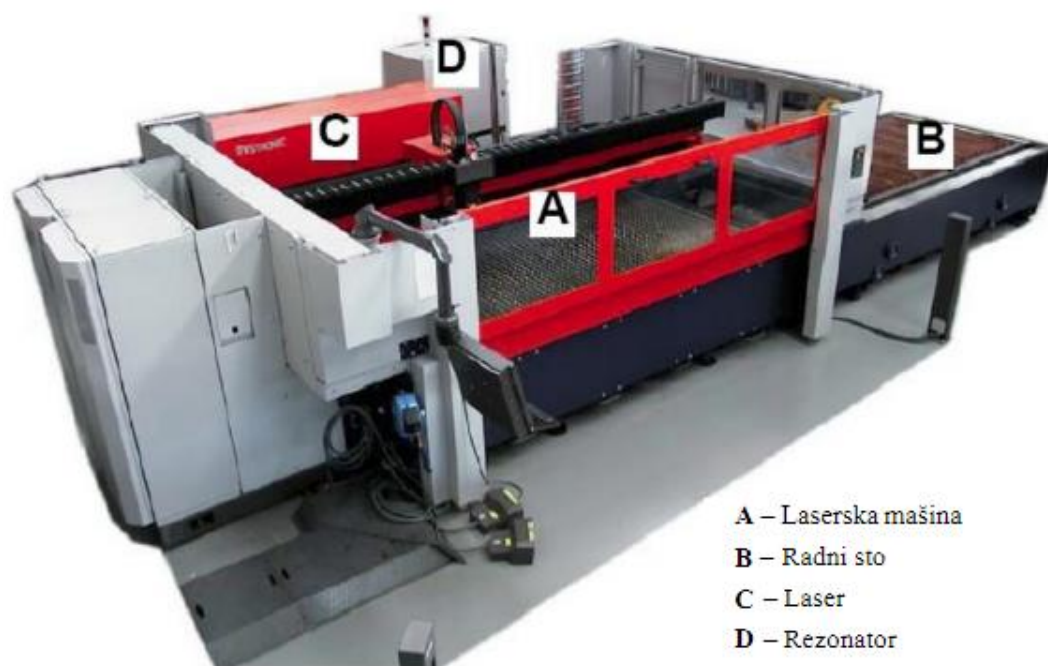
Ласер машина **Bystronic -Bystar 3015** (слика 4.9) је намењена за индустријско сечење и гравирање лимова и плочастих материјала већих дебелина од различитих материјала. У табели 4.1 дати су материјали и дебелине превиђени за сечење и гравирање на овој ласер машини а у табели 4.2 основне карактеристике машине [16].

Табела 4.1. Материјали предвиђени за сечење и гравирање [16]

Материјали предвиђени за сечење	
Челик дебелине 1 ÷ 15 mm	Stw 22, St 37-2
Челик дебелине 16 ÷ 25 mm	S235 JRG2, QSt 37-2
Нерђајући челик и челик отпоран на киселине дебелине 1 ÷ 25 mm	X5CrNi18 -10
Алуминијум дебелине 1 ÷ 15 mm	AlMg3
Месинг дебелине 1 ÷ 3 mm	CuZn40
Титанијум дебелине 1 ÷ 3 mm	Ti

Табела 4.2. Основне карактеристике машине **Bystronic -Bystar 3015** [16]

RADNI PROSTOR	X	3 048 mm
	Y	1 542 mm
Kretanje glave za sečenje	Z	170 mm
Maksimalna nosivost radnog stola		890 kg
Preciznost pozicioniranja		± 0.1 mm
Ponovljivost		± 0.5 mm
Brzina pozicioniranja po X i Y osi istovremeno		113 m/min
Maksimalno ubrzanje		4.5 m/s ²
Maksimalna brzina sečenja		50 m/min
Maksimalna snaga lasera		5 200 W
Maksimalne dimenzije table predviđene za sečenje 3 000 mm x 1 500 mm		

Слика 4.9. Ласер машина *Bystronic -Bystar 3015* [16]

Основне карактеристике ласерског модула су дате у табели 4.3.

Maksimalna snaga lasera	5 200 W
Laser medijum	CO
Talasna dužina snopa	10 600 nm
Prečnik laserskog snopa	20 mm
Divergencija laserskog snopa	≤ 2
Polarizacija	kružna

Табела 4.3. Техничке карактеристике ласерског модула [16]

6.1. Примери примене ласерског гравирања

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

Гравирање ласером пружа могућност да се на материјалу по избору исцртају ком плексни облици, логотипи и текст уз максималну финоћу линија. Ово је нарочито значајно за маркетиншке агенције које на овај начин могу својим клијентима понудити персонализоване рекламне поклоне, елементе ентеријера и сл.

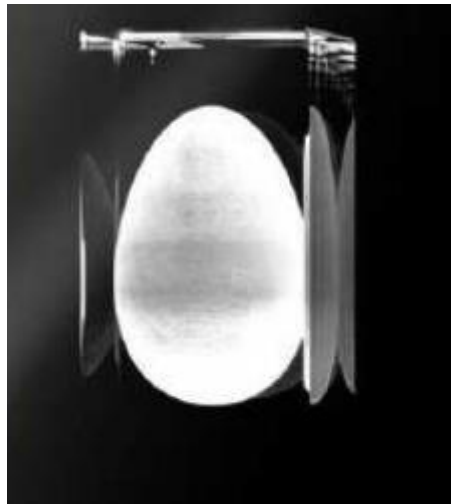
Стандардне граверске послове ласер обавља без проблема, тако да се могу гравирати и ИД картице, беџеве, печате, плочице за означавање, као и многе друге предмете. Оно што би требало имати у виду јесте то да је брзина гравирања драстично мања него брзина сечења.

Материјали који се могу обрађивати су разни: дрво, ламинатна пластика, акрил, стакло, пресвучени материјали, керамика, делрин, платно, кожа, мермер, папир, анодизирани алуминијум, гума, фурнир, фиберглас, обојени материјали, метал спреман за ласерско гравирање итд.

На слици 6.24. су дати неки примери делова израђени обрадом ласерског гравирања.



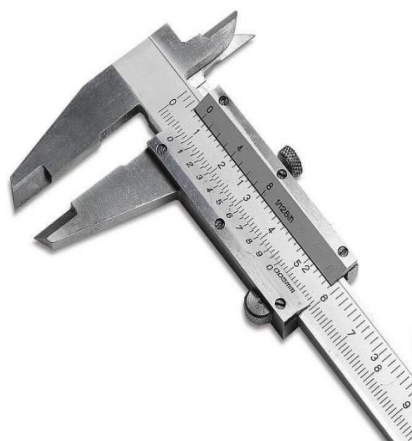
Привезак – 3D мотив



3D мотив у стаклу



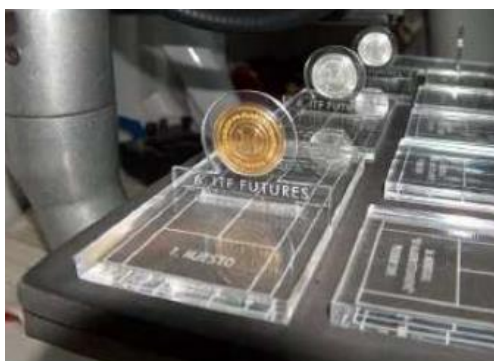
*3D ласерско гравирање
(кристал)*



Гравура на мерилу



Гравура на чаши (стакло)



Медаље



Гравирање оружја

Слика 6.24. Примери примене ласерског гравирања

7. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ГРАВИРАЊА ЛАСЕРОМ

У оквиру овог рада вршено је испитивање утицаја параметара услова гравирања ласером на добијени траг на различитим материјалима. Анализиран је утицај коришћене снаге ласера, брзина гравирања и број пролаза. Мерени су дубина и висина настале гравуре и ширине добијеног трага на различитим висина. Добијени резултати су показали да параметри услова гравирања ласером значајно утичу на параметре добијеног трага.

7.1 Услови испитивања

Реализована испитивања су вршена на различитим материјалима: челик у побољшаном стању, алуминијум и месинг. Изабрани су ови материјали јер се они користе за израду појединих делова наоружања. За израду стрелачког оружја и оружја уопште се највише користе челик и алуминијум, а месинг за израду муниције различитих калибара.

На плочицама за испитивање гравирани су линије ширине 0,1 mm и дужине 10 mm. Коришћене су различите вредности параметара:

- снага ласера: 55%, 80% и 100% од максималне снаге која износи 70W,
- брзина гравирања 20 mm/s, 100 mm/s, 250 mm/s и 500 mm/s,
- број пролаза: 1, 2 и 3.

Гравирањем је добијено 6 истих паралелних линија на растојању 0.75 mm. Испитивања су имала за циљ донешење закључка о утицају услова снаге ласера, брзине гравирања и броја пролаза на квалитет гравуре.

7.1.1 Карактеристике машине за гравирање „ZetalaseTM XL”

Испитивања су реализована у предузећу "Завод за испитивање оружја и муниције" Крагујевац на ласерској машини „ZetalaseTM XL” фирме ТУКМА, SAD, слика 7.1. Ова фирма је специјализована за производњу ласерских машина за обележавање и гравирање. Радни простор је велики и максимално је искоришћен. Основне карактеристике машине су:

- Поседује ваздушно хлађење, без потребе за посебним одржавањем,
- Намењена је за обележавање и гравирање на челику, лаким и обојеним материјалима и већини пластичних маса,
- поседује аутоматски режим рада са аутоматским стартом након затварању врата,
- Поседује „МОРА“ фибер ласера од 10W до 70W, са избором таласних дужина
- Предња врата се пнеуматски покрећу за унос предмета и располажу са уграђеним сигурносним механизмом,
- Фокусна висина се може програмирати или ручно подешавати
- Радна површина величине је 760x600 mm са Т жлебовима,
- Располаже са различитим фокусним сочивима од 163 mm до 410 mm, који омогућују различито радно поље.
- Интегрисани рачунар са одговарајућим софтвером,

Табела 7.1. Техничке карактеристике машине *Zetalase™ XL*

Technical Specifications	
System Dimensions / Weight	32"W x 52"L x 74"H / Approx. 500lbs
Standard Marking Field	160S (100mm x 100mm) (3.93" x 3.93")
Standard Max Part Size (160S Lens)	30"W x 24"L x 20"H or (mm) 762W x 609L x 508 15"W x 42"L (Using Center Wall Opening) (mm) 381W x 1,066L
Available Marking Lens Upgrade and Marking Fields	254S (140mm x 140mm, 5.5" x 5.5") 254L (165mm x 165mm, 6.5" x 6.5") 330L (200mm x 200mm, 7.87" x 7.87") 420L (260mm x 260mm, 10.2" x 10.2")
Maximum Part Height with Lens Upgrade	(254S) 15.65"/396mm (254L) 12.5"/317mm (330L) 11.75"/298mm (420L) 6"/152mm
Laser Type	Ytterbium Fiber
Wavelength	1062nm +/- 3nm
Wattage	20W / 30W / 50W
Frequency Range	1kHz - 500kHz (20/50W) 1kHz-1,000kHz (30W)
Pulse Duration	(20/50W) Selectable, 260ns or 40ns (30W) 29 Selectable from 220ns - 15ns
Operative Ambient Temperature Range	45° F to 110° F
Cooling	Air Cooled
Input Power	Power Sensing 110-240VAC 50/60Hz
Aiming Beam	(2) Class IIM Red Diode (635nm)
PC	Integrated Windows PC w/Monitor, Keyboard, Mouse
Available Ports	Diagnostic/USB/VGA/Ethernet
Warranty	36 Month Comprehensive Unlimited Hours
Documentation	USB Drive / Quick Start Guide Video Tutorials / Software Manual Safety Manual / Laser Settings Manual (Manuals Provided in Digital Copy)
Optional Accessories	• Full Size Rotary Device (360° Marking) • Fume Extraction • Footswitch for Start Mark

На слици 7.2 приказана је Ласер машина “*Zetalase™ XL*“ у предузећу Завод за испитивање оружја и муниције, Крагујевац и припремљена плочица за гравирање.



Слика 7.1. Ласер машина “Zetalase™ XL“ и њен радни простор



Слика 7.2. Ласер машина “Zetalase™ XL“ у предузећу Завод за испитивање оружја и муниције, Крагујевац и припремљена плочица за гравирање

7.1.2 Уређај за мерење топографије ISR-C002

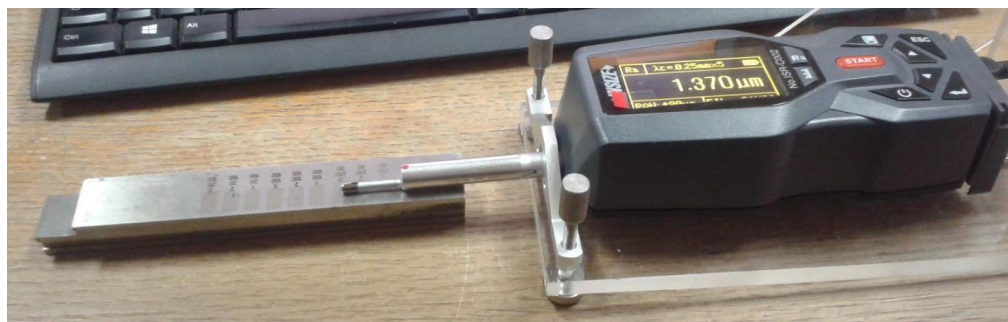
Уређај ISR-C002, фирме INSIZE, Кина је уређај за испитивање храпавости површина, слика 7.3. То је преносни уређај и погодан је за мерење на различитим површинама. Уређај је једноставан за руковање, мерење се обавља брзо, поседује веома стабилну и високу тачност мерења.

Мерење храпавости, односно великог броја параметара топографије површине се врши у складу са различитим националним и међународним стандардима. Резултати мерења се дигитално / графички приказују на екрану уређаја а такође могу бити повезани директно на штампач. Уређај поседује могућност повезивања са рачунаром и управљање мерењем помоћу одговарајућег софтвера. Резултати мерења се могу чувати у различитим форматима.



Слика 7.3: Уређај “ISR-C002” за мерење храпавости површина

У оквиру реализације испитвања у овом раду уређај “ISR-C002” је коришћен за профилометрисање испитиваних трагова гравирања ласером. При мерењима нису одређивани параметри топографије већ висински и дужински параметри добијеног трага. На слици 7.4 приказана је гравирана плочица и начин профилометрисања трагова гравирања.

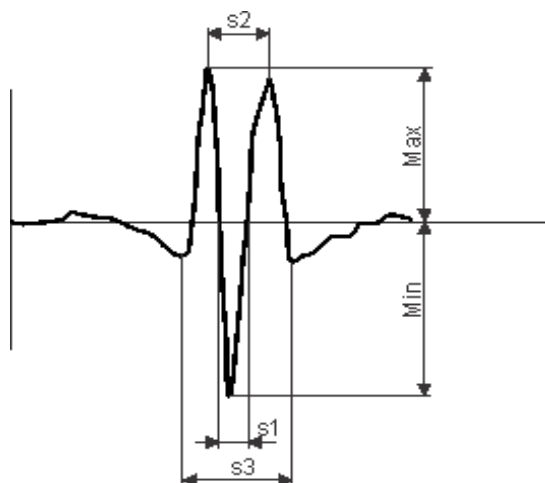


Слика 7.4: Профилометрисање трагова гравирања

Дужина профилометрисања је била 1.25 mm, при чему су мерена два трага гравирања. Мерење је вршено на прва два од 6 трагова и то на средини дужине од 10 mm. мерене величине код трага гравирања су биле:

- *Max* - максимална висина трага гравирања
- *Min* - максимална дубина трага гравирања
- *s1* - ширина трага удубљења на основној површини
- *s2* - максимална ширина трага на узвишењу,
- *s3* - максимална ширина у подножју трага

На слици 7.5 приказан је карактеристичан облик трага гравирања. Може се видети да је на срдњишем делу дошло до уклањања материјала, али да је од уклоњеног материјала направљено узвишење. Разлог оваквог трага гравирања је због тога што се гравирање изводи без коришћења радног гаса чија је улога интензивно уклањање растопљеног материјала.



Слика 7.5. Карактеристичан облик трага гравирања

7.3 Резултати испитивања

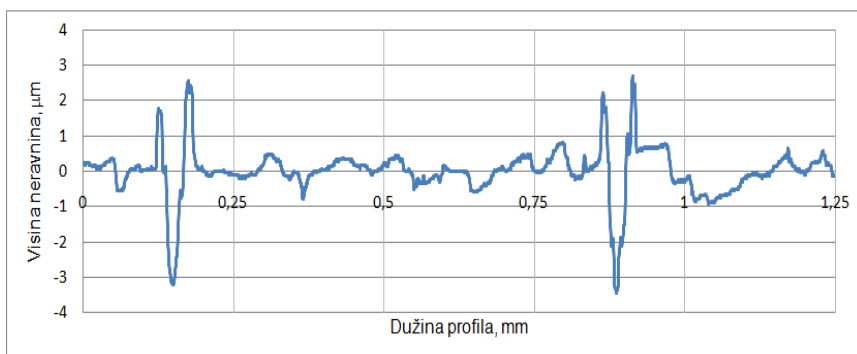
7.3.1 Гравирање на челику

Велика разноврсност и могућност легирања, термичке обраде и пластичне и механичке обраде, уз релативно ниску цену производње челик чине и даље најраспрострањеније коришћеним материјалом у области производње делова наоружања. Примена производа од челика је од најмањих делова стрелачког оружја па до сложених система наоружања и војне опреме. Код наменских производа на челичним деловима се налазе ознаке произвођача које углавном описују калибар оружја, број, назив произвођача, модел, итд. Због тога је интересно вршити истраживање у области гравирања делова од челика.

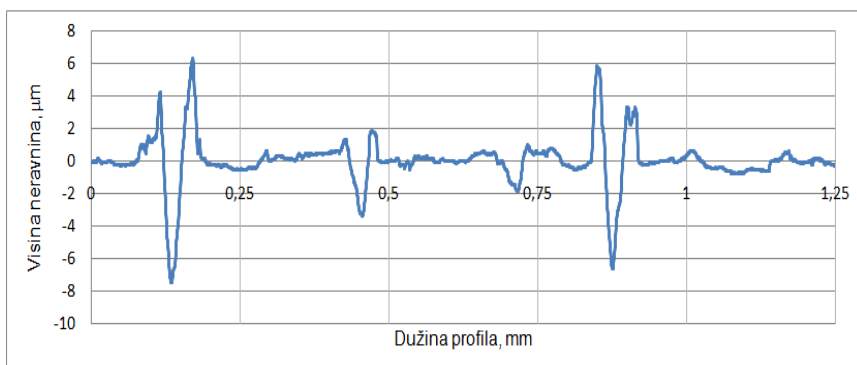
У табели 7.2 су приказани резултати мерења трагова гравирања на плочицама од челика.

Табела 7.2. Резултати испитивања гравирања на челику

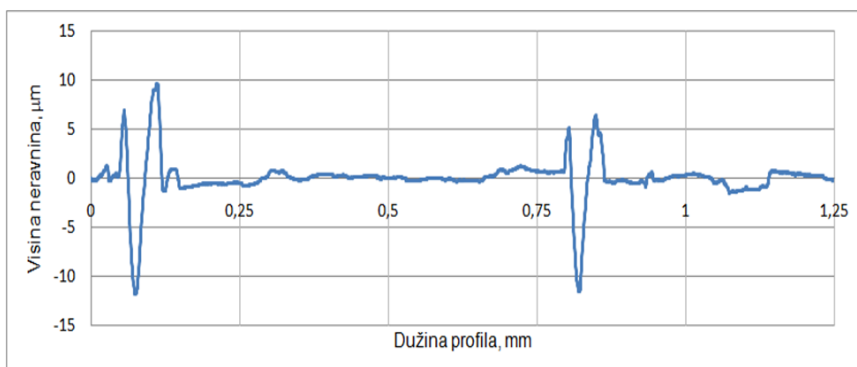
Redni broj	Број пролаза	V mm/s	P %	Min μm	Max μm	s1 mm	s2 mm	s3 mm
1	1	500	55	3,45	2,71	0,03	0,05	0,08
2	2	500	55	7,45	6,27	0,03	0,055	0,08
3	3	500	55	11,8	9,63	0,03	0,05	0,08
4	1	250	80	10,66	6,86	0,03	0,05	0,08
5	2	250	80	17,13	11,4	0,03	0,06	0,09
6	3	250	80	16,24	13,78	0,03	0,06	0,11
7	1	100	100	23,8	18,81	0,03	0,07	0,14
8	2	100	100	19,85	23,31	0,03	0,08	0,14
9	3	100	100	16,99	25,48	0,02	0,08	0,17
10	1	20	100	12,84	22,32	0	0,07	0,09
11	2	20	100	13,23	25,33	0,04	0,07	0,1
12	3	20	100	14,17	20,1	0,04	0,08	0,11



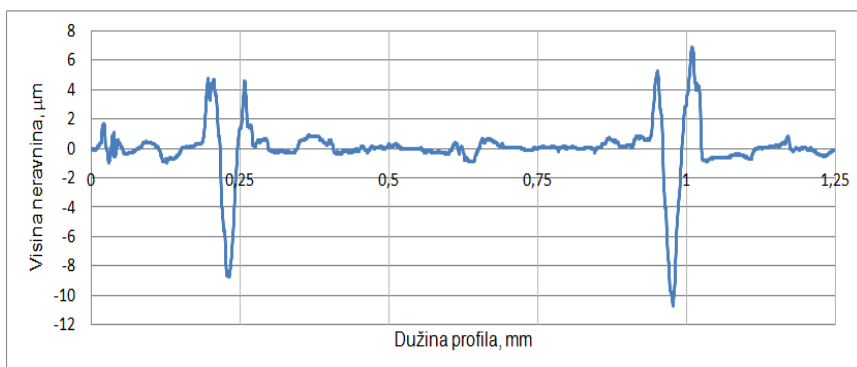
Слика 7.6. Профил гравуре на челику (1 пролаз, снага 55%, брзина 500 mm/s)



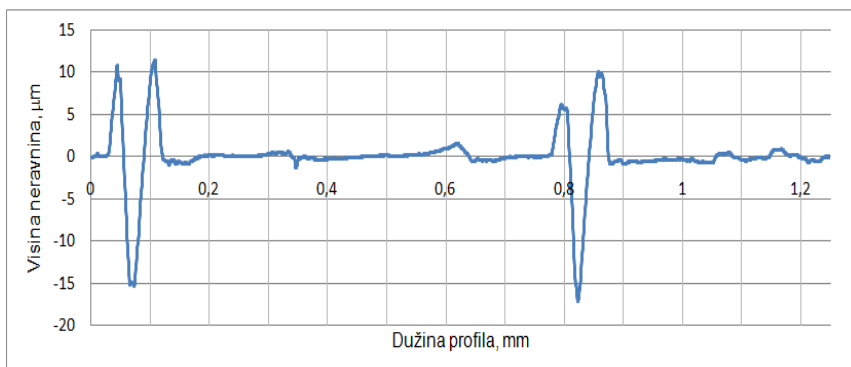
Слика 7.7. Профил гравуре на челику (2 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



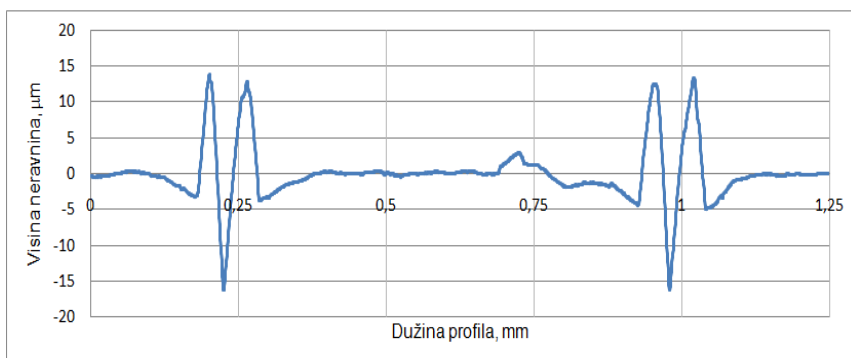
Слика 7.8. Профил гравуре на челику (3 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



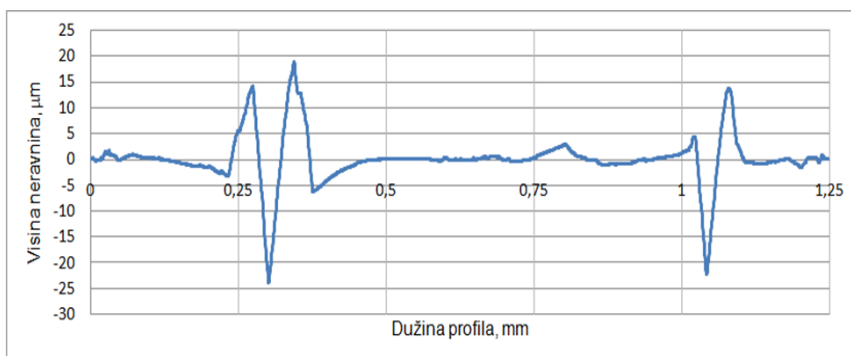
Слика 7.9. Профил гравуре на челику (1 пролаз, снага 80%, брзина 250 mm/s)



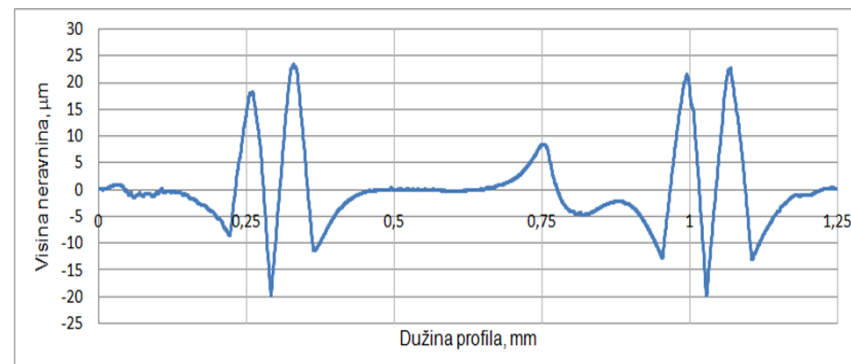
Слика 7.10. Профил гравуре на челику (2 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



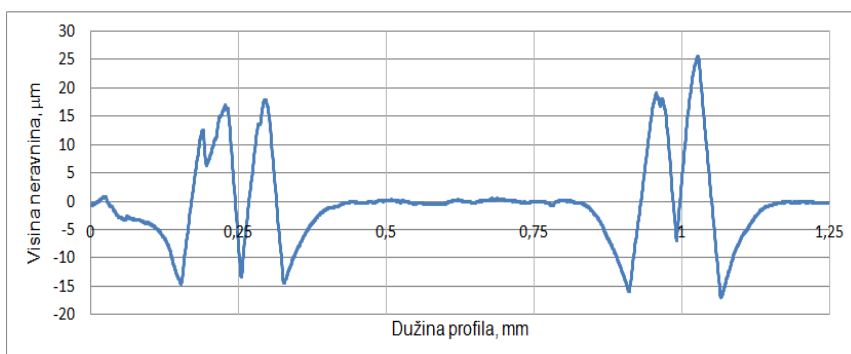
Слика 7.11. Профил гравуре на челику (3 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



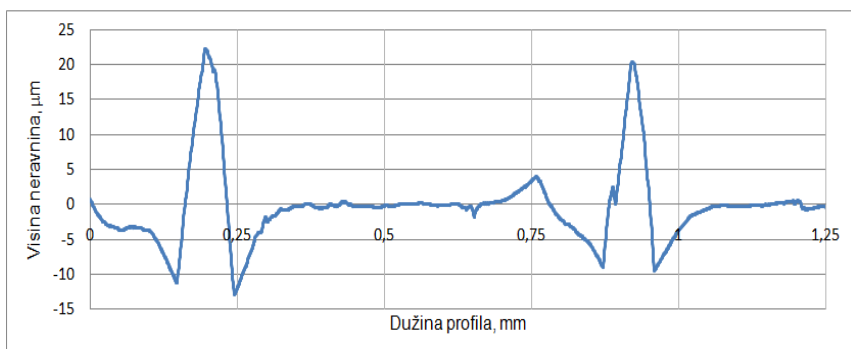
Слика 7.12. Профил гравуре на челику (1 пролаз, снага 100%, брзина 100 mm/s)



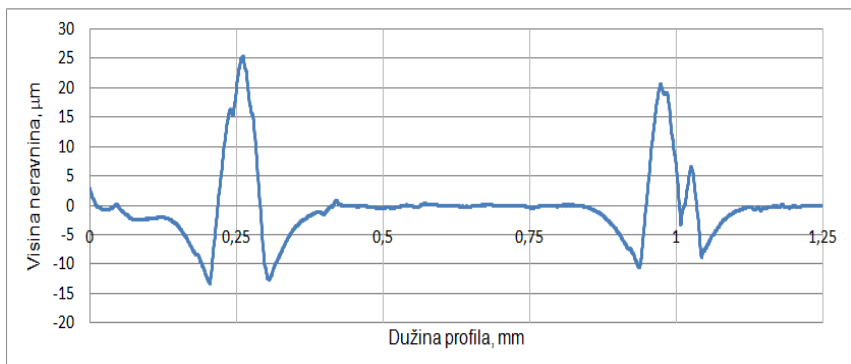
Слика 7.13. Профил гравуре на челику (2 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



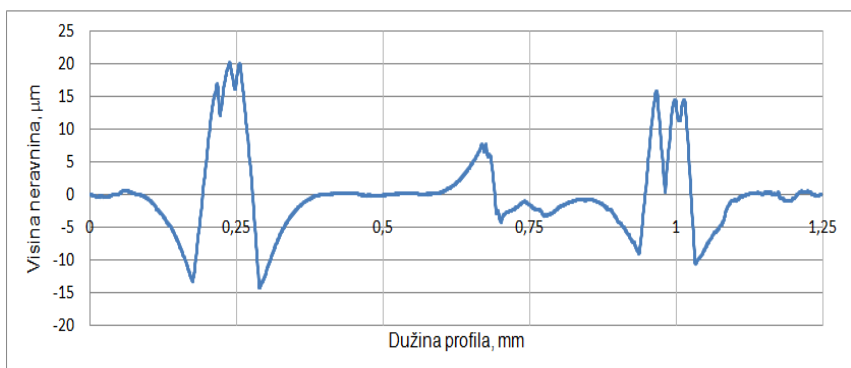
Слика 7.14. Профил гравуре на челику (3 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



Слика 7.15. Профил гравуре на челику (1 пролаз, снага 20%, брзина 100 mm/s)

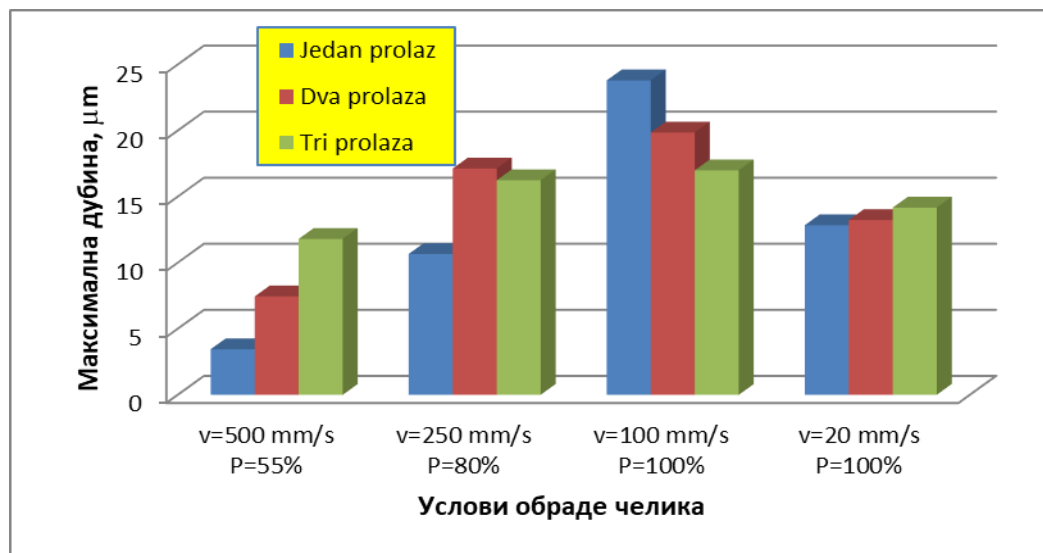


Слика 7.16. Профил гравуре на челику (2 пролаза, снага 20%, брзина 100 mm/s)



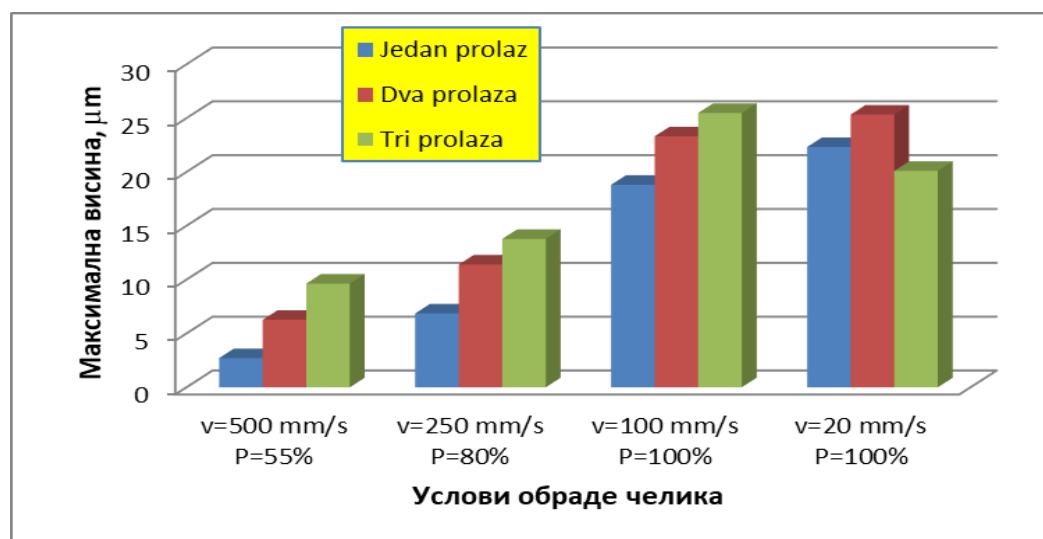
Слика 7.17. Профил гравуре на челику (3 пролаза, снага 20%, брзина 100 mm/s)

На слици број 7.18 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на челику на максималну дубину гравуре (слика 7.5 - *Min*). Са дијаграма се може видети да са смањењем брзине гравирања и повећањем снаге, максимална дубина гравуре расте. Даљим смањењем брзине гравирања дубина гравуре опада. Код великих брзина гравирања и мањих снага са повећањем броја пролаза расте максимална дубина гравуре док се код мањих брзина при максималној снази, са повећањем броја пролаза смањује дубина гравуре. За веома малу брзину гравирања број пролаза нема утицаја на максималну дубину гравуре.



Слика 7.18: Максимална дубина гравуре на челику

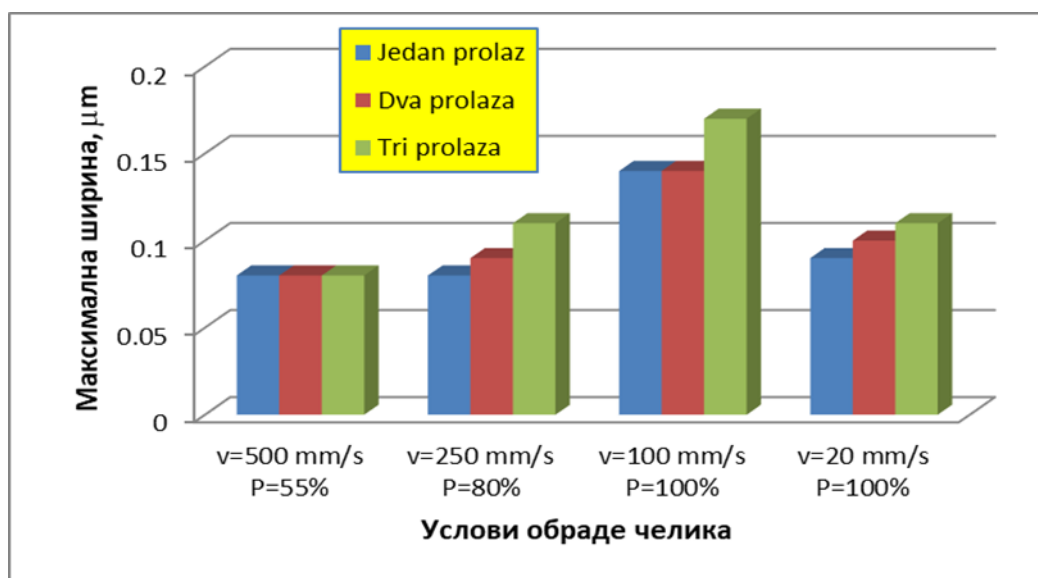
На слици број 7.19 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на челику на максималну висину добијеног испупчења гравуре (слика 7.5 - *Max*). Са дијаграма се може видети да са повећањем снаге и смањења брзине гравирања, максимална висина гравуре расте. Код већих брзина гравирања, независно од снаге, са повећањем броја пролаза расте максимална висина гравуре. Код најмање коришћене брзине гравирања и максималне снаге, повећање броја пролаза нема значајнији утицај на максималну висину гравуре.



Слика 7.19: Максимална висина гравуре на челику

Анализирајући резултате мерења ширина добијеног трага гравирања, величине s_1 , s_2 и s_3 (слика 7.5), може се закључити да услови гравирања немају значајан утицај на s_1 - ширину трага удубљења на основној површини и s_2 - максималну ширину трага на узвишењу, док на s_3 - максималну ширину у подножју трага имају утицај. Из ових разлога даља анализа резултата није обухватала величине s_1 и s_2 .

На слици број 7.20 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на челику на максималну ширину у подножју трага гравуре (слика 7.5 - s_3). Са дијаграма се може видети да са смањењем брзине гравирања и повећањем снаге, максимална ширина у подножју гравуре расте. Са даљим повећањем брзине при максималној снази максимална ширина у подножју гравуре опада. При највећој брзини гравирања и најмањој коришћеној снази број пролаза нема утицај на ову мерену величину. Са даљим смањењем брзине гравирања и повећањем снаге са повећањем броја пролаза расте максимална ширина у подножју гравуре.



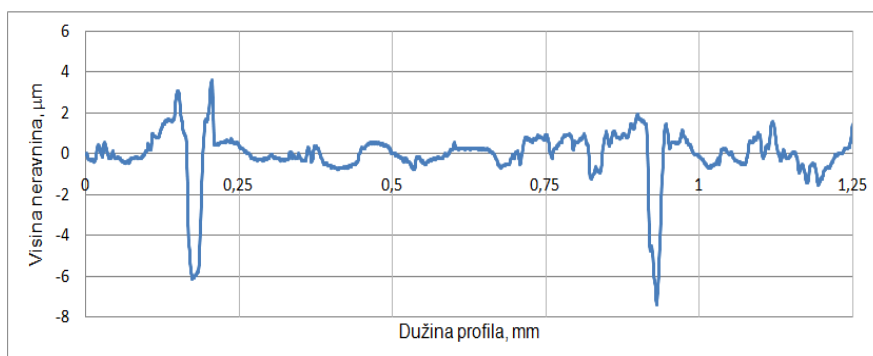
Слика 7.20: Максимална ширина у подножју гравуре на челику

7.3.2 Гравирање на алуминијуму

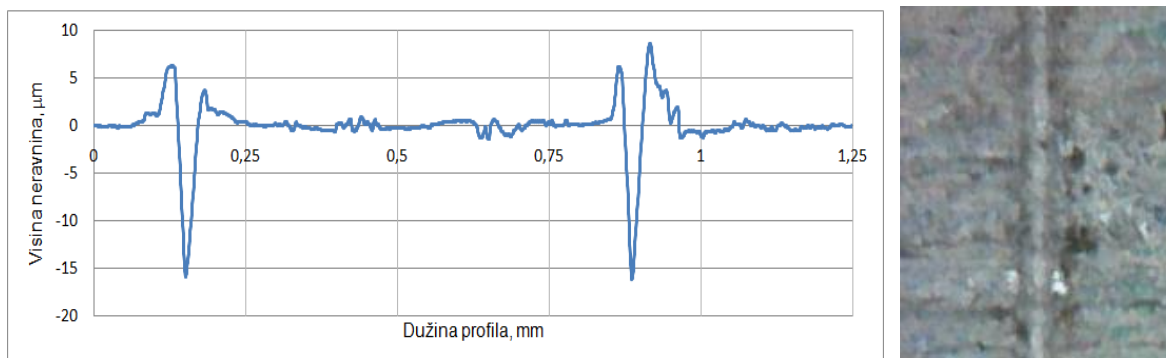
Због своје мале густине, алуминијум се често употребљава у ради смањења тежине како код стрелачког наоружања тако и код борбених сложених система. То се нарочито односи на наоружање и војну опрему. У легурама са магнезијумом, силицијумом и другим металима, алуминијуму се може повећати чврстоћа, која се може поредити са челиком. Код наменских производа на алуминијумским деловима се налазе ознаке произвођача које углавном описују калибар оружја, број, назив произвођача, модел, итд. У табели 7.3 дати су резултати мерења гравираних узорака од алуминијума.

Табела 7.3. Резултати испитивања гравирања на алуминијуму

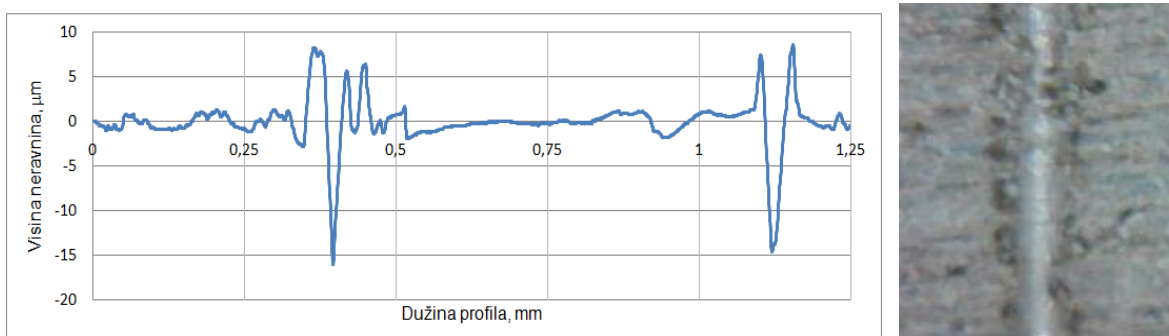
Redni broj	Број пролаза	V mm/s	P %	Min μm	Max μm	s1 mm	s2 mm	s3 mm
1	1	500	55	7,35	3,6	0,03	0,06	0,07
2	2	500	55	16,15	8,54	0,03	0,06	0,085
3	3	500	55	16	8,54	0,03	0,065	0,085
4	1	250	80	18,76	7,21	0,03	0,06	0,08
5	2	250	80	19,46	8,59	0,03	0,06	0,08
6	3	250	80	17,83	11,85	0,03	0,065	0,11
7	1	100	100	13,78	12,54	0,025	0,06	0,1
8	2	100	100	12,29	19,95	0,02	0,055	0,11
9	3	100	100	14,71	23,36	0,02	0,055	0,13
10	1	20	100	13,87	16,64	0	0,07	0,13
11	2	20	100	19,5	20,74	0	0,07	0,15
12	3	20	100	23,01	24,39	0	0,08	0,18



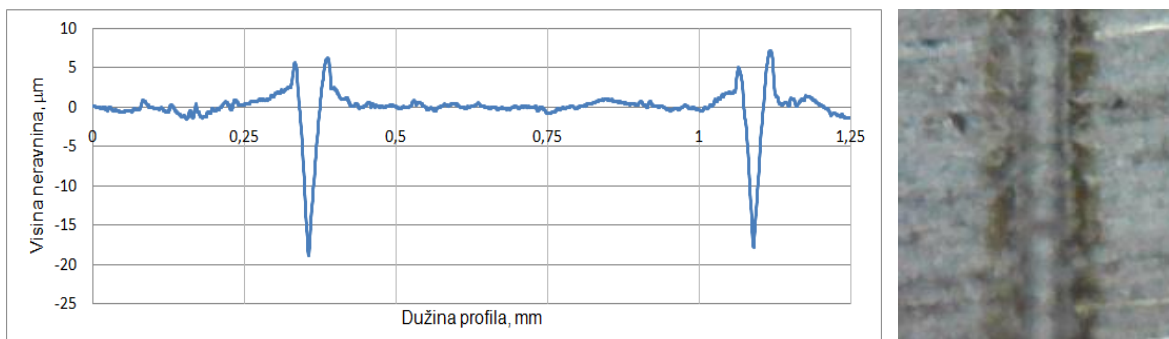
Слика 7.21. Профил гравуре на алуминијуму (1 пролаз, снага 55%, брзина 500 mm/s)



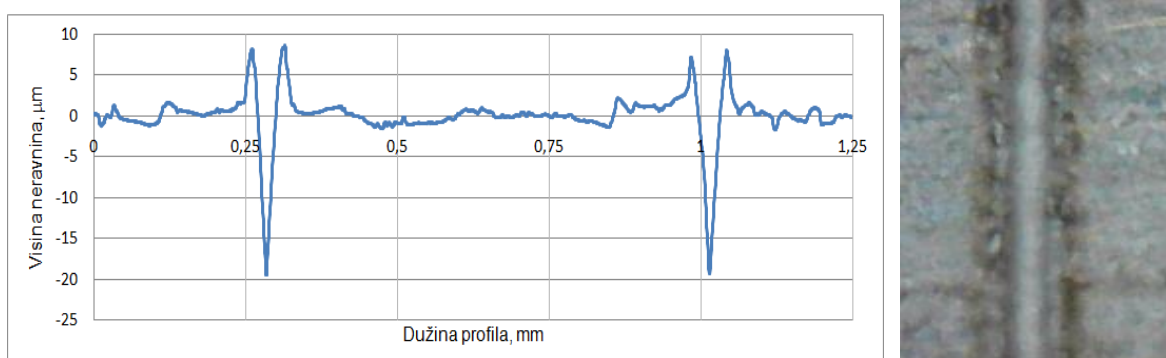
Слика 7.22. Профил гравуре на алуминијуму (2 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



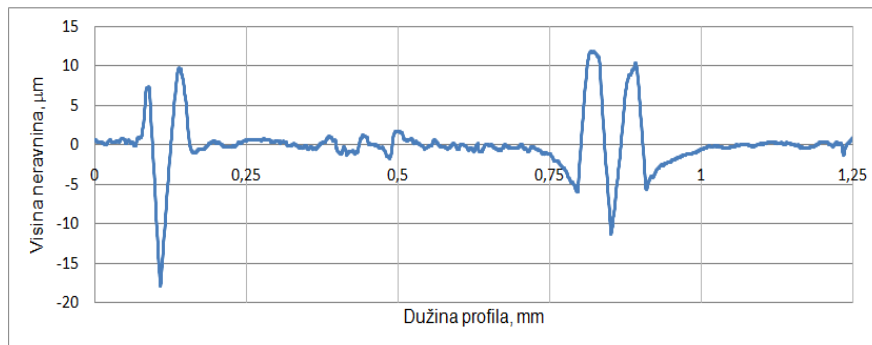
Слика 7.23. Профил гравуре на алуминијуму (3 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



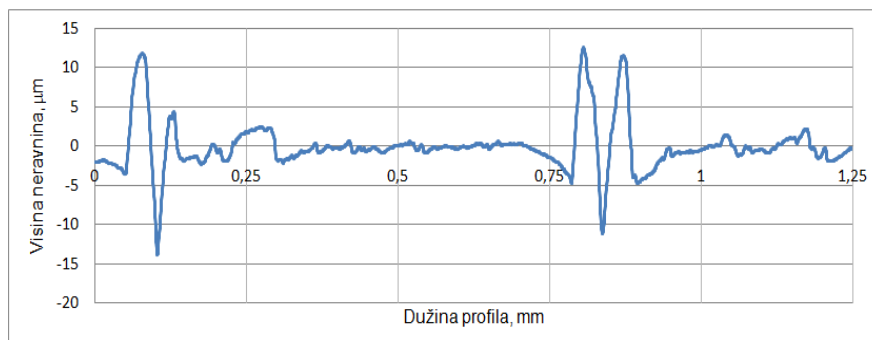
Слика 7.24. Профил гравуре на алуминијуму (1 пролаз, снага 80%, брзина 250 mm/s)



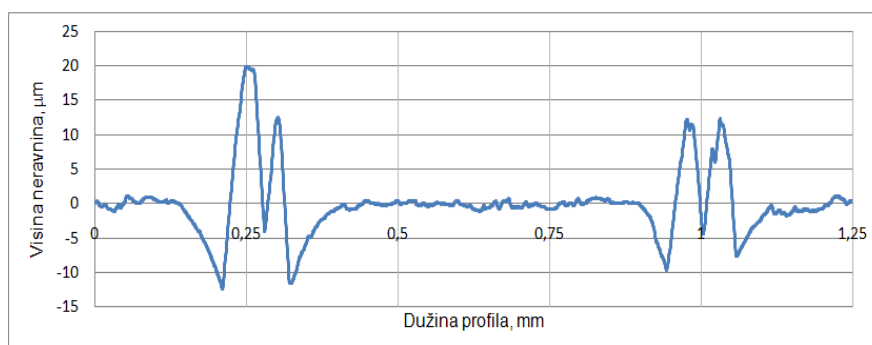
Слика 7.25. Профил гравуре на алуминијуму (2 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



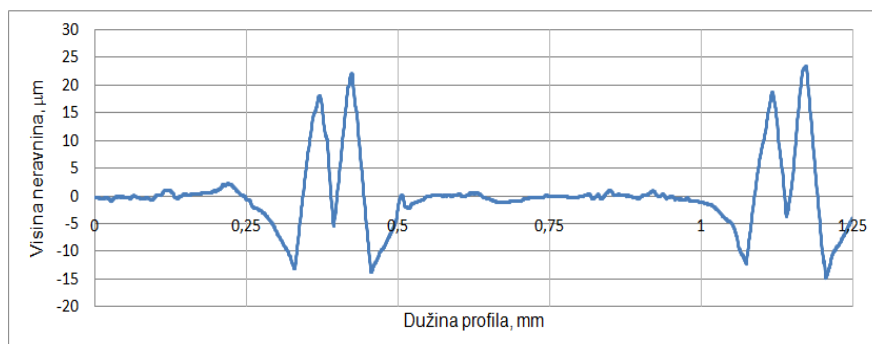
Слика 7.26. Профил гравуре на алуминијуму (3 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



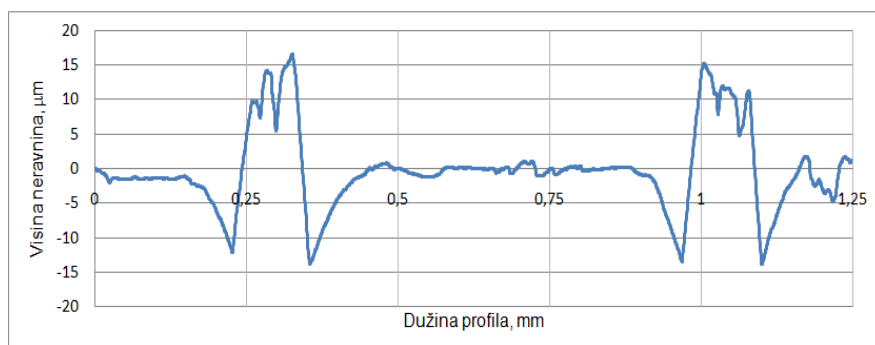
Слика 7.27. Профил гравуре на алуминијуму (1 пролаз, снага 100%, брзина 100 mm/s)



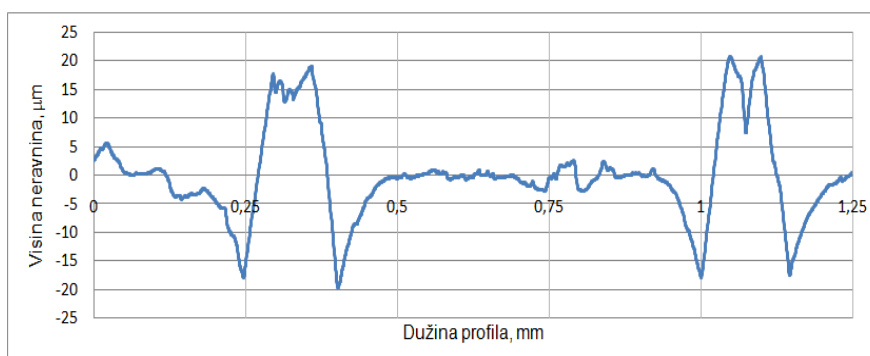
Слика 7.28. Профил гравуре на алуминијуму (2 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



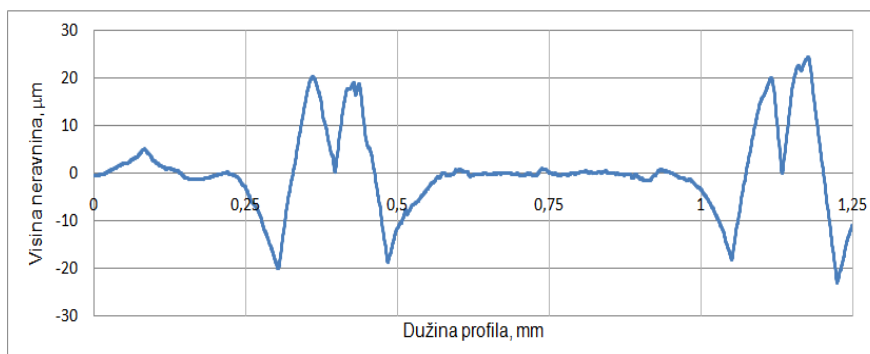
Слика 7.29. Профил гравуре на алуминијуму (3 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



Слика 7.30. Профил гравуре на алуминијуму (1 пролаз, снага 100%, брзина 20 mm/s)

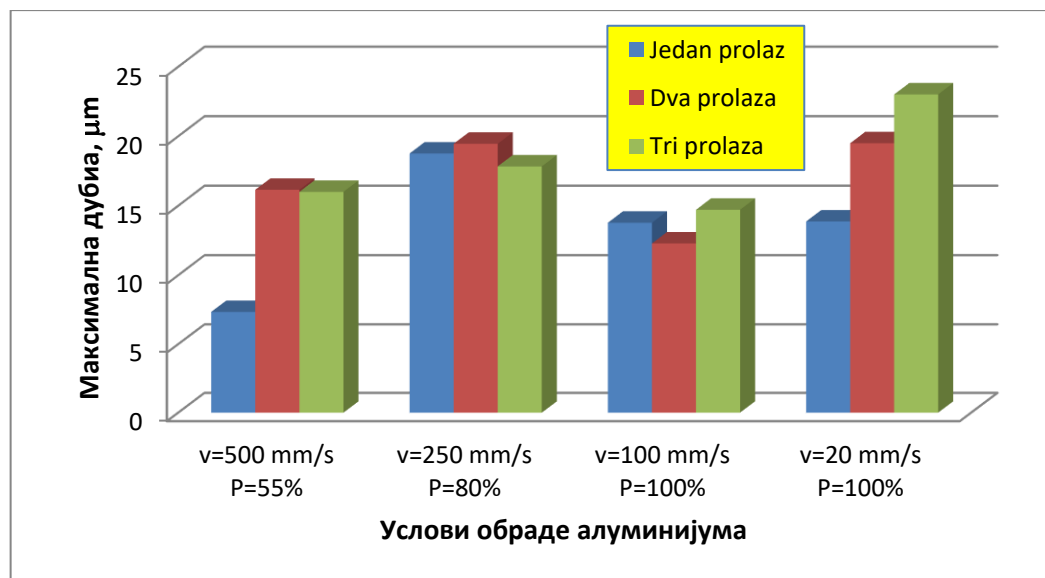


Слика 7.31. Профил гравуре на алуминијуму (2 пролаза, снага 100%, брзина 20 mm/s)



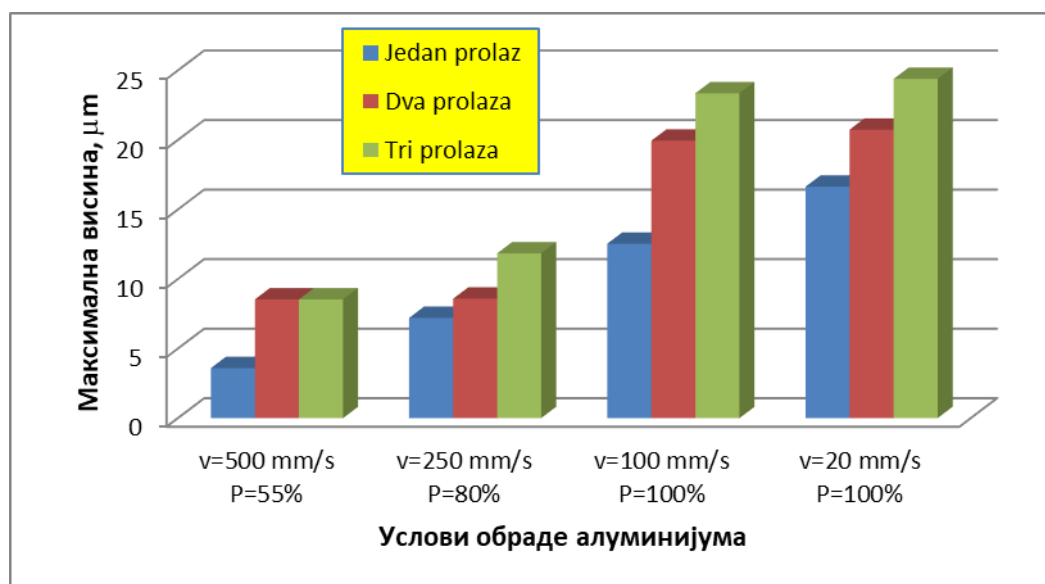
Слика 7.32. Профил гравуре на алуминијуму (3 пролаза, снага 100%, брзина 20 mm/s)

На слици број 7.33 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на алуминијуму на максималну дубину гравуре (слика 7.5 - *Min*). Са дијаграма се може видети да услови гравирања немају значајнији утицај. Максимална дубина се креће у границаја од 13 до 19 μm , у највећем броју случајева. Најмања дубина је код највеће брзине гравирања и најмање снаге при једном пролазу, а највећа дубина је код највеће снаге и најмање брзине гравирања код 3 пролаза. Са повећањем броја пролаза само при најмањој брзини гравирања долази до повећања дубине гравуре.



Слика 7.33: Максимална дубина гравуре на алуминијуму

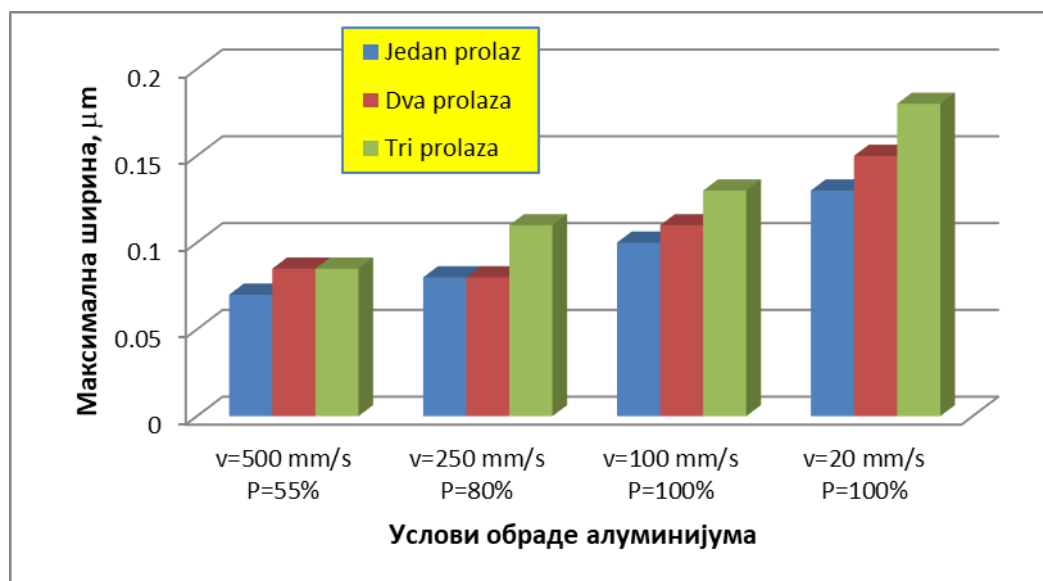
На слици број 7.34 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на алуминијуму на максималну висину добијеног испупчења гравуре (слика 7.5 - *Max*). Са дијаграма се може видети да са повећањем снаге и смањења брзине гравирања, максимална висина гравуре расте. Такође, са повећањем броја пролаза максимална висина гравуре расте. Са слика 7.21 до 7.32 се може закључити да при максималној снази и мањим брзинама гравирања не долази до значајније дубине гравуре, чак доминира испупчење гравуре изнад основне површине предмета на месту путање ласерског снопа.



Слика 7.34: Максимална висина гравуре на алуминијуму

Анализирајући резултате мерења ширина добијеног трага гравирања на алуминијуму, величине s_1 , s_2 и s_3 (слика 7.5), може се закључити да као и код челика, услови гравирања немају значајан утицај на s_1 и s_2 , док на s_3 - максималну ширину у подножју трага имају утицај.

На слици број 7.35 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на алуминијуму на максималну ширину у подножју трага гравуре (слика 7.5 - s_3). Са дијаграма се може видети да са смањењем брзине гравирања и повећањем снаге, максимална ширина у подножју гравуре расте. Са даљим повећањем брзине при максималној снази максимална ширина у подножју гравуре опада. При највећој брзини гравирања и најмањој коришћеној снази са повећањем броја пролаза мерена ширина расте.



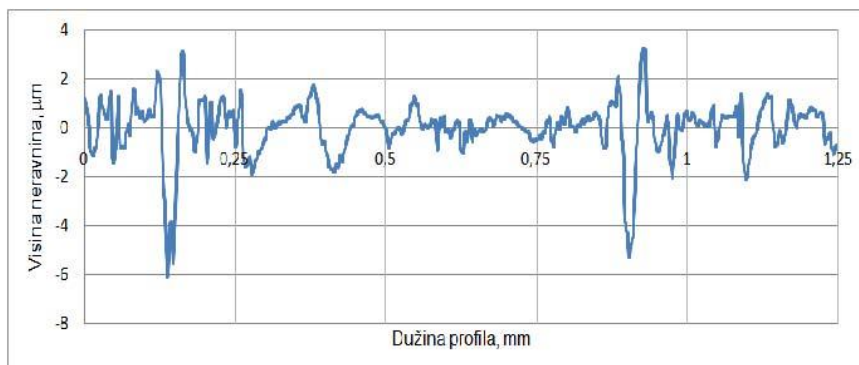
Слика 7.35: Максимална ширина у подножју трага гравуре на алуминијуму

7.3.3 Гравирање на месингу

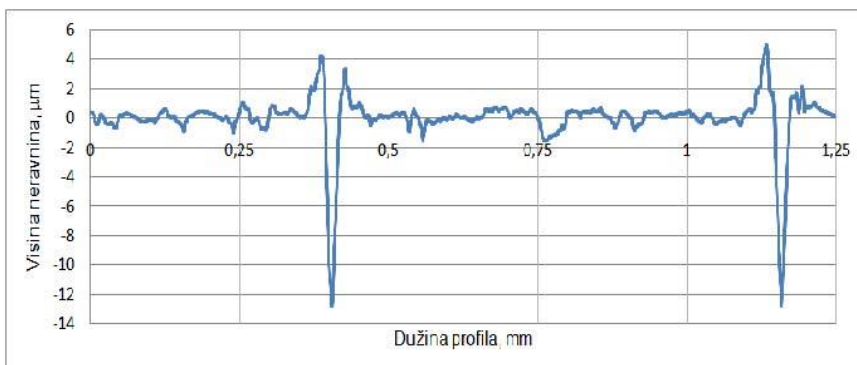
Месинг је легура бакра и цинка. У зависности од њихове размере, својства месинга се мењају у веома великом распону. Месинг се користи у свим гранама индустрије. Примењује се у изради лимова, цеви и жица, док у наменској индустрији највећу примену има у производњи муниције. Чаура метка се најчешће прави од месинга због мањег хабања лежишта метка. Месингане чауре се праве за калибре стрелачке муниције од “22 L.R.” до артиљериске муниције калибра “155 mm”. Искоришћене чауре различитих калибара су повољне за рециклажу тако да се у велике количине чаура рециклира. На месинганим чаурама се налазе ознаке произвођача које углавном описују калибар метка (пројектила), дужину чауре, назив произвођача и годину производње. У табели 7.4 и сликама од 7.36 до 7.47 су приказани резултати мерења.

Табела 7.4. Резултати испитивања гравирања на месингу

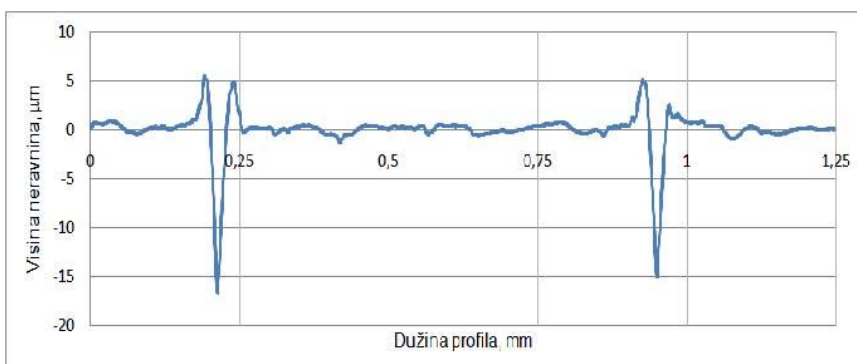
Redni broj	Број пролаза	V mm/s	P %	Min μm	Max μm	s1 mm	s2 mm	s3 mm
1	1	500	55	6,07	3,25	0,03	0,045	0,05
2	2	500	55	12,79	4,98	0,03	0,045	0,07
3	3	500	55	16,59	5,48	0,03	0,045	0,07
4	1	250	80	13,73	5,92	0,03	0,06	0,09
5	2	250	80	18,52	10,17	0,03	0,06	0,09
6	3	250	80	14,71	11,45	0,03	0,06	0,09
7	1	100	100	14,22	12,44	0,03	0,06	0,09
8	2	100	100	7,35	16,79	0,02	0,05	0,09
9	3	100	100	12,59	19,95	0,02	0,05	0,11
10	1	20	100	8,93	15,75	0,02	0,05	0,09
11	2	20	100	13,48	22,91	0	0,05	0,11
12	3	20	100	17,04	28,1	0	0,03	0,11



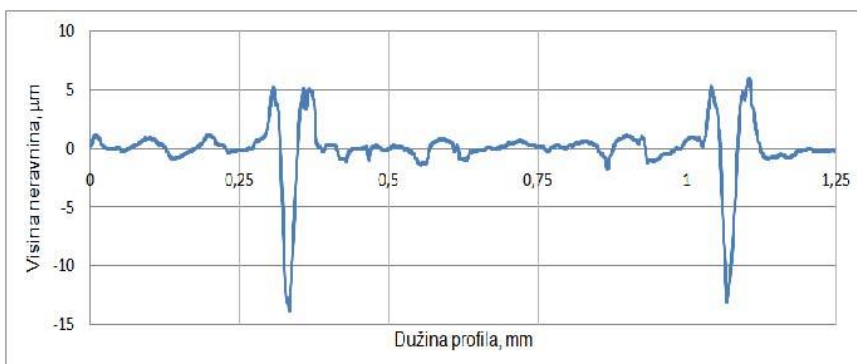
Слика 7.36. Профил гравуре на месингу (1 пролаз, снага 55%, брзина 500 mm/s)



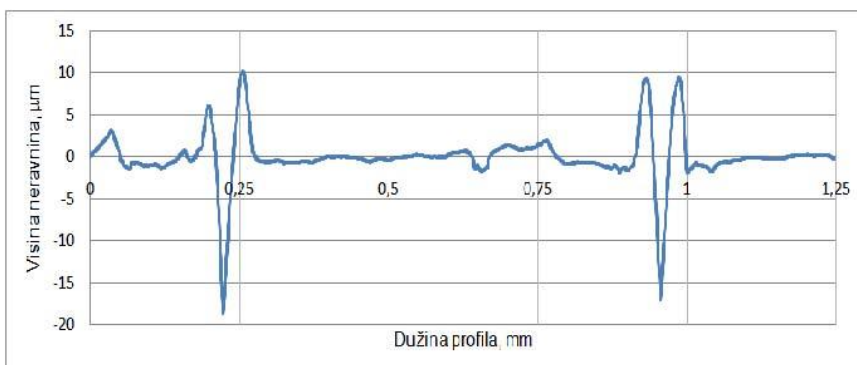
Слика 7.37. Профил гравуре на месингу (2 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



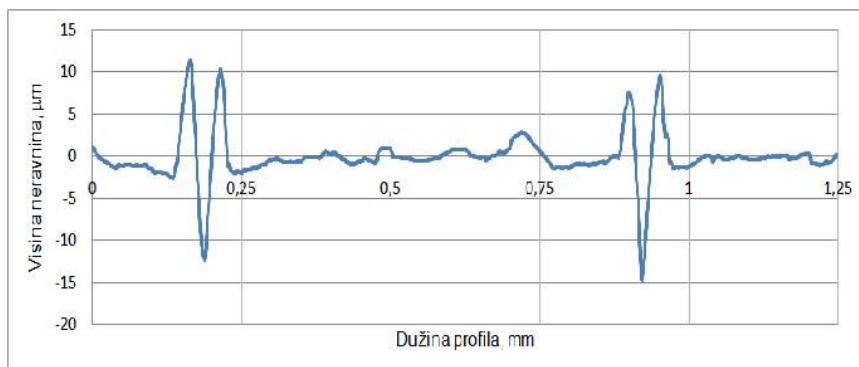
Слика 7.38. Профил гравуре на месингу (3 пролаза, снага 55%, брзина 500 mm/s)



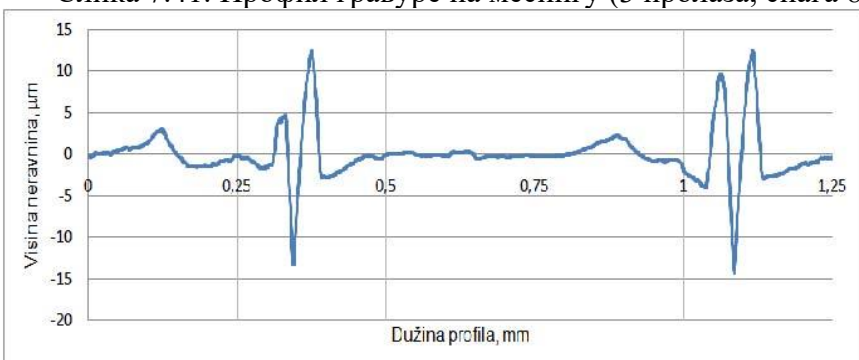
Слика 7.39. Профил гравуре на месингу (1 пролаз, снага 80%, брзина 250 mm/s)



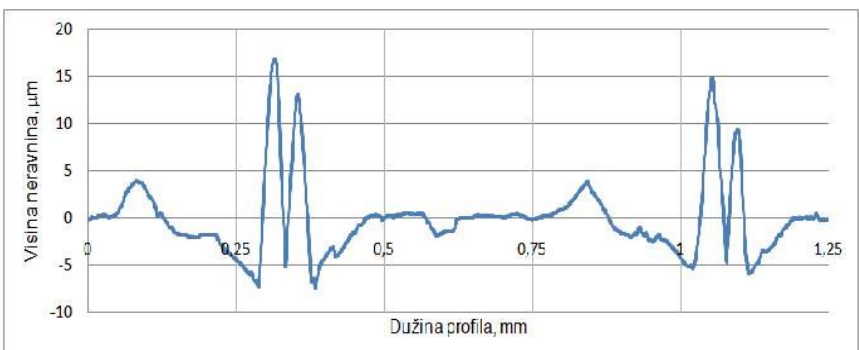
Слика 7.40. Профил гравуре на месингу (2 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



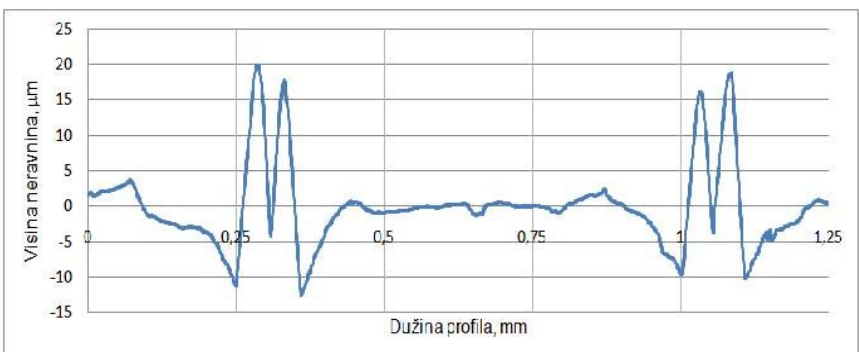
Слика 7.41. Профил гравуре на месингу (3 пролаза, снага 80%, брзина 250 mm/s)



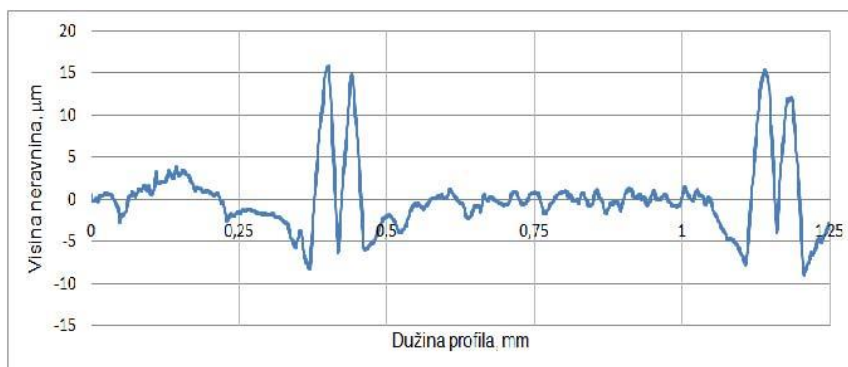
Слика 7.42. Профил гравуре на месингу (1 пролаз, снага 100%, брзина 100 mm/s)



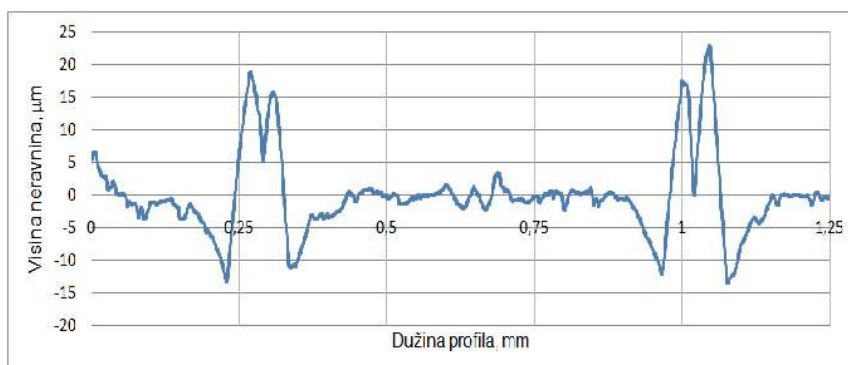
Слика 7.43. Профил гравуре на месингу (2 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



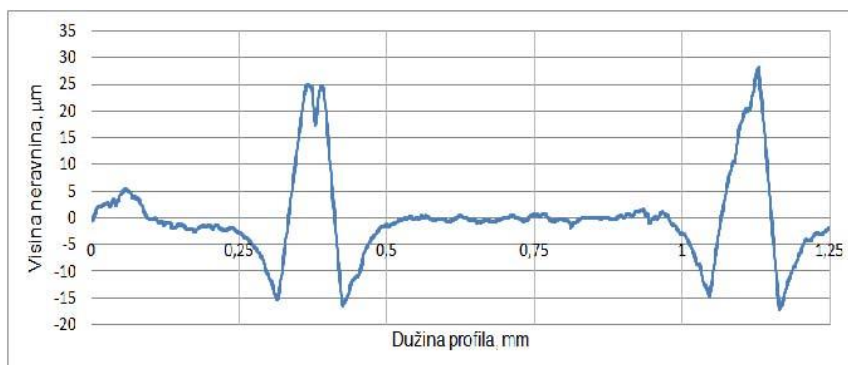
Слика 7.44. Профил гравуре на месингу (3 пролаза, снага 100%, брзина 100 mm/s)



Слика 7.45. Профил гравуре на месингу (1 пролаз, снага 100%, брзина 20 mm/s)

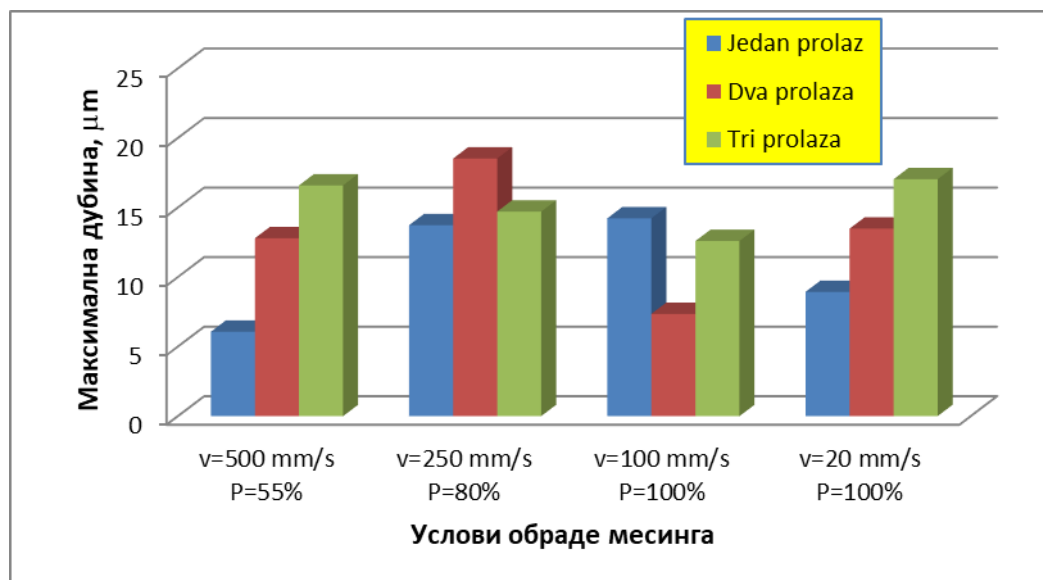


Слика 7.46. Профил гравуре на месингу (2 пролаза, снага 100%, брзина 20 mm/s)



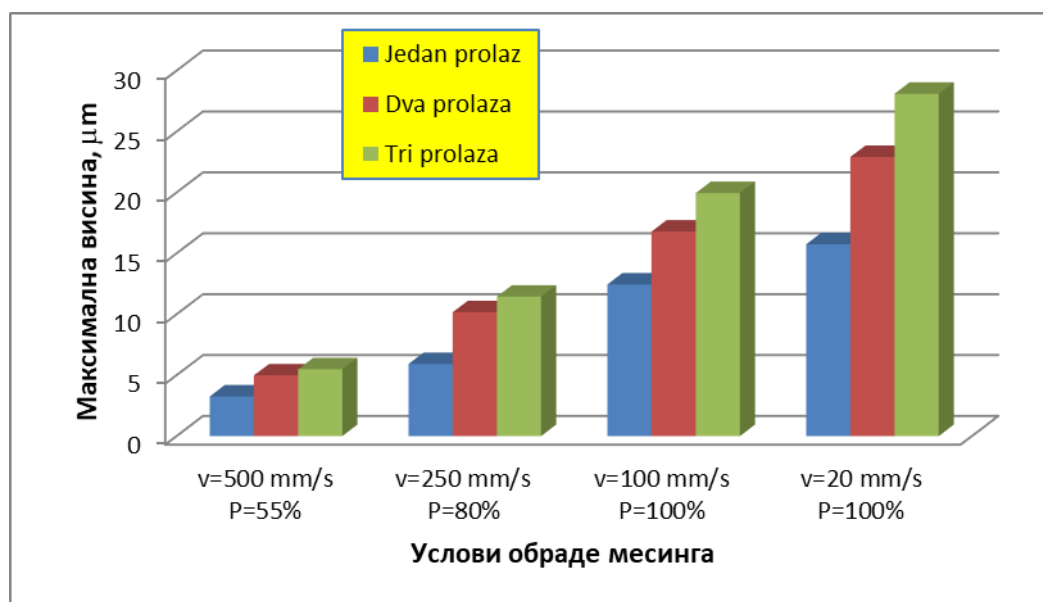
Слика 7.47. Профил гравуре на месингу (3 пролаза, снага 100%, брзина 20 mm/s)

На слици број 7.48 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на месингу на максималну дубину гравуре (слика 7.5 - *Min*). Са дијаграма се може видети да се не може успоставити значајнија веза између услова гравирања и мерене дубине гравуре. Може се видети да при већем броју пролаза и већој брзини гравирања и мањим снагама је већа дубина гравуре. Дубина гравуре се у највећем броју случајева креће у границама од 10 до 18 μm . Најмања дубина је код највеће брзине гравирања и најмање снаге при једном пролазу. Не може се једнозначно утврдити утицај повећања броја пролаза на дубину гравуре. Са слика 7.43 до 7.47 се може закључити да при максималној снази и мањим брзинама гравирања не долази до значајније дубине гравуре, чак доминира испупчење гравуре изнад основне површине предмета на месту путање ласерског снопа.



Слика 7.48: Максимална дубина гравуре на месингу

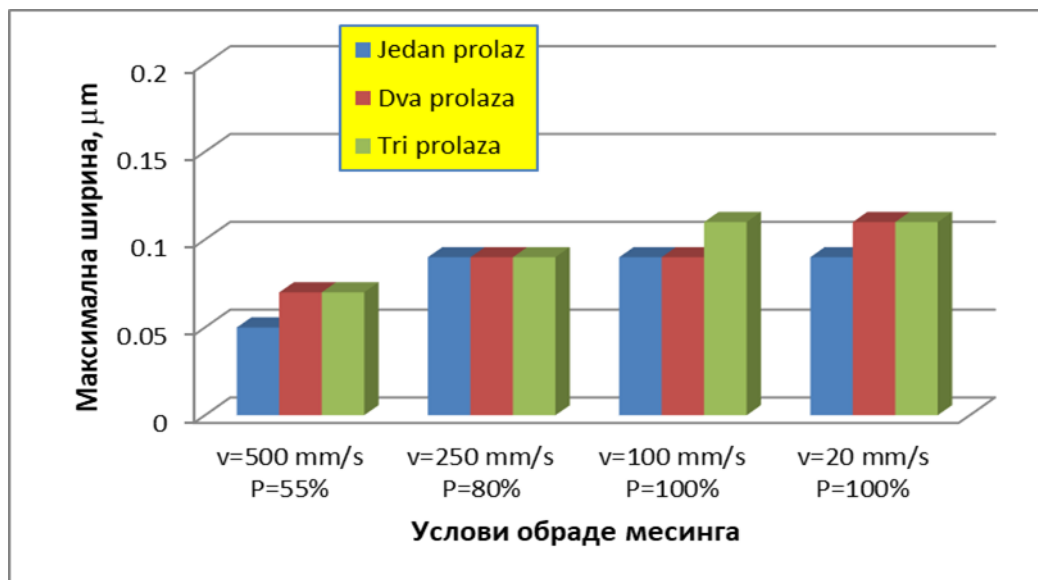
На слици број 7.49 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на месингу на максималну висину добијеног испупчења гравуре (слика 7.5 - *Max*). Са дијаграма се може видети да са повећањем снаге и смањења брзине гравирања, као и повећањем броја пролаза максимална висина гравуре расте.



Слика 7.49: Максимална висина гравуре на месингу

Анализирајући резултате мерења ширина добијеног трага гравирања на месингу, као и код челика и алуминијума, може се закључити да услови гравирања немају значајан утицај на *S1* и *S2*, док на *S3* - максималну ширину у подножју трага имају мали утицај.

На слици број 7.35 приказан је дијаграм утицаја параметара гравирања ласером на месингу на максималну ширину у подножју трага гравуре (слика 7.5 - S3). Са дијаграма се може видети да са смањењем брзине гравирања и повећањем снаге, максимална ширина у подножју трага гравуре незнатно расте. Ова ширина се креће у границама од 0.05 mm до 0.11 mm.



Слика 7.50: Максимална ширина у подножју трага гравуре на месингу

8. ЗАКЉУЧАК

У оквиру 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. Такође, приказане су и машине за гравирање као и материјали који се користе.

Ласерско гравирање и сечење је модерна технологија где се, помоћу ласерског снопа добијеног у специјалној машини за гравирање, могу обрађивати различити материјали ласерским сечењем и ласерским гравирањем.

На темељу предходно изложеног указано је на то да се са ласером може вршити израда 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.

Откриће и сама примена ласера у технологији обраде убрзава сам развој технологије, како у садашности тако ће врло вјероватно бити и у будућности.

Примена ласера омогућава нам бржу, лакшу и ефикаснију обраду готово свих материјала. Ласерска употреба при резању, заваривању, гравирању, бушењу и осталим методама обраде метала омогућује нам ефективнији учинак жељене обраде.

Обрада ласером се одликује високом прецизношћу и тачности обраде, великом брзином обраде, високом квалитетом обрађене површине, те широким спектром избора материјала за обраду.

Под деловањем ласерских зрака на предмету обраде не долази до структурних и хемијских промена. Осим у ласерској обради метала, ласер је „нашао” врло значајну примену и у другим гранама gospodarства, као нпр. у медицини, војсци, рачунарској технологији.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић Б., Лазих М. Неконвенционални поступци обраде, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2008.
- [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] <http://www.technologystudent.com/laser1/laser8.html> (22.12.2020.)
- [5] „LaserCut“ упуство за употребу, Београд, 2016.
- [6] http://mchalegentile.com/iduartsshop/lc_howto.html (22.12.2020.)
- [7] <https://www.linkedin.com/pulse/work-theory-laser-cutting-machine-apple-he> (22.12.2020.)
- [8] Каталог „Sisma“ машина и уређаја, 2013
- [9] <https://www.troteclaser.com/sr/>
- [10] http://mchalegentile.com/iduartsshop/lc_howto.html (22.12.2020.)
- [11] „Обрада ласером“, (скрипта за ученике), Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [12] https://bs.wikipedia.org/wiki/Lasersko_graviranje (22.12.2020.)
- [13] <https://www.bestblanks.com/gravographls900.html> (23.12.2020.)
- [14] [http://www.sisma.com/eng/jewellery/laser/marking-laser-for-big-pieces/bss- 83d.php](http://www.sisma.com/eng/jewellery/laser/marking-laser-for-big-pieces/bss-83d.php) (23.12.2020.)
- [15] <https://www.troteclaser.com/sr/laser-masine/laser-graverke-speedy-serija/>
- [16] <https://industrialmak.com/maquinas/bystronic-byspeed-3015-bytrans/?lang=en>
- [17] <http://www.technologystudent.com/laser1/laser8.html> (27.12.2020.)
- [18] <https://sh.wikipedia.org/wiki/Graviranje> (22.12.2020.)
- [19] <http://www.samsvojmajstor.com/portal/forums/uradi-sam/obrada-drвета/rezbarenje-drвета-ili-duborez-alat-i-%C5%A1ablони> (22.12.2020.)
- [20] <https://www.google.hr/search?q=dlijeta+za+kamen&tbm> (23.12.2020.)
- [21] <https://www.google.hr/search?biw=1366&bih=662&tbm> (11.1.2021)
- [22] <http://www.ealdormeregazette.ca/2015/04/illuminated-scroll-blank-featuring.html> (12.01.2021.)
- [23] <https://en.wikipedia.org/wiki/Pantograph> (11.01.2021.)
- [24] Нумерички управљани алатни стројеви (поглавље о CNC машинама, књига у рукопису), проф. др. Младен Бошњаковић, 2006.
- [25] <http://www.njuskalo.hr/obradni-strojevi-ostalo/zlatarski-cnc-stroj-graviranje-oglas-413000> (23.12.2020.)
- [26] <http://www.multicamusa.com/routers.html> (23.12.2020.)
- [27] <http://web-trgovina.metal-kovis.hr/cnc-glodalica-x7-linear/x7/cnc-strojevi> (23.12.2020.)
- [28] <http://www.vemaels.co.rs/primena.html> (23.12.2020)