

Факултет инжењерских наука

Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 316/2015

Милош Б. Богдановић

**Анализа процеса сечења ласером на машини
TRUMPF TRULASER 3040**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

МАСТЕР РАД

са темом:

АНАЛИЗА ПРОЦЕСА СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ НА МАШИНИ TRUMPF TRULASER 3040

За кандидата: Милоша Богдановића, број индекса 316/2015

У оквиру мастер рада кандидат треба да размотри проблематику поступака обраде ласером, елементе опреме и карактеристике машина и примере примене. Посебан акценат кандидат треба да обрати на машину TRUMPF TRULASER 3040 која се налази у предузећу "Wacker Neuson" Крагујевац. Потребно је извршити експериментална испитивања са дизнама које су већ коришћене у различитим условима сечења.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања
2. Анализа процеса обраде ласером
3. Преглед и карактеристике машине TRUMPF TRULASER 3040
4. Пример програмирања машина TRUMPF TRULASER 3040
5. Експериментална испитивања
6. Закључци,
7. Литература.

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК

Проф. др Богдан Недић

Крагујевац, мај, 2017. год.

РЕЗИМЕ:

У раду је описана анализа процеса сечења ласером, његов развој, настанак ласерског зрака у резонатору, технолошке операције обраде ласером, квалитет процеса обраде ласером и проблеми који се јављају при сечењу ласером. Детаљно је описана ласерска машина Trumpf 3040 у компанији “Wacker Neuson”, Крагујевац. Затим програмирање у TruTops-у. На крају рада су дати резултати мерења храпавости на плочицама (2 плочице дебљине 15 mm и 4 плочице дебљине 10 mm).

Кључне речи:

Неконвенционални поступци обраде, ласер, сечење ласером, програмирање, испитивање.

SUMMARY:

In this paper analyzes data processing as laser cutting, evolvent of laser, the occurrence of laser beam in resonator. The quality of laser cutting, problems in process of cutting. Also in this paper is minutely described the laser machine Trumpf 3040 in company Wacker Neuson, Kragujevac. In the end is presents results of roughness on tiles (2 tiles thick 15 mm and 4 tiles thick 10 mm).

Key words:

Unconventional methods of machining, laser, laser cutting, programming, examination.

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	2
2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ.....	4
2.1. ИСТОРИЈАТ И РАЗВОЈ ИНДУСТРИЈСКОГ ЛАСЕРА	4
2.2. ВРСТЕ ЛАСЕРА	5
2.3. ОПИС НАСТАНКА ЛАСЕРСКОГ ЗРАКА, ПРИНЦИП РАДА И ОПИС ЛАСЕРА.....	5
2.4. ОСОБИНЕ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА	15
2.5. ПРИНЦИП ЛАСЕРСКЕ ОБРАДЕ.....	18
2.6. ТЕХНОЛОШКЕ ОПЕРАЦИЈЕ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ	24
3. АНАЛИЗА КВАЛИТЕТА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ.....	30
3.1. ОБРАДА ЛАСЕРОМ	30
3.2. КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ	43
3.2.1. КВАЛИТЕТ ПОВРШИНЕ РЕЗА.....	44
3.2.3. УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ НА КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ.....	45
3.3. ГРЕШКЕ ПРИ ОБРАДИ СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ	47
4. ПРЕГЛЕД И КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ TRUMPF TRULASER 3040	50
4.1. НАМЕНА И ТЕХНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ.....	50
4.2.1. Управљачка јединица	55
4.2.1. Управљачки терминал.....	58
4.2.3. Ласерски модул – Trumpf 3040.....	61
4.2.4. Глава за сечење	67
4.2.5. Радни сто.....	71
4.2.6. Подизач Load Master (додатна опрема ласера Trumpf).....	73
5. ПРОГРАМИРАЊЕ У TRUTOPSU ЗА ЛАСЕР TRUMPF 3040	74
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	78
6.1 ИСПИТИВАЊЕ	80
7. ЗАКЉУЧАК	111
ЛИТЕРАТУРА.....	112

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Упоредо са развојем нових високоотпорних материјала, улагани су значајни напори у развоју одговарајућих поступака обраде. При том су вршена паралелна истраживања на усавршавању конвенционалних поступака обраде и проналажењу нових квалитетнијих резних алата, као и проналажењу нових поступака обраде који раде на сасвим новим принципима у односу на резање одношењем струготине. С обзиром да се код ових поступака обраде скидање материјала обратка остварује на сасвим другим принципима у односу на конвенционалне поступке обраде резањем, исти су добили назив неконвенционални поступци обраде (НПО).

Конвенционални поступци не могу да задовоље све захтеве савремене технологије обраде свих врста материјала, због чега се све више проширује примена неконвенционалних поступака. Њихова примена оправдана је не само при обради тешко обрадљивих материјала, већ и при обради делова сложеног геометријског облика, од иначе добро обрадљивих материјала, због знатно једноставније технологије и геометрије алата за обраду.

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.

Исконска тежња човека да светлост Сунца искористи као извор енергије за обраду метала није могла бити у потпуности остварена. Заправо то је због тога што се њеним фокусирањем постиже највише 2.5 W/cm^2 , а то је довољно само да растопи неке лако топиве метале, али не и да се изазову ефекти који су потребни за обраду скидањем метала. Међутим фокусирањем ласерског зрака на врло малу површину, практично у једну тачку, добија се концентрација енергије од 10^8 W/cm^2 , а у неким случајевима чак 10^{13} W/cm^2 , што је више него довољно да растопи или испари и најтврђе материјале. Због тога је ласер постао универзалан алат за обраду, *Laser Beam Machining (LBM)*, са којим се могу изводити најразличитије производне операције на скоро свим врстама материјала.

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, 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 изучавања 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 процесом сечења, упознавање са машином за сечење, ласером марке TRUMPF 3040 на бази CO_2 , затим испитивање сечења истим као и мерења храпавости на деловима и упоређивања вредности са дизнама које су радиле у различитим условима, у просеку 5.3 h и новом дизном.

У другом поглављу описана је анализа процеса обраде ласером, историјат, развој ласера, опис настанка ласерског зрака, принцип рада, структура ласерског постројења. Карактеристике CO_2 ласера, принцип ласерске обраде, као и технолошке операције обраде ласером (бушење, гравирање, обрадивост материјала).

У трећем поглављу анализа квалитета процеса обраде ласером, резање ласерским снопом, методе сечења ласером, фактори процеса сечења, снага ласера, брзина сечења, квалитет обраде, гасови који се користе за сечење, примене ласерског сечења, предности и недостаци обраде ласером, квалитет површине реза, утицајни фактори на квалитет површине реза, грешке при обради сечења ласером.

У четвртм поглављу преглед и карактеристике машине Trumpf 3040, управљачка јединица, управљачки терминал, ласерски модул, глава за сечење, радни сто и додатна опрема ласерске машине Trumpf 3040 у виду подизача Load Master-a.

У петом поглављу је описано програмирање у TruTopsu на ласеру Trumpf 3040.

2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

2.1. ИСТОРИЈАТ И РАЗВОЈ ИНДУСТРИЈСКОГ ЛАСЕРА

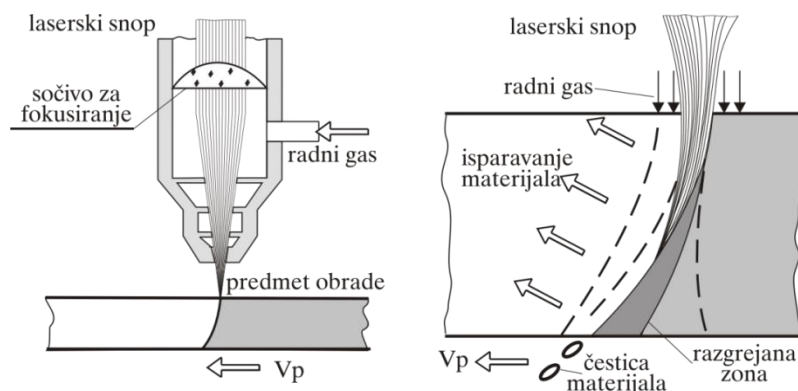
Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. 1704. године Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Ласери су уређаји за генерисање и појачавање монохроматских кохерентних електромагнетних таласа у видљивом, инфрацрвеном ултраљубичастом и у последње време рендгенском делу спектра.

Ајнштајн је постулирао постојање фотона као појавног облика светлости. 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. Кумар Пател је рођен 1938. у Барамати, у Индији 1964. Године. Кумар Пател је изумио CO_2 ласер. Од 1961. се бави истраживањем ласера, што доводи открићу CO_2 ласера 1963. године. Први плински ласер велике снаге употребљен је 1964. године. Успркос његовом труду да нађе користан начин употребе тог уређаја, CO_2 ласер своју практичну примену има тек данас. Ласерски снап, 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.

Захваљујући високом фокусирању ласерског снапа, високој густини енергије снапа, могућности једноставног управљања ласерским снапом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде (слика 1). Овај нови правац обраде материјала добио је назив ласерска технологија [5].

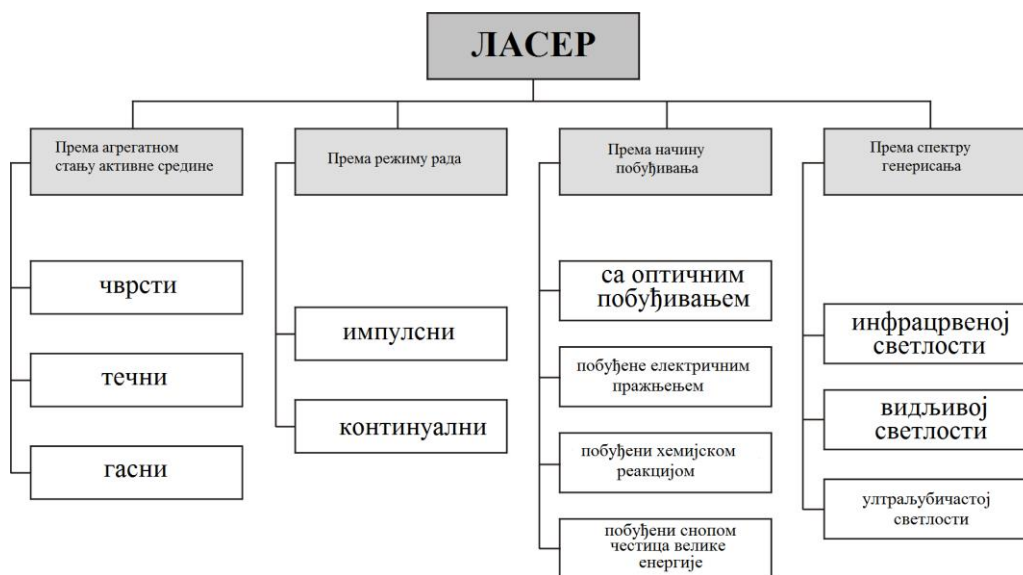


Слика 1. Принципијелна шема формирања ласерског снапа

1954.- конструкција првих уређаја за појачавање микроталасног зрачења. Конструкција првог гасодинамичког CO₂ ласера- 1966. Касније се конструишу многи ласери са чврстим супстанцама као активном средином. Сви ови ласери називају се оптички, јер покривају углавном видљиви део спектра. Од 1984. интензивно се ради на развоју рендгенског ласера [5].

2.2. ВРСТЕ ЛАСЕРА

Постоји више критеријума за поделу ласера. На слици 15 приказана је најчешћа подела.

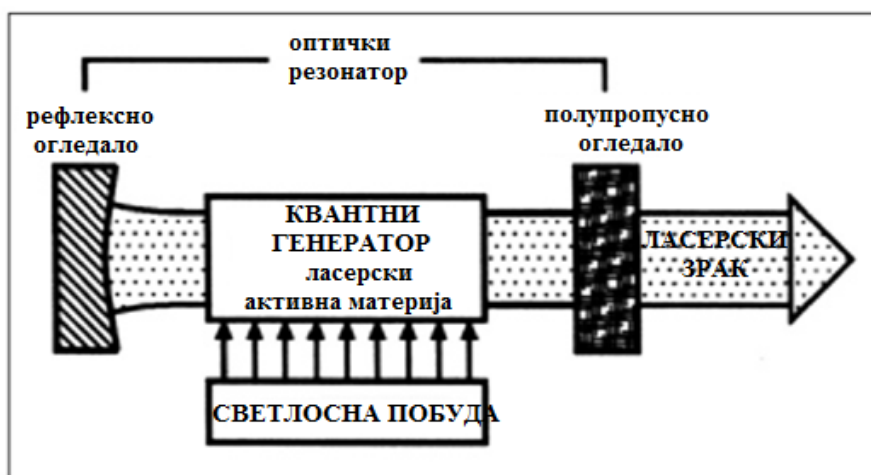


Слика 2. Подела ласера [5]

2.3. ОПИС НАСТАНКА ЛАСЕРСКОГ ЗРАКА, ПРИНЦИП РАДА И ОПИС ЛАСЕРА

Ласерски зрак се добија у *ласерском резонатору*, чија је принципијална шема дана на слици 3. Саставни делови тог резонатора су: *квантни генератор*, кога чини ласерски активна материја, *извор светлосне побуде* и *два паралелна огледала*; лево које рефлектује светлост и десно које делимично пропушта светлост (највише до 10%), овде називамо полу пропушно огледало.

Физикални процеси добијања ласерског зрака, тј *стимулације (индуковане) емисије зрачења*. Процес се одиграва у ласерски активинвој материји – квантном генератору под непосредним дејством спољашње светлосне побуде.



Слика 3. Принципијална шема извора ласерске светлости – оптичког резонатора [3]

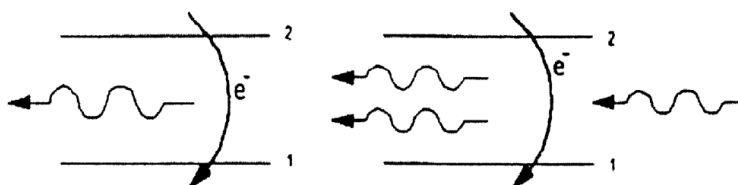


Слика 4. Кућиште у којем се налази резонатор ласера “Trumpf 3040”

Сваки фотон има енергију пропорционалну фреквенцији светлости коју репрезентује, а обратно пропорционалну таласној дужини:

$$E_{\text{fot}} = h\nu = h \cdot c/\lambda = h\omega/2\pi$$

Први ослобођени фотон или сноп фотона треба да буде исте енергије (таласне дужине) као и фотони које ће емитовати атоми при преласку из побуђеног у основно стање; у том случају сакупљена светлост ће бити монохроматска и високо кохерентна [1].

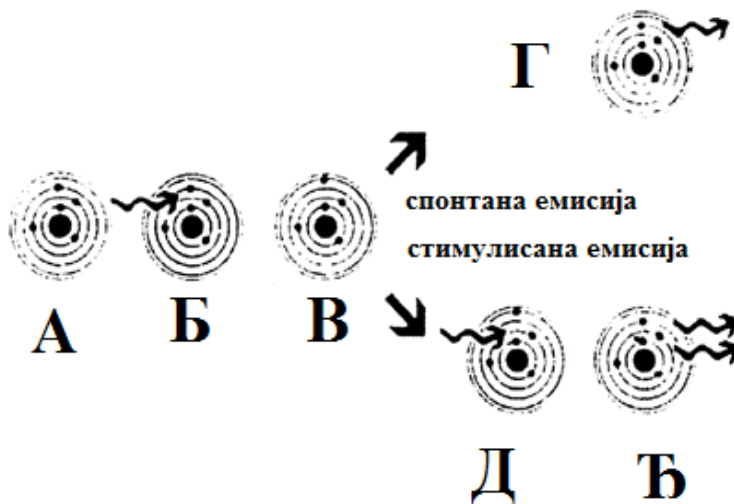


Слика 5. Ослобођени фотони [1]

Основа за функционисање ласера је својство неких супстанци да спонтано остварују инверзну насељеност енергијских нивоа [1].

Велики број електрона при том напушта основне нивое и сели се у виша, метастабилна стања, одакле могу, опет спонтано, да се врате у нижи енергетски ниво и емитују фотон чија је енергија једнака разлици енергије два нивоа између којих се врши прелаз:

$$E_{\text{fot}} = \Delta E = E_{\text{meta}} - E_0$$



Слика 6. Спонтанна и стимулисана емисија [1]

На слици 6 приказано је следеће:

А – Атоми са електронима у различитим енергетским стањима,

Б - Фотон резонантне енергије пада на атом побуђује један електрон,

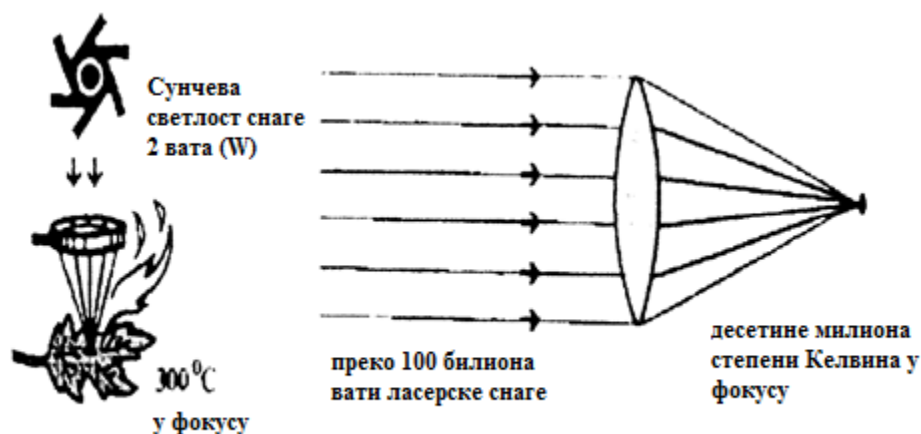
В – Електрон се подиже на виши енергетски ниво,

Г – После истека времена живота електрон се враћа на првобитни ниво и емитује фотон,

Д – Други фотон исправне енергије погађа атом пре него што електрон спонтано падне на предходни ниво,

Ћ – Атом емитује идентичан фотон у истом правцу и смеру као и упадни фотон

Код активних супстанци већи број електрона се налази у метастабилним стањима, што их чини погодним за коришћење код ласера. Уколико се кроз такву средину пропусти фотон или сноп фотона са резонантном енергијом, наступиће тзв. стимулисано зрачење у облику прелаза са виших на ниже нивое у многим атомима, што ослобађа нове фотоне који пропадају у истом правцу и смеру као и упадни фотони. На овом ефекту је заснован рад највећег броја ласера [1].



Слика 7. Фокус ласерске снаге при сечењу [1]

Емитована светлост је монохроматска (сви фотони су исте таласне дужине, односно енергије. Први, Маиманов ласер (1960.) је као активну средину користио рубин-кристал алуминијумског оксида (Al_2O_3) у коме су неки атоми алуминијума (0,05% целокупног броја) замењени атомима хрома (Cr) [1].

Ласерски зраци су кохерентни, са константном фазном разликом и строго паралелни. Убрзо после појаве првог оптичког ласера успешно су се показали и неодим (Nd), празеодим (Pr), талијум (Tm), холијум (Ho), ербијум (Er), итербијум (Yb), гадолинијум (Gd), па чак и уранијум (U); коришћени су и страни супстрати, као нпр. YAG (итријум-алуминијумски гранит), калцијум флуорид (CaF_2) и др. 1962. совјетски физичари Басов и Ораевски пројектовали су метод добијања инверзне популације у молекуларним системима путем наглог хлађења гаса [1].

Прототип првог гасног ласера прорадио је 1962. год. у “Avco Everett” истраживачкој лабораторији. [1]

CO_2 ласери данас имају веома широку примену, посебно за припрему, сечење, топљење и легирање материјала. Поред CO_2 ласера, главни кандидат за улогу “драјвера” у процесу ласерске фузије је ласер на неодимском стаклу (коришћен је у уређају “Nova”). Радна супстанца је хемијски чисто стакло допирано атомима неодима (Nd).

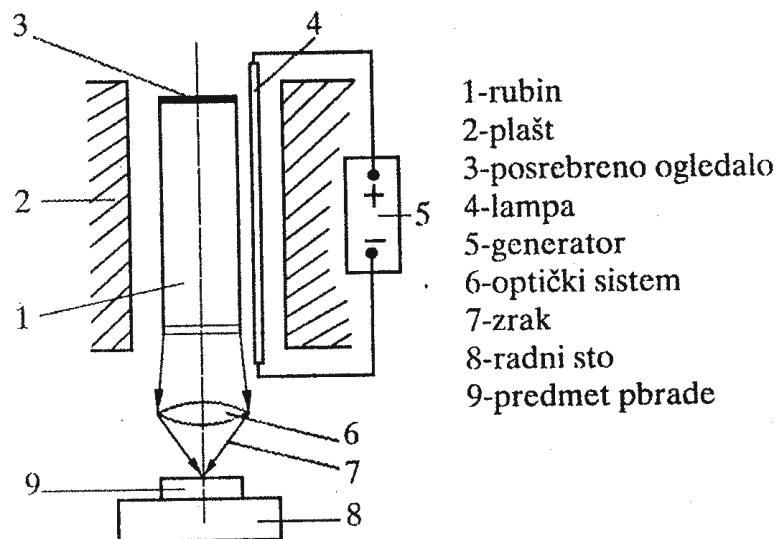
Још једна врста која би се користила за процесе директне фузије је гасни ласер на бази мешавине криптона и флуора са додатком аргона (KrF- ласер). Данас се употребљавају ласери на бази металних пара, течних органских боја и полупроводнички ласери. [1].

Поларни вештачки кристал рубина величине оловке $\phi=7\text{ mm}$ и $l=125\text{ mm}$, ставља се унутар спиралне импулсне лампе или паралелно са правом лампом.

Горње чело кристала је посребрено, а доње је полупосребрено, или се близу чела кристала ставе два квалитетна огледала, строго паралелна и нормална на осу кристала, која представљају оптички резонатор. Око рубинског штапа и лампе налази се плашт са рефлектујућом површином. Код савремених ласера сви елементи ласера стављају се у омотач ласера који се хлади посебним системом хлађења ваздушним или воденим.

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

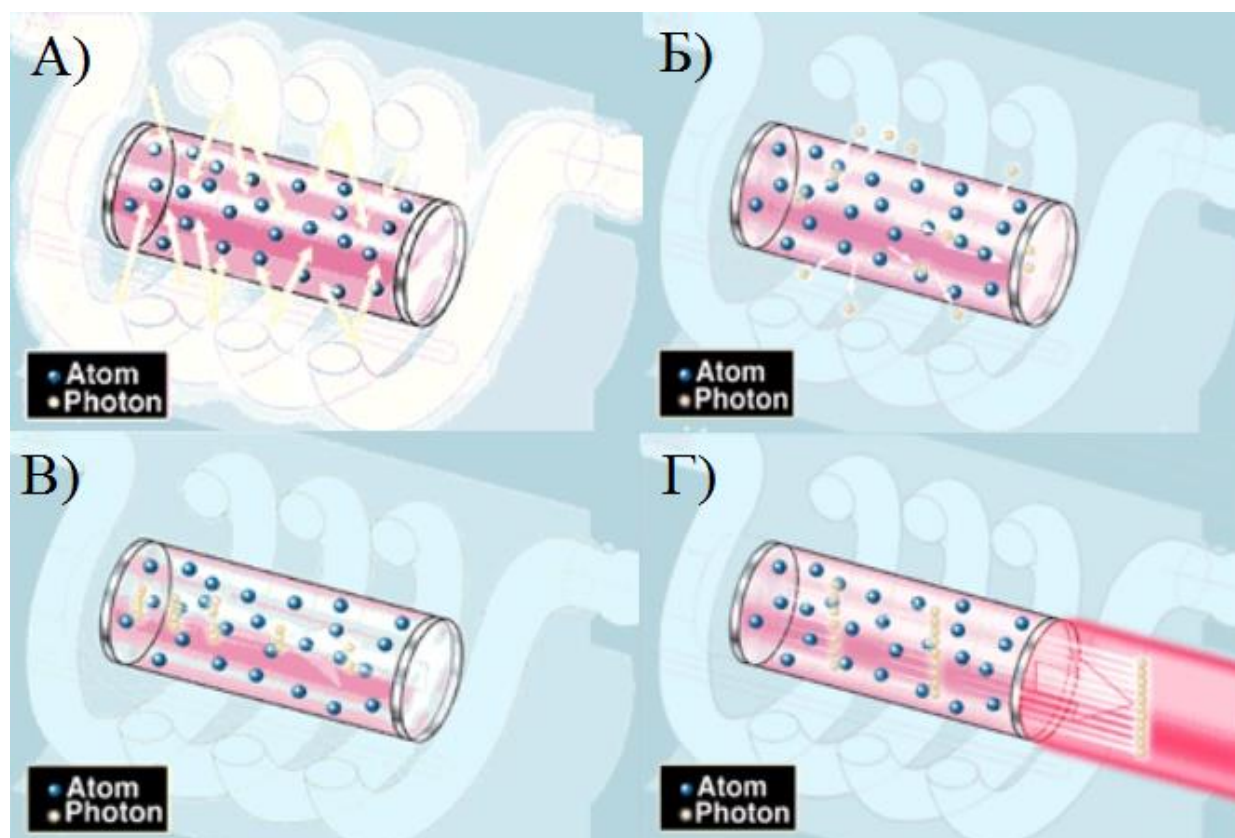
Шема обраде и ласер са чврстим емитером од рубинског кристала дати су на слици 8.



Слика 8. Шема обраде рубинског ласера [5]

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

Појаве које се дешавају у рубинском ласеру приказане су на слици 8.



Слика 9. Појаве које се дешавају у рубинском ласеру [2]

А) Кварцна лампа емитује светлост која изазива побуђивање атома у кристалу рубина на виши енергетски ниво.

Б) На већем енергетском нивоу неки атоми емитују фотоне. Фотони атома изазивају стимулисану емисију фотона других атома.

В) Огледала на крајевима рефлектују фотоне. Интензитет светлости се рапидно повећава.

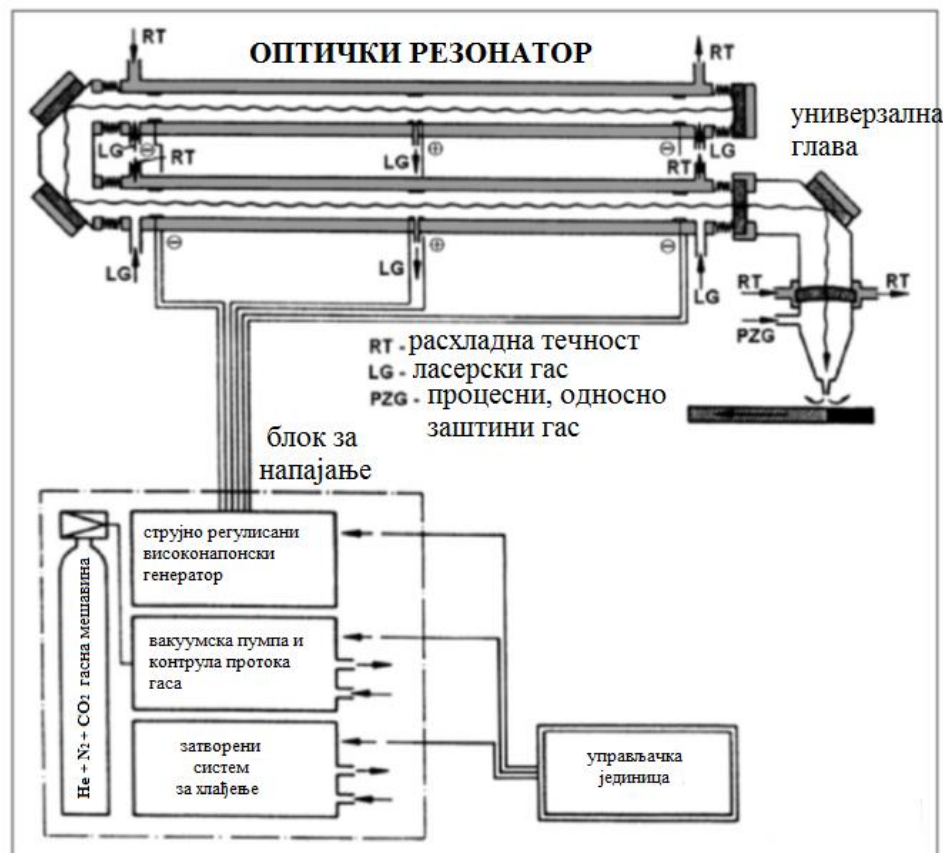
Г) Фотони излазе кроз полупропусно огледало. То је ласерски светлосни сноп

- СТРУКТУРА ЛАСЕРСКОГ ПОСТРОЈЕЊА

Ласерско постројење има задатак да обезбеди генерисање ласерског зрака одређених карактеристика, као и да осигура његово вођење и обликовање пре самог усмеравања на површину обратка. Осим тога оно мора да обезбеди прихватање и стезање обратка, као и потребна кретања при обради слично као код машина за обраду резањем.

Ласерска постројења сачињавају низ јединица које обављају одређене задатке, а све су преко контроле и управљања повезане у једну функционалну целину. У састав ласерских постројења улазе следеће:

- Ласер, односно јединица за добијање ласерског зрака;
- Оптички систем за вођење и обликовање зрака;
- Систем за хлађење ласерске јединице и оптичког система (сочива, призми, огледала)
- Јединица за напајање електричном енергијом или енергетским гласовима;
- Систем за контролу и управљање целим постројењем;
- Радна јединица која обезбеђује прихватање обратка и даје потребна кретања при обради;
- Сигурносни систем, с обзиром да неконтролисани излазак ласерског зрака из постројења може бити катастрофалан за послужоца и околину.



Слика 10. Шематски приказ структуре ласерског постројења са CO₂ – ласером [3]

На слици 10. дат је шематски приказ структуре ласерског постројења за обраду помоћу CO₂ – ласера на којој су приказане неке од предходно наведених јединица.

Врсте активне материје у квантном генератору представљају најважнију карактеристику ласерског постројења на основу које се дефинише његова номинална снага и подручје економичне примене.

Активна материја ласера може бити у сва три агрегатна стања, односно у чврстом, гасовитом и течном стању, зависно од жељене снаге и подручја примене [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 боља усмереност ласерског зрака. С друге стране, гас као активна средина има и одређене недостатке: густина гаса је знатно нижа од густине чврстих тела, зато се 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 овим ласерима износи од 10^{-3} до 10^{-2} Ра.

У пракси се разликују 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.

Код гасних ласера се нарочито ефикасно употребљава молекуларни CO_2 – ласер за оптичко побуђивање ласера у далекој инфрацрвеној области која се граничи са микроталасним подручјем. Најчешћа побуда код гасних ласера је сударна екситација [1].

Овај начин побуђивања гаса осварује се у ласерским цевима где су уграђене електроде на које се доводи електрични напон.

Под дејством електричног поља долази до јонизације гаса у цеви, а електрони се између катоде и аноде убрзавају и сударају се са честицама гаса. Електрон део енергије предаје честици која се побуђује. Да би дошло до апсорпције зрачења у једном атомском спектру, зрачење мора да има тачно одређену фреквенцију, тј. [1].

$$h\nu_{\text{min}} = E_n - E_m$$

- CO_2 ласер

Тело CO_2 ласера се састоји од гасне смеше CO_2 , Не и N_2 , при чему активну средину чине молекули CO_2 . Ови ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину светлости десет пута већу 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.

Ласер се састоји од :

Стаклене цеви у којој се налази смеша гасова: угљениковог диоксида, азота , хелијума и евентуално неког другог гаса. На крајевима цеви се налазе два паралелна огледала, која су премазана слојем силикона, молибдена или злата, која рефлектују ласерски зрак натраг у цев и формирају резонатор. Сочива и прозори су направљени од германијума и цинк-селенида ZnSe. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон. Високи напон производи мноштво брзих електрона у цеви који сударима предају своју енергију молекулима плина [4].



Слика 11. Стаклена цев у којој се налази смеша гасова [4]

Састав ласерске гасне мешавине је зависан од врсте ласера, снаге и произвођача. Ласерски гасови се обично достављају у посебним плинским боцама или су претходно смешани у једној боци. Нечистоће у ласерској гасној мешавини, могу створити проблеме у раду CO₂ ласера, и смањити му излазну снагу, дестабилизovati електрични набој или повећати потрошњу ласерских плина. Уз то нечистоће утичу на интерну оптику, смањујући трајност огледала, а поправке могу бити скупе [4].

CO₂ ласер нуди пуно већу снагу и то до 50 kW. Састави до приближно 4 kW , често се користе за ласерско сечење. Поступак стварања ласерских зрака у CO₂ ласеру, темељи се на следећим ласерским гасовима: на CO₂, азоту и хелијуму. Те гасове је потребно уредно контролисати и поставити строге стандарде за квалитет. Гасови у CO₂ ласеру производе светлост у инфрацрвеном подручју, што значи да ласерски сноп није видљив.

Због тога радник на ласеру мора поштовати сигурносне мере и средства за рад те је потребно забранити прилаз неовлашћеним особама и другим лицима. Најчешће се користе CO₂ ласери, првенствено због јаког ласерског снопа светлости.

Примена CO₂ ласера

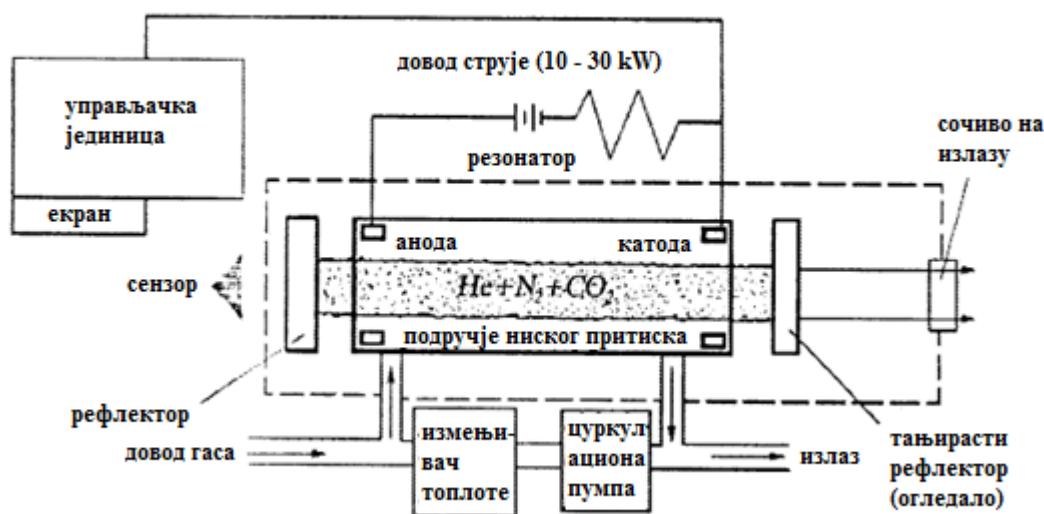
- Војна индустрија
- Медицина, хирургија
- Обрада материјала CO₂ ласери су најчешће употребљавани ласери у металопрађивачкој индустрији

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, CO_2 ласери се деле на:

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

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

На слици 12. је приказан принцип обраде CO_2 ласера.



Слика 12. Принцип обраде CO_2 ласером [10]

Према начину протока гасне смеше низ оптички резонатор и према правцу електричног пражњења низ гасни флуид, разликују се више врста CO_2 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,
- 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. Ласерска емисија је добијена на неколико стотина прелаза у области од 8,7 до 11,8 μm , с тим што се најснажнија емисија добија у области 10,6 μm .

Први CO_2 ласер је прорадио са чистим CO_2 , а веће снаге су добијене тек када је додат азот који је вишеструко повећао снагу ласера [1].

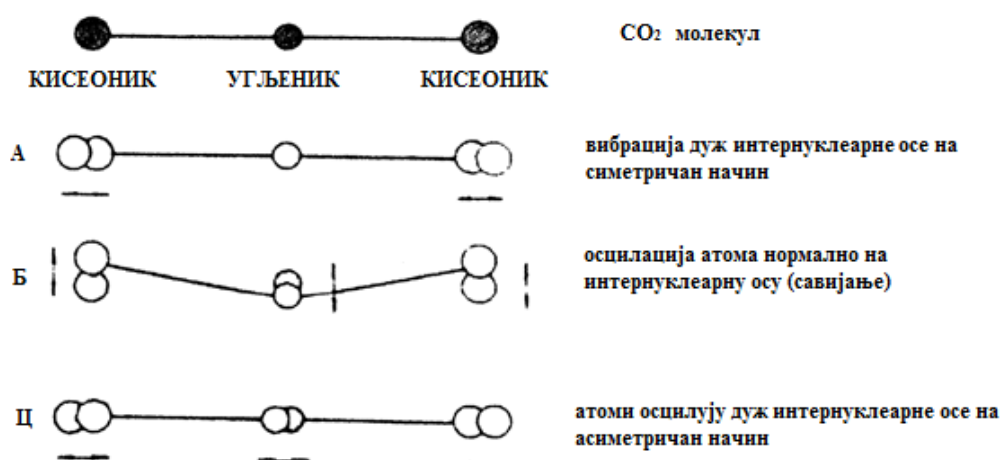
Вибрациона стања CO_2 молекула се описују са три квантна броја V1: описује број вибрационих кваната у симетричном моду, V2 : број вибрационих кваната у моду савијања, V3 : број вибрационих кваната у асиметричном моду осциловања.

Као додатни гас најчешће се употребљава хелијум. Улоге He су следеће:

Услед велике топлоте проводности, He смањује температуру гаса у пражњењу, па на тај начин смањује број сударних деекситација горњег ласерског нивоа CO_2 (001);

Смањује температуру електрона у пражњењу, што доводи до ефектније екситације N_2 (V=0) у N_2 (V=1) и CO_2 (000) у CO_2 (001);

Врши ефикасно деекситацију CO_2 (010) нивоа [1].



Слика 13. Молекул CO_2 [1]

2.4. ОСОБИНЕ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА

Ласерско зрачење се разликује од зрачења техничког светлосног извора по великој спектралној густини енергије, великој дужини кохеренције таласа, стационарном фронту таласа у снопу ласерског зрачења, великој стабилности амплитуде као и у могућности производње ултракратких светлосних импулса.

Осим тога, ласерско зрачење се разликује од других извора електромагнетне енергије малим степеном дивергенције својих таласа тј. врло уским правцем свога распрострањања. Зрачење ласера има висок степен монохроматичности, тј. садржи веома уски интервал таласних дужина.

Монохроматичност одређује дијапазон фреквенција, односно таласних дужина, садржаних у зрачењу, тј. ширину спектра ласерског зрачења. Степен монохроматичности за неку спектралну линију са таласном дужином λ_0 (фреквенција ν_0) одређује се изразом:

$$\mu = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

где је:

$\Delta\lambda$ - ширина спектра.

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

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

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$$

где је:

d - пречник ласерског материјала (активне средине),

λ - таласна дужина зрачења.

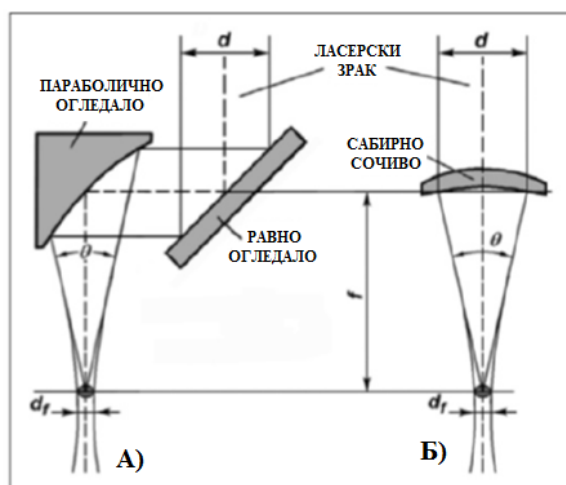
Дивергенција утиче на пречник фокусираног снопа ласерских зрака, а стога и на максималну густину снаге која се може добити при фокусирању.

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

$$d_r = 2 \cdot \theta \cdot f_s = 2.44 \frac{\lambda \cdot f_s}{d}$$

- ГЕОМЕТРИЈСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛАСЕРСКОГ ЗРАКА F

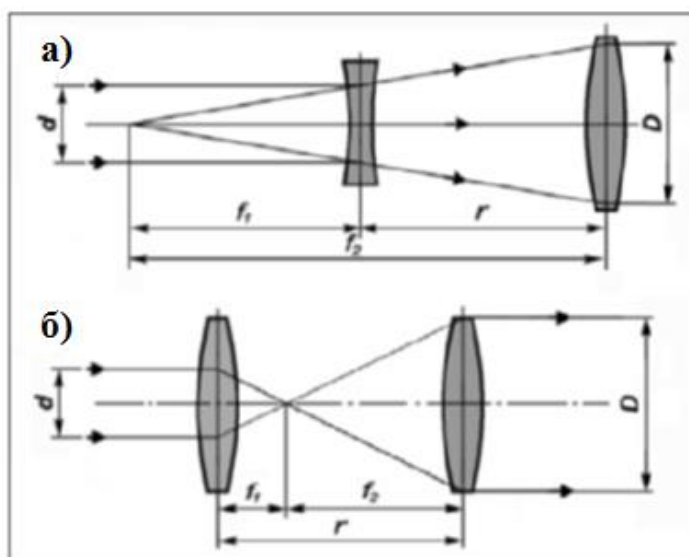
Ласерски зрак, који излази из резонатора, води се оптички помоћу призми и огледала према површини обратка или у новије време кроз оптичке проводнике. Непосредно пре усмеравања на саму површину, ласерски зрак се фокусира да би се на тај начин добила што мања површина попречног пресека зрака, а што већи интензитет. То се постиже помоћу параболичних огледала у ласерску главу [3].



Слика 14. Карактеристичне величине фокусираног ласерског зрака а) фокусирање помоћу параболних огледала, б) фокусирање помоћу сабирних сочива [3]

Попречни пресек ласерског зрака d може задржати исту меру као на изласку из резонатора, или се применом телескопа та мера може повећати на пречник D .

На слици 15 је шема два типа ових телескопа, са којима се може видети да се промена пречника ласерског зрака врши променом растојања r између сочива телескопа. Вредност пречника ласерског зрака утиче на пречник фокусираног зрака, што ће касније бити и практично показано, па се исти може користити за регулисање интензитета зрака у фокусу [3].



Слика 15. Повећање пречника ласерског зрака помоћу телескопа а) Галилејев телескоп; б) Кеплеров телескоп [3]

где је:

θ - ствами угао дивергенције,

f_s - жижна даљина сочива.

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

$$q = \frac{E}{A_f \cdot t_i} = \frac{4E}{\pi d}$$

где је:

E - енергија импулса ласерског зрачења,

t_i - трајање импулса зрачења и

A_f - површина светлосне мрље.

Густина снаге је значајна карактеристика процеса обраде која утиче на карактер разарања (ерозије) материјала под дејством ласерског зрачења. Од густине снаге зависи температура загревања материјала обраде [3].

Енергија импулса ласерског зрачења је:

$$E = \int_0^{t_i} P_l(\tau) d\tau$$

где је:

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

t_i - трајање импулса.

Средња снага импулса ласерског зрачења је:

$$P_{lsr} = \frac{E}{t_i}$$

Трајање једног импулса ласерског зрачења је:

$$t_i = \frac{P_{lsr}}{E}$$

2.5. ПРИНЦИП ЛАСЕРСКЕ ОБРАДЕ

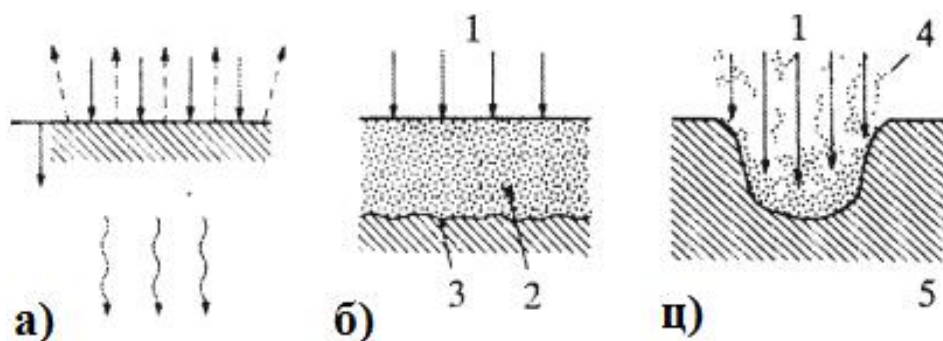
При судару ласерског снопа са непрозирним чврстим телом, на његовој површини и у подповршинским слојевима (на одређеној дубини) се одигравају различити физички процеси. Под његовим утицајем долази до интензивног површинског загревања материјала предмета обраде, топљења и испаравања материјала предмета 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 [5].

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 16).



Слика 16. Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом

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

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

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.

У табели 1. дате су вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења.

Табела 1. Вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења [5]

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

Према табели 1, за CO_2 ласере ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) коефицијент рефлексије R је много велики за све наведене метале, тако да се за обраду метала користи само мали део енергије ласерског млаза. Зато су ови ласери непогодни за обраду метала. Међутим, повећањем густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm^2 доводи до смањења коефицијента рефлексије [5].

Већина ласерских технолошких процеса заснива се на топлотном дејству ласерског зрачења. При разматрању топлотних процеса, који настају у материјалу под дејством ласерског зрачења, неопходно је познавати карактеристике као што су:

- густина снаге ласерског зрачења q ,
- просторна расподела густине снаге q_r ,
- време трајања импулса t_i ,
- таласна дужина ласерског зрачења λ ,
- услови фокусирања,
- дубина продирања ласерског импулс у материјал x ,
- апсорбовани део ласерског зрачења $\alpha=1-R$.
- рефлексија ласерског зрачења R итд.

Обично се користе два различита модела расподеле густине снаге ласерског зрачења:

- Гаусова и
- равномерна.

За нормалну расподелу густине снаге важи израз:

$$q(r) = q_0 e^{-kr^2}$$

где је:

q_0 - максимална густина снаге,

k - коефицијент који одређује степен оштрине просторне расподеле и

r - радијална компонента.

За обраду ласером посебно значајан параметар је критична снага ласерског млаза при којој настаје разарање материјала. Под појмом разарања у овом случају се подразумева: топљење површинских слојева, испаравање материјала, формирање кратера на обрађеној површини испаравањем материјала или истискивањем течне фазе, формирање отвора или прскање материјала под дејством термичких напона.

Израз за густину снаге ласерског млаза на озраченој површини, да би се достигла температура топљења материјала:

$$q_c = 2\lambda_\theta T_t \sqrt{\frac{k}{\pi}}$$

где је:

λ_θ - коефицијент топлотне проводљивости материјала предмета обраде и

T_t - температура топљења материјала предмета обраде.

Падајући на материјал, светлосни сноп ласерских зрака се у мањој или већој мери апсорбује у његовој површини. Апсорпција снопа фотона у материјалу врши се у правцу снопа нормално на површину. Густина снаге ласерског зрачења слаби са дужином продирања, по закону:

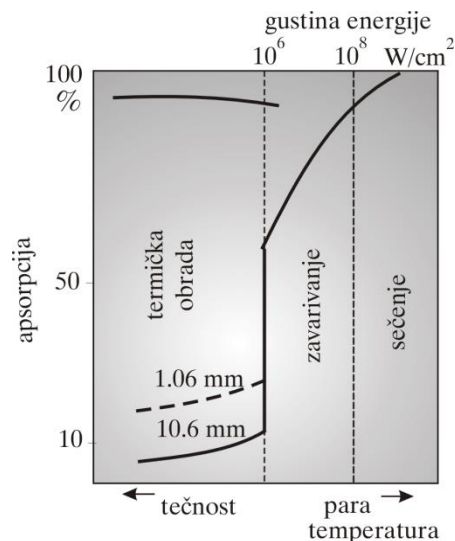
$$q = q_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Дубина продирања зрачења x у материјал предмета обраде, окарактерисана је растојањем на коме се густина снаге зрачења смањује e пута ($e=2.7182$).

Ово растојање једнако је реципрочној вредности коефицијента апсорпције α .

За већи број метала, поред пораста температуре површинских слојева, поспешује се стварање оксидног слоја, који има значајно мали коефицијент рефлексије, односно велики коефицијент апсорпције и при $\lambda=10.6\mu m$ [5].

На слици 17 приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 17. Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала [5]

Битан утицај на коефицијент рефлексије има и густина ласерског млаза. Са повећањем густине од $10^7 \div 10^8 \text{ W/cm}^2$ 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, у поређењу са вредностима датим у табели 1.

Са повећањем хrapавости обрађене површине исто тако се смањује коефицијент рефлексије, тј. расте коефицијент апсорпције. Веза између њих дата је изразом:

$$\alpha = 1 - R$$

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 хrapавости, 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 $A \%$. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снижити рефлексиона способност повећањем хrapавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака [5].

Уколико температура на површини не прелази температуру топљења T_t , узима се да је апсорпциона способност линеарна функција температуре:

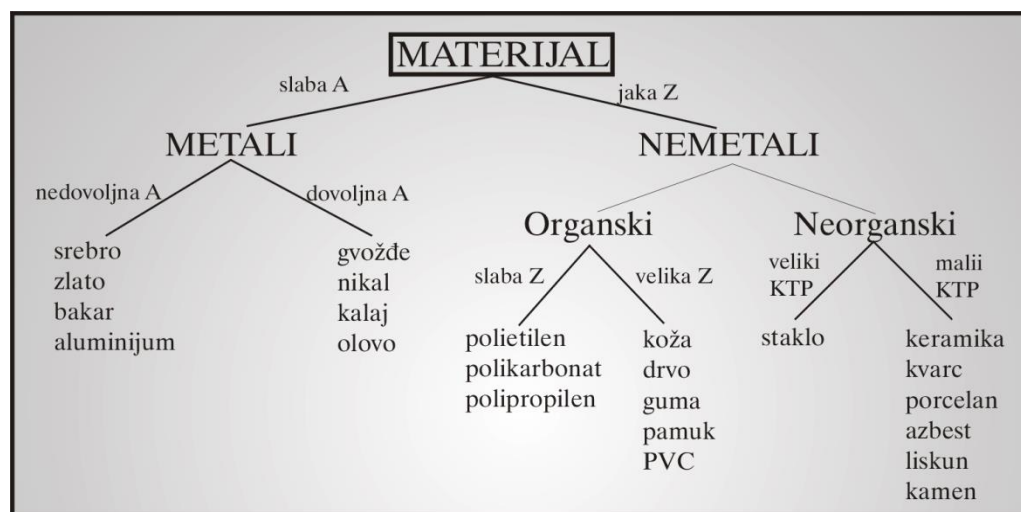
$$A = a + bT$$

где је:

T, K - температура површине која апсорбује зрачење и

a, b - коефицијенти добијени експериментом.

На слици 18 приказан је утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост



Слика 18. Утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост [5]

На основу коефицијента апсорпције може се одредити минимална снага ласера, потребна за топљење материјала, помоћу израза:

$$P_{L \min} = \frac{C \cdot k \cdot T_t \cdot \lambda}{\alpha}$$

где је:

k - термичка проводност материјала предмета обраде,

T_t - температура топљења материјала предмета обраде,

λ - температура топљења материјала предмета обраде,

α - коефицијент апсорпције и

C - константа блиска јединици која узима у обзир апроксимације.

Апсорпција је битна само у првом тренутку интеракције снопа ласерских зрака са материјалом предмета обраде, касније доминантну улогу има топлотна дифузија материјала предмета обраде, која се означава са a и изражава у cm^2/s . Помоћу коефицијента топлотне дифузије може да се одреди дубина продирања топлоте за време t помоћу израза:

$$X^2 \approx 4 \cdot a \cdot t$$

или време топлотне дифузије за материјале дебљине X :

$$t = \frac{X^2}{4a}$$

За танке лимове може се израчунати температуру у центру светлосне мрље, помоћу израза:

$$T_0 = \frac{\alpha \cdot q_0}{k} \left(\frac{4}{\pi} a \cdot t \right)^{0.5}$$

Сви ови параметри и њихова међузависност указују на комплексност ласерске обраде. Истраживања и прорачуни су утолико сложенији што ови параметри не остају константни за време обраде материјала већ се непрекидно мењају услед промене температуре, густине и притиска [5].

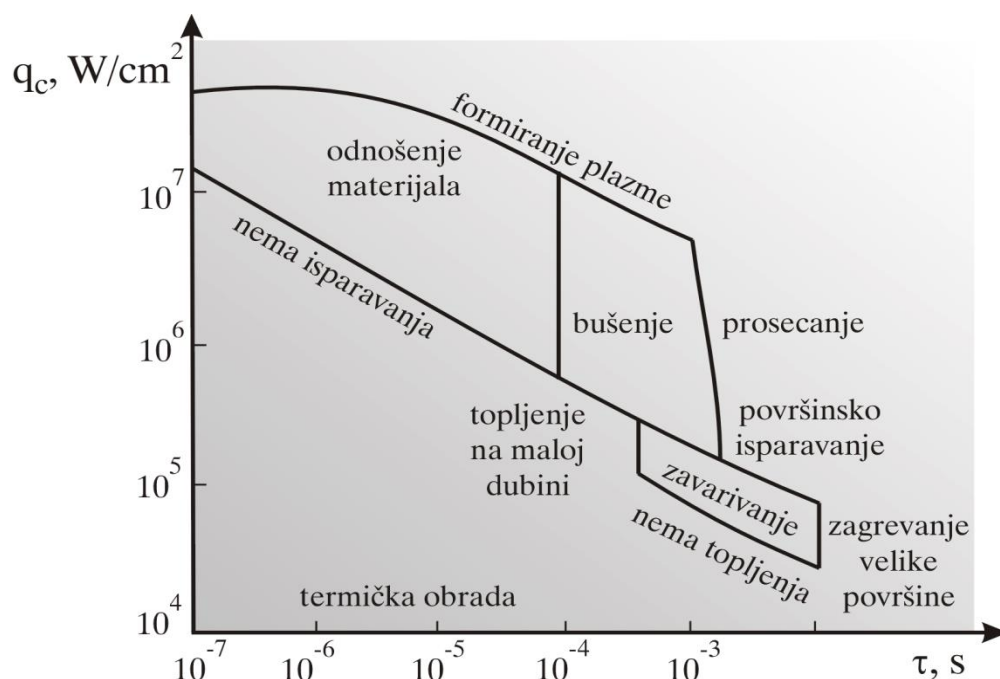
2.6. ТЕХНОЛОШКЕ ОПЕРАЦИЈЕ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

Ласерски зрак фокусиран на радни пречник $0.15 \div 0.2 \text{ mm}$ 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.

На слици 19 приказан је дијаграм примене обраде ласером на бази енергетских карактеристика ласерског снопа.

Постоје четири карактеристичне зоне:

- површинско загревање,
- топљење,
- одношење материјала и
- формирање плазме.



Слика 19. Дијаграм примене ласерске обраде са енергетског аспекта [5]

При $q_c = 10^4 \div 10^5$, W/cm^2 и $\tau = 10^{-4} \div 10^{-3}$, s јавља се само површинско загревање материјала, при чему могу да наступе различите структурне измене површинских слојева. У оваквим условима могу да се изводе различити видови површинске термичке обраде.

При $q_c = 10^5 \div 10^6$, W/cm^2 и $\tau = 10^{-5} \div 10^{-4}$, s могу да се врше технолошки процеси везани за површинско топљење материјала, као на пример: заваривање, сечење и сл.

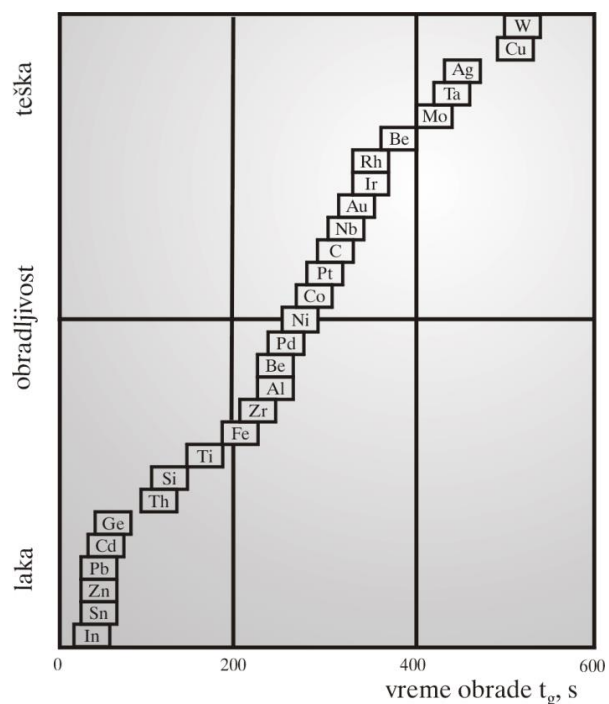
При $q_c = 10^7 \div 10^8$, W/cm^2 и $\tau = 10^{-5} \div 10^{-4}$, s могу да се врше технолошке операције везане за одношење материјала: побољшање отвора, сечење, гравирање, итд.

При $q_c > 10^8$, W/cm^2 и $\tau < 10^{-3}$, s не могу да се врше технолошке операције јер формирана плазма, испод површине материјала, практично потпуно апсорбује ласерске зраке и спречава њихово дејство на материјал [5].

- ОБРАДИВОСТ МАТЕРИЈАЛА ЛАСЕРОМ

Обрадљивост материјала ласером је различита и зависи од разних својстава материјала, а нарочито од топлотнофизичких својстава (специфични топлотни капацитет, топлотна проводност, топлота топљења и сублимације, температура топљења и испаравања, итд.).

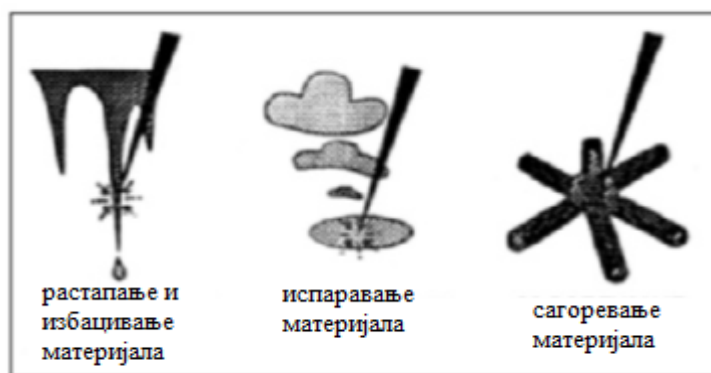
На слици 20 дат је приказ обрадљивости метала ласером.



Слика 20. Обрадљивост метала ласером [5]

Метали имају бољу обрадљивост уколико имају мању енергију испаравања и слабију топлотну проводљивост. На пример, Cu, Ag, Au (добра топлотна проводност) и W, Ir, Mo (велика енергија испаравања), врло тешко се обрађују ласером. Међутим, Zr, Ti (слаба топлотна проводљивост) и Zn, Pb, Sn (мала енергија испаравања), лако се обрађују ласером [5].

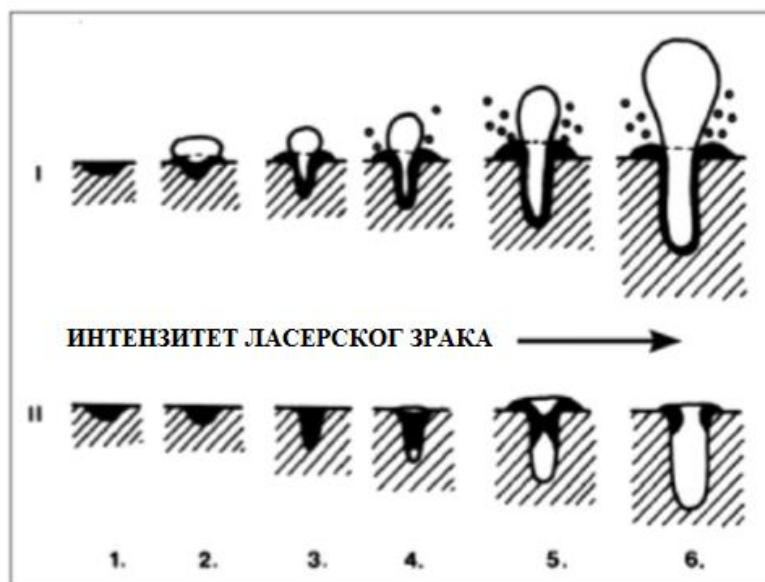
Скидање материјала при обради ласером се остварује путем абсорпције светлосне енергије ласерског зрака у површински слој материјала обратка, који се загрева на температури 4000 K до 6000 K. Тако високе температуре доводе до тренутног растапања, испаравања или сагоревања било ког материјала слика 21 и стварања малог удубљења – кратера. Као што се из наведеног види, механизам скидања материјала при обради ласером је исти као код снопа електрона, само је енергетски извор другачији.



Слика 21. Основни механизми скидања материјала при обради ласером [3]

Са истопљеним и испареним материјалом из обратка се одстрањују и чврсте честице што је резултат разарања материјала због високог термичког напрезања. У зависности од густине фотоског млаза, дужине импулса и материјала обратка, течна фаза у подручјима обраде износи 30 – 80 % од укупне количине скинутог материјала.

На рачун апсорбоване енергије ласерског зрака настаје кратер чија дубина и пречник зависе од енергетских карактеристика зрака слика 22 Види се да се повећањем интензитета пречника улазног отвора, али знатно спорије него што се повећава дубина продирања [3].



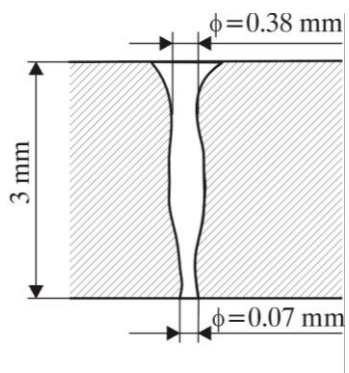
Слика 22. Зависност димензија кратера од интензитета ласерског зрака

| - за време обраде; || - после обраде [3]

- 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 продуката испаравања материјала при чему се добија рупа или отвор кружног облика.

При бушењу отвора у лимовима улазни пречник је већи од излазног, а кратер има улазни конус и венац на почетку (слика 23) [5].

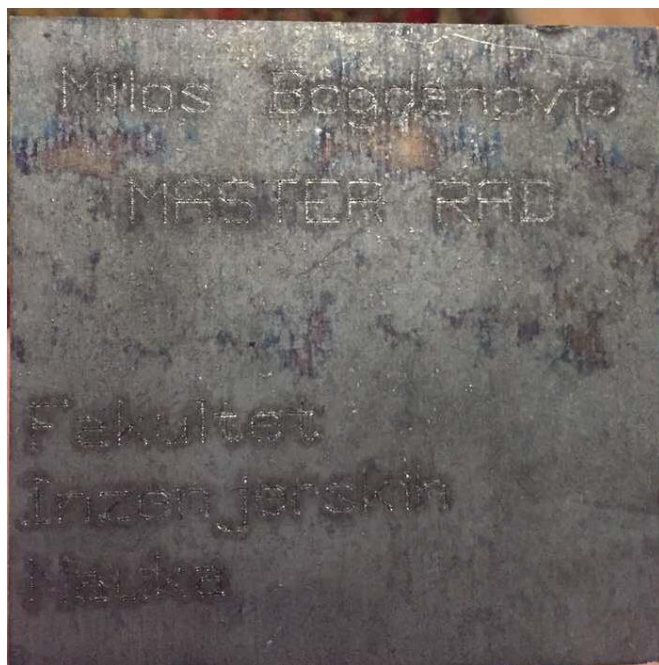


Слика 23. Попречни пресек отвора у челику добијен ласерским бушењем [5]

- ЛАСЕРСКО ГРАВИРАЊЕ

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

- маркирање или обележавање на предметима са наношењем серије бројева или других ознака за идентификацију, укључујући и израду логаритамских скала;
- израда печатерских ваљака;
- израда шема различитих танких превлака од различитих материјала које се наносе на изабрану подлогу, итд. На слици 24. Приказано је гравирање на ласеру “Trumpf 3040”.



Слика 24. Гравирање на ласеру "Trumpf 3040"

3. АНАЛИЗА КВАЛИТЕТА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

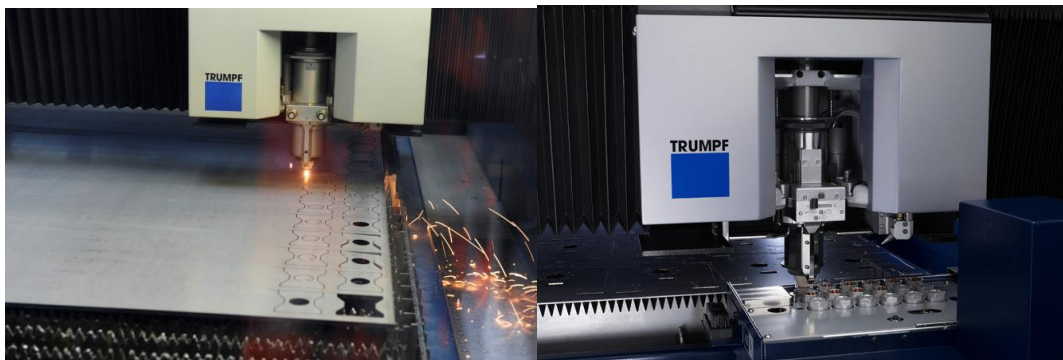
3.1. ОБРАДА ЛАСЕРОМ

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

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

Ласер производи кохерентан светлосни сноп ласерских зрака великог интензитета енергије кога карактерише правост и мала дисперзија.

У интеракцији са предметом обраде, ако је енергија већа од способности материјала предмета обраде да рефлектује, пренесе или распе ову енергију, долази до апсорпције светлосне енергије и њеног претварања у топлотну енергију, односно до пораста температуре на озраченом месту. При знатном порасту температуре долази до појаве локалног топљења или испаравања материјала, што зависи од интензитета генерисане топлоте и доводи до стварања рупе или отвора у предмету обраде. Померањем ласерског зрака или предмета обраде настаје процес ласерског сечења. На слици 25 приказано је сечење ласером *trumpf 3040*.



Слика 25. Сечење ласером *trumpf 3040*.

У много случајева нефокусирани сноп ласерских зрака индустријских ласера веће снаге, нема адекватну енергију да учини нешто више сем да загреје озрачену површину материјала предмета обраде. Међутим, ако се сноп усмери кроз сочиво за фокусирање, енергија је концентрисана на површину пречника мањег од 0.25 mm, што производи снагу од преко 10^6 W, способну да истопи многе материјале. Ласерске машине поред топлоте добијене фокусирањем снопа ласерских зрака користе и помоћни гас који има задатак да одстрани истопљени материјал из зоне сечења, да заштити сочива од испарења и помогне у процесу сагоревања.

- СЕЧЕЊЕ ЛАСЕРСКИМ СНОПОМ

Сечење ласерским снопом је прецизан поступак код кога су димензионе толеранције изрезаних комада исте као код механичких поступака. За вођење ласерског снопа користе се традиционалне CNC машине (за сечење у x-y равни) и роботске руке (за просторно сечење у 3 димензије). Нови ласерски резачи имају тачност позиционирања од 10 микрометара и поновљивост од 5 микрометара. Стандардна храпавост Rz расте са повећањем дебљина лима али се смањује са снагом ласера и брзином резања. При сечењу нискоугљеничног челика, ласером снаге од 800 W, стандардна храпавост Rz је 10 μ m за дебљину плоче од 1 mm, 20 μ m за 3 mm, и 25 μ m за 6 mm.

Овај поступак омогућава одржавање врло уских толеранција, често до 0.001 инча (0.025 mm). Ову врсту сечења одликује велика брзина, изузетно квалитетан и узан рез са оштрим прелазима на угловима и ниска топлотна дисипација. Недостатак су релативно мале дебљине које, код челика, не прелазе 20 mm.

Извори ласерског снопа код машина за сечење су гасни CO₂ ласер и чврсто течни Nd:YAG ласер. Због већег опсега снаге, ширу примену има CO₂ ласер са снопом таласне дужине 10,6 μ m. Ласерски сноп се води до радног комада системом огледала или оптичким влакнима. Фокусира се на радну површину одговарајућим сочивима како би се постигла потребна температура за процес сечења: иницијална температура за почетак сагоревања (ласерско кисеонично сечење), температура топљења (ласерско сечење топљењем).

Стандардна подела ласерског сечења је на три варијанте: 1. ласерско кисеонично сечење 2. ласерско сечење топљењем 3. ласерско сечење сублимацијом. Ласерско кисеонично сечење користи топлоту фокусираног ласерског снопа за иницијално загревање основног материјала до температуре паљења (између 1150°C и 1200°C). Као код гасног сечење, млаз кисеоника почиње са сагоревањем и пратећи ласерски сноп сагорева основни материјал и издувава га у виду шљаке из зоне сечење. Као пламен код гасног сечења, тако и ласерски сноп који окружује млаз кисеоника врши предгревање и неутралише ефекат одвођења топлоте. Ласерско кисеонично сечење се користи за нискоугљеничне и нисколегиране челике дебљина између 1 и 10 mm.

Снага ласера се креће од 1 до 5 kW. Ласерско сечење топљењем користи топлоту фокусираног ласерског снопа за топљење основног материјала, а млаз инертног гаса својом кинетичком енергијом издувава растопљени метал из зоне реза. Користи се за високолегиране челике и нежелезне материјале. Гасови за сечење су азот или аргон. За разлику од претходног поступка, сва енергија фокусираног ласерског снопа се троши на топљење материјала по целом пресеку.

Снага ласера је најмање 1 kW, а дебљина основног материјала је до 4 mm.

Притисци инертних гасова се крећу од 15 до 20 bar. Ласерско сечење сублимацијом користи топлоту фокусираног ласерског снопа за испаравање основног материјала по целом пресеку. За елиминацију пара метала из зоне реза користи се струја инертног гаса [5] [6].

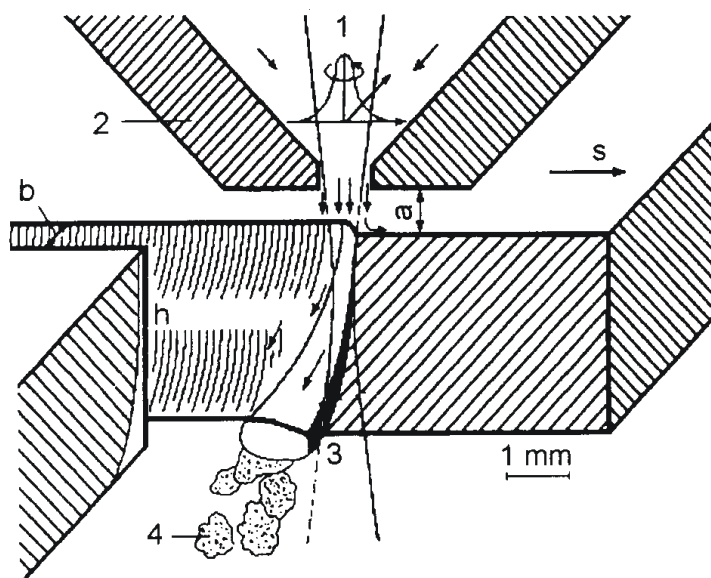
- МЕТОДЕ СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ

Постоје три методе сечења ласером:

1. Са потпуним одстрањивање материјала дуж линије раздвајања (испаривањем и што је чешћи случај, топљењем и ограниченим испаривањем);

2. Са делимичним одстрањивањем материјала дуж линије раздвајања (испаривањем материјала до одређене дубине и накнадним одвајањем материјала механичким дејством);

3. Без одстрањивања материјала дуж линије раздвајања (контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством и у току озрачења ласером или контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством механичке силе, примењене по озрачењу ласером). Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. На слици 26 дат је шематски приказ процеса сечења ласером [5].



Слика 26. Шематски приказ сечења ласером [5]

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 .

Поступци сечења, засновани на испаравању материјала предмета обраде, траже велику густину снаге, односно велику густину енергије. Остварују се по правилу, импулсним зрачењем.

Поступак сечења ласером уз коришћење помоћног гаса врши се по правилу, континуалним зрачењем и потпомогнут је топлотом која се развија у хемијској реакцији између O_2 и материјала предмета обраде (у случају реактивног гаса), односно ерозионим деловањем млаза гаса у зони сечења (у случају неутралног и инертног гаса), што битно смањује потребну енергију за процес сечења.

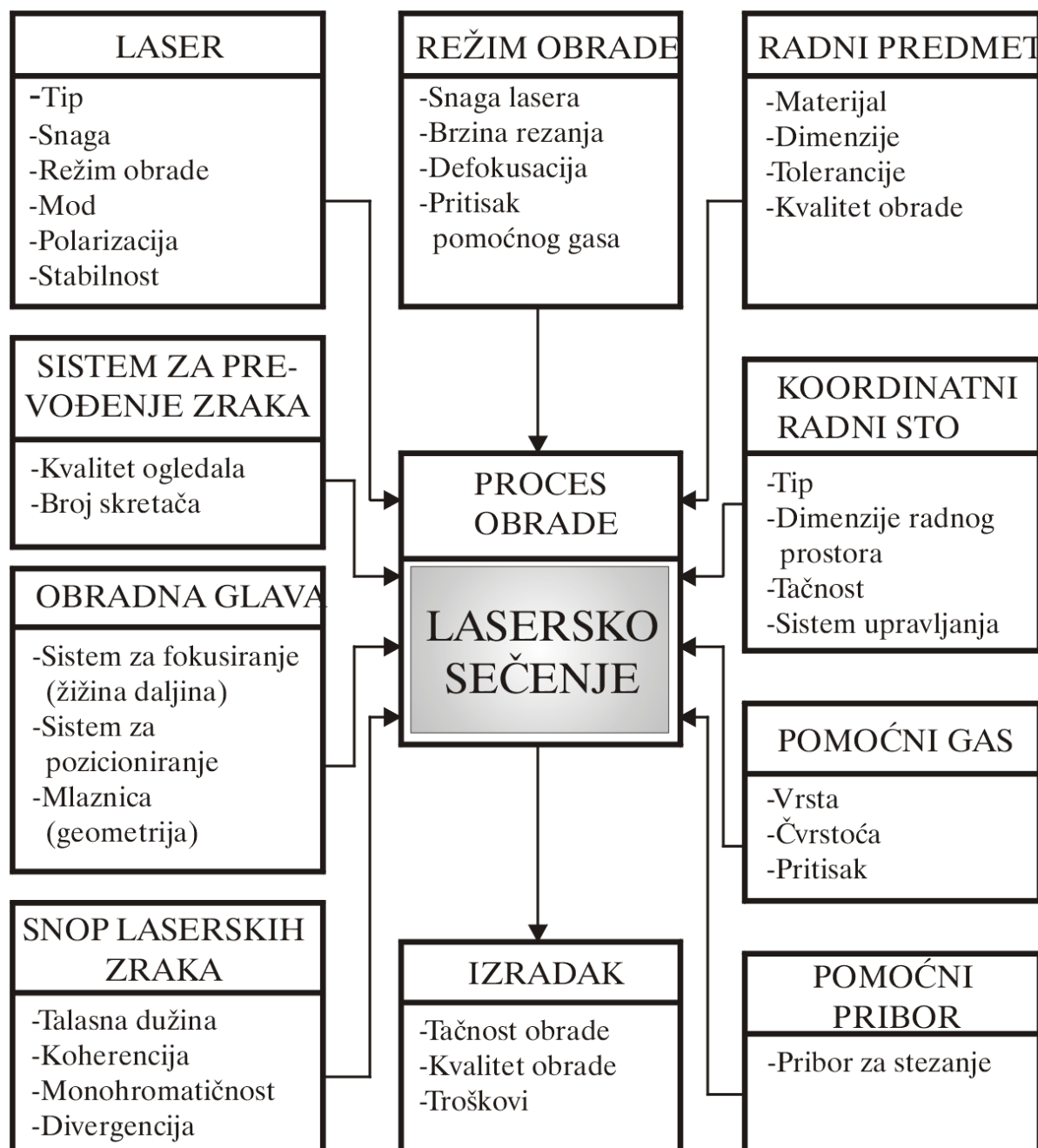
Метода 2. користи се за сечење металних слојева на керамичким подлогама и полимерних слојева на металним подлогама. Поступак захтева додатну механичку енергију, која врши накнадно сламање материјала када је зрачење ласером завршено.

Поступци 2. и 3. примењују се у случају кртих материјала - стакло, полупроводници, керамички материјали [5].

- ФАКТОРИ ПРОЦЕСА СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ

На слици 27 приказани су фактори који утичу на процес 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 жиге у односу на површину предмета обраде, притисак помоћног гаса) и
 - околина (радни услови: чистоћа, вибрације) [5].



Слика 27. Фактори који утичу на процес ласерског сечења [5]

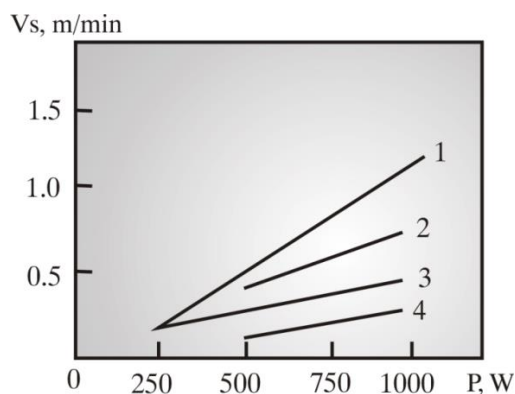
- РЕЖИМИ ОБРАДЕ

- СНАГА ЛАСЕРА

Најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине је снага ласера. Пошто је ласерско сечење термички процес, количина произведене топлоте је утицајни фактор од кога зависи способност ласера за сечење. Повећање снаге ласера омогућује сечење дебљих лимова и повећање брзине сечења. Добијање стабилног ласерског излаза представља кључни фактор за примену ласера у технологији обраде метала.

Под стабилним ласерским излазом подразумева се стабилност снаге, мода и концентрисане енергије.

На слици 28 приказана је зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.



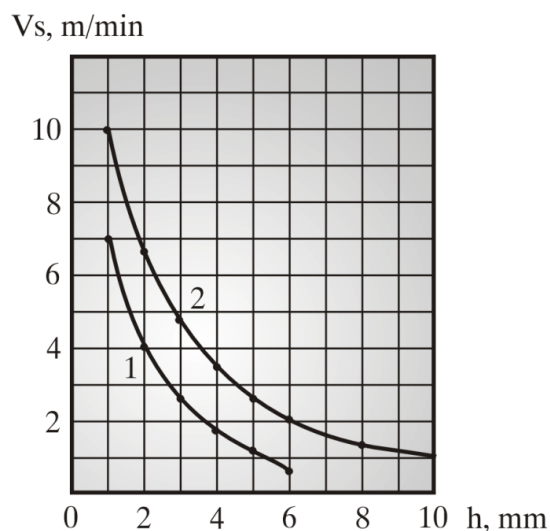
Слика 28. Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале:

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 ($h=1.5\text{ mm}$)

- БРЗИНА СЕЧЕЊА

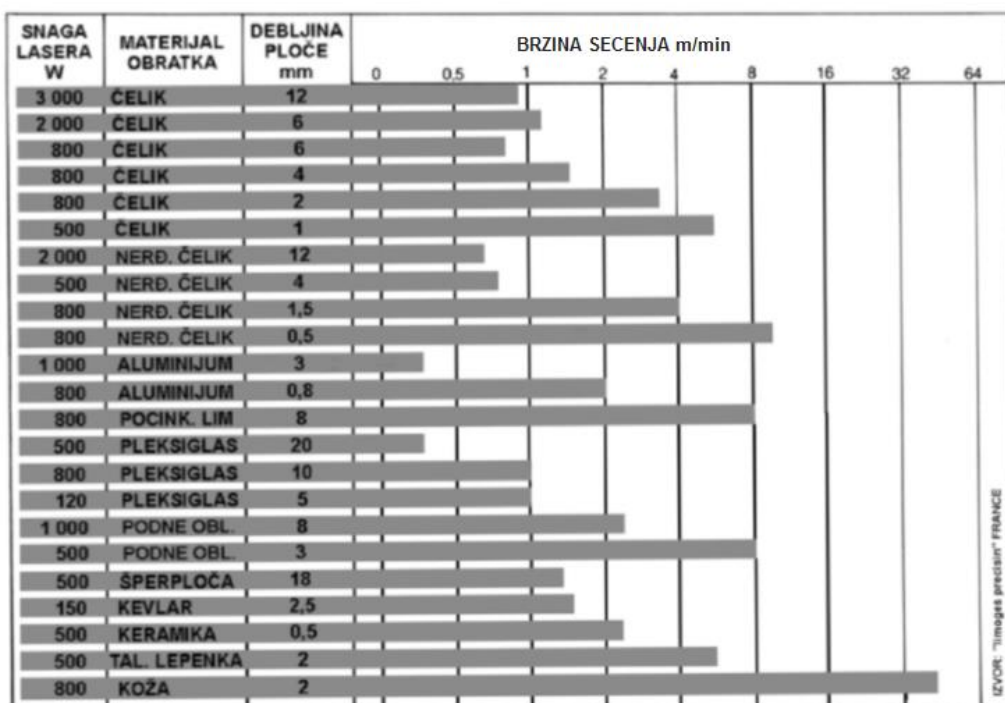
Продуктивност обраде, зависи директно од брзине сечења. Брзина сечења је други по значају битан параметар за сечење ласером и зависи од низа фактора: снага ласера, мод, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета итд. Узимајући у обзир квалитет реза и посматрајући брзину резања у функцији од дебљине материјала радног предмета, може се дефинисати област употребљиве брзине сечења која је ограничена доњом и горњом граничном кривом.

При одређеној дебљини материјала, са повећањем снаге ласерског млаза, брзина сечења се повећава (сл. 28). Уколико је дебљина материјала мала и при истој густини снаге, може се применити висока брзина сечења (сл. 29). На слици 29 приказан је утицај дебљине лима на максималну дебљину сечења.



Слика 29. Зависност максималне брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике: $P=625\text{ W}$, 2. $P=1250\text{ W}$ [5]

Ефикасност примене ласера при сечењу може се уочити из прегледа брзина сечења у зависности од снаге ласера, материјала обратка и дебљине плоче које су приказане номограму слика 30. Види се да материјал обратка битно утиче на брзину сечења, што је у вези са његовим својствима апсорције и рефлексије ласерског зрака. Тако нпр. сечење алуминијума, при скоро истим условима, се врши за око 6 пута спорије него код челика, код кога се ласером снаге 3000 W и дебљине плоче од 12 mm постиже брзина до скоро 1 m/min . [3]



Слика 30. Преглед брзине сечења помоћу ласерског зрака [3]

- ЖИЖНА ДАЉНА СОЧИВА

Избор сочива за фокусирање знатно утиче на квалитет реза. Сочива мале жижне даљине имају могућност веће концентрације снопа ласерских зрака и дају велику густину снаге, али је њихова примена ограничена за обраду због мале радне зоне. Погодна су за сечење радних предмета малих дебљина при чему се користе велике брзине сечења. Сочива веће жижне даљине дају мању густину снаге али је њихова радна зона много већа тако да се употребљавају за сечење дебљих материјала. На слици 31 приказано је чишћење сочива ласера “Trumpf 3040”.



Слика 31. Чишћење сочива (ацетоном) ласера “Trumpf 3040”

- ПОМОЋНИ ГАС

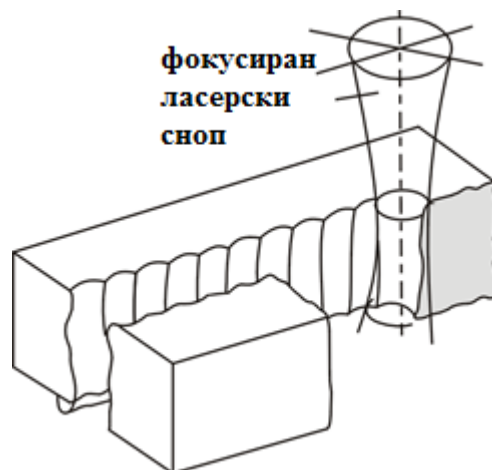
Задатак помоћног гаса је да у процесу сечења заштити сочива и помогне у одстрањивању испареног и отопљеног материјала предмета обраде. За већину метала користи се реактиван помоћни гас кисеоник, јер потпомаже егзотермну реакцију. Употребом кисеоника као помоћног гаса, повећава се укупна енергија употребљена 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, хрпавост обрађене површине) и физичко - хемијским карактеристикама на израженој површини материјала предмета обраде. Квалитет и тачност обраде сечења ласером, у највећем степену зависе од: брзине сечења, снаге ласерског млаза, врсте и притиска гаса, пречника и положаја млазнице у односу на површину предмета обраде, као и од квалитета управљачке јединице у случају NC или CNC ласерске машине за сечење лима. Тачност облика и димензија радног предмета одређени су карактеристикама радног стола.

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.

Сечење материјала фокусираним снопом ласерских зрака карактерише појава сужења реза. Величина сужења зависи од више фактора, првенствено од жижне даљине сочива за фокусирање и дефокусације али и од особина материјала предмета обраде и поларизације ласерских зрака.

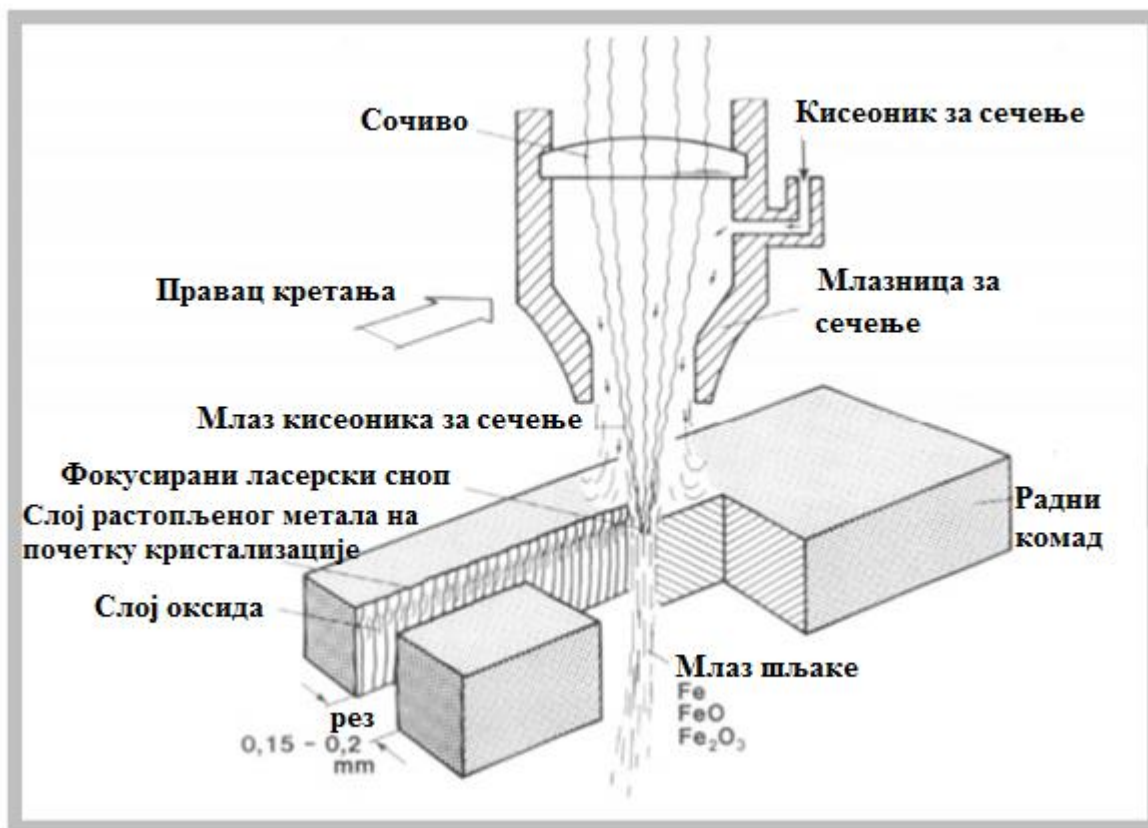


Слика 32. Шематски приказ ласерског млаза [5]

Ефикасност сечења ласером се може знатно повећати применом тзв. радног гаса (користе се O_2 , N_2 и Ar), који се убацује у смеру деловања ласерског зрака, а чији је задатак да побољша сагоревање и одстрањивање продукта обраде. Тачност сечења, под којим се подразумева уједињеност ширине реза, тј. паралелност одсечених површина, може се побољшати избором правца поларизације ласерске светлости у ондосу на правац резања, слика 34. илуструје резултате једног таквог експеримента на основу којих се може закључити да се највећа тачност реза може постићи ако се поларизација ласерске светлости остварује у правцу сечења. [6]

- ГАСОВИ КОЈИ СЕ КОРИСТЕ ЗА СЕЧЕЊЕ

Кисеоник је изузетно високе чистоће, веће од 99,95%. Смањењем чистоће кисеоника рапидно опадају брзина сечења и квалитет реза. Азот се употребљава за сечење високолегираних челика. Захтева се висока чистоћа, без трагова кисеоника. Остали гасови за сечење аргон и његове мешавине са кисеоником и азотом. Мешавине се користе за резање Al и Al легура. Мешавина аргона и кисеоника се користи за сечење Ti. [6]



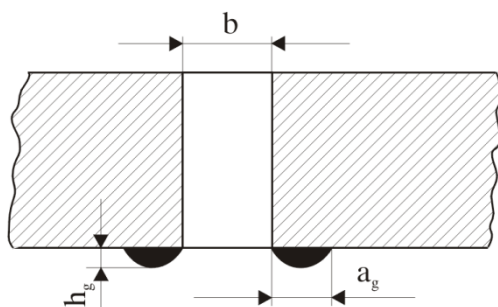
Слика 33. Шематски приказ принципа сечења ласерским снопом. Гас за сечење може да буде кисеоник (ласерско кисеонично сечење) или азот (ласерско сечење топљењем) [6]



Слика 34. Ефекти сечења ласером за различите правце поларизације у односу на правац реза [6]

Храпавост површине реза је такође битна карактеристика процеса сечења ласером. Визуелним посматрањем површине реза уочавају се две зоне: горња, у подручју улазне стране снопа (фино обрађена површина) и доња, у подручју излазне стране снопа (површина реза је грубља).

При обради метала, по дужини реза са доње стране, формира се гребен од отврдног метала и металних оксида, чиме се погоршава квалитет обраде. На слици 35 приказана је појава гребена приликом сечења метала.



Слика 35. Појава гребена при сечењу метала ласером [5]

Величина гребена зависи од снаге ласерског снопа, врсте и дебљине метала и притиска гаса. У табели 2 дати су подаци за параметре гребена h_g/α_g у зависности од снаге ласерског снопа за различите дебљине лима при притиску гаса од 5 bar. Као што се види у табели 2 димензије гребена су веће уколико је снага ласерског снопа мања, а дебљина лима већа.

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.

Табела 2. - Димензије гребена при различитим снагама ласерског снопа [5]

Дебљина лима, mm	Однос висине према ширини гребена при снази ласерског снопа, h_g/α_g		
	800, W	450, W	300, W
1.0	0.12/0.24	0.25/0.45	0.31/0.52
1.5	0.22/0.31	0.37/0.60	0.49/0.69
20	0.31/0.36	0.45/0.70	0.58/0.82

- ПРИМЕНА ЛАСЕРСКОГ СЕЧЕЊА

Ласерско сечење се данас широко примењује при сечењу сложених контура од тврдых и крхких 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.

Број прихватљивих ласера за ласерско сечење је врло мали. Практично, своди се на ласере са неодијумом, који могу да раде и у континуалном и у импулсном режиму рада. Једна од највећих примена у металопрерађивачкој индустрији је прецизно сечење лимова снопом зрака CO_2 ласера. CO_2 ласери се по свом учинку сврставају у сами врх ласерске технике. Користе се за сечење свих врста метала (угљенични челици, нерђајући челици, легирани челици, алуминијум, бакар, месинг, титан и др.)

- ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАЦИ СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ

Ласерско сечење има предности у односу на класичне поступке сечења материјала:

а) Врло јака топлотна енергија снопа ласерских зрака, сконцентрисана на екстремно малу површину, омогућава:

- узан и раван рез;
- минимални термички утицај на структуру материјала у зони реза;
- минимални термички утицај на деформисање предмета обраде.

б) Ласерски снап представља безконтактни резни алат, што значи:

- нема деловања сила па ни механичких деформација предмета обраде;
- нема трошења алата па ни потребе за заменом;
- може да сече материјал без обзира на његову тврдоћу.

ц) Ласерски снап је подесан за остваривање високог степена контроле и управљивости и тиме омогућује:

- потпуну аутоматизацију и лаку интеграцију у технолошким системима;
- неограничену могућност профилисања;

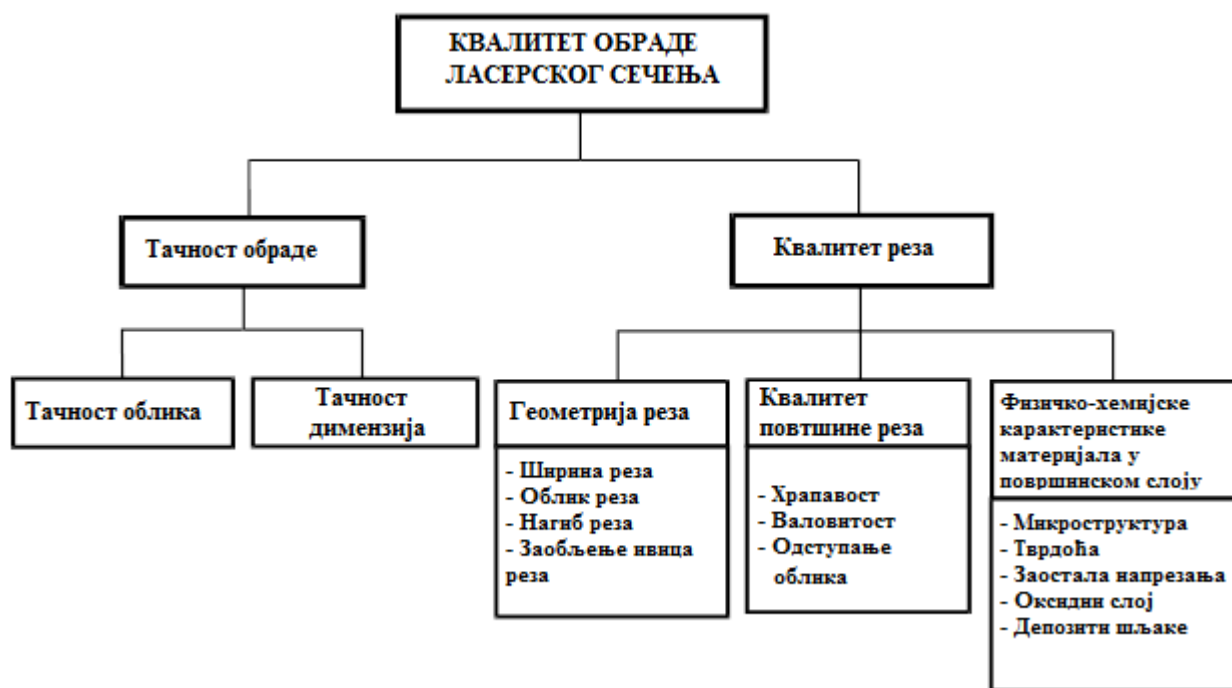
д) Смањењем времена обраде и помоћних времена повећава се економичност обраде.

е) Применом ласерске технологије повећан је квалитет производње, омогућен развој нових производа и повећана флексибилност производње.

Најважнији ограничавајући фактор за примену ласерске технологије је економски фактор. Ласерска машина за сечења материјала има велику набавну цену која се касније одражава на цену производа [5].

3.2. КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

Код сечења металних лимова значајан критеријум је квалитет обраде. Квалитет обраде код ласерског сечења одређен је тачношћу облика и димензија и квалитетом реза. Тачност облика и димензија радног предмета одређена је карактеристикама координатног радног стола (тачност позиционирања) као и квалитетом управљачке јединице у случају NC или CNC ласерске машине за сечење лима. При овоме, изузимајући из разматрања тачност облика и димензија, квалитет обраде код ласерског сечења своди се на квалитет реза. Квалитет реза се односи на геометрију реза, квалитет површине реза и физичко-хемијске карактеристике материјала у површинском слоју реза. Карактеристике квалитета обраде код ласерског сечења, посматрано са становишта тачности, прегледно су приказане на слици 36.



Слика 36. Карактеристике квалитета обраде код ласерског сечења [5]

Квалитет површине реза садржи оцену храпавости, валовитости и одступање облика-површинске грешке. Физичко-хемијске карактеристике материјала у површинском слоју реза односе се на површински слој настао у процесу ласерског сечења при топлотном дејству снопа ласерских зрака на материјал радног предмета. При томе се посматра микроструктура материјала, тврдоћа, појава заосталих напрезања и величина оксидног слоја [5].

3.2.1. КВАЛИТЕТ ПОВРШИНЕ РЕЗА

На површини ласерског реза уочава се специфичан облик неравнина. Ове неравнине у облику полукружних жљебова или бразди правилног облика последица су облика фокусираног снопа ласерских зрака. Брзине кретања радног предмета и процеса стварања, одношења и очвршћавања растопине на месту реза. Визуелним посматрањем површине реза код ласерског сечења уочавају се две зоне: горња, у подручју улазне стране снопа ласерских зрака, која је једна фино обрађена површина правилних жљебова на међусобном растојању $0.1 \div 0.2 \text{ mm}$, и доња зона, у подручју излазне стране снопа ласерских зрака, код које је површина реза грубља, са жљебовима насталим услед одношења растопине и шљаке из зоне реза. Из тог разлога одређено је да се храпавост површине реза мери на растојању једне трећине дебљине лима од горње ивице реза.

Разликује се храпавост површине реза у правцу осе снопа ласерских зрака и храпавост у правцу ласерског реза тј. у правцу који је нормалан на осу снопа ласерских зрака. Храпавост површине реза у правцу осе снопа ласерских зрака нема битног утицаја на разматрање проблема храпавости површине реза јер се код ласерског сечења ради о танким лимовима чија дебљина не прелази десетак милиметара. Храпавост површине реза у правцу који је нормалан на осу снопа ласерских зрака је прегледнија појава која се може посматрати и анализирати.

Оцена храпавости површине садржи облик и величину неравнина. Оцена храпавости површине реза у пракси се своди на истраживање појединих пресека кроз површину. Храпавост површине у неком пресеку приказана профилем на посматраној референтној дужини или дужини оцењивања, као графички метод, даје доста јасне податке о геометријском облику и величини неравнина. За праксу су, међутим, погоднији одређени параметри којима се храпавост површине изражава нумеричким подацима. Иако је у пракси уведен велики број таквих параметара, треба истаћи да се њима не може површина описати у потпуности. Параметри храпавости површине дефинисани стандардом односе се на карактеристике профила неравнина.

Најчешће примењивани параметри за оцену храпавости површине су: средња висина неравнина R_z и средње аритметичко одступање профила R_a и $R_{\max}$ - максимална висина неравнина. Средња висина неравнина R_z је средња вредност апсолутних вредности висина пет највиших испупчења и дубине пет најнижих удубљења у границама референтне дужине:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5}$$

где је: y_{pi} - висина i -тог највишег испупчења, y_{vi} - дубина i -тог најнижег удубљења.

Средње аритметичко одступање профила R_a је средња аритметичка вредност одступања профила у границама референтне дужине l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

За квантитативно одређивање квалитета реза код ласерског сечења поред параметара храпавости R_z и R_a користи се и "толеранција" нагиба реза (u). У табели 3. дата је зависност параметра храпавости R_z и "толеранције" нагиба реза (u) у функцији од дебљине лима (s), одређена стандардом DIN 2310.

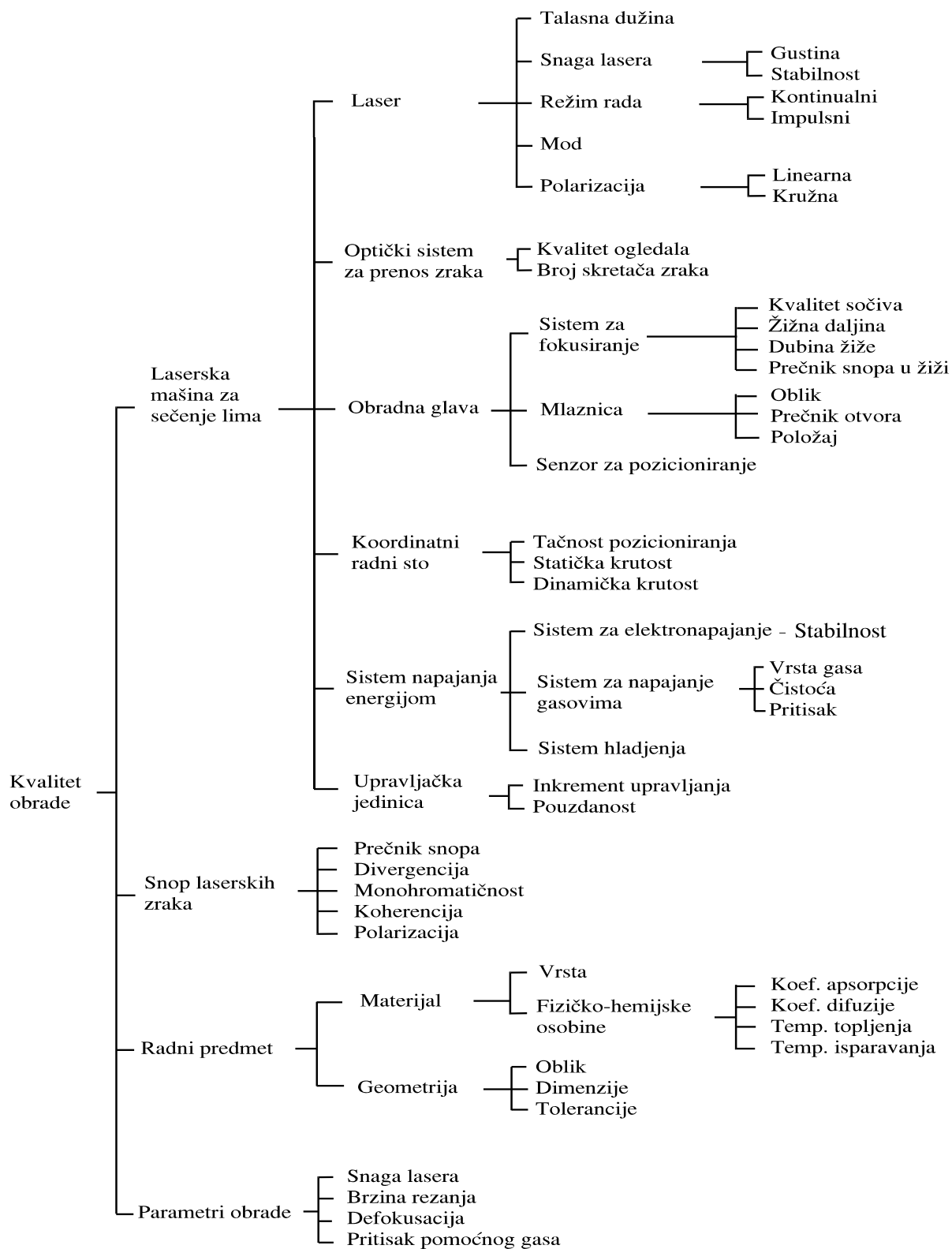
Табела 3. Зависност параметра храпавости R_z и "толеранције" нагиба реза [5]

Средња висина неравнина R_z (μm)	"Толеранција" нагиба реза u (mm)
$R_{z,1} = 10+2 s$	$u_1 = 0,05+0,0025 s$
$R_{z,2} = 30+3 s$	$u_2 = 0,10+0,015 s$
$R_{z,3} = 60+4 s$	$u_3 = 0,25+0,025 s$
s (mm) - дебљина лима	

У доњем делу ознаке за параметар храпавости R_z додате су ознаке за "поља" 1, 2 и 3. "Поље 1" означава да квалитет реза треба да испуни услов: $R_z \leq R_{z,1}$ и $u \leq u_1$. Квалитет I је мање оштар критеријум. Обухвата и поље 1 и поље 2, тако да мора бити испуњен услов $R_z \leq R_{z,2}$ и $u \leq u_2$. За квалитет II (поља од 1 до 3) важи услов $R_z \leq R_{z,3}$ и $u \leq u_3$ [5].

3.2.3. УТИЦАЈНИ ФАКТОРИ НА КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ

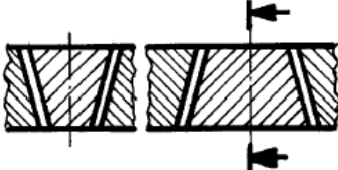
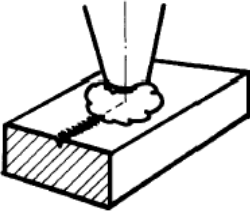
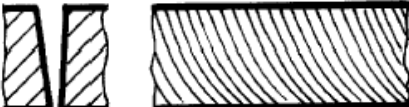
Од бројних фактора највећи утицај имају: снага ласера, особине материјала радног предмета, брзина резања, врста и притисак помоћног гаса, карактеристике снопа ласерских зрака, временска стабилност снаге ласера, прилагођавање снопа ласерских зрака и параметара обраде процесу резања и др. На слици 37 дат је приказ утицајних фактора на квалитет обраде код ласерског сечења [5].



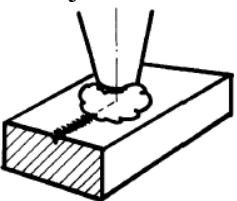
Слика 37. Утицајни фактори на квалитет обраде код ласерског сечења [5]

3.3. ГРЕШКЕ ПРИ ОБРАДИ СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ

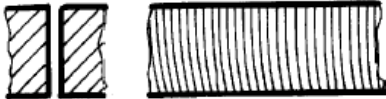
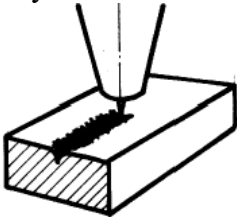
Табела 4. Примери грешака, узрока настанка и начина отклањања [5]

ГРЕШКА	МОГУЋИ УЗРОЦИ	РЕШЕЊЕ
Угаоно сечење 2 стране су у реду, а 2 су лоше 	Погрешна поларизација огледала, неисправно монтирано или оштећено Поставити поларизацију огледала уместо скретања огледала	Проверите огледало поларизације Проверите извијено огледало
Светло плава плазма, радни комад се не пресеца 	Погрешан гас (N_2) Превелика брзина Мала снага	Користити кисеоник као помоћни гас Смањити брзину Повећати снагу
Грубо сечена површина 	Велики притисак гаса Оштећене млазнице Велики пречник млазнице	Смањити притисак гаса Заменити млазнице Поставити исправне млазнице
Није истопљен, приликом сечења савијен је уназад Исеците према дну 	Велика брзина	Смањити брзину
Кратер 	Висок притисак гаса Мала брзина Висок фокус Скале су на површини листа Прегревање обратка Илустрација материјала	Смањити притисак гаса Повећати брзину Поставити ниже фокус Користите бољи материјал
Врло груба обрада 	Позиција фокуса је превисока Висок притисак гаса Мала брзина Материјал је много врућ	Поставити ниже фокус Смањити притисак гаса Повећати брзину Охладити материјал

Табела 5. Нерђајући челик : сечење под високим притиском са N_2 [5]

ГРЕШКА	МОГУЋИ УЗРОЦИ	РЕШЕЊЕ
У реду, нормални истопљени бркови 	Низак фокус Велика брзина	Поставити више фокус Смањити брзину
Груби бркови на обе стране, бркови оксидују, на великим контурама 	Висока позиција фокуса Мала брзина Мали притисак гаса Материјал је много врућ	Поставити ниже фокус Повећати брзину Повећати притисак гаса Охладити материјал
Груби бркови на резној ивици, само са једне стране 	Млазница није центрирана Висока позиција фокуса Низак притисак гаса Мала брзина	Центрирати млазницу Поставити ниже фокус Повећати притисак гаса Повећати брзину
Исећи жућкасте ивице	Азот са кисеоником	Користите бољи квалитет азота
Права линија плазме 	Велика брзина Ниска снага Низак фокус	Смањити брзину Повећати снагу Поставити више фокус
Зрак прекида	Велика брзина Ниска снага Низак фокус	Смањити брзину Повећати снагу Поставити више фокус
Плазма у угловима	Угао толеранције је висок Подешавање је високо Високо убрзање	Смањите угао толеранције Смањите подешавање или убрзање
Сноп прекида при покрету	Visoko start-up ubrzanje Nizak fokus Ne može biti izbijen rastopljeni materijal	Високо start-up убрзање Низак фокус Не може бити избијен растопљени материјал

Табела 6. Челичне конструкције: Резање са O_2 [5]

ГРЕШКА	МОГУЋИ УЗРОЦИ	РЕШЕЊЕ
Није истопљено, нормално	Добро извршење посла Добра брзина	
Озбиљно скретање приликом сечења на дну, засек шири на дну 	Велика брзина Мала снага ласера Низак притисак гаса Висока позиција фокуса	Смањити брзину Повећати снагу ласера Повећати притисак гаса Поставити ниже фокус
Истопљени материјал на дну је, лако уклонити 	Велика брзина Низак притисак гаса Висока позиција фокуса Ниска снага ласера	Смањити брзину Повећати притисак гаса Поставити ниже фокус
Истопљени материјал се лако уклања, у једном комаду 	Висока позиција фокуса	Поставити ниже фокус
Истопљени материјал се тешко уклања 	Велика брзина Низак притисак гаса Прљав гас Висока позиција фокуса	Смањити брзину Повећати притисак гаса Користите чистији гас Поставити ниже фокус
Истопљени материјал само са једне стране 	Истопљени материјал само са једне стране	Заменити и центрирати млазницу
Заменити и центрирати млазницу 	Мала снага Велика брзина	Повећати снагу Смањити брзину

4. ПРЕГЛЕД И КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ TRUMPF TRULASER 3040

4.1. НАМЕНА И ТЕХНИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ МАШИНЕ

Ласерска машина trumpf truma 3040 се налази у компанији Wacker Neuson – производња делова за багере у Крагујевцу. Намене је за индустријско сечење, најчешће челика са ознаком S355J2+N. У табели 7. Наведени су материји дебљине предвиђени за сечење на овој ласерској машини.

Табела 7. – Материјали предвиђени за сечење

Материјали предвиђени за сечење	
Челик дебљине 4 ÷ 25 mm	S355J2+N
Нерђајући челик и челик отпоран на киселине дебљине 12 mm	X5CrNi18 -10
Алуминијум дебљине 8 mm	AlMg3
Месинг дебљине 4 mm	CuZn40
Титанијум дебљине 4 mm	Ti
Меки чекик 20 mm	DC01
	DC02
	DC03

Табела 8. Техничке карактеристике ласера Trumpf 3040.

РАДНИ ПРОСТОР	X	4000 mm
	Y	2100 mm
Кретање главе за сечење	Z	115 mm
Максимална носивост радног стола		900 kg
Прецизност позиционирања		± 0.1 mm
Поновљивост		± 0.5 mm
Брзина позивионирања по X i Y оси истовремено		113 m/min
Максимално убрзање		4.5 m/s^2
Максимална брзина сечења		140 m/min
Максимална снага ласера		5 000 W
Дужина машине		12000 mm
Ширина машине		7600 mm
Висина машина		2200 mm
Тежина машине		14000 kg
Максималне димензије табле предвиђене за сечење 4 000 mm x 2100 mm ; S=25mm		

Код ласера "Trumpf trulaser 3040" за обраду се користи енергија светлости – фотона, која се на посебан начин појачава и путем абсорције претвара у топлотну енергију потребну за обраду. Процес стварања стимулисане енергије фотона зрачења побуђује помоћу блиц лампе – бљескалица напуњене инертним гасом (CO₂). Систем за обликовање вођење снопа електрона, односно ласерске светлости има задатак да параметре снопа формираног у извору трансформише у параметре који су потребни за отварање процеса обраде и таквог доведе до површине обратка.

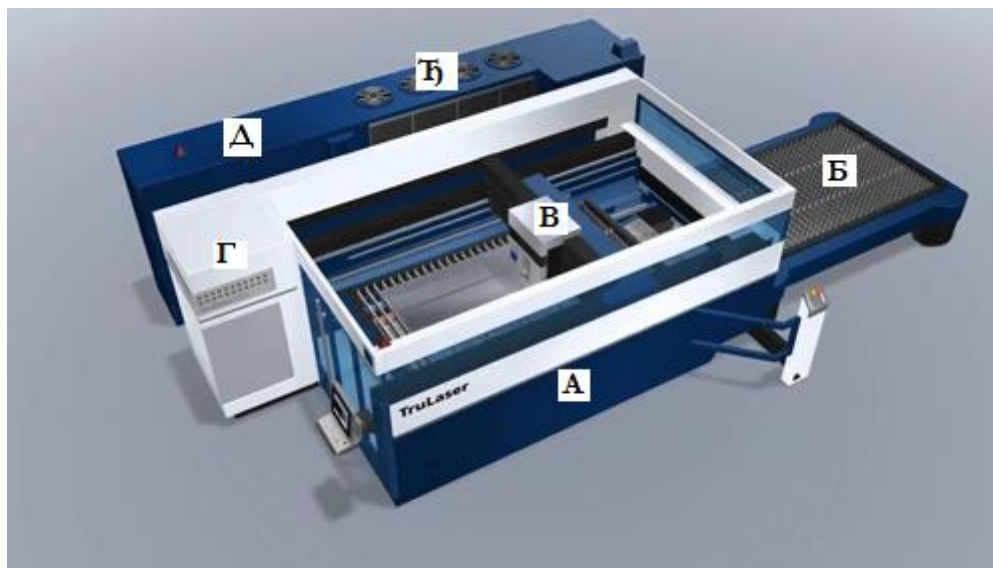
Обликовање и вођење се постиже фокусирањем и скретањем снопа (систем за обликовање се састоји од огледала пропусних и непропусних, сочива и призми).

Концентрација енергије у фокусу код ласера Trumpf truma 3040 специфична снага зрака износи: $q = (10^6 \div 10^{10}) \text{ W/cm}^2$.

Могућност промене енергетског стања снопа се код Трумфовог ласера постиже помоћу промене таласне дужине светлости, што је веома тешко с обзиром да већина ласерских тела емитује светлост тачно одређене таласне дужине. Због тога се за то много више користе параметри побуде ласера. Режим рада може бити непрекидан (континуални) и прекидан (импулсни).

Средина у којој се изводи обрада је у атмосфери, што значи да нема потребе за посебним коморама у којој се врши обрада сечења. Код овог ласера потребно је накнадно чишћење површина и обрађивање оштрих ивица због присусва угљенисаних честица и оксидационог слоја. Постиже се релативно висока тачност обраде (због веома малих димензија фокусираног снопа), али при изради отвора добија већи пречник на улазу него на излазу, због облика снопа и избацивања растопљеног материјала поред ивица отвора под притиском насталих пара.

Ограничења у примени ласера “Trumpf Trulaser 3040” су због високог степена рефлексије ласерског зрака, веома се тешко обрађују метали као што су: злато, сребро, бакар итд.



Слика 38. Ласерска машина Trumpf 3040:

А – Ласерска машина, Б – Радни сто, В – Ласерска глава, Г – Резонатор, Д – Управљачка јединица (ел. Ормар), Ђ – Хладњаци



Слика 39. Ласерска машина *Trumpf 3040* [7]



Слика 40. Ласерска машина *Trumpf 3040* у компанији “*Wacker Neuson*”, Крагујевац



Слика 41. Ласерска машина Trumpf 3040 у компанији “Wacker Neuson”, Крагујевац

4.2.1. Управљачка јединица

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

SIEMENS

Siemens врши управљање заменом радних столова и контролом заштитних система на ласерској машини. У управљачкој јединици је смештен и главни прекидач напајања ласера.

Рад на Sinumerik 810/840D је организован преко 5 менија који се још називају и радна подручја. А то су:

- Ручно управљање машином,
- Уношење података за програмирање и података о алатима,
- Писање и уношење програма,
- Учитавање програма и података,
- Приказ аларма и порука.

Siemens је до садана тржиште пласирао већи број управљачких јединица заснованих на отвореној архитектури, који су своје место нашли у универзалним и специјалним машинама алаткама конвенционалне архитектуре, машинама алаткама на бази паралелних механизма и у свету све популарнијем ретрофитингу (реконструкција старијих машина алатки). Тренутно су на тржишту најактуелнији модели из серија Sinumerik 840D и 840C.

Управљачки системи новије генерације се у комбинацији са новим моделима серво мотора (SIMODRIVE) могу користити за градњу машина алатки које по данашњим критеријумима имају екстремне карактеристике. То подразумева, у теоријском смислу, брзине обраде до 300 m/min, убрзања до 45G и сл. Примена управљачких система Sinumerik омогућава кориснику коришћење читавог низа напредних функција од којих су неке укључене у основну конфигурацију система, а неке су дате опционо [17].

Ту спадају:

- 2D спирална интерполација,
- програмабилно убрзање,
- надзор процеса обраде,
- надзор алата,
- компензација грешке по квадрантима,
- контрола 10 канала и 31 управљану осу / вретена (опционо),
- spline интерполација (опционо),
- компензација дужине алата (опционо).

Управљачка јединица SIEMENS 840D (слика 42) омогућава управљање до 31 осе или вретена са 10 канала. Заснована је на PC платформи, до 31 осу/вретено и применљива је за све технологије.

Нова PCU (Personal Computer Unit) постоји како у варијанти без хард диска (PCU 20), тако и у варијанти са хард диском (PCU 50) и садржи у интегралној форми разне могућности комуникације (Ethernet, MPI, PROFIBUS DP). Оперативни систем је Windows NT [17].



Слика 42. Управљачки систем Siemens 840D [17]

Управљачка јединица SIEMENS 840C (слика 41) је предвиђена за решавање сложенијих управљачких задатака који укључују управљање дигиталним и аналогним погонима.



Слика 43. Контролни панел управљачког система SIEMENS 840C [17]



Слика 44. Приказ софтверских додатака за управљачке “siemens” новије генерације [17]

Осим флексибилности управљачких система, код овог произвођача се може приметити присуство већег броја софтверских додатака за саме управљачке јединице, који су уобичајени у конвенционалним РС рачунарима, али се у управљачким системима први пут појављују. Омогућена самој управљачкој јединици уз помоћ видео линка комуницирати са инжењерима из одељења технологије.

CNC – управљачка јединица садржи CNC (Computer Numeric Control) контролер. CNC контролер врши конвертовање планове сечења у координате по осама. Контролише кретање главе ласера преко предмета обраде. Аутоматски прилагођава брзину кретања главе сечања као и снагу ласера према задатој контури предмета обраде.

Ласерска машина извршава програм независно од управљачког терминала што омогућава креирање и модификовање геометријских контура у току самог извршавања програма.



Слика 45. Управљачка јединица:

А – CNC управљачка јединица, Б – SIEMENS управљачка јединица

4.2.1. Управљачки терминал

Управљачки терминал се налази на обртном носачу који је причвршћен за ласерску машину. Носач му омогућава обртање око осе носача као и хоризонтално померање.



Слика 46. Управљачки терминал

Управљачки терминал садржи:

- Матичну плочу и процесор
- Хард диск
- USB 2.0 интерфејс
- DVD-RW уређај за пребацивање података
- Мрежну картицу
- Windows XP W7,8 оперативни систем
- Монитор осетљив на додир
- Стандардна РС тастатура



Слика 47. USB уређај за пребацивање података

Управљање машином се врши преко екрана осетљивог на додир или преко тастатуре. Пренос података се може вршити преко мрежне картице директним учитавањем података у управљачки терминал или преко улазно излазних уређаја DVD-а или USB порта.



Слика 48. Управљачки терминал са основним командама



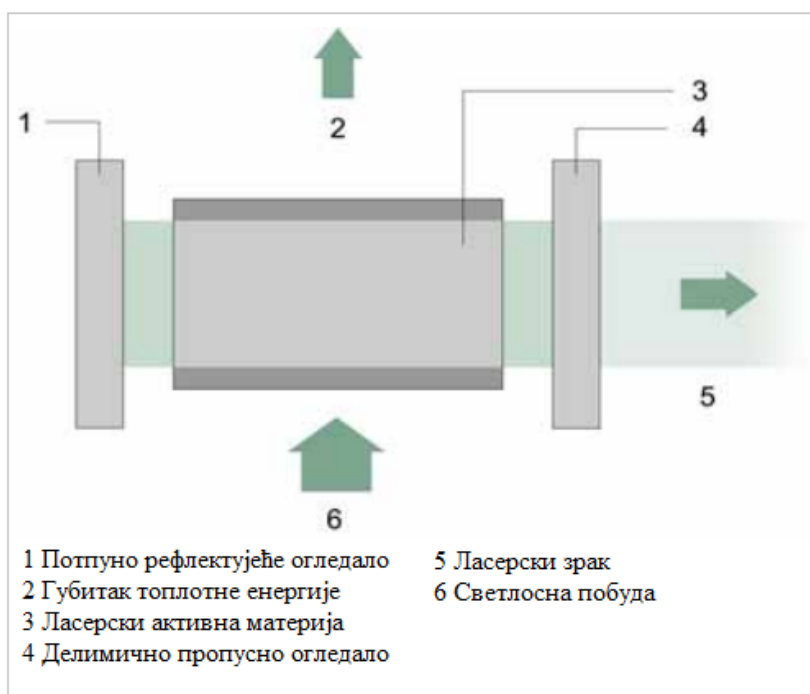
Слика 49. Ласерски модул и индикатор лампа

Основне карактеристике:

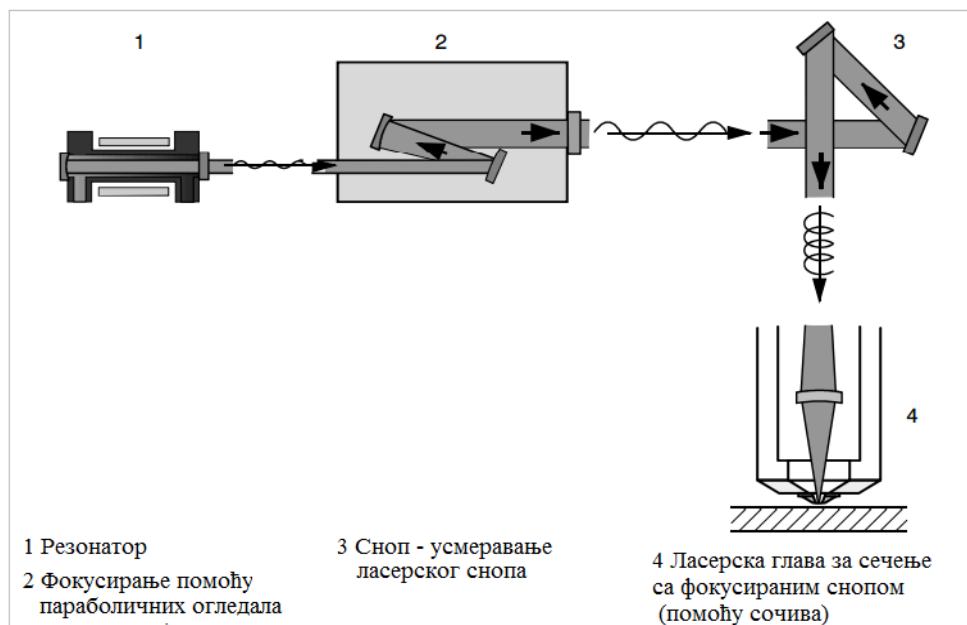
Табела 9. – Техничке карактеристике ласерског модула

Максимална снага ласера	5 000 W
Ласер медијум	CO ₂
Таласна дужина снопа	10.6 μ m
Пречник ласерског снопа	20 mm
Дивергенција ласерског снопа	≤ 2
Поларизација	кружна

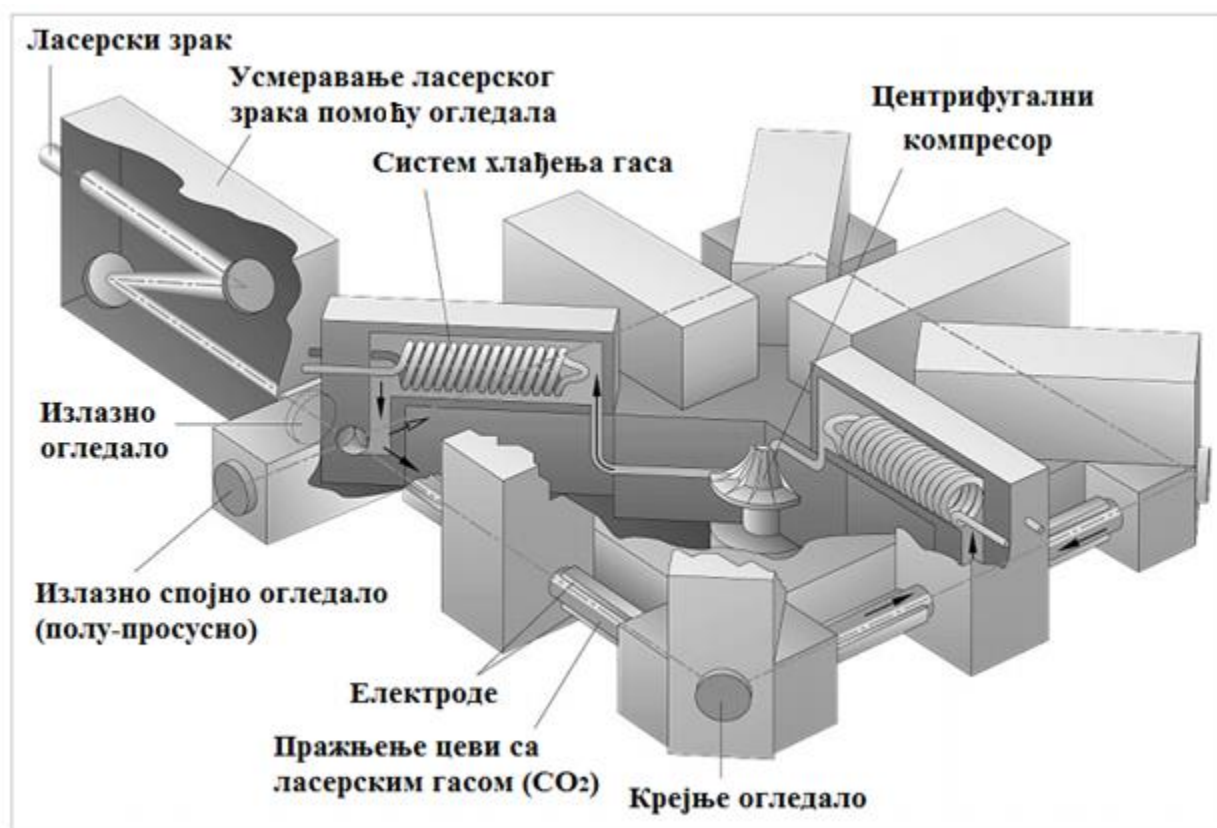
4.2.3. Ласерски модул – Trumpf 3040



Слика 50. Основне компоненте ласера Trumpf 3040 [8]



Слика 51. Кретање ласерског зрака између резонатора и радног предмета код ласера Trumpf 3040 [8]

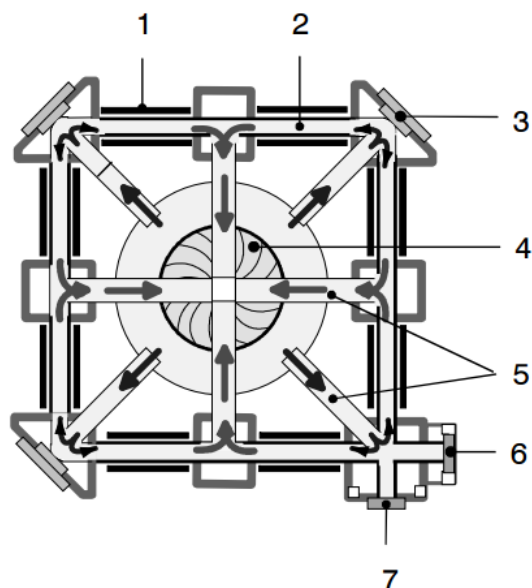


Слика 52. Резонатор ласера Trumph 3040 [8]

Процес електричног пражњења који се одвија у цеви подиже температуру гасне мешавине. Познато је да је процес настанка ласерског снопа могућ само на нижим температурама, што значи да би на повишеним температурама дошло до распада гасних молекула, а самим тим и до прекида процеса, тј. до настанка ласерског снопа. Из тог разлога гас мора да циркулише великом брзином, то се постиже коришћењем гасних компресора који се хладе посебним кулерима.

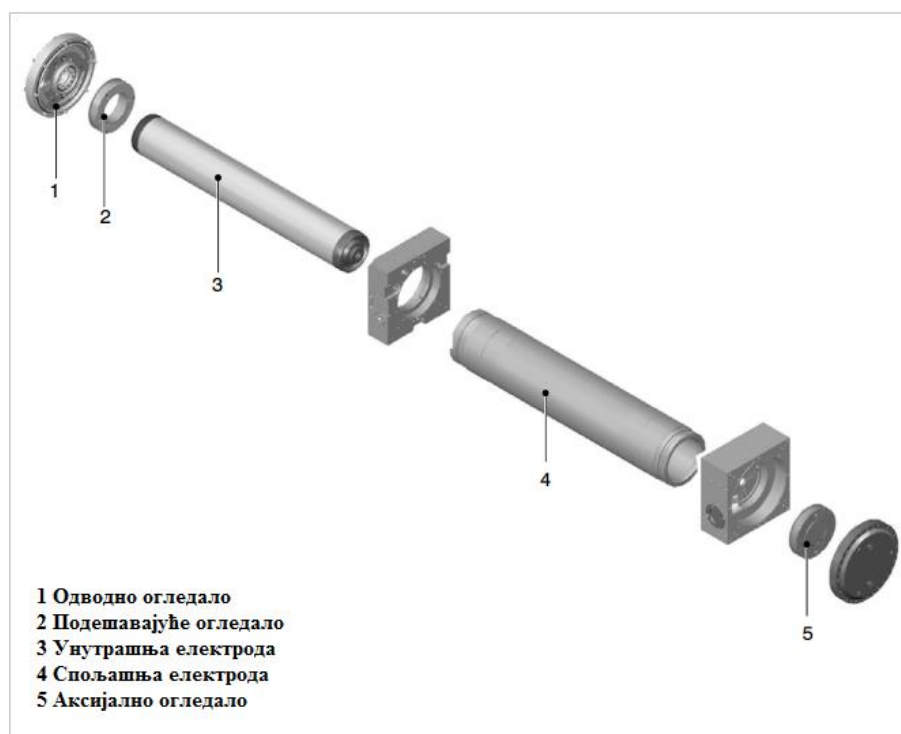
Велика брзина протока гаса значи да гас проводи мање времена у цеви за пражњење, а самим тим се и мање загрева, тако да захтева мање хлађења у односу на друге типове ласера. Део гаса се приликом циркулације континуирано замењује новим гасом што омогућава несметано функционисање процеса настанка ласерског снопа.

- 1 Електроде
 - 2 Пажњење цев са мешањем гаса
 - 3 Угаона огледала за усмеравање снопа
 - 4 Турбина
 - 5 Гасно пажњење
 - 6 Задње огледало
 - 7 Излазно спољно огледало
- ; правац протока гаса



Слика 53. Правац протока гаса резонатора [8]

- ОГЛЕДАЛА ЗА УСМЕРАВАЊЕ ЛАСЕРСКОГ СНОПА



Слика 54. Конструкција резонатора [8]

Усмеравање ласерског снопа ван резонатора врши се огледалима са могућношћу подешавања односно ARC огледалима (**A**daptive **R**adius **C**ontrol). Ова огледала оптимизују пречник ласерског снопа и обезбеђују скретање ласерског снопа за 90° ,

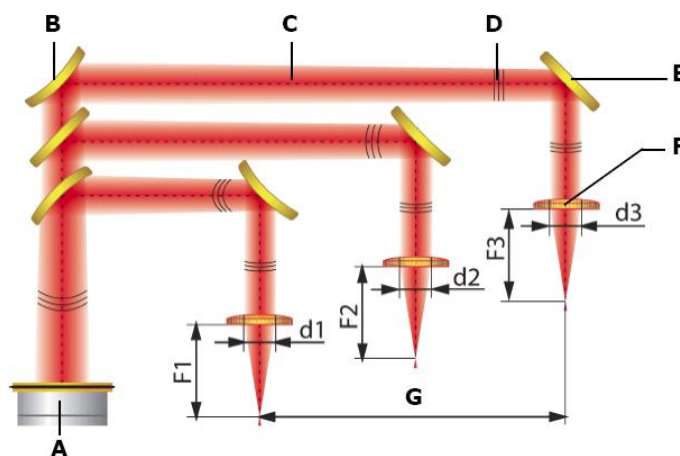
Постоје два начина рада ARC огледала:

1. Константан пречник ласерског снопа преко целе радне површине и константна густина ласерског снопа у жижној тачци.
2. Варирање пречника ласерског снопа у зависности од материјала који се сече, подешавањем параметара сечења.

У циљу постизања оптималних параметара процеса неопходно је контролисати снагу ласера у зависности од контуре предмета обраде, брзине сечења и осталих параметара, односно изабрати одговарајући режим рада ласерског модула.

У највећем броју случајева ласер ради у режиму континуираног таласа (CW - continuous wave). Често није само довољно смањити снагу ласера у режиму континуираног таласа, већ је потребно варирати снагу ласера мањег односа импулса и пауза.

За комплексне облике предмета обраде и материјале које се теже секу импулсни режим је од посебног значаја. Огледало је конструисано тако да обезбеђује константне оптичке параметре за различите углове скретања ласерског снопа. Површина огледала се савија уз помоћ контролисаног притиска воде, од максимално 14 бара, чиме се добија жељено закривљење огледала. На слици 55 је приказано следеће: А – Ласерски снап из резонатора, В – ARC огледало, С – Ласерски снап, D – Фронт таласа, Е – Огледало за усмеравање ласерског снопа на носачу главе за сечење, F – Сочиво у глави за сечење, G – Радна површина [5]



Слика 55. Шематски дијаграм рада са константним пречником ласерског снопа [5]

- РЕЖИМИ РАДА ЛАСЕРСКОГ МОДУЛА

Овај ласерски модул подржава следеће режиме рада:

1. Режим континуираног таласа (CW)
2. Режим модулације (MD)
3. Импулсни - пулсни режим (NP)

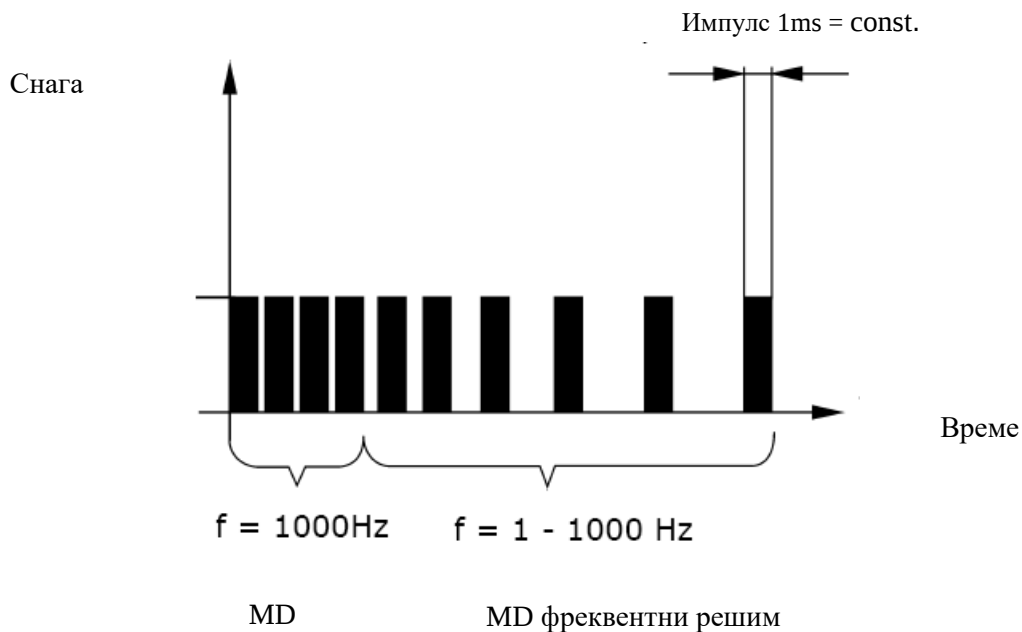
Режим континуираног таласа значи да ласер за време процеса сечења ради континуирано са задатом снагом.



Слика 56. Режим рада континуалног таласа [5]

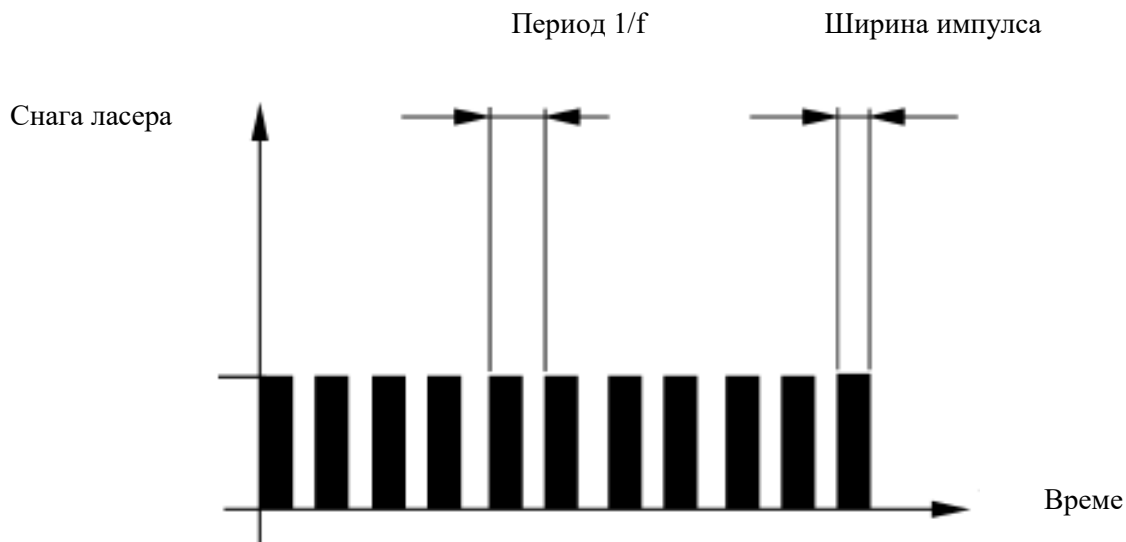
Режим модулације се може користити само када је у функцији спс контролер. У режиму модулације снага ласера се мења у зависности од кретања главе за сечење (убрзање или заустављање).

Овај мод онемогућава прегревање материјала у угловима и малим контурама. При фреквентној модулацији, фреквенција се варира од 1 до 1000 Hz у функцији од брзине кретања. Са константним импулсом трајања 1 милисекунде омогућава подешавања снаге ласера према тренутној брзини ласера.



Слика 57. Режим модулације [5]

Импулсни или пулсни режим се користи када је потребно сећи рупе малих пречника. Минимални пречник може бити пола дебљине лима, (и код просецања финих контура).



Слика 58. Импулсни режим [5]

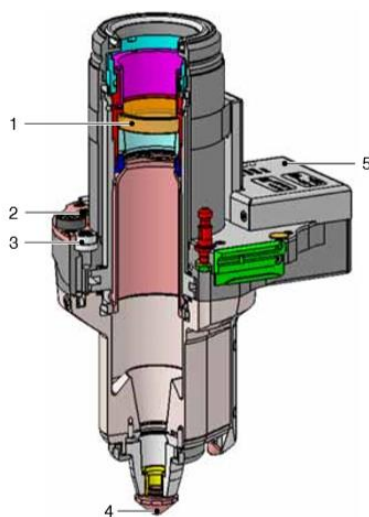
4.2.4. Глава за сечење

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



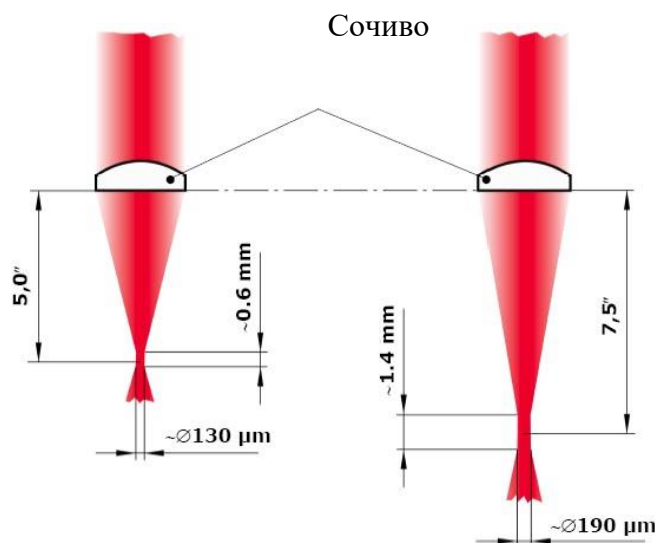
Слика 59. Глава ласера *Trumpf 3040*:

А – Тастер за ослобађање главе, Б – Ваљци за централну млазницу (подешавање посмака), В – Млазница за хлађење при сечењу помоћу уља, Г – Сигурносне лампице за ослобађање главе ласера.



Слика 60. Слика ласерске главе: 1- Сочиво, 2 – Ваздух под притиском, 3 – сечење гасом (азот, кисеоник), 4 – Дизна, 5 – Електронска кутија. [8]

У циљу постизања оптималних резултата сечења у зависности од дебљине материјала код сечења је могуће користити главу за сечење које има сочиво жижне даљине 5" или 7,5". На слици 61 су приказане поменуте главе за сечење.



Слика 61. Жижна даљина [5]

У табели 10. су дате карактеристике ласерског снопа у зависности од положаја жиже.

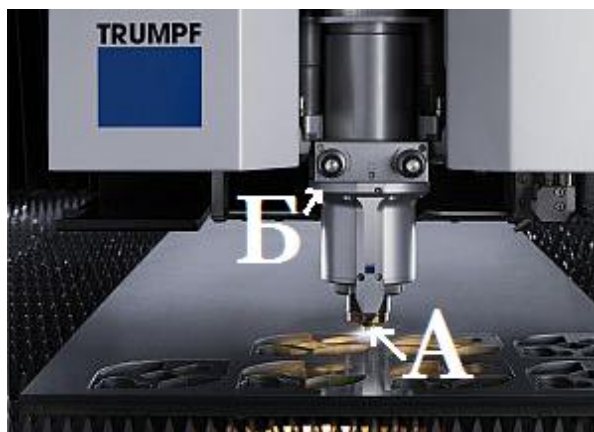
Табела 10. – Положај жиже [5]

Жижна даљина 5"	Жижна даљина 7.5"
Мали пречник жиже	Велики пречник жиже
Већи интензитет снопа у жижи	Мањи интензитет снопа у жижи
Веће брзине сечења код тањих лимова	Мање брзине сечења код тањих лимова
Дебљи лимови не могу бити сечени	Веће брзине сечења код дебљих лимова
Узан рез	Шири рез
Сочиво ближе радном комаду	Сочиво удаљено од радног комада
Фин рез	Храпав рез

У односу на положај ласерског снопа на глави се поставља млазница која се центрира уз помоћ два вијка. Млазница усмерава помоћни гас ка радном комаду. За време процеса сечења помоћни гас издувава растопљени материјал из зоне сечења чиме се спречава оштећење сочива, спречава се да растопљени материјал поново очврсне и предходно исечени предмет обраде завари и спречава везивање шљаке са задње стране реза.

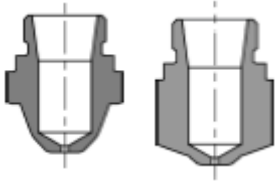
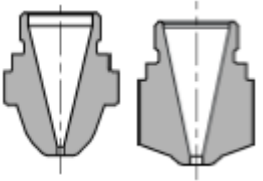
Облик и пречник млазнице које се монтира на глави за сечење зависи од:

- типа материјала,
- дебљине материјала,
- процеса сечења



Слика 62. Млазница: А – Млазница, Б – Плоча

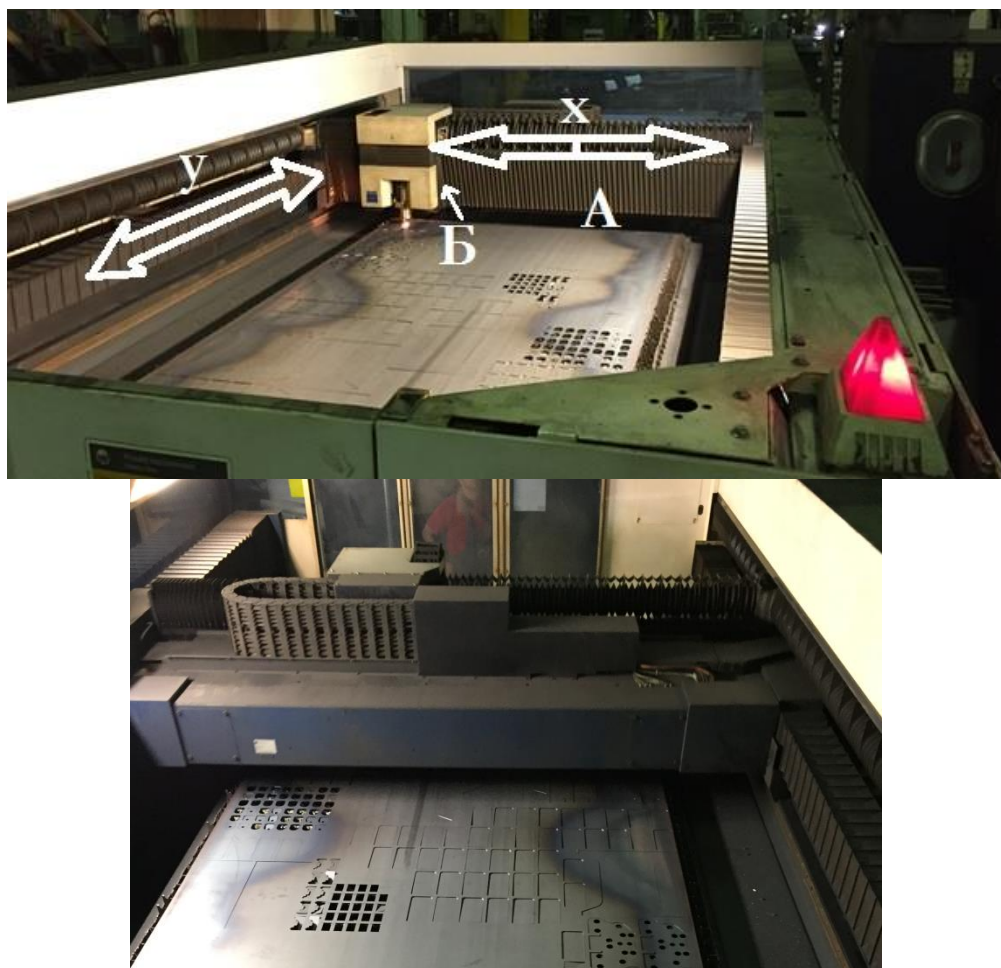
У зависности поменутих параметара бира се млазница која може бити за нормалан или висок притисак, слика 63.

Млазнице за нормалан притисак	Млазнице за висок притисак
	

Слика 63. Типови млазница [5]

- НОСАЧ ГЛАВЕ ЗА СЕЧЕЊЕ

Носач главе за сечење се налази на покретном мосту који омогућава кретање главе за сечење преко радног комада у правцу Y осе, слика 64. Ласерски зрак се усмерава са Y осе према X оси помоћу огледала монтираних на покретном мосту.

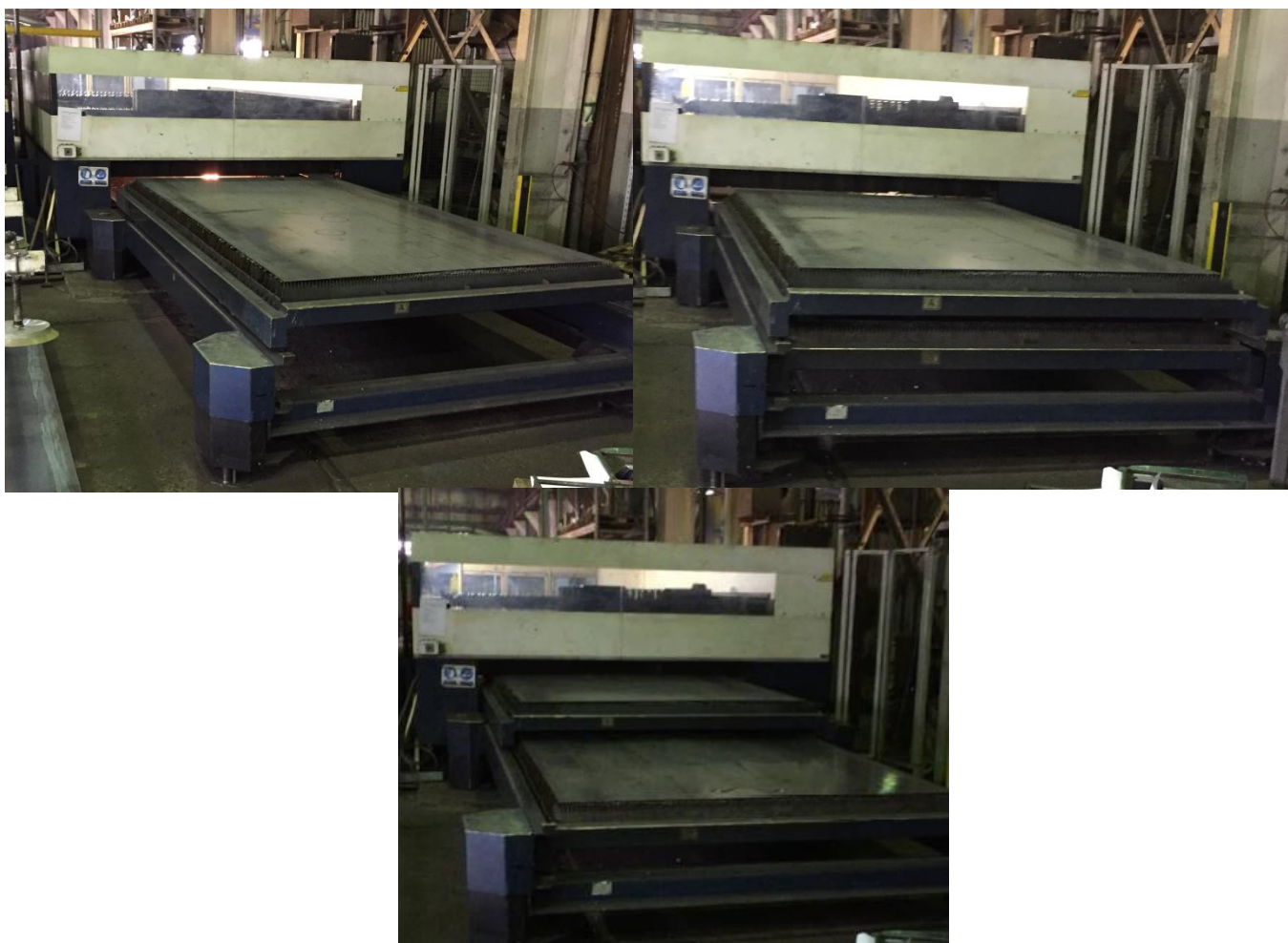


Слика 64. Покретни мост: А- Покретни мост, Б – Носач главе за сечење

Сам носач главе за сечење омогућава померање главе за сечење у правцу X осе као и вертикално померање у правцу Z осе. Сам носач главе за сечење омогућава померање главе за сечење у правцу X осе као и вертикално померање у правцу Z осе.

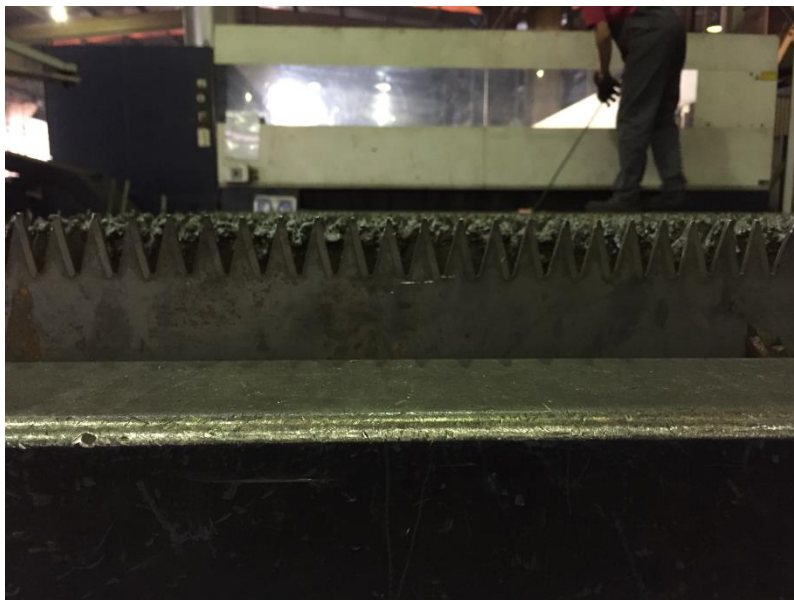
4.2.5. Радни сто

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

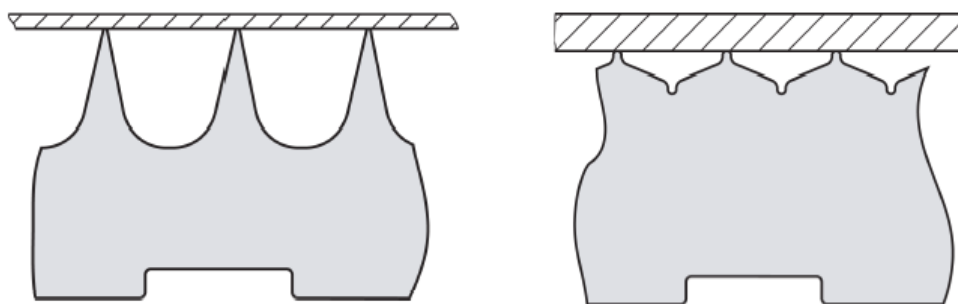


Слика 65. Радни сто са изменљивим решеткама

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



Слика 66. Решетке за лимове до 20 mm ласера Trumf 3040



Слика 67. Решетке за тање и дебље лимове [5]

4.2.6. Подизач Load Master (додатна опрема ласера Trumpf)

Максимална носивост Load Master – а је 1600 kg, дебљина 25 mm. На слици 68. приказан је Load Master. У даљем тексту биће описане команде на тастеру Load Master – а.



Слика 68. Load Master



Слика 69. Тастатура Load Master – а:

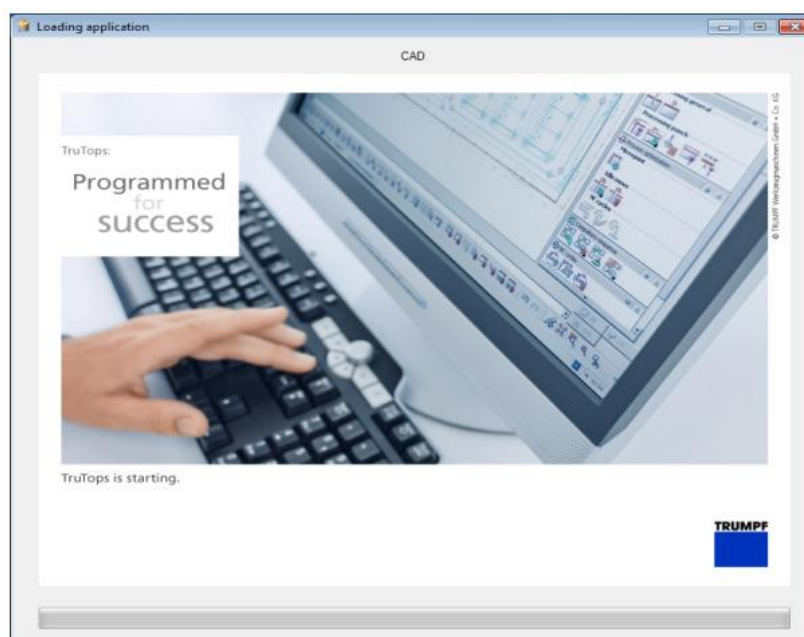
1- Кретање лево, 2 – Кретање десно, 3 – 4 - , 5 – подизање табле, 6 – спуштање табле, 7 – увлачење ваздуха, 8 – позивање стола, 9 – поништавање функције, 10 – узбуна, 11 – аутоматско подизање (могуће избацивање грешке), Б – команда која ствара ласерски зрак упозорења – прилаз столу

5. ПРОГРАМИРАЊЕ У TRUTOPSU ЗА ЛАСЕР TRUMPF 3040

- ОПИС ПРОГРАМА TRUTOPSU-A

TruTops Програм се састоји од три дела: CAD, гнездо и ЛАСЕР. Да би се добио NC код, за ласер, мора се ићи кроз све три фазе програма.

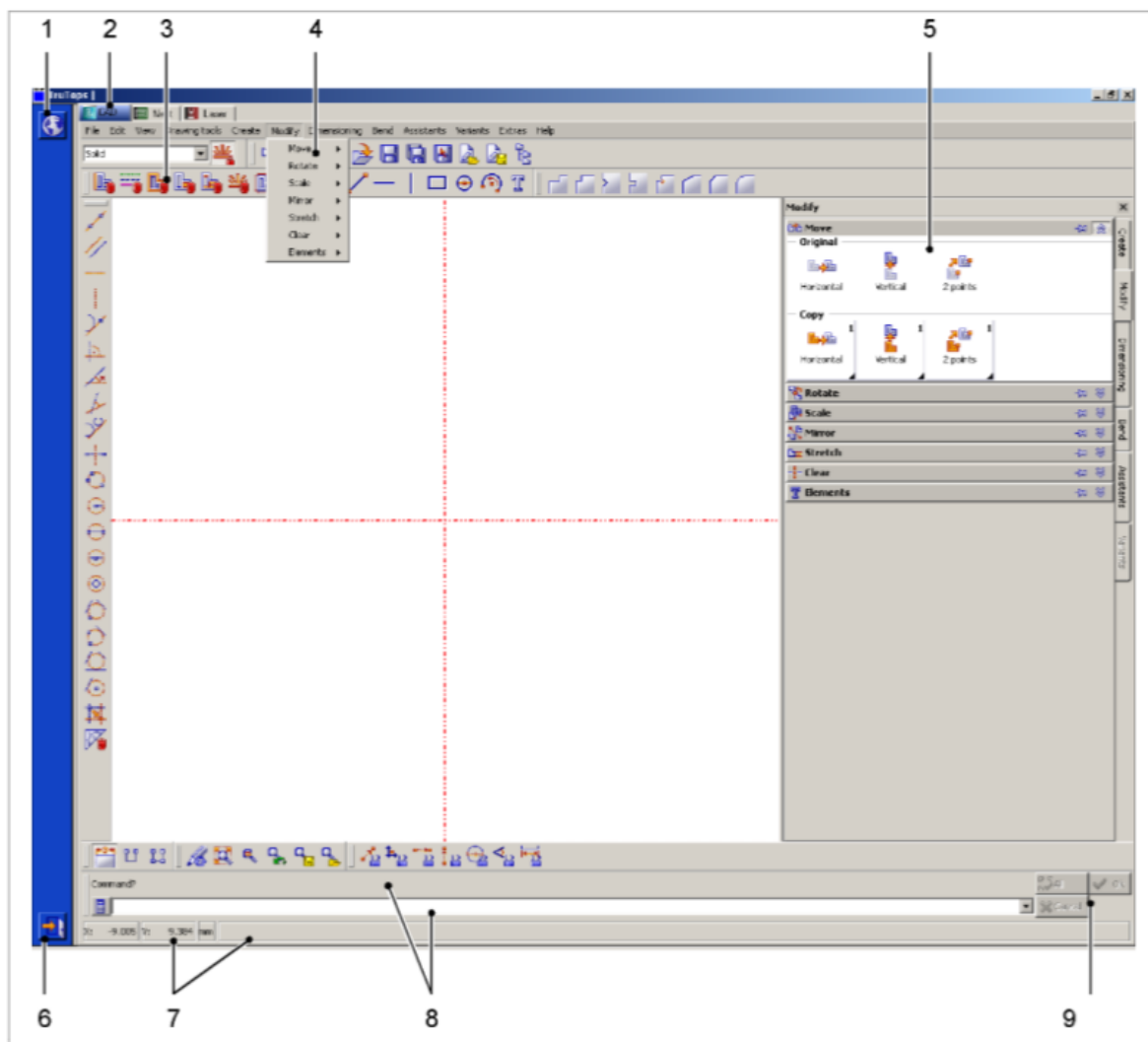
У CAD - обрађено у сваком комаду појединачно, добијене делове савијене у NEST-у на плочи. Водећи рачуна да панел што је више могуће оптимално коришћен (шкарт на табли испод 30 %). Коначно, када се софтверски одради програм, резултат NC програма се шаље на машину.



Слика 70. Пример програма TruTops – а [9]

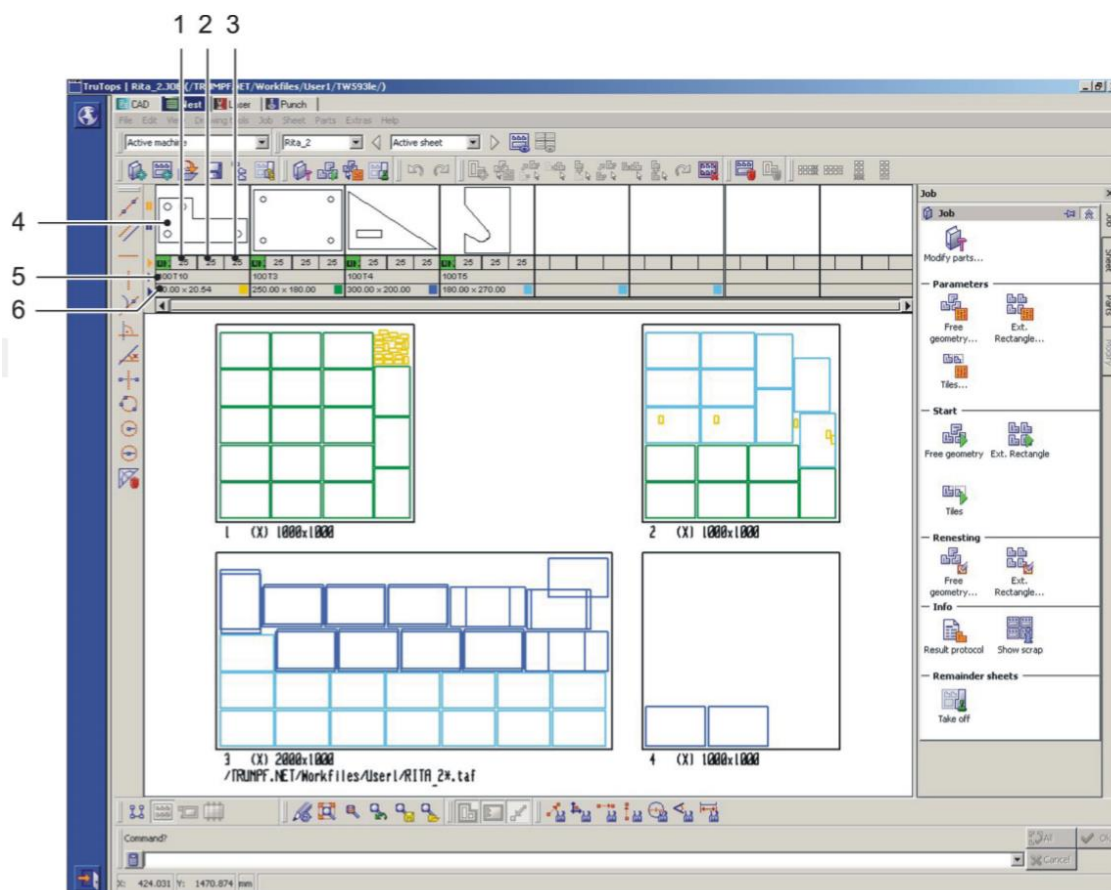
TruTops CAD (слика 70) је TruTops 2D CAD систем. CAD омогућава да креирање 2D модела. Написани програм се чува у формату Fein GEO, који се директно користи у другим деловима система - Nest и Ласеру. CAD обезбеђује све ефикаснију листу нацртаних деловима, аутоматску синхронизацију цртежа или дизајна. Лака измена, поправка итд...

Подаци из других CAD система путем стандардних формата DKSF, DVG, MI, IGNES и DSTV.



- 1 - Бирање језика
- 2 - Апликације
- 3 - Тоорbars (може се прилагодити, промена положаја цртежа)
- 4 - Глани мени и подмени бар
- 5 - Функција претраживач
- 6 - Напуштање TruTopsa
- 7 - Статусна трака и порука програма
- 8 - Померање положаја ручним куцањем
- 9 - Командне функције (потврђивање задате функције; поништавање)

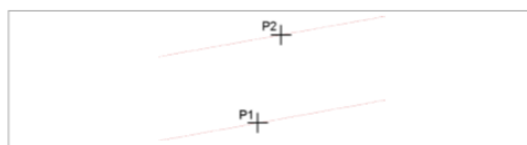
Слика 71. TruTops кориснички интерфејс [9]



Слика 72. Nest план цртања у TruTops програму: [9]

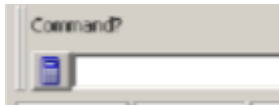
1 – минималан број комада, 2 – број убачених комада у Nesting плану, 3- максималан број комада, 4 – део за цртање, 5 – назив фајла, 6 – димензије комада

- ПАРАЛЕЛНО ЦРТАЊЕ ЛИНИЈА СА ПОМОЋНОМ ЛИНИЈОМ



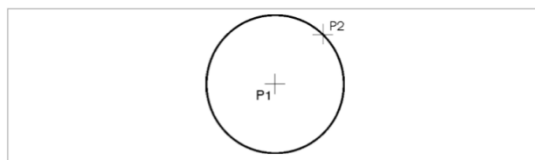
Слика 73. Паралелно цртање линија [9]

1. селектровати: >Aux. tools,>Construction lineP>arallel.
2. селектровати помоћну линију (P1) за коју ће паралелна линија бити извучена.
3. За једну паралелну помоћну линију: селектровати тачку (P2) у односу на предходну помоћну линију.

За више паралелних линија: селектровати обе помоћне тачке (P1, P2), а затим вредности дистанце у пољу  (без употребе зареза, већ тачке нпр: 10. 20. 30.).

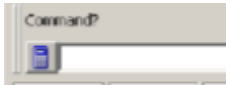
Притиснути ентер, а затим селектровати стану на којој желимо да се појави паралелна линија/е.

- ЦРТАЊЕ КРУГА



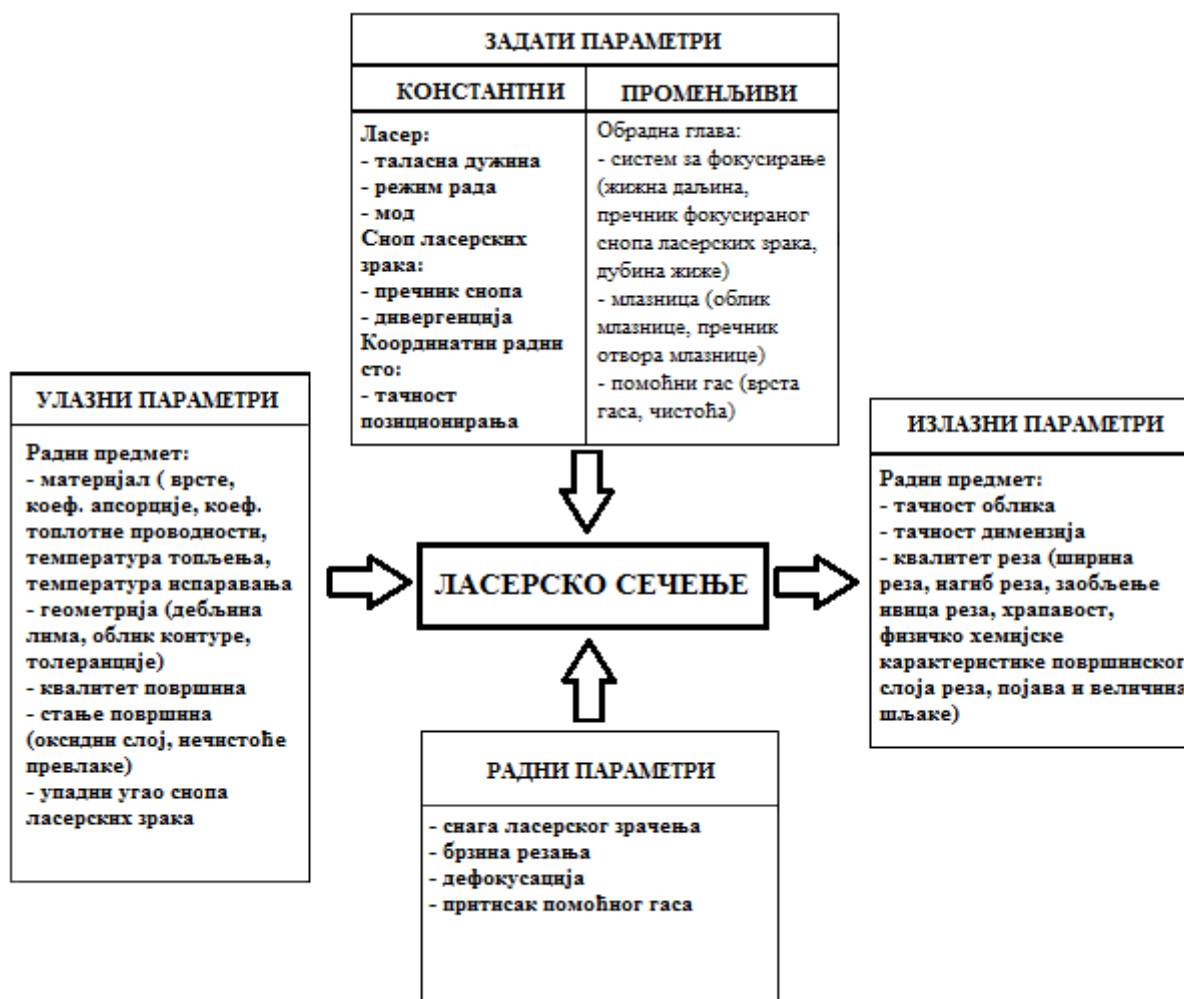
Слика 74. Цртање круга [9]

1. селектовати: >Auxiliary tools >Auxiliary circle >Center - diameter.

2. селектровати поље  и унети вредност жељеног пречника

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Експериментална испитивања имала су за циљ да се утврди утицај параметара обраде на квалитет резања код ласерског сечења. Испитивани су утицаји снаге ласера, брзине резања, притисак помоћног гаса и положаја жиже односно фокуса ласерског снопа као и квалитет материјала обрађене површине.



Слика 75. Параметри ласерске обраде [5]

- Снага ласерског зрачења.

Најважнија карактеристика којом се врши процена ласерске машине је снага ласерског зрачења. Пошто је ласерско сечење топлотни процес, количина произведене топлоте је утицајни фактор од кога зависи способност ласера за сечење. Узимајући да су остали параметри исти, повећање снаге ласерског зрачења омогућује сечење дебљих лимова и повећање брзине сечења.

- **Брзина резања је други по значају параметар за ласерско сечење.**

Више параметара утиче на брзину резања: снага ласера, мод, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета, иницијалне енергије топљења и испаравања итд.

- **Положај жиже сочива за фокусирање у односу на површину обрадка (дефокусација).**

Варијација положаја жиже у односу на површину радног предмета показује различиту карактеристику на квалитет реза. Зависно од врсте материјала и дебљине обратка жижа се позиционира на или незнатно испод површине обратка. У току процеса ласерског сечења жижа сочива за фокусирање снопа ласерских зрака мора бити стално позиционирана у односу на површину обратка како би се обезбедили најбољи ефекти сечења.

- **Помоћни гас.**

Гас се у зону обраде доводи кроз обрадну главу при чему мора бити коаксијалан са фокусираним ласерским зраком. Коришћењем гаса за продувавање растопљени и испарени материјал раног предмета лакше се одводи из зоне резања, што директно утиче на чистоћу и квалитет реза. Компримовани ваздух или инертни гас се користе за одстрањивање растопљеног и испареног материјала из зоне резања продувавањем код неметала и органских материјала при чему се умањује појава горења. За већину метала користи се реактивни помоћни гас, кисеоник, јер помаже егзотермну реакцију. Употребом кисеоника као помоћног гаса повећава се укупна енергија употребљена у процесу сечења тако да је могуће повећати брзину резања за $25 \div 40\%$ у односу на брзине резања код којих је ваздух помоћни гас.

Притисак помоћног гаса утиче на брзину резања брзином одношења растопљеног и испареног материјала и на појаву настанка шљаке по ивицама реза. Притисак се смањује ако се повећава дебљина радног предмета или ако се смањује брзина резања.

Веће честице испареног или растопљеног материјала које се неконтролисано распрскавају могу изазвати трајно оштећење оптичких елемената. Млаз гаса који се продувава непосредно испред сочива штити га од оштећења.

При ласерској обради полупроводничких-електронских компоненти продувавање гасом користи се и за хлађење радног предмета, што је у овом случају веома важно.

Материјал предмета обраде је S355J2+N (Č0563), његове карактеристике приказане су у табели 11.

Табела 11. Карактеристике материјала [11] [12]

Врста материјала	Хемијски састав				Механичке особине
	C(%)	Mn(%)	Si(%)	P,S(%)	R_e (N/mm ²)
S355 J2+N (Č0563)	≤ 0.22	≤ 1.60	0.55	≤ 0.035	≥ 355

Испитивање се односи на квалитет резања при оптималним вредностима параметара обраде за материјал S355 J2+N (Č0563) дебљине 15 mm (две плочице са дизном која је радила 5.3h и новом дизном) и 4 плочице од 10 mm сечене помоћу дизни које су радиле 5.3h, при варирању параметара обраде.

6.1 ИСПИТИВАЊЕ

Испитивање је извршено варирањем параметара:

- Снага ласера (W) $P = 2671 \div 4770$
- Брзина помоћног кретања (mm/min): $V = 1330 \div 2070$
- Притисак помоћног гаса O_2 (bar): $p = 0.3 \div 0.8$
- Фокус $f = 4 \div 5$ mm

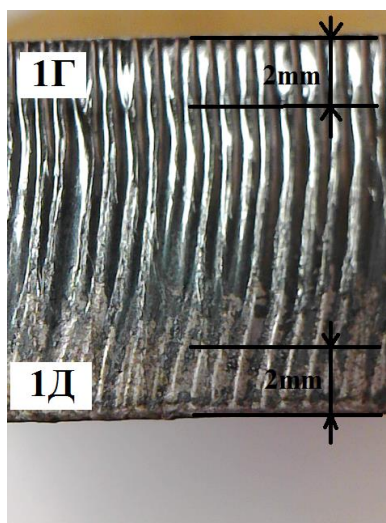
Мерење храпавости вршено је на мерном систему Talysurf 6. Мерни систем служи за мерење карактеристика микрогеометрије контактних површина приказан на слици 76. Уређај је компјутеризован и има широк спектар могућности као што су:

- мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости,
- статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости,
- приказивање резултата на екрану, њихово меморисање, штампање и цртање,
- просторно скенирање површине.

Коришћењем овог мерног система добијене су вредности параметара микрогеометрије површине обрађеног материјала.

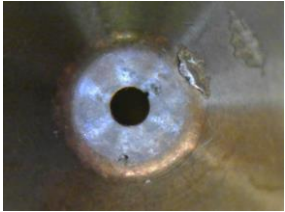
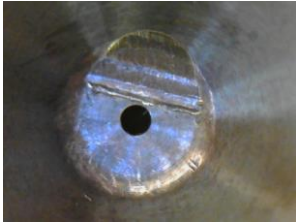
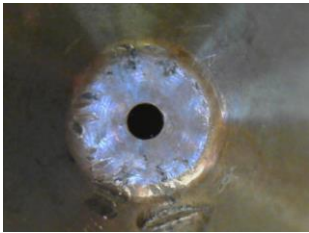


Слика 76. Уређај за мерење храпавости Talysurf на Факултету инжењерских наука, Крагујевац

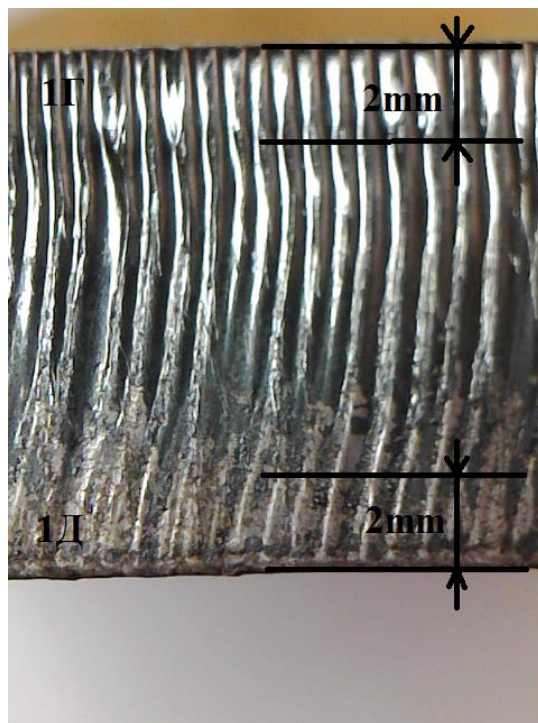


Слика 77. Изглед површине узорка на којој је мерена топографија површине (1Г - горња површина првог узорка, 1Д - доња површина првог узорка)

Табела 12. Резултати мерења

Дизна	Услови обраде	Ra (μm)	Rmax (μm)
1 	Дизна која је радила 5.3h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$) P = 4770 W p = 0,5 bar V = 1417 mm/min f = 5 mm s = 10 mm	1 Г $\rightarrow$ 20.1 μm 1 Д $\rightarrow$ 4.31 μm	1 Г $\rightarrow$ 105 μm 1 Д $\rightarrow$ 24.9 μm
2 	Дизна која је радила 5.3h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$) P = 3498 W p = 0,3 bar V = 1530 mm/min f = 5 mm s = 10 mm	2 Г $\rightarrow$ 13.3 μm 2 Д $\rightarrow$ 2.7 μm	2 Г $\rightarrow$ 57 μm 2 Д $\rightarrow$ 15 μm
3 	Дизна која је радила 5.3h ($\varnothing 1.0 \text{ mm}$) P = 2671 W p = 0,3 bar V = 1330 mm/min f = 5 mm s = 10 mm	3 Г $\rightarrow$ 5.5 μm 3 Д $\rightarrow$ 1.94 μm	3 Г $\rightarrow$ 5.5 μm 3 Д $\rightarrow$ 1.94 μm
4 	Дизна која је радила 5.3h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$) P = 4698 W p = 0,6 bar V = 1350 mm/min f = 5 mm s = 10 mm	4 Г $\rightarrow$ 11.76 μm 4 Д $\rightarrow$ 4.1 μm	4 Г $\rightarrow$ 50.1 μm 4 Д $\rightarrow$ 23.3 μm
5 	Дизна која је радила 5.3h ($\varnothing 1.2 \text{ mm}$) P = 4704 W p = 0,7 bar V = 2070 mm/min f = 5 mm s = 15 mm	5 Г $\rightarrow$ 15.4 μm 5 Д $\rightarrow$ 5.2 μm	5 Г $\rightarrow$ 67 μm 5 Д $\rightarrow$ 37 μm

6 	Нова дигна $\varnothing 1,2 \text{ mm}$ $P = 4680 \text{ W}$ $p = 0,8 \text{ bar}$ $V = 1530 \text{ mm/min}$ $f = 4 \text{ mm}$ $s = 15 \text{ mm}$	$6 \Gamma \rightarrow 12.63 \mu\text{m}$ $6 \Delta \rightarrow 4.54 \mu\text{m}$	$6 \Gamma \rightarrow 57 \mu\text{m}$ $6 \Delta \rightarrow 32 \mu\text{m}$
--	--	--	---



Слика 78. Изглед површине узорка 1

Након мерења параметара топографије површина, извршена је израда фотографија свих добијених узорака. Ова мерења су имала за циљ утврђивање утицаја режима ласерског резања на облик линија реза. За одређивање топографије површина вршено је испитивање на 2 mm од горње површине узорка и 2 mm од доње површине узорка. Резултати мерења одступања су дати у одговарајућим табелама за сваки узорак понаосо.

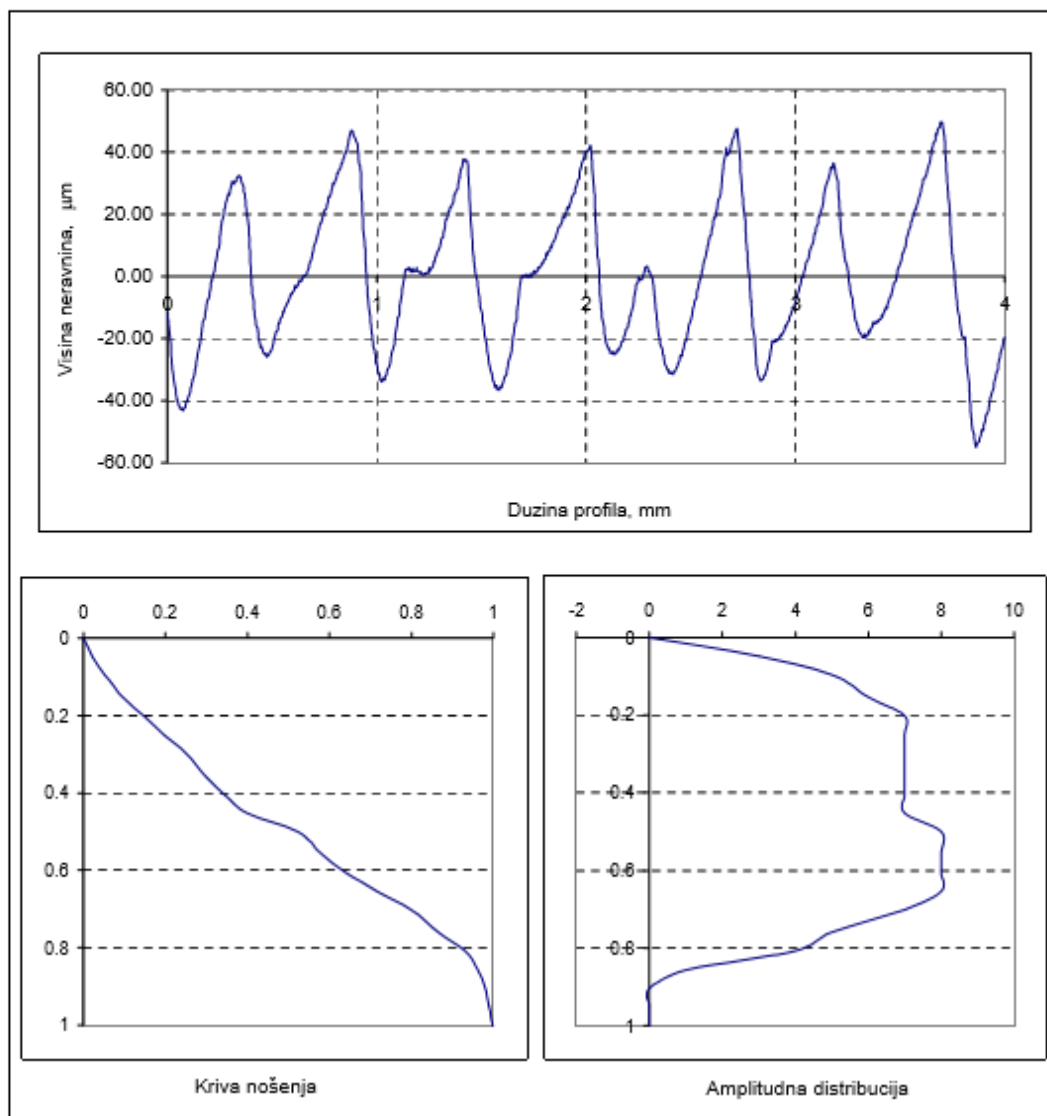
На основу резултата топографије површина првог узорка, може се видети да је за горњу површину максимална висина профила $R_{\text{max}} = 105 \mu\text{m}$, док је средње аритметичко одступање профила $R_a = 20.1 \mu\text{m}$. За доњу површину узорка максимална висина профила $R_{\text{max}} = 24.9 \mu\text{m}$, док је средње аритметичко одступање профила $R_a = 4.34 \mu\text{m}$.

У наставку текста биће дати параметри топографије површине који су измерени на површинама узорка, коришћењем Talysurf. За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 4770 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.5 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 1417 \text{ mm/min}$, фокус $f = 5 \text{ mm}$, коришћена дизна која је радила 5.3 h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 10 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $Rt5 = 105 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 1Г, $Rt4 = 24.9 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 1Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 20.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Ra = 4.31 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 24.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Rq = 5.25 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 105 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Ry = 24.9 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 84 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Rtm = 18.7 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 55 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Rv = 13.8 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 49 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Rp = 11.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $R3z = 14.3 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 43 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Rpm = 9.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $R3y = 20.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 467 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $Sm = 176 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 279 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Г, $S = 28 \text{ }\mu\text{m}$ за 1Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 22.3 \text{ deg}$ за 1Г, $DELQ = 12.5 \text{ deg}$ за 1Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = 0.1$ за 1Г, $Rsk = -0.5$ за 1Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 2.1$ за 1Г, $Rku = 2.5$ за 1Д

Топографија: 1 g

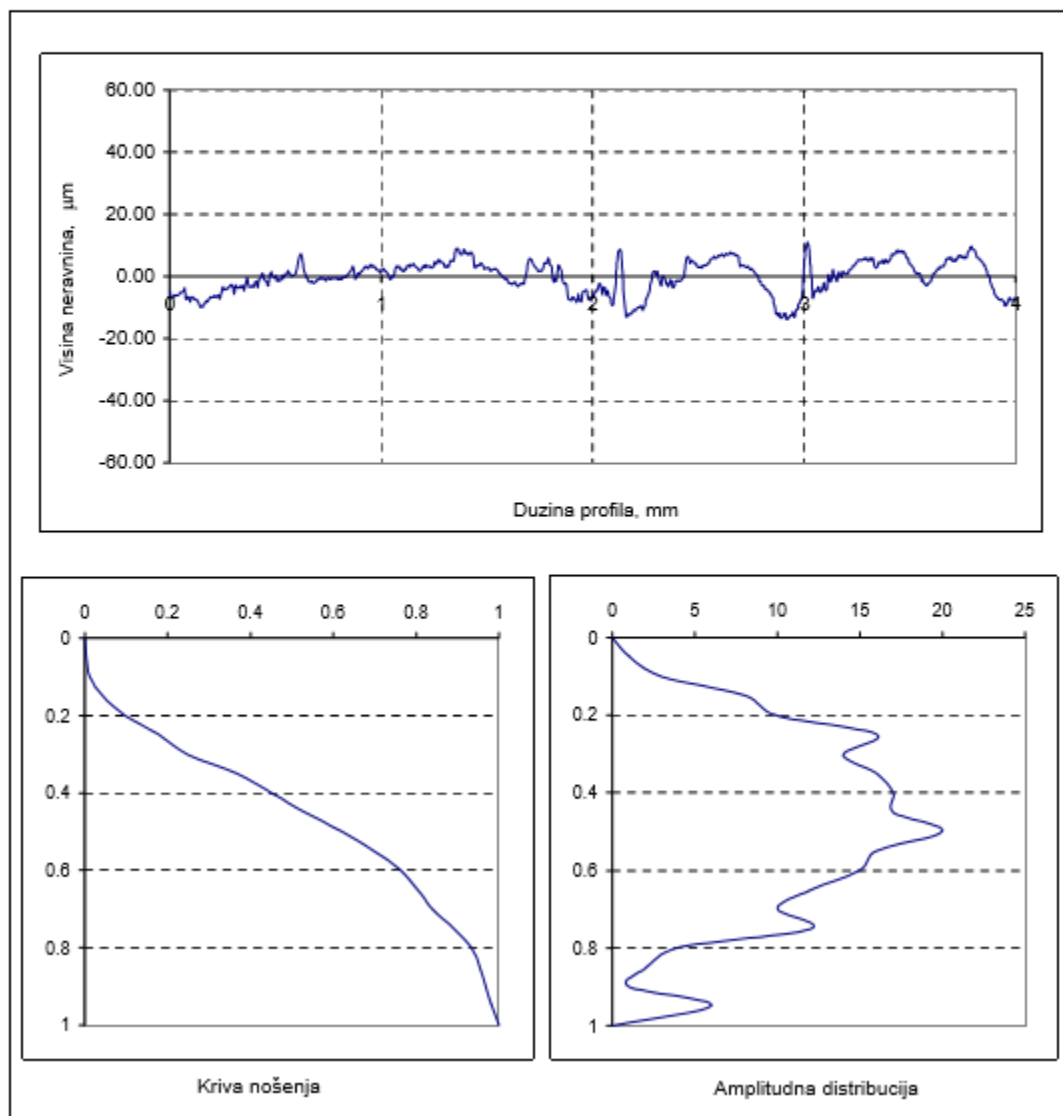
Rt1 = 76 μm	Ry = 105 μm	Sm = 467 μm
Rt2 = 84 μm	Rtm = 84 μm	S = 279 μm
Rt3 = 77 μm	Rv = 55 μm	DELQ = 22.3 deg
Rt4 = 81 μm	Rp = 49 μm	Rsk = 0.1
Rt5 = 105 μm	R3z = 0 μm	Rku = 2.1
Ra = 20.1 μm	Rpm = 43 μm	
Rq = 24.1 μm	R3y = 0 μm	



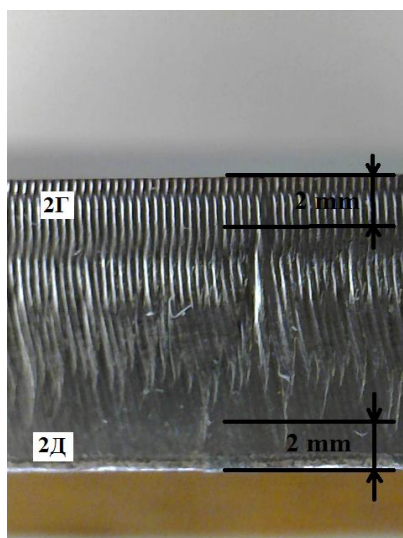
Слика 79. Резултати мерења и топографија површине на узорку 1 на горњој површини

Топографија: 1 d

Rt1 =	17.1 μm	Ry =	24.9 μm	Sm =	176 μm
Rt2 =	10.8 μm	Rtm =	18.7 μm	S =	28 μm
Rt3 =	21.8 μm	Rv =	13.8 μm	DELQ =	12.5 deg
Rt4 =	24.9 μm	Rp =	11.1 μm	Rsk =	-0.5
Rt5 =	19 μm	R3z =	14.3 μm	Rku =	2.5
Ra =	4.31 μm	Rpm =	9.1 μm		
Rq =	5.25 μm	R3y =	20.5 μm		



Слика 80. Резултати мерења и топографија површине на узорку 1 на доњој површини



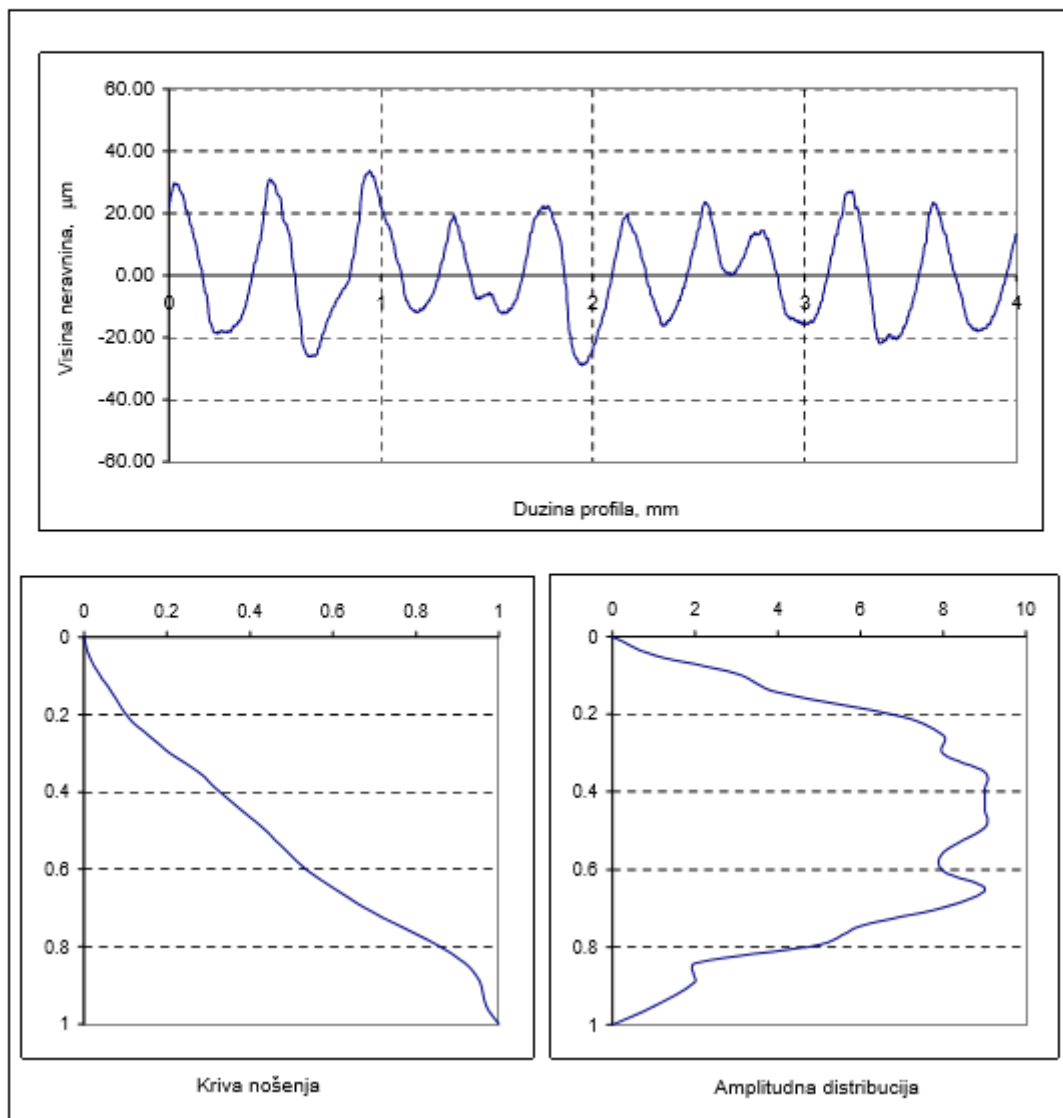
Слика 81. Изглед површине узорка 2

За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 3498 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.3 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 1530 \text{ mm/min}$, фокус $f = 5 \text{ mm}$, коришћена диза која је радила 5.3 h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 10 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $= Rt1 = 57 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 2Г, $Rt5 = 15 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 2Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 13.3 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Ra = 2.7 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 15.4 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Rq = 15.4 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 57 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Ry = 15 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 49 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Rtm = 12 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 29 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Rv = 8 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 34 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Rp = 7 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $R3z = 10 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 28 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Rpm = 6 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $R3y = 12 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 396 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $Sm = 258 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 222 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Г, $S = 15 \text{ }\mu\text{m}$ за 2Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 15.5 \text{ deg}$ за 2Г, $DELQ = 8 \text{ deg}$ за 2Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = 0.2$ за 2Г, $Rsk = 0$ за 2Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 2$ за 2Г, $Rku = 2.1$ за 2Д

Топографија: 2 g

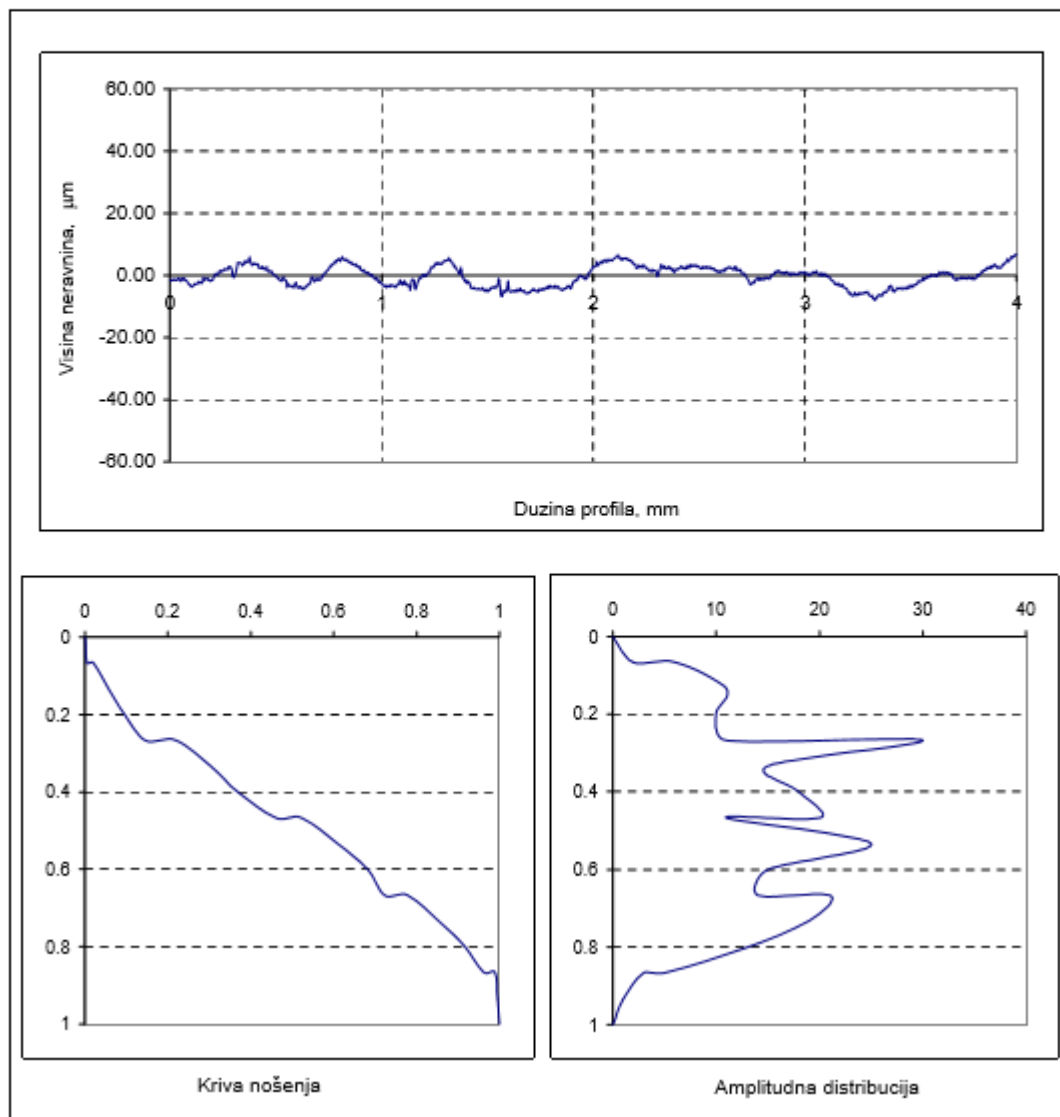
Rt1 =	57 μm	Ry =	57 μm	Sm =	398 μm
Rt2 =	46 μm	Rtm =	49 μm	S =	222 μm
Rt3 =	51 μm	Rv =	29 μm	DELQ =	15.5 deg
Rt4 =	42 μm	Rp =	34 μm	Rsk =	0.2
Rt5 =	49 μm	R3z =	0 μm	Rku =	2
Ra =	13.3 μm	Rpm =	28 μm		
Rq =	15.4 μm	R3y =	0 μm		



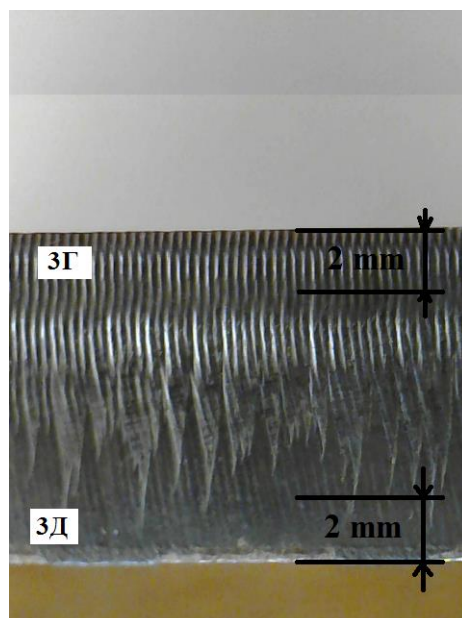
Слика 82. Резултати мерења и топографија површине на узорку 2 на горњој површини

Топографија: 2 d

Rt1 =	10 μm	Ry =	15 μm	Sm =	258 μm
Rt2 =	13 μm	Rtm =	12 μm	S =	15 μm
Rt3 =	13 μm	Rv =	8 μm	DELQ =	8 deg
Rt4 =	8 μm	Rp =	7 μm	Rsk =	0
Rt5 =	15 μm	R3z =	10 μm	Rku =	2.1
Ra =	2.7 μm	Rpm =	6 μm		
Rq =	3.2 μm	R3y =	12 μm		



Слика 83. Резултати мерења и топографија површине на узорку 2 на доњој површини



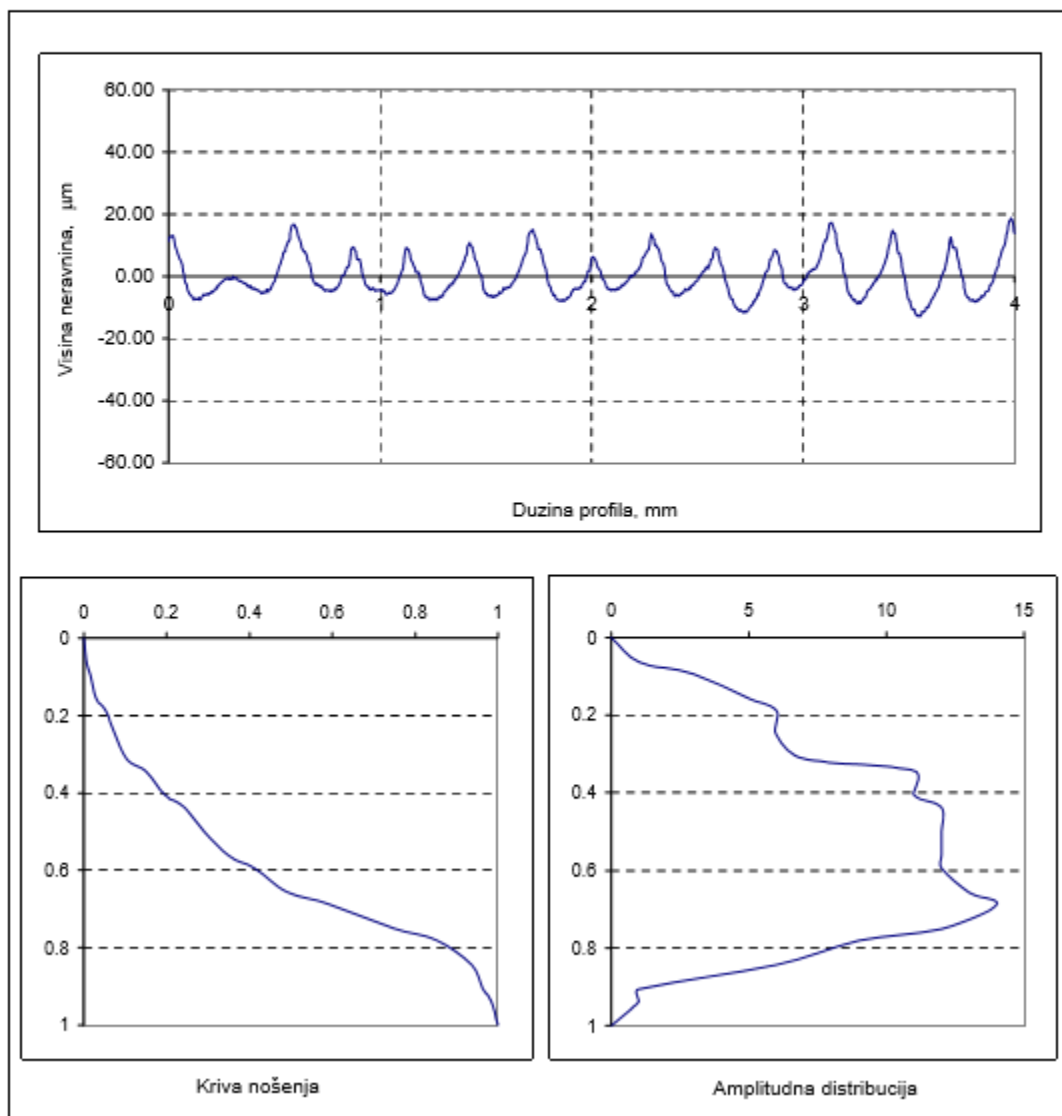
Слика 84. Изглед површине узорка 3

За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 2671 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.3 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 1330 \text{ mm/min}$, фокус 5 mm , коришћена дизна која је радила 5.3 h ($\varnothing 1.0 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 10 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $Rt5 = 32 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 3Г, $Rt2 = 14.3 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 3Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 5.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Ra = 1.94 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 6.6 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Rq = 2.55 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 32 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Ry = 14.3 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 25 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Rtm = 9.3 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 13 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Rv = 7.8 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 19 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Rp = 6.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 14 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $R3z = 6.6 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 16 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Rpm = 4.6 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 23 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $R3y = 10.8 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 300 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $Sm = 201 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 59 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Г, $S = 4 \text{ }\mu\text{m}$ за 3Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 10.8 \text{ deg}$ за 3Г, $DELQ = 6.8 \text{ deg}$ за 3Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = 0.6$ за 3Г, $Rsk = -0.5$ за 3Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 2.7$ за 3Г, $Rku = 3.6$ за 3Д

Топографија: 3 g

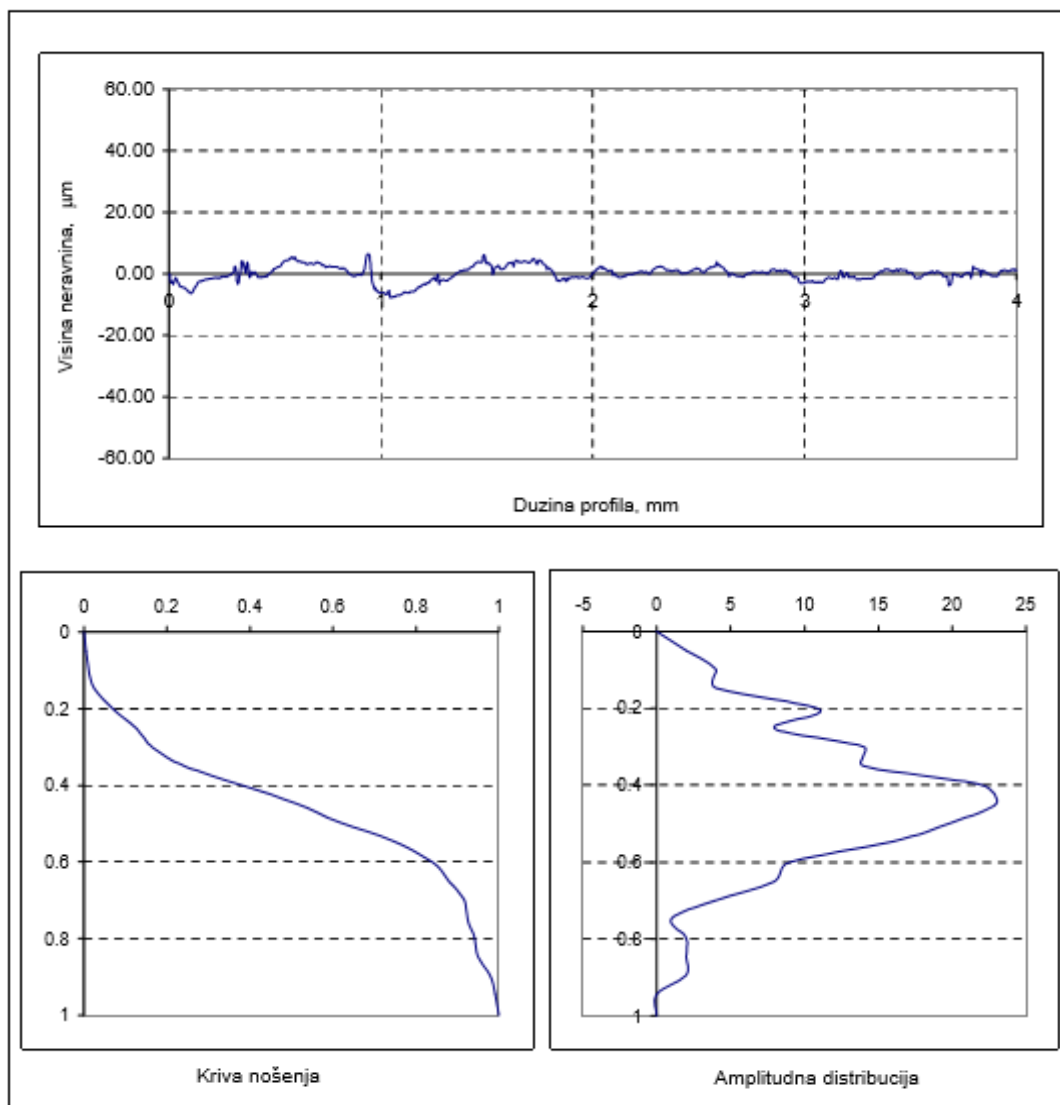
Rt1 =	24 μm	Ry =	32 μm	Sm =	300 μm
Rt2 =	19 μm	Rtm =	25 μm	S =	59 μm
Rt3 =	23 μm	Rv =	13 μm	DELQ =	10.8 deg
Rt4 =	29 μm	Rp =	19 μm	Rsk =	0.6
Rt5 =	32 μm	R3z =	14 μm	Rku =	2.7
Ra =	5.5 μm	Rpm =	16 μm		
Rq =	6.6 μm	R3y =	23 μm		



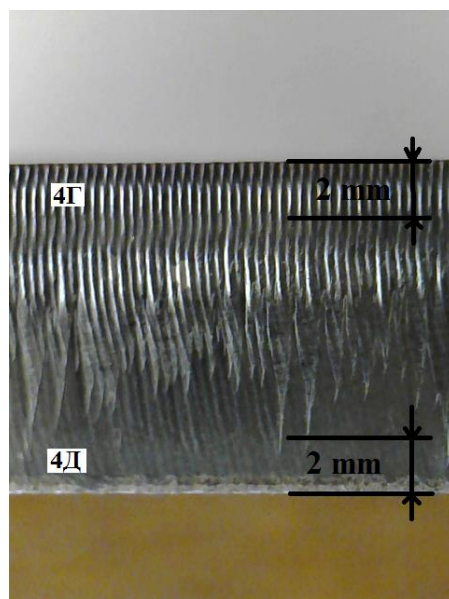
Слика 85. Резултати мерења и топографија површине на узорку 3 на горњој површини

Топографија: 3 d

Rt1 =	11.7 μm	Ry =	14.3 μm	Sm =	201 μm
Rt2 =	14.3 μm	Rtm =	9.3 μm	S =	40 μm
Rt3 =	7.4 μm	Rv =	7.8 μm	DELQ =	6.8 deg
Rt4 =	7 μm	Rp =	6.5 μm	Rsk =	-0.5
Rt5 =	6.3 μm	R3z =	6.6 μm	Rku =	3.6
Ra =	1.94 μm	Rpm =	4.6 μm		
Rq =	2.55 μm	R3y =	10.8 μm		



Слика 86. Резултати мерења и топографија површине на узорку 3 на доњој површини



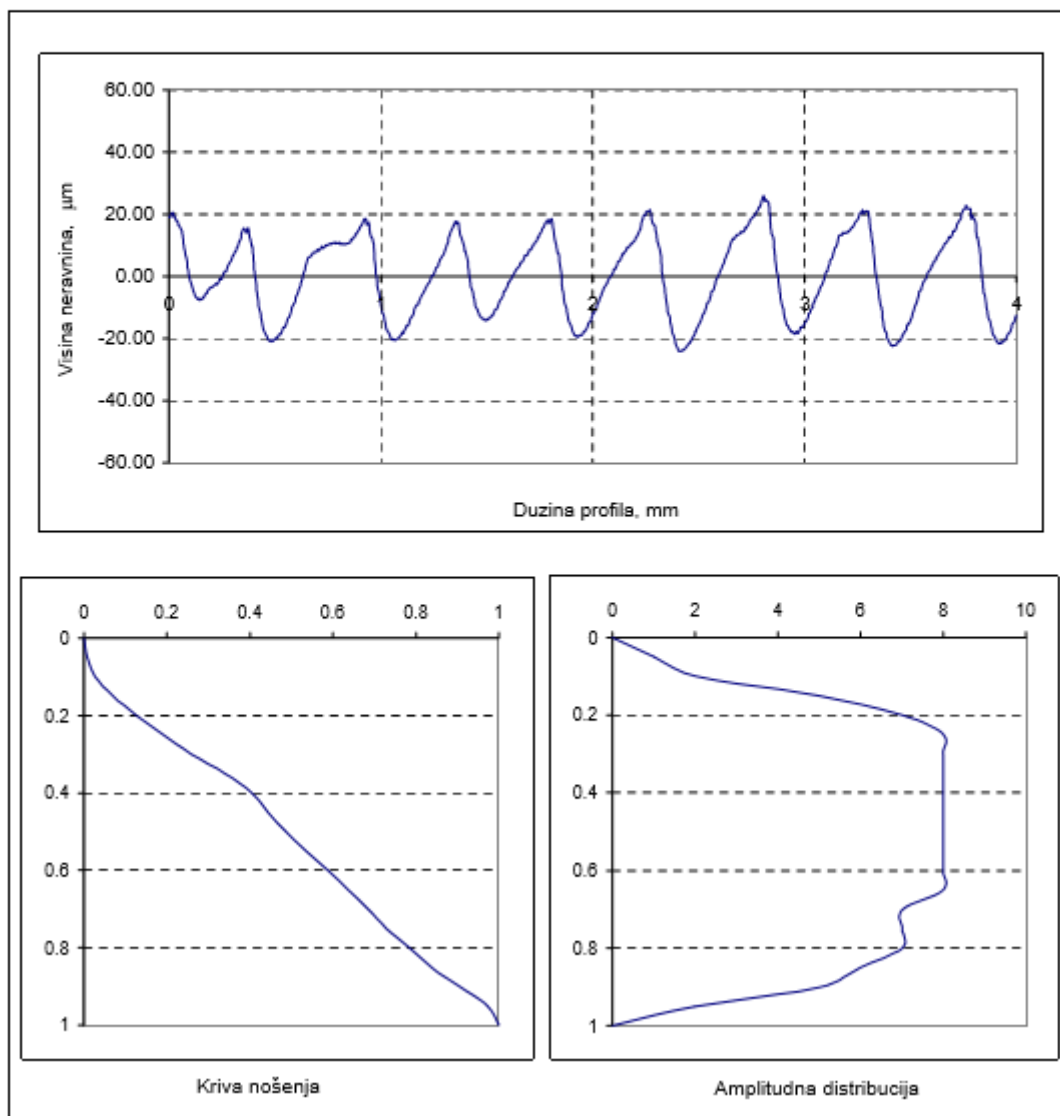
Слика 87. Изглед површине узорка 4

За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 4698 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.6 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 1350 \text{ mm/min}$, фокус $f = 5 \text{ mm}$, коришћена дизна која је радила 5.3 h ($\varnothing 1.4 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 10 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $Rt4 = 50.1 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 4Г, $Rt5 = 23.3 \text{ }\mu\text{m}$ за топографију 4Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 11.76 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Ra = 4.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 13.39 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Rq = 4.96 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 50.1 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Ry = 23.3 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 44.2 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Rtm = 18.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 24.4 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Rv = 10.8 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 25.9 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Rp = 12.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $R3z = 13.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 21.9 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Rpm = 10 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 0 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $R3y = 17.5 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 475 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $Sm = 475 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 236 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Г, $S = 39 \text{ }\mu\text{m}$ за 4Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 13.3 \text{ deg}$ за 4Г, $DELQ = 7.8 \text{ deg}$ за 4Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = -0.1$ за 4Г, $Rsk = 0.4$ за 4Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 1.7$ за 4Г, $Rku = 2.4$ за 4Д

Топографија: 4 g

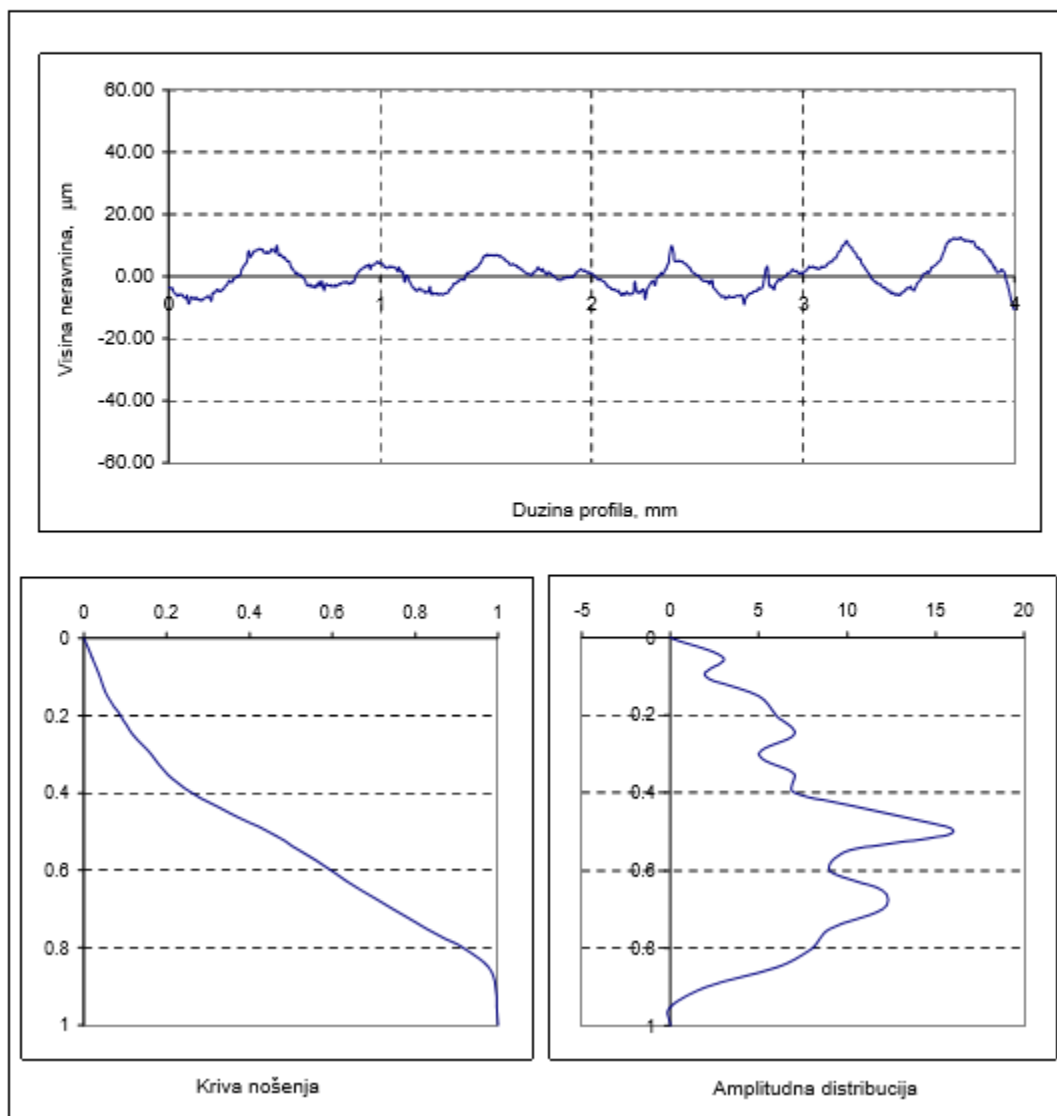
Rt1 = 41.7 μm	Ry = 50.1 μm	Sm = 475 μm
Rt2 = 39.3 μm	Rtm = 44.2 μm	S = 236 μm
Rt3 = 44.3 μm	Rv = 24.2 μm	DELQ = 13.3 deg
Rt4 = 50.1 μm	Rp = 25.9 μm	Rsk = -0.1
Rt5 = 45.3 μm	R3z = 0 μm	Rku = 1.7
Ra = 11.76 μm	Rpm = 21.9 μm	
Rq = 13.39 μm	R3y = 0 μm	



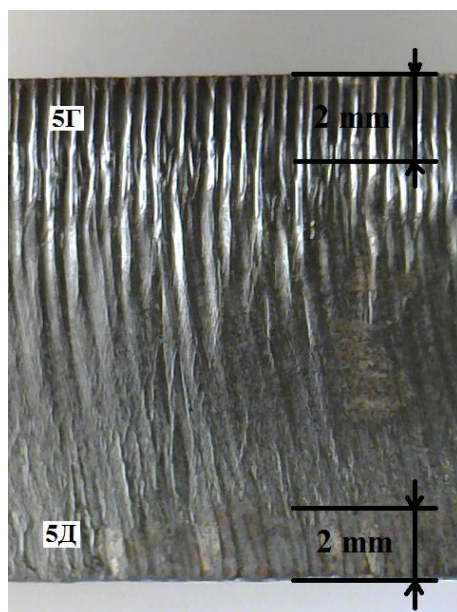
Слика 88. Резултати мерења и топографија површине на узорку 4 на горњој површини

Топографија: 4 d

Rt1 =	18.7 μm	Ry =	23.3 μm	Sm =	405 μm
Rt2 =	13.2 μm	Rtm =	18.5 μm	S =	39 μm
Rt3 =	17.2 μm	Rv =	10.8 μm	DELQ =	7.8 deg
Rt4 =	20 μm	Rp =	12.5 μm	Rsk =	0.4
Rt5 =	23.3 μm	R3z =	13.5 μm	Rku =	2.4
Ra =	4.1 μm	Rpm =	10 μm		
Rq =	4.98 μm	R3y =	17.5 μm		



Слика 89. Резултати мерења и топографија површине на узорку 4 на доњој површини



Слика 90. Изглед површине узорка 5

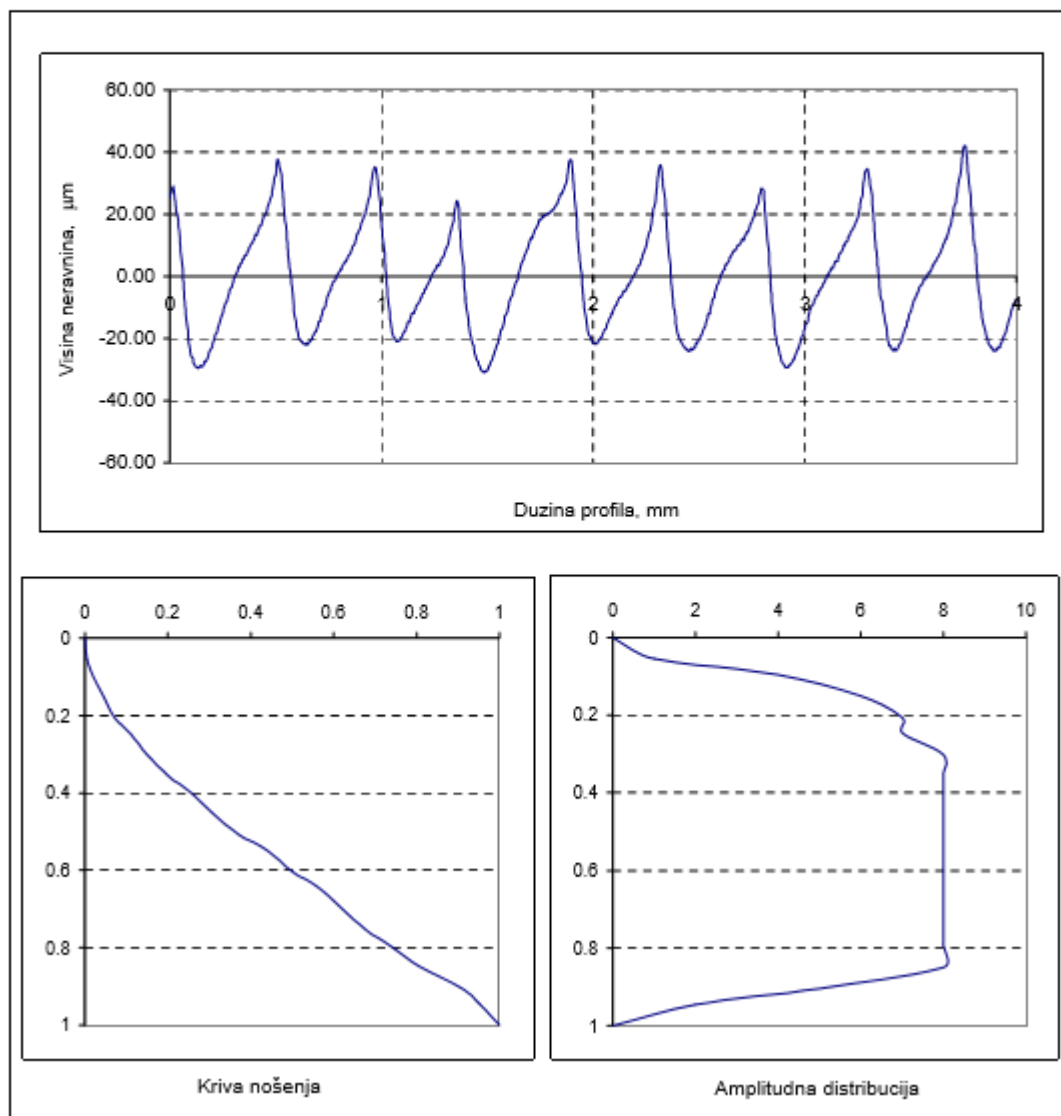
За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 4704 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.7 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 2070 \text{ mm/min}$, фокус $f = 5 \text{ mm}$, коришћена дизна која је радила 5.3 h ($\varnothing 1.2 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 15 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $Rt1 = 67 \mu\text{m}$ за топографију 5Г, $Rt5 = 37 \mu\text{m}$ за топографију 5Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 15.4 \mu\text{m}$ за 5Г, $Ra = 5.2 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 18 \mu\text{m}$ за 5Г, $Rq = 6.7 \mu\text{m}$ за 5Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 67 \mu\text{m}$ за 5Г, $Ry = 37 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 63 \mu\text{m}$ за 5Г, $Rtm = 27 \mu\text{m}$ за 5Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 31 \mu\text{m}$ за 5Г, $Rv = 15 \mu\text{m}$ за 5Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 42 \mu\text{m}$ за 5Г, $Rp = 26 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 0 \mu\text{m}$ за 5Г, $R3z = 17 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 37 \mu\text{m}$ за 5Г, $Rpm = 15 \mu\text{m}$ за 5Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 0 \mu\text{m}$ за 5Г, $R3y = 25 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 467 \mu\text{m}$ за 5Г, $Sm = 238 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 415 \mu\text{m}$ за 5Г, $S = 46 \mu\text{m}$ за 5Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 19.4 \text{ deg}$ за 5Г, $DELQ = 13.2 \text{ deg}$ за 5Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = 0.3$ за 5Г, $Rsk = 0.6$ за 5Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 2$ за 5Г, $Rku = 3.7$

за 5Д

Топографија: 5 g

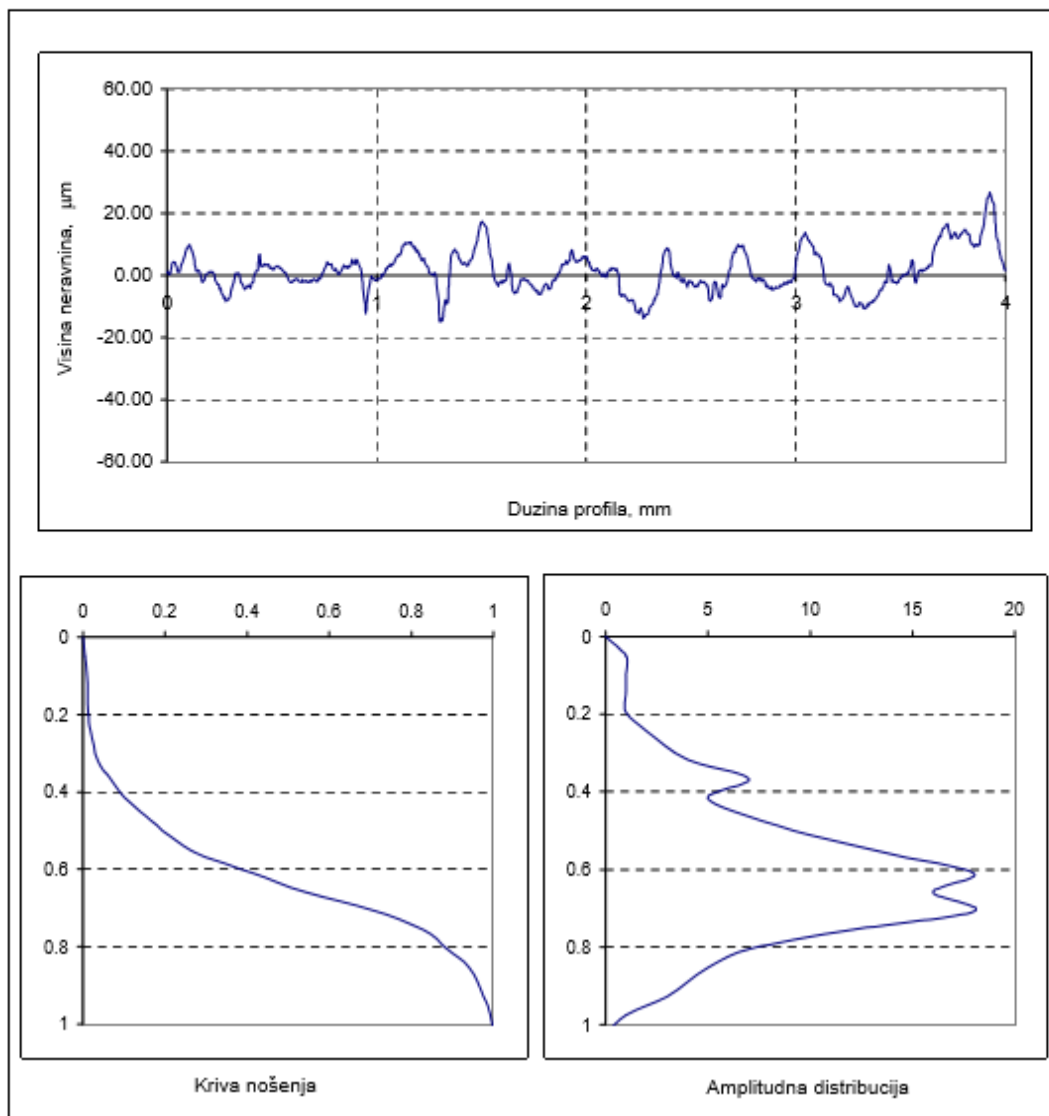
Rt1 =	67 μm	Ry =	67 μm	Sm =	467 μm
Rt2 =	66 μm	Rtm =	63 μm	S =	415 μm
Rt3 =	59 μm	Rv =	31 μm	DELQ =	19.4 deg
Rt4 =	58 μm	Rp =	42 μm	Rsk =	0.3
Rt5 =	66 μm	R3z =	0 μm	Rku =	2
Ra =	15.4 μm	Rpm =	37 μm		
Rq =	18 μm	R3y =	0 μm		



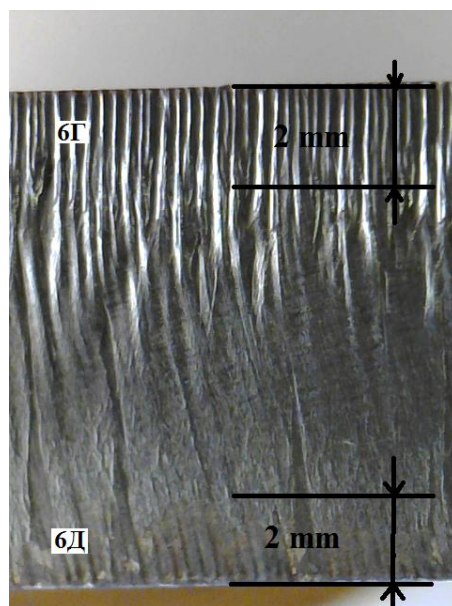
Слика 91. Резултати мерења и топографија површине на узорку 5 на горњој површини

Топографија: 5 d

Rt1 =	18 μm	Ry =	37 μm	Sm =	238 μm
Rt2 =	32 μm	Rtm =	27 μm	S =	46 μm
Rt3 =	23 μm	Rv =	15 μm	DELQ =	13.2 deg
Rt4 =	22 μm	Rp =	26 μm	Rsk =	0.6
Rt5 =	37 μm	R3z =	17 μm	Rku =	3.7
Ra =	5.2 μm	Rpm =	15 μm		
Rq =	6.7 μm	R3y =	25 μm		



Слика 92. Резултати мерења и топографија површине на узорку 5 на доњој површини



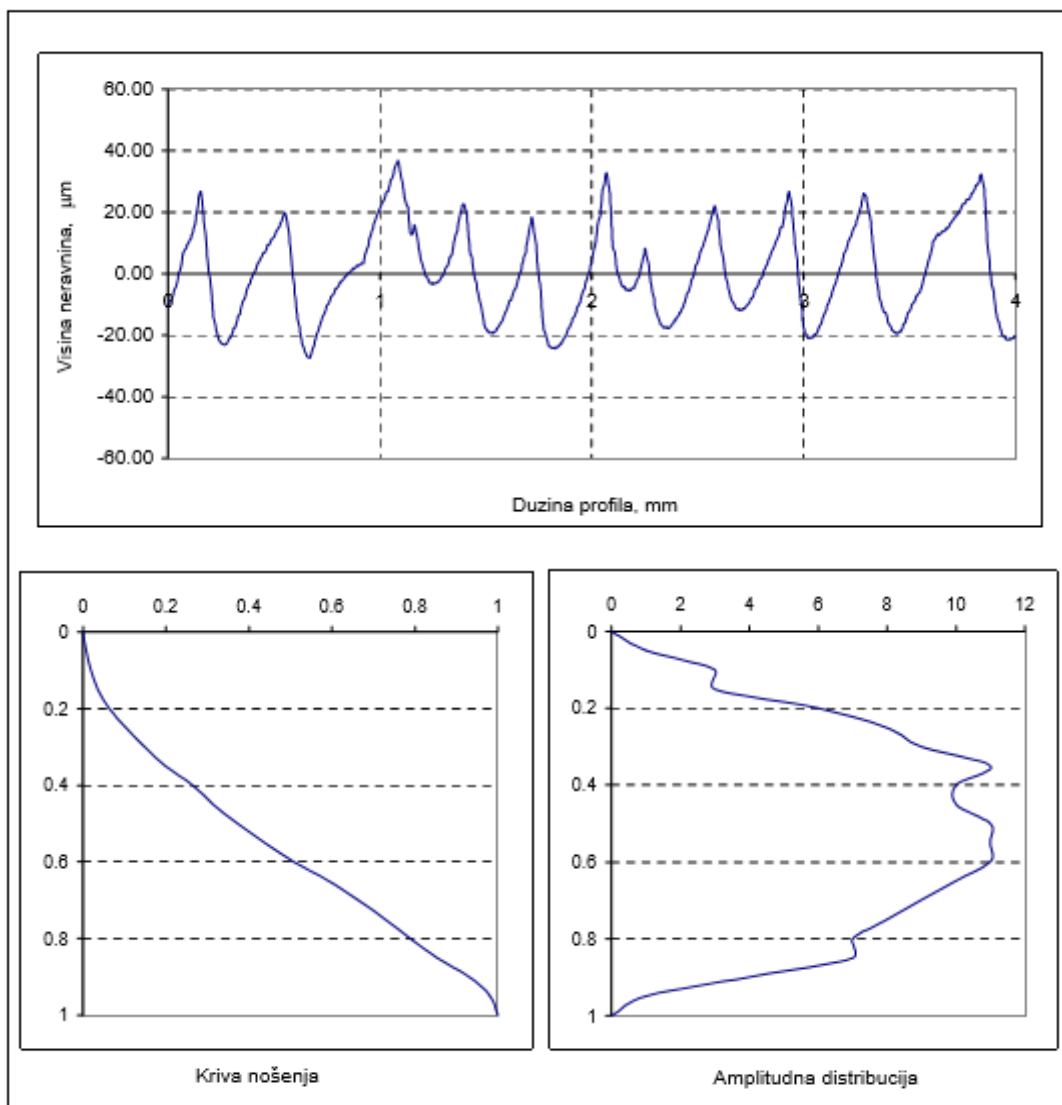
Слика 93. Изглед површине узорка 6

За услове обраде у којима је снага ласера била $P = 4680 \text{ W}$, притисак помоћног гаса $p = 0.8 \text{ bar}$, брзина помоћног кретања $V = 1530 \text{ mm/min}$, фокус $f = 4 \text{ mm}$, коришћена нова дизна ($\varnothing 1.2 \text{ mm}$), дебљина плочице $s = 15 \text{ mm}$, добијени су следећи резултати:

- максимална висина профила на референтним дужинама $Rt3 = 57 \mu\text{m}$ за топографију 6Г, $Rt2 = 32 \mu\text{m}$ за топографију 6Д,
- Средње аритметичко одступање профила $Ra = 12.63 \mu\text{m}$ за 6Г, $Ra = 4.54 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средње квадратно одступање профила $Rq = 15.01 \mu\text{m}$ за 6Г, $Rq = 6 \mu\text{m}$ за 6Д
- Максимална висина профила, максимална Rti вредност $Ry = 57 \mu\text{m}$ за 6Г, $Ry = 32 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средња Rti вредност $Rtm = 53.9 \mu\text{m}$ за 6Г, $Rtm = 23.7 \mu\text{m}$ за 6Д
- Највећа дубина удубљења профила $Rv = 27.4 \mu\text{m}$ за 6Г, $Rv = 15.8 \mu\text{m}$ за 6Д
- Највећа висина испупчења профила $Rp = 37 \mu\text{m}$ за 6Г, $Rp = 22.4 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила $R3z = 0 \mu\text{m}$ за 6Г, $R3z = 10.6 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама $Rpm = 31.2 \mu\text{m}$ за 6Г, $Rpm = 14 \mu\text{m}$ за 6Д
- Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини $R3y = 0 \mu\text{m}$ за 6Г, $R3y = 16.8 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средњи корак испупчења профила $Sm = 352 \mu\text{m}$ за 6Г, $Sm = 231 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средњи корак локалних испупчења профила $S = 335 \mu\text{m}$ за 6Г, $S = 55 \mu\text{m}$ за 6Д
- Средњи квадратни угао нагиба профила $DELQ = 17 \text{ deg}$ за 6Г, $DELQ = 11.2 \text{ deg}$ за 6Д
- Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуда $Rsk = 0.2$ за 6Г, $Rsk = 0.6$ за 6Д
- Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуде $Rku = 2.1$ за 6Г, $Rku = 4.2$ за 6Д

Топографија: 6 g

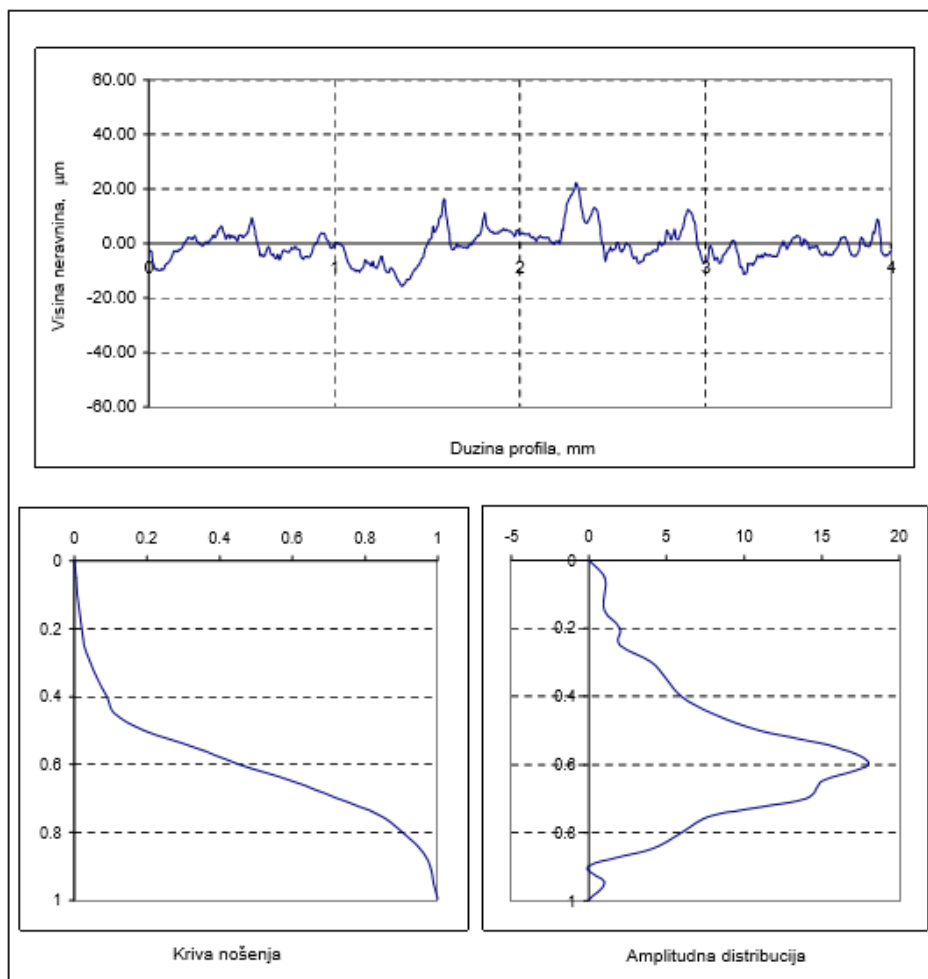
Rt1 =	54.3 μm	Ry =	57 μm	Sm =	352 μm
Rt2 =	56.3 μm	Rtm =	53.9 μm	S =	335 μm
Rt3 =	57 μm	Rv =	27.4 μm	DELQ =	17 deg
Rt4 =	48 μm	Rp =	37 μm	Rsk =	0.2
Rt5 =	53.9 μm	R3z =	0 μm	Rku =	2.1
Ra =	12.63 μm	Rpm =	31.2 μm		
Rq =	15.01 μm	R3y =	0 μm		



Слика 94. Резултати мерења и топографија површине на узорку 6 на горњој површини

Топографија: 6 d

Rt1 = 19.3 μm	Ry = 32 μm	Sm = 231 μm
Rt2 = 32 μm	Rtm = 23.7 μm	S = 55 μm
Rt3 = 24.6 μm	Rv = 15.8 μm	DELQ = 11.2 deg
Rt4 = 22.6 μm	Rp = 22.4 μm	Rsk = 0.6
Rt5 = 20.1 μm	R3z = 10.6 μm	Rku = 4.2
Ra = 4.54 μm	Rpm = 14 μm	
Rq = 6 μm	R3y = 16.8 μm	



Слика 95. Резултати мерења и топографија површине на узорку 6 на доњој површини

Експериментом је утврђено да је на горњој површини узорка плочице 100 x 100 mm већа храпавост, тачније веће вредности средње аритметичко одступање профила (R_a), као и максимална висина профила, максимална R_{ti} вредност (R_{max}). Конкретно за снагу највећу снагу која је коришћена у експерименту $P = 4770 \text{ W}$ добијене су вредности $R_{max} = 105 \mu\text{m}$ $R_a = 20.1 \mu\text{m}$, што су уједно и највеће вредности параметра храпавости за 6 узорка. То се може приметити и код узорка од 15 mm са већом снагом долази до повећања храпавости на горњој површини узорка. Са снагом од $P = 4704 \text{ W}$ добијене су вредности $R_a = 15.4 \mu\text{m}$ $R_{max} = 67 \mu\text{m}$ (дизна која је радила 5.3 h $\varnothing 1.2 \text{ mm}$), што је веће од вредности $R_a = 12.63 \mu\text{m}$, $R_{max} = 57 \mu\text{m}$, за снагу од $P = 4680 \text{ W}$ (нова дигна $\varnothing 1.2 \text{ mm}$).

Табела 13. NSTIG план плочице од 10 mm

TRUMPF



SET-UP SCHEDULE GENERAL DATA

MACHINE:	TruLaser 3040 (L32) (MAX. LASER POWER 5000 WATT)
CONTROL:	Sin 840D
COMPANY:	Trumpf
JOB NAME:	MB
NC PROGRAM PATH:	C:\ TRUMPF.NET\ Workfiles\ User1\ MB_1.LST
PROGRAM NAME:	MB_1 ()
MATERIAL ID (SHEET):	St37-100 (1.0038)
MATERIAL (TT):	St37-100 (1.0038)
Stock ID:	ST001000----4000x1510
STORAGE LOCATION	
BLANK:	4000.00 x 1510.00 x 10.00 mm
MINIMUM BLANK:	110.21 x 110.22 mm
GRAIN:	*
WEIGHT:	474.14 kg
MACHINING TIME:	0 : 00 : 45 [h:min:s]
STORAGE REQUIREMENT:	16097 CHARACTERS
TOTAL CUTTING LENGTH:	1102.79 mm
NUMBER OF PROGRAMME RUNS:	1
SCRAP:	99.83 %

MACHINING INSTRUCTIONS

SHEET STOP:	
MICROJOINTS, CHANGEABLE ON THE MACHINE:	not set
NAME OF SLAT ASSIGNMENT:	Standard machine, every second set
DISTANCE OF SUPPORT POINTS ON THE SLAT:	38 mm
SLAT DISTANCE:	67 mm
ANTICIPATE PROCESSINGS:	without
REMARKS:	

LASER-TECHNOLOGY TABLES

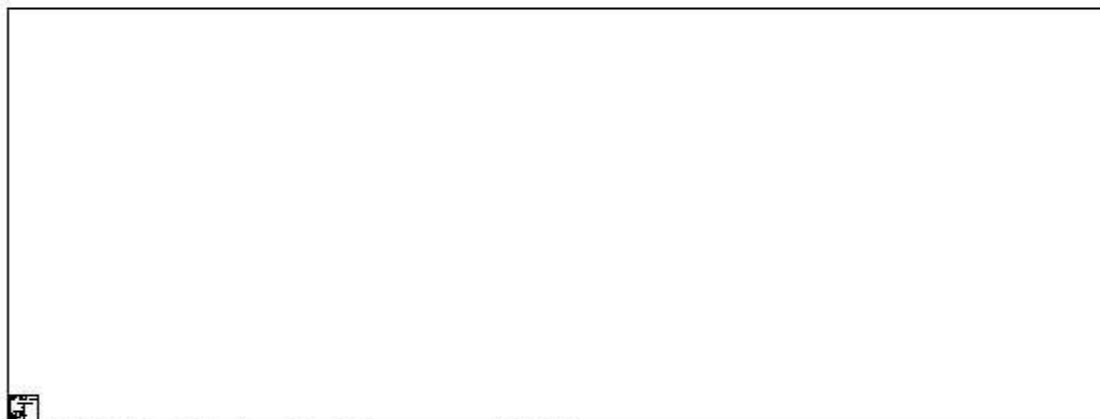
TABLE NUMBER	KERF WIDTH	FOCAL LENGTH	NOZZLE DIAMETER	MAX. LASER POWER	SET DIMENSION	GAS
ST100MD0-O2S0-30-2	0.43	9.80	EAA12	5000	3.50	1
Gas type: 1 = Oxygen, 2 = Nitrogen, 3=Customer, 4 = Compressed air						

TECHNOLOGY TABLES

NUMBER	PIERCING MODE	CUTTING MODE	TYPE OF CONTOUR
ST100MD0-O2S0-30-2	NORMAL	ENGRAVE	LARGE
ST100MD0-O2S0-30-2	NORMAL	NORMAL	LARGE

Табела 14. Информације о појединачном узорку

Milos Bogdanovic MASTER RAD Fakultet Inzenjerskih Nauka	PART NUMBER:	1
	DRAWING NUMBER:	NOID_1
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	
	NUMBER:	1
	DIMENSIONS:	100.000 x 100.000 mm
	SURFACE:	10000.00 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP1MB_1
	MACHINING TIME:	0.72 min
	CUTTING LENGTH:	1102.79 mm
	WEIGHT:	0.785 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	0.66 s
	GEOFILE NAME:	C:\Users\lnzsenos\Desktop\ 1000342014-6mm11.05.2017.GEO



C:\TRUMPFF.NET\Workfiles\User\1\MB_1.TAF igor 11.05.2017

TRUMPF**SET-UP SCHEDULE
GENERAL DATA**

MACHINE:	TruLaser 3040 (L32) (MAX. LASER POWER 5000 WATT)
CONTROL:	Sin 840D
COMPANY:	Trumpf
JOB NAME:	MB-15mm
NC PROGRAM PATH:	C:\ TRUMPF.NET\ Workfiles\ User1\ MB-15mm_1.LST
PROGRAM NAME:	MB_15mm_1 ()
MATERIAL ID (SHEET):	St37-150 (1.0038)
MATERIAL (TT):	St37-150 (1.0038)
Stock ID:	ST001500----4000x1512
STORAGE LOCATION	
BLANK:	4000.00 x 1512.00 x 15.00 mm
MINIMUM BLANK:	110.22 x 110.23 mm
GRAIN:	*
WEIGHT:	712.15 kg
MACHINING TIME:	0 : 00 : 51 [h:min:s]
STORAGE REQUIREMENT:	16122 CHARACTERS
TOTAL CUTTING LENGTH:	1107.12 mm
NUMBER OF PROGRAMME RUNS:	1
SCRAP:	99.83 %

MACHINING INSTRUCTIONS

SHEET STOP:	
MICROJOINTS, CHANGEABLE ON THE MACHINE:	not set
NAME OF SLAT ASSIGNMENT:	Standard machine, every second set
DISTANCE OF SUPPORT POINTS ON THE SLAT:	38 mm
SLAT DISTANCE:	67 mm
ANTICIPATE PROCESSINGS:	without
REMARKS:	

LASER-TECHNOLOGY TABLES

TABLE NUMBER	KERF WIDTH	FOCAL LENGTH	NOZZLE DIAMETER	MAX. LASER POWER	SET DIMENSION	GAS
ST150MD0-O2S0-30-2	0.45	9.80	EAA14	5000	5.00	1

Gas type: 1 = Oxygen, 2 = Nitrogen, 3=Customer, 4 = Compressed air

TECHNOLOGY TABLES

NUMBER	PIERCING MODE	CUTTING MODE	TYPE OF CONTOUR
ST150MD0-O2S0-30-2	NORMAL	ENGRAVE	LARGE
ST150MD0-O2S0-30-2	NORMAL	NORMAL	LARGE

Табела 16. Информације о појединачном узорку

Milos Bogdanovic MASTER RAD Fakultet Inženjerskih Nauka	PART NUMBER:	1
	DRAWING NUMBER:	NOID_1
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	
	NUMBER:	1
	DIMENSIONS:	100.000 x 100.000 mm
	SURFACE:	10000.00 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP1MB_15mm_1
	MACHINING TIME:	0.85 min
	CUTTING LENGTH:	1107.12 mm
	WEIGHT:	1.178 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	2.04 s
	GEOFILE NAME:	C:\Users\lnzsenos\Desktop\ 1000342014-6mm11.05.2017.GEO



C:\TRUMPF.NET\Workfiles\User\1\MB-15mm_1.TPF igor 11.05.2017

TRUMPF



SET-UP SCHEDULE

GENERAL DATA

MACHINE:	TruLaser 3040 (L32) (MAX. LASER POWER 5000 WATT)
CONTROL:	Sin 840D
COMPANY:	Trumpf
JOB NAME:	z302
NC PROGRAM PATH:	C:\ TRUMPF.NET\ Workfiles\ User1\ z302_1.LST
PROGRAM NAME:	z302_1 ()
MATERIAL ID (SHEET):	St37-120 (1.0038)
MATERIAL (TT):	St37-120 (1.0038)
Stock ID:	ST001200----4012x2000
STORAGE LOCATION	
BLANK:	4012.00 x 2000.00 x 12.00 mm
MINIMUM BLANK:	4010.58 x 1999.54 mm
GRAIN:	*
WEIGHT:	755.86 kg
MACHINING TIME:	2 : 01 : 38 [h:min:s]
STORAGE REQUIREMENT:	88138 CHARACTERS
TOTAL CUTTING LENGTH:	173328 mm
NUMBER OF PROGRAMME RUNS:	1
SCRAP:	40.67 %

MACHINING INSTRUCTIONS

SHEET STOP:	
MICROJOINTS, CHANGEABLE ON THE MACHINE:	not set
NAME OF SLAT ASSIGNMENT:	Standard machine, every second set
DISTANCE OF SUPPORT POINTS ON THE SLAT:	38 mm
SLAT DISTANCE:	67 mm
ANTICIPATE PROCESSINGS:	without
REMARKS:	

LASER-TECHNOLOGY TABLES

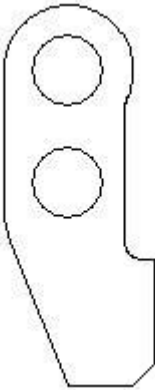
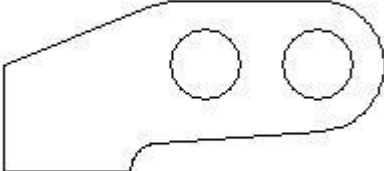
TABLE NUMBER	KERF WIDTH	FOCAL LENGTH	NOZZLE DIAMETER	MAX. LASER POWER	SET DIMENSION	GAS
ST120MD0-O2S0-30-2	0.46	9.80	EAA12	5000	4.00	1

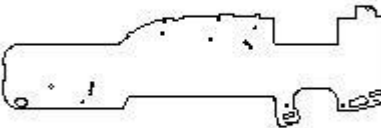
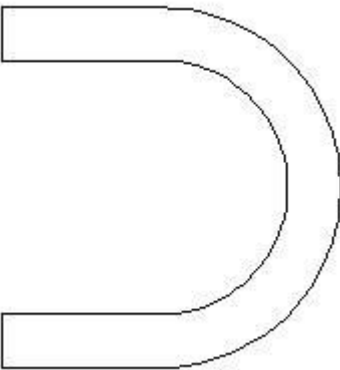
Gas type: 1 = Oxygen, 2 = Nitrogen, 3=Customer, 4 = Compressed air

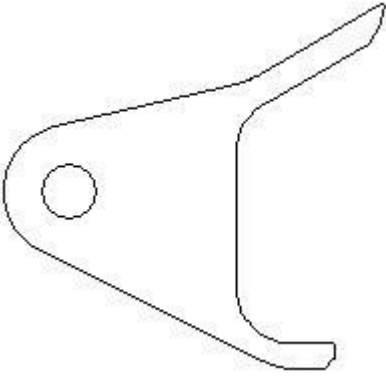
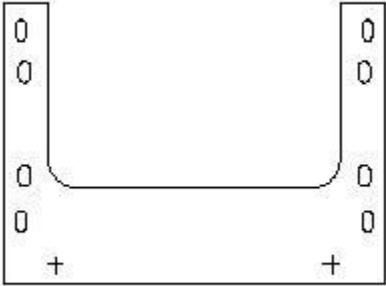
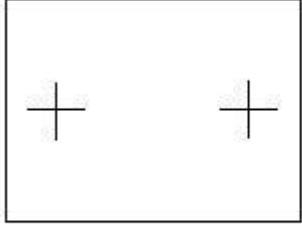
TECHNOLOGY TABLES

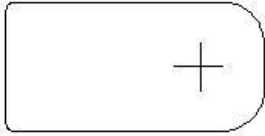
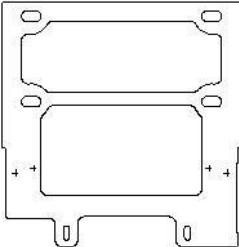
NUMBER	PIERCING MODE	CUTTING MODE	TYPE OF CONTOUR
ST120MD0-O2S0-30-2	NORMAL	NORMAL	LARGE
ST120MD0-O2S0-30-2	NORMAL	ENGRAVE	LARGE
ST120MD0-O2S0-30-2	NORMAL	NORMAL	MEDIUM

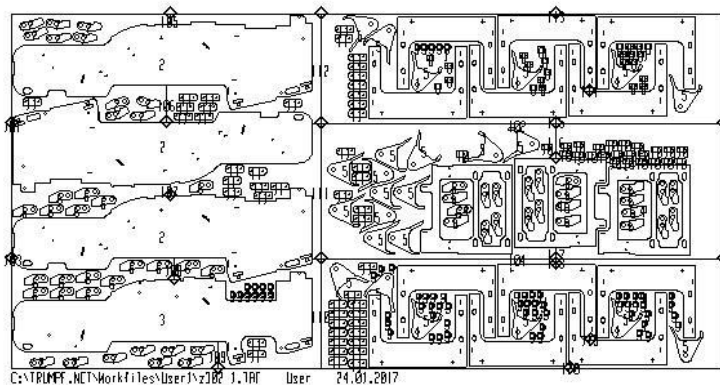
Табела 18. Информације о појединачним узорцима

	PART NUMBER:	7
	DRAWING NUMBER:	1000333476
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	30
	DIMENSIONS:	53.500 x 135.000 mm
	SURFACE:	4444.76 mm ²
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP1z302_1
	MACHINING TIME:	0.40 min
	CUTTING LENGTH:	522.648 mm
	WEIGHT:	0.419 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	3
	PIERCING TIME	4.13 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000333476-12mm test.GEO
	PART NUMBER:	6
	DRAWING NUMBER:	1000333470
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	30
	DIMENSIONS:	135.000 x 60.500 mm
	SURFACE:	5150.77 mm ²
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP2z302_1
	MACHINING TIME:	0.40 min
	CUTTING LENGTH:	532.132 mm
	WEIGHT:	0.485 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	3
	PIERCING TIME	4.13 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000333470-12mm test.GEO
	PART NUMBER:	2
	DRAWING NUMBER:	1000330699
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	3
	DIMENSIONS:	1688.302 x 527.167 mm
	SURFACE:	573740.92 mm ²
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP3z302_1
	MACHINING TIME:	4.13 min
	CUTTING LENGTH:	6100.38 mm
	WEIGHT:	54.046 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	16
	PIERCING TIME	22.00 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000330699 - 12mm.GEO

	PART NUMBER:	11
	DRAWING NUMBER:	1000186387
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	WNK
	NUMBER:	48
	DIMENSIONS:	100.000 x 40.000 mm
	SURFACE:	3914.16 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP4z302_1
	MACHINING TIME:	0.22 min
	CUTTING LENGTH:	332.404 mm
	WEIGHT:	0.369 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	1.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000186387-12mm.GEO
	PART NUMBER:	3
	DRAWING NUMBER:	1000330698
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	1
	DIMENSIONS:	1688.302 x 527.167 mm
	SURFACE:	526871.94 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP5z302_1
	MACHINING TIME:	4.25 min
	CUTTING LENGTH:	6267.85 mm
	WEIGHT:	49.631 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	16
	PIERCING TIME	22.00 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000330698 - 12mm.GEO
	PART NUMBER:	9
	DRAWING NUMBER:	1000186344
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	WNK
	NUMBER:	65
	DIMENSIONS:	32.000 x 34.000 mm
	SURFACE:	377.77 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP6z302_1
	MACHINING TIME:	0.12 min
	CUTTING LENGTH:	171.996 mm
	WEIGHT:	0.036 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	1.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000186344(1000237667).GEO

	PART NUMBER:	5
	DRAWING NUMBER:	1000353294
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	
	NUMBER:	24
	DIMENSIONS:	200.999 x 192.900 mm
	SURFACE:	12794.80 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP7z302_1
	MACHINING TIME:	0.52 min
	CUTTING LENGTH:	818.497 mm
	WEIGHT:	1.205 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	2
	PIERCING TIME	2.75 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000353294- 12mm.GEO
	PART NUMBER:	1
	DRAWING NUMBER:	1000215290
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	12
	DIMENSIONS:	550.000 x 406.184 mm
	SURFACE:	108722.42 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP8z302_1
	MACHINING TIME:	2.13 min
	CUTTING LENGTH:	3206.74 mm
	WEIGHT:	10.242 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	9
	PIERCING TIME	12.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000215290 - 12mm.GEO
	PART NUMBER:	8
	DRAWING NUMBER:	1000186396
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	WNK
	NUMBER:	24
	DIMENSIONS:	40.000 x 30.000 mm
	SURFACE:	1200.00 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP9z302_1
	MACHINING TIME:	0.13 min
	CUTTING LENGTH:	182.037 mm
	WEIGHT:	0.113 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	1.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000186396-12mm.GEO

	PART NUMBER:	10
	DRAWING NUMBER:	1000288940
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	none
	NUMBER:	24
	DIMENSIONS:	60.000 x 30.000 mm
	SURFACE:	1755.36 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP10z302_1
	MACHINING TIME:	0.15 min
	CUTTING LENGTH:	204.171 mm
	WEIGHT:	0.165 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	1
	PIERCING TIME	1.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000288940 -12mm.GEO
	PART NUMBER:	4
	DRAWING NUMBER:	1000215074
	NAME OF DRAWING:	
	CUSTOMER NAME:	
	NUMBER:	3
	DIMENSIONS:	502.000 x 516.777 mm
	SURFACE:	109870.79 mm2
	RULE NAME:	1P
	SUBROUTINE NUMBER:	SP11z302_1
	MACHINING TIME:	3.17 min
	CUTTING LENGTH:	4982.4 mm
	WEIGHT:	10.350 kg
	NUMBER OF PIERCING POINTS:	9
	PIERCING TIME	12.38 s
	GEOFILE NAME:	E:\ Production\ Production\ IGORR\ laser dxf\ 12mm\ 1000215074 - 12mm.GEO



7. ЗАКЉУЧАК

Ласером се може вршити израда са високом прецизношћу и квалитетом обраде. 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. 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.

Ласерско сечење има више предности у односу на класичне поступке сечења материјала. Ширина реза је мала, странице реза су равне, топлотно деформисани слој је мали, могуће је сећи радни предмет по компликованим контурама са великом прецизношћу, могућа је обрада готово свих познатих врста материјала, додатна обрада није потребна, чист је и еколошки прихватљив процес обраде.

На основу теоријских разматрања дошло се до закључка да на квалитет обраде код ласерског сечења утиче велики број фактора који су систематизовани на факторе ласерске машине за сечење лима, снопа ласерских зрака који представља алат у обрадном процесу и радног предмета. Бројност утицајних фактора, различитих по природи, условили су да се у овом раду истраживања ограниче на истраживање утицаја параметара процеса на квалитет обраде.

Експериментом је утврђено да је на горњој површини узорка плочице 100 x 100 mm већа храпавост, тачније веће вредности средње аритметичко одступање профила (R_a), као и максимална висина профила, максимална R_{ti} вредност (R_{max}). Конкретно за снагу највећу снагу која је коришћена у експерименту $P = 4770 \text{ W}$ добијене су вредности $R_{max} = 105 \mu\text{m}$ $R_a = 20.1 \mu\text{m}$, што су уједно и највеће вредности параметра храпавости за 6 узорка. То се може приметити и код узорка од 15 mm са већом снагом долази до повећања храпавости на горњој површини узорка. Са снагом од $P = 4704 \text{ W}$ добијене су вредности $R_a = 15.4 \mu\text{m}$ $R_{max} = 67 \mu\text{m}$ (дизна која је радила 5.3 h Ø1.2 mm), што је веће од вредности $R_a = 12.63 \mu\text{m}$, $R_{max} = 57 \mu\text{m}$, за снагу од $P = 4680 \text{ W}$ (нова дизна Ø1.2 mm).

Поред тога што примењени режими ласерског сечења утичу на вредност параметара топографије површине, утићу и на облик закривљености линија реза. Даљим обимнијим истраживањима могуће је формирати базу знања о утицају параметара режима на излазне параметре квалитета обраде ласерским сечењем.

Детаљно познавање технологије ласерског сечења омогућава њену успешну примену у производњи, односно, правилан одабир параметара обраде доводи до повећања квалитета обрађених материјала. Анализом резултата утицаја параметара ласерског сечења на квалитет обрађене површине може се закључити да поједини параметри значајно утичу (снага, положај жиже и брзина помоћног кретања) на висину неравнина (R_a).

Утицај притиска радног гаса код добијених резултата мерења је незнатан.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] www.gaf.ni.ac.rs/fizika/doc/.../LASERI%20I%20NJIHOVA%20PRIMENA.pps, приступљено: 01.06.2017
- [2] http://www.vtsnis.edu.rs/predmeti_2012/nekonvencionalne_metode_obrade/predavanja_2015/5_Laserska_obrada_LBM.pdf, приступљено: 04.05.2017
- [3] Драгоје Миликић Неконвенционални поступци обраде
- [4] <https://www.emaze.com/@AOOCZCTL/Laserska-Obrada>, приступљено: 02.06.2017
- [5] Иван Миликић, Квалитет обраде ласером, Дипломски рад, машински факултет Крагујевац.
- [6] scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2011/0354-79651102075M.pdf, приступљено: 05.06.2017
- [7] https://www.google.rs/search?biw=1366&bih=638&tbm=isch&sa=1&q=trumpf+laser+3040&oq=trumpf+laser+3040&gs_l=img.12...45114.45114.0.46247.0.0.0.0.0.0..0.0....0...1.1.64.img..0.0.0.VRAvmuwYJLc, приступљено: 07.06.2017
- [8] <https://www.scribd.com/document/262953130/Library-Laser-CO2-Laser-pdf>, приступљено: 07.06.2017
- [9] <https://www.tumpf.com>, приступљено: 07.06.2017
- [10] „Обрада ласером“, (скрипта за ученике), Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [11] <http://www.beverlysteel.com/products/steel-plate/s355j2-s355j2-n-steel-plate.html>, приступљено: 10.06.2017
- [12] <http://metalopromet.rs/uporedni-standardi-celika/>, приступљено: 10.06.2017
- [13] Недић, Б., Лазић, М., Неконвенционални поступци обраде (поглавље о обради ласером, књига у рукопису), Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [14] Радовановић, М., Аутоматизовано пројектовање технологије обраде ласером, Докторска дисертација, Машински факултет, Ниш, 1995.
- [15] BYSTRONIC, *Bystar - Operating instructions*, 2008.
- [16] Срећко Ђурчић, Неконвенционални поступци обраде, Технички факултет, Чачак, 2005
- [17] <https://www.scribd.com/doc/57986455/PROGRAMIRANJE-NUMERICKE-UPLAVLJANIH-GLODALICA-POMOUCAM-SISTEMA>, приступљено: 15.06.2017