



**Факултет инжењерских наука
Универзитет у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Смер: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 346/2015

Алекса Ж. Васић
3D ОБРАДА ЛАСЕРОМ
Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф. – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, фебруар, 2019.

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА
Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО
Предмет: Неконвенционални поступци обраде

МАСТЕР РАД

са темом:

3D ОБРАДА ЛАСЕРОМ

За кандидата: **Алексу Васића**, број индекса 346/2015

У оквиру мастер рада кандидат треба да размотри проблематику обраде ласером, изврши анализу поступака обраде, елементе опреме и карактеристике машина. Посебну пажњу кандидат треба да обрати на обраду гравирањем и могућности 3D обраде. Такође, у складу са могућностима, извршити одговарајућа испитивања утицаја услова обраде на дубину обраде и квалитет обрађене површине.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Анализа процеса обраде ласером,
3. Ласерско гравирање и 3D обрада,
4. Експериментална испитивања,
5. Резултати,
6. Закључак,
7. Литература.

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК
Проф. др Богдан Недић

Крагујевац, јануар, 2019.

Резиме

У оквиру мастер рада извршено је прикупљање, систематизација и анализа података о обради ласером. Описане су врсте ласера, принцип обраде, операције обраде. У посебном поглављу описана је примена ласера за гравирање и обраду сложених 3D површина. Извршена су обимна експериментална испитивања обраде ласером у условима различитих снага ласерског снопа, брзина кретања и радијалног посмака. Такође обрада је вршена и са различитим бројем пролаза. Циљ истраживања је био утврђивање могућности 3D обраде ласером.

Кључне речи: Обрада ласером, квалитет обраде, гравирање, 3D обрада.

Abstract

In this Master Thesis the gathering, systematization and analysis of data, relating to the laser machining, was conducted. The types of lasers, principle of machining and machining operation were described. In a particular chapter, the use of the laser for engraving and machining of the complex 3D surfaces was explained. An extensive experimental research of the laser machining in various conditions, related to the laser power, movement speed and radial step, was also conducted. Furthermore, the machining was done with a huge number of different passes. The goal of this research was to determine the capabilities of the 3D laser machining.

Keywords: Laser machining, the quality of the machining, engraving, 3D machining.

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	5
2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ.....	7
2.1 ИСТОРИЈАТ И РАЗВОЈ ЛАСЕРА	7
2.2 ОСОБИНЕ ЛАСЕРСКОГ ЗРАЧЕЊА.....	8
2.3 ВРСТЕ ЛСЕРА.....	9
2.4 ПРИНЦИП ЛАСЕРСКЕ ОБРАДЕ.....	15
2.5 ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПЦИ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ	19
2.6 ОБРАДЉИВОСТ МАТЕРИЈАЛА ЛАСЕРОМ.....	20
2.7 ЗАВАРИВАЊЕ ЛАСЕРОМ	21
2.8 БУШЕЊЕ ЛАСЕРОМ.....	22
2.9 СЕЧЕЊЕ ЛАСЕРОМ.....	23
2.10 ЛАСЕРСКА ТЕРМИЧКА ОБРАДА	28
3. ЛАСЕРСКО ГРАВИРАЊЕ И 3D ОБРАДА.....	30
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	36
4.1 ОПРЕМА	37
5. РЕЗУЛТАТИ.....	43
5.1 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА	62
6. ЗАКЉУЧАК	64
ЛИТЕРАТУРА.....	65

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 на то 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 обрадивих материјала, већ и при обради делова сложеног геометријског облика од 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. Поред сечења, све више се користи и ласерско гравирање за које се врше разна испитивања у циљу побољшања ове технологије обраде [2].

Друга тачка овог рада описује принципе рада и особине ласера као и поделу ласера и детаљније описивање свих врста ласера. Такође је дат опис најраспрострањенијих врста ласерских обрада као што су бушење, сечење и термичка

обрада. Трећа тачка детаљније описује гравирање ласером, микро резање и 3D обраду - "глодање ласером". Дати су и реалани примери употребе ових поступака.

Експериментална испитивања су приказана у четвртој и петој тачци овог рада где се може видети циљ овог испитивања, опрема помоћу које је извршено испитивање и добијени резултати експеримента. Такође је дат приказ зависности параметара ласерске обраде у виду 3D дијаграма како би се јасније виделе предности и мане ласерског резања. Поред приказа 3D дијаграма дати су и 2D дијаграми који приказују зависност броја пролаза на дубину гравуре. Након тога је дата анализа резултат где је детаљније описана зависност параметара обраде и добијених резултата.

На крају самог рада се налази закључак где се види сврха овог испитивања и даље могуће врсте примене ове технологије обраде ласерским зрацима.

2. АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ

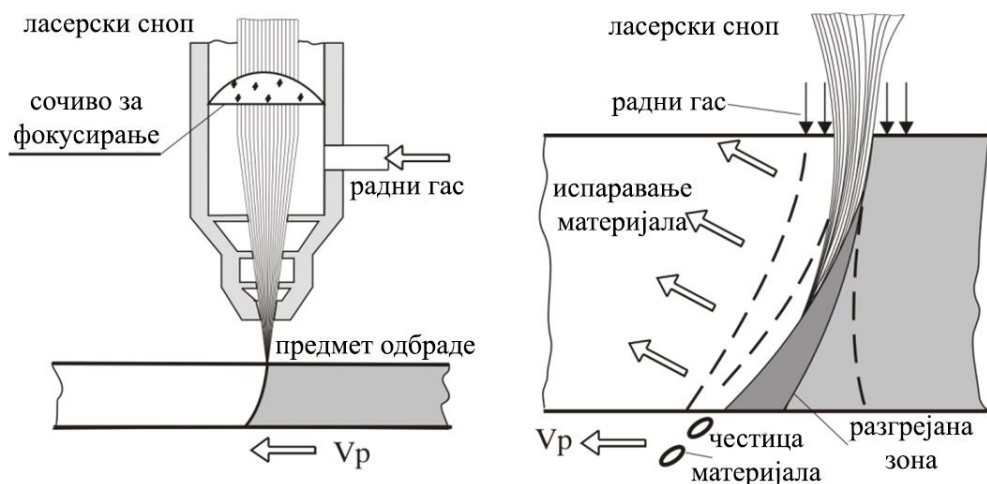
2.1 Историјат и развој ласера

Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. Године 1704. Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Јангов експеримент обављен 1803. године и непосредно откриће поларизације светлости су убедили научнике у оно време да светлост има способност таласања. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица. Први ласер је пронађен у Мајамију, маја 1960. године. То је био рубинов ласер изузетне чврстоће. Многе врсте ласера су пронађене ускоро после рубиновог ласера - први уранијум ласер у „ИВМ“ (новембар 1960. године), први хелијум-неонски ласер 1961. године, први Nd ласер: „YAG“ - ласер и CO₂ ласер 1964. године, Ag ласер 1964. године, хемијски ласер 1965. године. Када познајемо принципе ласера, ово није исувише велико изненађење али широки и континуални развој и примена ласера су заиста изванредни и представљају преко чудо [1].

Ласерски снап, који емитује ласерско тело разликује се од других познатих видова светлости [1]:

- 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.

Последњих година технолошки процеси који се базирају на локалном загревању обрађиване површине помоћу ласера, добијају значајан развој и примену. Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде (слика 2.1). Овај нови правац обраде материјала добио је назив ласерска технологија.



Слика 2.1 Принципијална шема формирања ласерског снопа [2]

2.2 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 распрострањавања. 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 где је (фреквенција ν_0) одређује се изразом [6]:

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

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 [6]:

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

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 обраде је [6]:

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

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

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 [1].

Енергија импулса ласерског зрачења је:

$$E = \int_0^{\tau_i} P_\lambda(\tau) d\tau$$

где је:

$P_\lambda(t)$ - снага ласерског зрачења у моменту t и

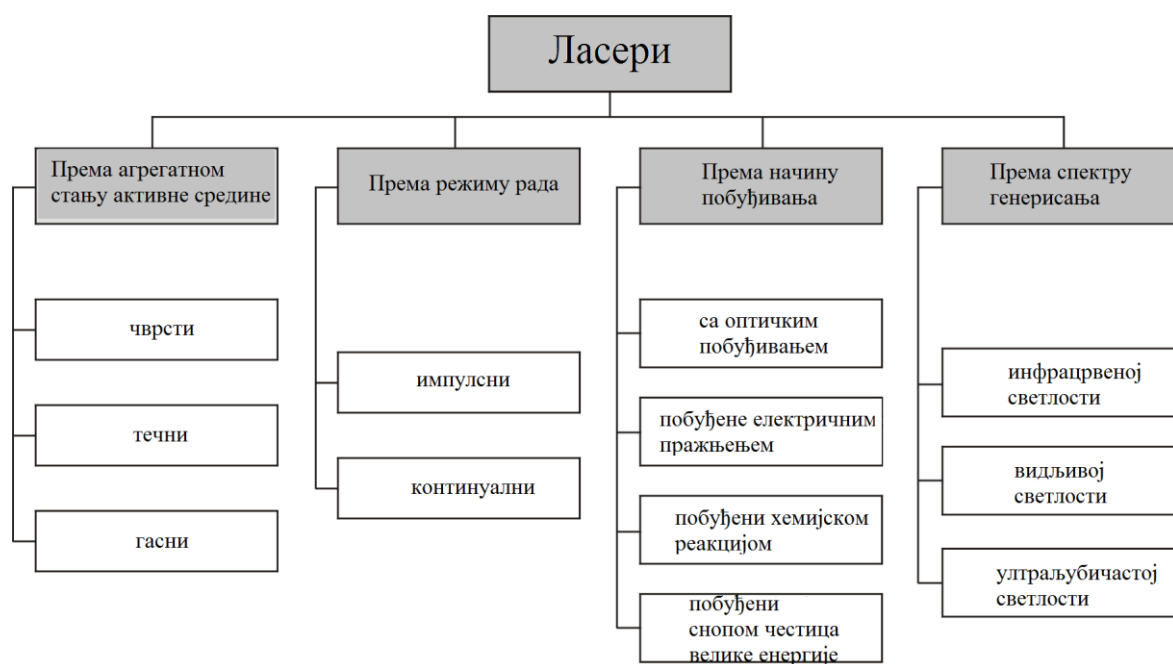
τ_i - трајање импулса.

Средња снага импулса ласерског зрачења је:

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

2.3 Врсте ласера

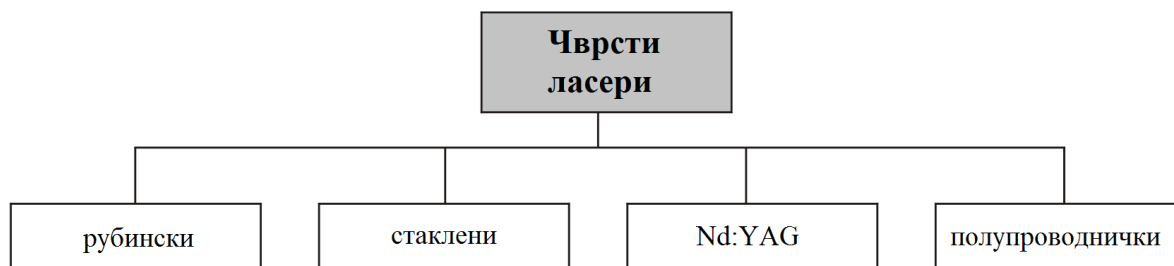
Постоји више подела ласера. На слици 2.2 је приказана најчешћа подела.



Слика 2.2 Подела ласера [6]

Чврсти ласери

Ласери са чврстим телом нашли су примену у обради метала и неметала. На слици 2.3 дата је подела чврстих ласера [6].



Слика 2.3 Подела чврстих ласера [6]

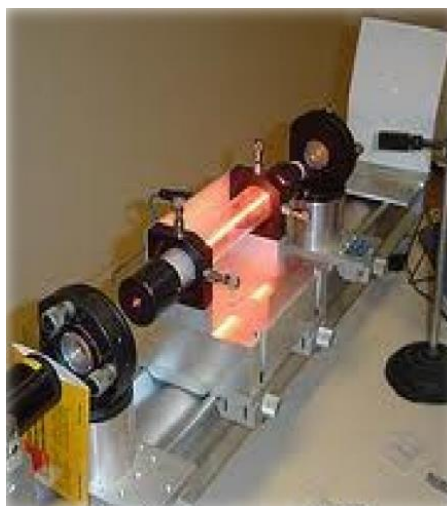
Као активна средина код ласера на бази чврстих тела користи се кристално или аморфно тело. Чврста тела имају знатно већу концентрацију активних честица него гасови. Због тога је насељеност енергетских нивоа у чврстим телима много већа од насељености енергетских нивоа у гасовима. Чврсто тело као оптичка средина има мању оптичку хомогеност него гасови, што условљава веће дисперзионе губитке светлости и смањење квалитета резонатора при његовој већој дужини, па зато нема смисла производити активне елементе веће дужине. Активни елементи ових ласера не прелазе дужину од 60 cm за оптички најхомогеније материјале.

Рубински ласер

Међу ласерима са чврстим телом најпознатији је рубински ласер. Он је израђен на бази ласерског тела од кристалног синтетичког рубина (Al_2O_3) у виду цилиндра (10x10 mm) са додатком 0.5% тровалентног хрома (Cr^{+++}). Рубин је минерал бледо ружичасте боје до јарко црвене боје, при чему преовладава црвена боја таласне дужине светлости $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$.

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

Рубински ласер је први ласер који је почео да се користи за бушење дијаманта и алата за извлачење танке жице. Овај ласер у машинству се користи за бушење малих отвора код различитих материјала и за тачкасто заваривање. Рубински ласер је приказан на слици 2.4 [2].



Слика 2.4 Рубински ласер

Стаклени ласер

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

Постоје два вида стаклених ласера:

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

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

Већа заступљеност ових ласера у поређењу са рубинским је у нижој цени и могућности да раде у широком дијапазону енергије 1 до 1000 J. Постоје стаклени ласери и са такозваним гигантским импулсом са енергијом од 10^4 до 10^5 J [2].

Nd: YAG laser

Један од најважнијих ласера који има многобројне индустријске и научне примене је Nd: YAG ласер (неодијумски ласер). YAG је скраћени назив за итријум алуминијум гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ који представља најчешћи извор ласерског зрачења. YAG спада у групу врло тврдих материјала. Захваљујући високој тврдоћи обрада YAG-а је отежана, јер захтева дијамантска средства.

YAG ласер одликује висока прозирност и висок степен полирања. Његова значајна предност у односу на рубинске, а нарочито у односу на стаклене ласере, је висока топлотна проводљивост и отпорност, као и мала осетљивост на високе температурне градијенте, чиме је омогућено његово интензивно хлађење. Захваљујући оваквим термофизичким својствима овај ласер може да ради како у импулсном, тако и у континуалном режиму рада. У импулсном режиму овај ласер ослобађа енергију од неколико стотина мЈ у основном моду, са фреквенцијом од 1÷50 Hz. У континуалном режиму снага његове емисије је између 1 и 20 W.

Nd: YAG ласер је карактеристичан по облику, јер се израђује у облику штапова са полираним крајевима, што захтева посебан технолошки поступак [2].

Полупроводнички ласери

Полупроводнички ласери се данас израђују са релативно малом јачином па нису нашли примену у обради метала и неметала. Имају релативно широку примену у мерној техници, холографији, фотографској техници итд.

Течни ласери

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

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

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

Избором органског једињења постиже се одговарајуће таласно подручје у којем ласер може да зрачи, а укључивањем селектовних елемената у резонатор постиже се ласерско зрачење на жељеној таласној дужини унутар таласног подручја. Овакви ласери могу радити и у континуалном и у импулсном режиму, док се ласери са неорганским растворима користе само у импулсном режиму. Побуђивање ласера на бази течности врши се оптичким пумпањем [2].

Ласери на бази неорганске течности

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

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

Ласери на бази органских боја

Ласери на бази органских боја представљају нову врсту ласера која се својим специфичним особинама издваја из групе течних ласера. Карактерише их могућност континуалног мењања таласне дужине ласерске емисије у широком интервалу, што је последица особине органских боја да поседују релативно уске ласерске прелазе. Као органска једињења која називамо органским бојама, а користе се као активна средина, најчешће се употребљавају: родамин 6G, родамин 6, кумарин 2, кумарин 6, итд.

Органске боје су сложена органска једињења која јако апсорбују видљиву светлост. Обично се састоје из бензенских (C_6H_6), пиридинских ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$), азотних ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$) и других прстенова. Већина боја у растворима има јонски карактер. Активна средина, у овом случају органска боја, растворена је у погодном растварачу. Као растварач користе се алкохол, бензин, етанол али је у употреби и пластика са диспергованом бојом. У првим типовима оваквих ласера побуда се вршила помоћу рубинских ласера, али се касније показало да се пумпање може остварити и помоћу бљешталица [6].

Гасни ласери

Постоји више врста ласера, који се међусобно разликују по врсти гаса који образује активну средину, те по начину остваривања средине са инверзном насељеношћу. У односу на остала тела гасови имају тачно одређене енергетске нивое појединих атома или молекула, па зато постоји низ могућих прелаза са нивоа на ниво у различитим гасовима. Друга карактеристика гасова је њихова оптичка хомогеност. Густина гаса је мала, па због тога у гасовима не долази до дисперзије светлости и изобличења светлосног зрака. Управо ова особина гасова дозвољава да растојање

између огледала у оптичком резонатору гасних ласера буде велико, чиме се лакше постиже монохроматичност и боља усмереност ласерског зрака. С друге стране, гас као активна средина има и одређене недостатке: густина гаса је знатно нижа од густине чврстих тела, па се зато у јединици запремине не може постићи велика количина побуђених атома који емитују светлост, као у чврстим телу. Због тога се у гасним ласерима не може постићи импулс велике снаге као у чврстим телима. Инверзна насељеност у овим ласерима постиже се побудом атома или молекула гаса при њиховом судару са брзим слободним електронима за време пражњења гаса. Притисак гаса у оваквим ласерима износи од 10^{-3} до 10^{-2} Ра.

У пракси разликујемо три типа ласера на бази пражњења гасова:

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

Ови ласери се међусобно разликују по механизму настајања инверзне насељености и по таласној дужини зрачења [2].

CO₂ ласер

Први гасни ласер употребљен је 1964. године али се није много користио јер је био мале снаге. Упркос његовом труду да нађе користан начин тог уређаја, CO₂ ласер своју практичну примену има тек данас. На слици 2.5 је приказан CO₂ ласер [7].



Слика 2.5 CO₂ ласер [2]

Принцип рада CO₂ ласера

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

Ласер се састоји од:

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

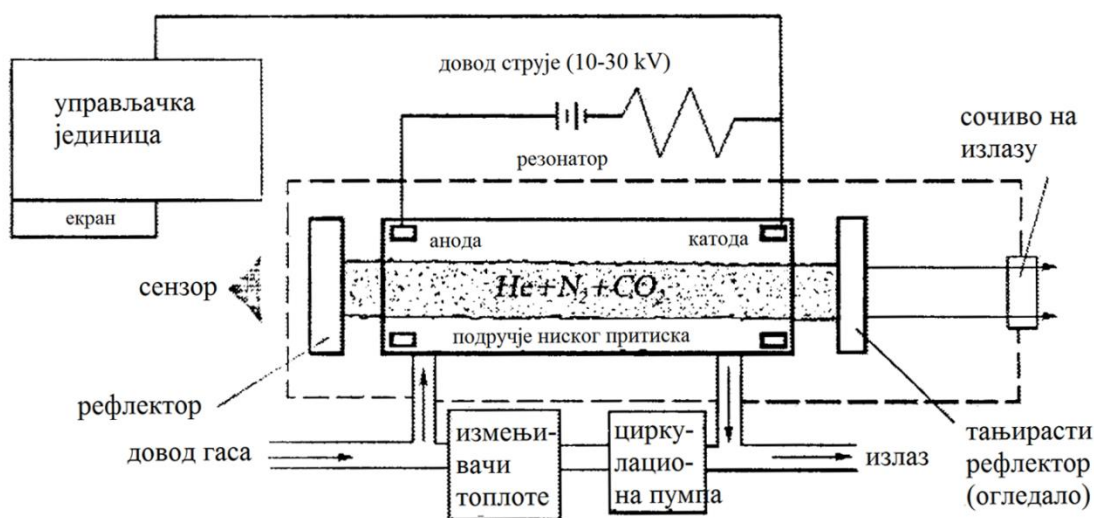
Сочива и прозори су направљени од германијума и цинк-селенида ZnSe. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон. Високи напон производи мноштво брзих електрона у цеви који сударима предају своју енергију молекулима гаса.

CO₂ ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину светлости $\lambda=10.6 \mu\text{m}$, која је десет пута већа од стаклених и YAG-lasera. 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 тврних превлака итд.

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

- ласере са дифузним хлађењем и
- ласере 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 2.6 је приказана шема CO₂ ласера [7].



Слика 2.6 Шема CO₂ ласера [2]

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

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

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

пражњења ефикасност CO₂ ласера је знатно изнад оне која се креће код других типова ласера. Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина. CO₂ ласери се најчешће употребљавају у металопераћивачкој индустрији.

CO₂ ласер се примењује у:

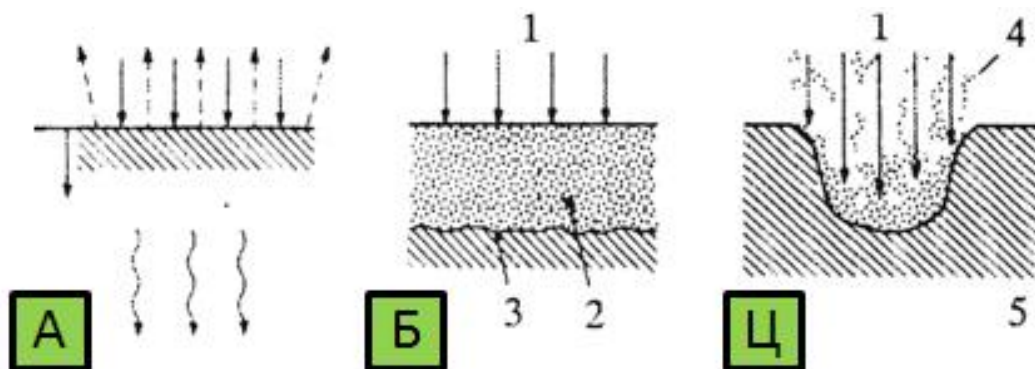
- војна индустрија,
- медицина, хирургија,
- обрада материјала.

2.4 Принцип ласерске обраде

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

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

Поред наведеног, истовремено се одвијају и други процеси (хемијски процеси и фазна трансформација), који битно утичу на карактер дејства ласерског зрачења. Део ласерског снопа који пада на површину предмета обраде апсорбује се у унутрашњост материјала на одређеној дубини, а део се одбија (рефлектује) од површине (слика 2.7).



Слика 2.7 Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом а) рефлексија и апсорпција, б) топљење, ц) испаравање [2]

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

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 2.1 дате су вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења.

Табела 2.1 Вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења [2].

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 2.1, за CO₂ ласере ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) је много велики коефициент рефлексије R за све наведене метале, тако да се за обраду метала користи само мали део енергије ласерског млаза. Зато, ови ласери су непогодни за обраду метала. 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 [6]:

- 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 импулса 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 [6]:

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

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 (слика 2.7-б) површинских слојева, испаравање материјала, формирање кратера на обрађеној површини (слика 2.7-ц) 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 [6]:

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

где је:

λ_0 - коефицијент топлотне проводљивости материјала предмета обраде и

T_t - температура топљења материјала предмета обраде.

Падајући на материјал, светлосни снап 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 [6]:

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

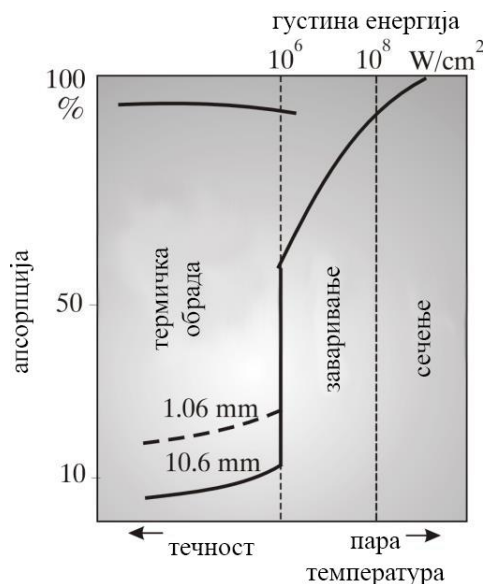
где је:

x - дубина,

α - коефицијент апсорпције и

q_0 - густина снаге ласерског зрачења на површини предмета обраде.

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 (слика 2.8) и при $\lambda=10.6\mu m$. На слици 2.8 приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 2.8 Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала[6]

Битан утицај на коефицијент рефлексије има и густина ласерског млаза. Са повећањем густине од 10^7 до 10^8 W/cm² за већи број метала коефицијент рефлексије се значајно повећава. Повећање густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm² доводи до знатног смањења коефицијента рефлексије, у поређењу са вредностима датим у табели 2.1. Са повећањем храпавости обрађене површине исто тако се смањује коефицијент рефлексије, тј. расте коефицијент апсорпције. Веза између њих дата је изразом [6]:

$$\alpha = 1 - R$$

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

обrade 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. У циљу повећања ефикасности обраде повећати апсорпциона способност $A\%$ ласером може се вештачки снизити рефлексиона способност повећањем хrapавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака.

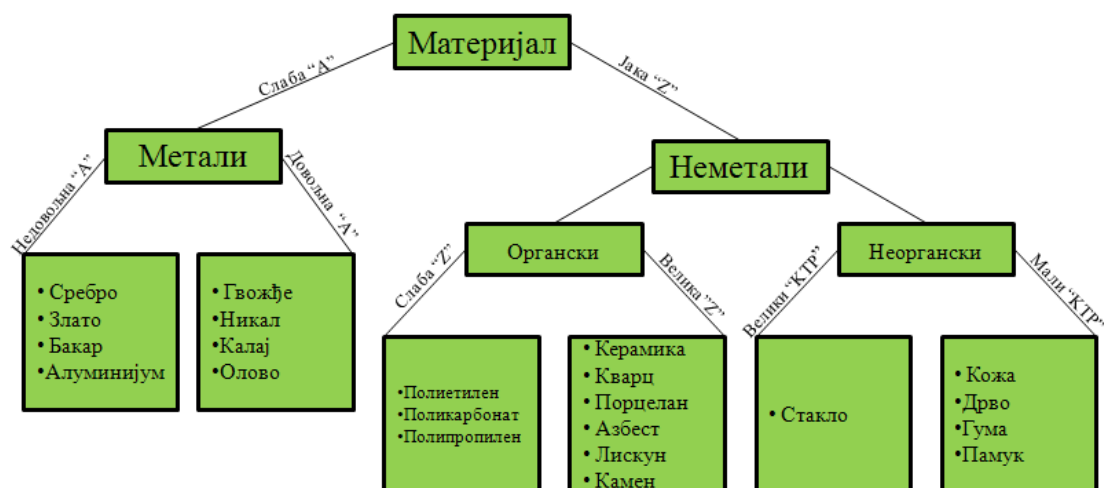
Уколико температура на површини не прелази температуру топљења T_t , узима се да је апсорпциона способност линеарна функција температуре [6]:

$$A = a + bT$$

где је:

T , K - температура површине која апсорбује зрачење и
 a , b - коефицијенти добијени експериментом.

На слици 2.9 приказан је утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост.



Слика 2.9 Утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост [6]

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 - таласна дужина ласерског зрачења
 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 [6]:

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

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 [6]:

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

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 [6].

2.5 Технолошки поступци обраде ласером

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

За правилно одређивање могућности и подручја примене ласерске обраде, врши се класификација са енергетског и технолошког аспекта.

За класификацију обраде са енергетског аспекта, користе се параметри [6]:

- густина снаге,
- трајање дејства ласерског снопа.

Густина снаге је:

$$q_c = \frac{4 \cdot N}{\pi \cdot d_m^2}$$

где је:

N , W – снага ласерског снопа

d_m , cm – пречник фокусираног снопа са континуалним дејством, износи:

$$\tau = \frac{d}{V}$$

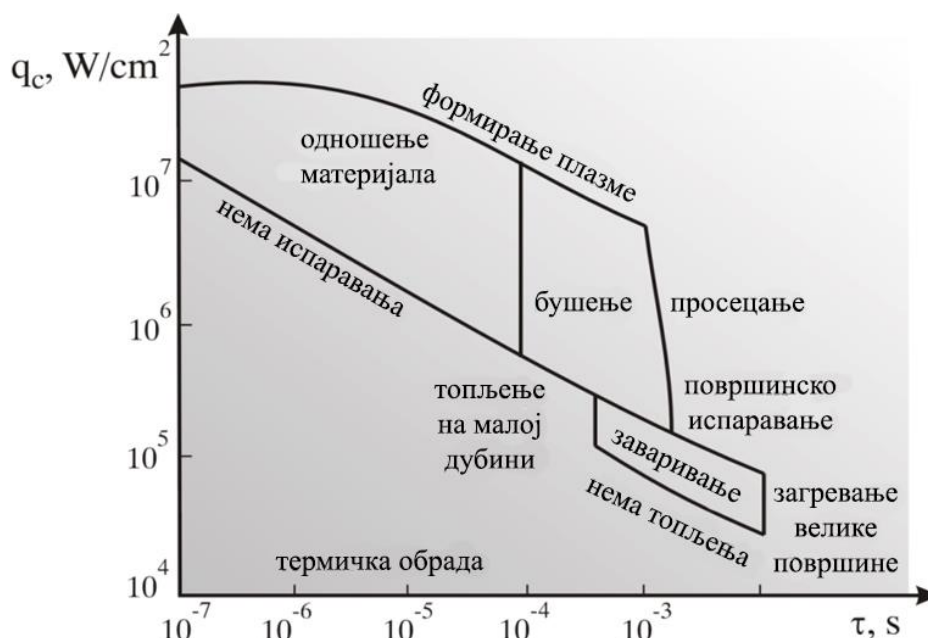
где је:

V , cm/s – брзина померања ласерског снопа по обрађиваној површини

Постоје четири карактеристичне зоне:

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

На слици 2.10 је приказан дијаграм примене ласерске обраде са енергетског аспекта.



Слика 2.10 Дијаграм примене ласерске обраде са енергетског аспекта [6]

При $q_c = 10^4 - 10^5$, W/cm^2 и $q_c = 10^{-4} - 10^{-3}$, јавља се само површинско загревање материјала, при чему могу да наступе различите структурне измене површинских слојева.

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

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

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

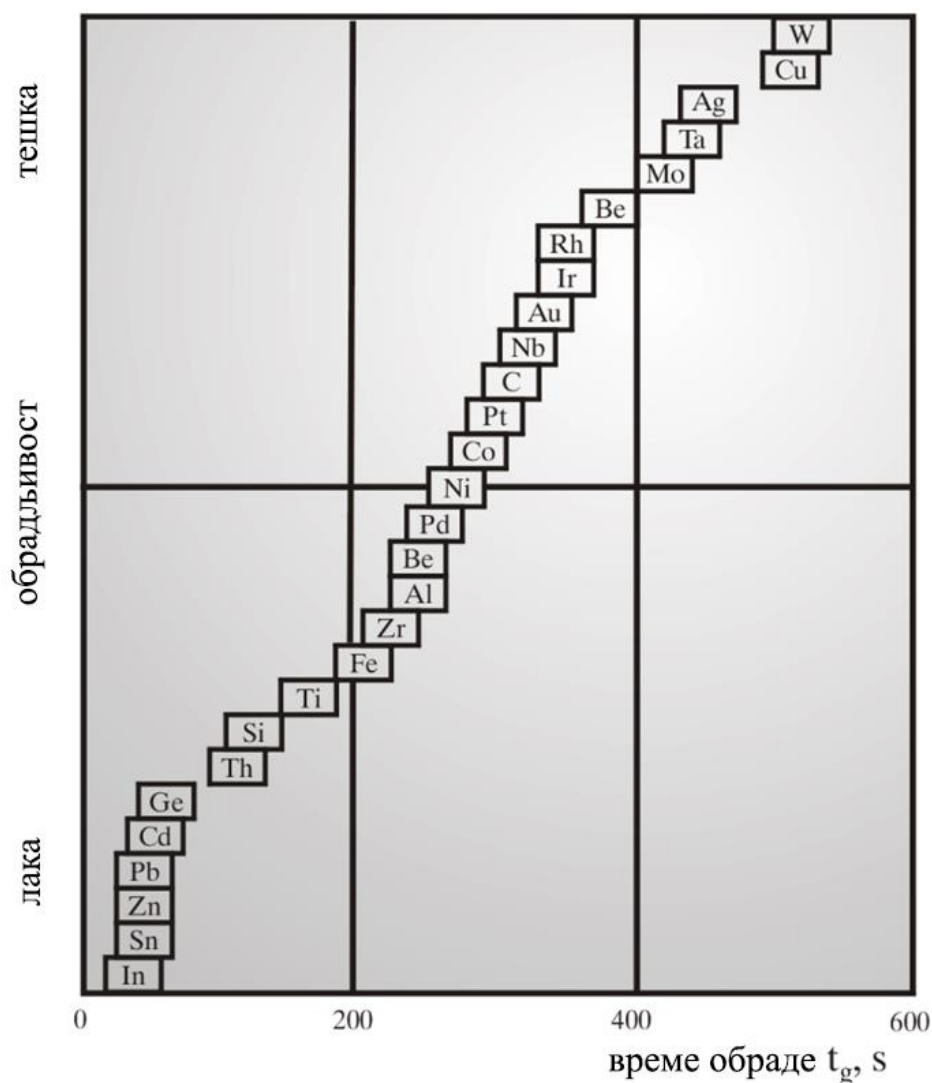
Технолошке карактеристике обраде ласером зависе од врсте технолошке операције. За операције одношења материјала, то су [6]:

- тачност мера (пречник и дубина избушеног отвора, тачност линије реза и сл.);
- квалитет обрађене површине (храпавост обрађене површине, структурне промене на површини и сл.);
- производност обраде (количина скинутог материјала по импулсу, број избушених отвора у јединици времена).

2.6 Обрадљивост 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 2.11 дат је приказ обрадљивости метала ласером.

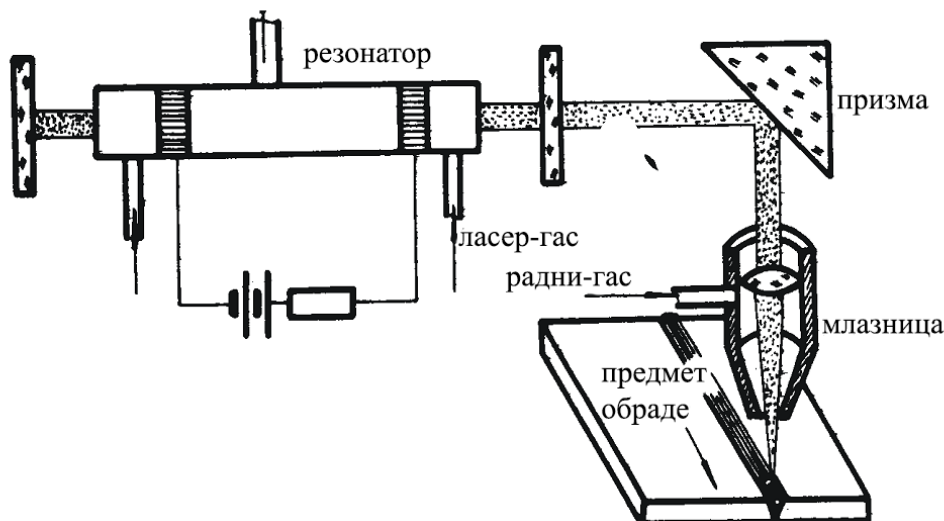


Слика 2.11 Обрадљивост метала ласером [6]

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.

2.7 Заваривање ласером

Представља технолошки процес који карактерише локално топљење метала на месту спајања (заваривања) елемената (слика 2.12). Ласерска техника и технологија се све шире примењује за извођење производних операција заваривања јер обезбеђује загревање веома уске зоне у околини шави (што је посебно значајно за заваривање лимова и других малогабаритних делова), непропустљивост спојева на резервоарима и пуњеним различитим течностима, микрозаваривање код микрошема, интегралних микрошема и других елемената микроелектронике, заваривање неметала (стакла, керамике и сл.), итд.



Слика 2.12 Принципијелна шема заваривања ласером [2]

Општи захтев код заваривања ласером је да ласер даје релативно дугачке импулсе у времену од 1-10 ms, са максималном снагом од 10-100 kW. Међутим, снага која одговара укупном интензитету мора бити довољно мала да се спречи испаравање и одмицање материјала. Трајање импулса мора бити довољно дуго да би се омогућило нижим деловима површине да дођу до тачке топлјења, одвођењем топлоте са горњег дела површине.

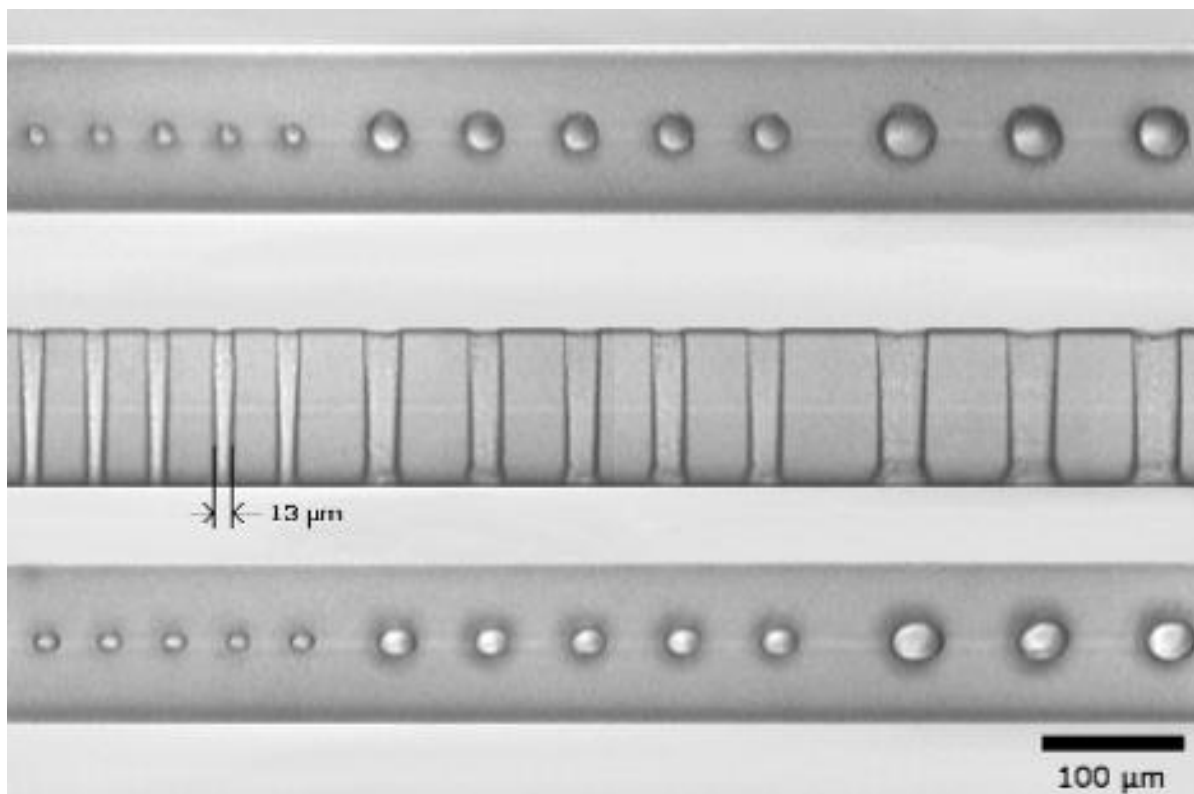
CO₂ ласери се не користе код заваривања због великог коефицијента рефлексије, који се за већину материјала креће од 94-98 % на собној температури, за таласну дужину ласера од 10.6 μm . Индустриски CO₂ ласери снаге неколико вати, могу се користити за заваривање танких метала дебљине 1 mm (Al и Cu легуре).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

2.8 Бушење ласером

Примена ласера у производним операцијама стругања, глодања, бушења, израде канала и жлебова, итд. је посебно ефективна код обраде скупочених материјала и елемената микроелектронике. То из разлога што обрада ласером обезбеђује, на пример, бушење отвора малих пречника (испод 0,1 mm, у било ком материјалу независно од тврдоће и сл.) и обраду материјала различитих карактеристика и намена.

Експериментално је утврђено да се дно отвора формира испаравањем материјала, а бокови топлјењем и истискивањем растопљеног материјала из отвора. Геометријски облик отвора зависи од места фокусирања ласерског снопа, док је дубина отвора директна функција енергије ласерског снопа.

С обзиром да се ласерси снап може компјутерски наводити, облици и положаји рупа и отвора, њихове димензије и густоћа у материјалу могу се унапред планирати, што доводи до невероватне прецизности, па је овом методом могуће бушење на микрометарској скали (слика 2.13).



Слика 2.13 Микрометарско бушење [1]

2.9 Сечење ласером

Сечење и димензионална обрада представља најчешће коришћене производне операције изведене применом ласера. Сам принцип обраде заснива се на локалном топљењу метала и одношењу продуката обраде под дејством силе теже, гасне струје радног гаса или струје снопа светлости ласера.

Ефекат сечења и брзина уклањања продуката обраде се могу повећати допунским струјањем радног гаса. Тако, на пример, увођењем кисеоника у зону обраде обезбеђује се повећање обрадљивости материјала, снижење површинских напона растопљеног метала, удаљење растопљених оскида итд. Брзина сечења зависи од снаге ласерског снопа, врсте материјала предмета обраде, врсте радног гаса, дебљине предмета обраде, протока и притиска радног гаса, врсте ласерског уредјаја и сл.

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 (слика 2.14) [6].

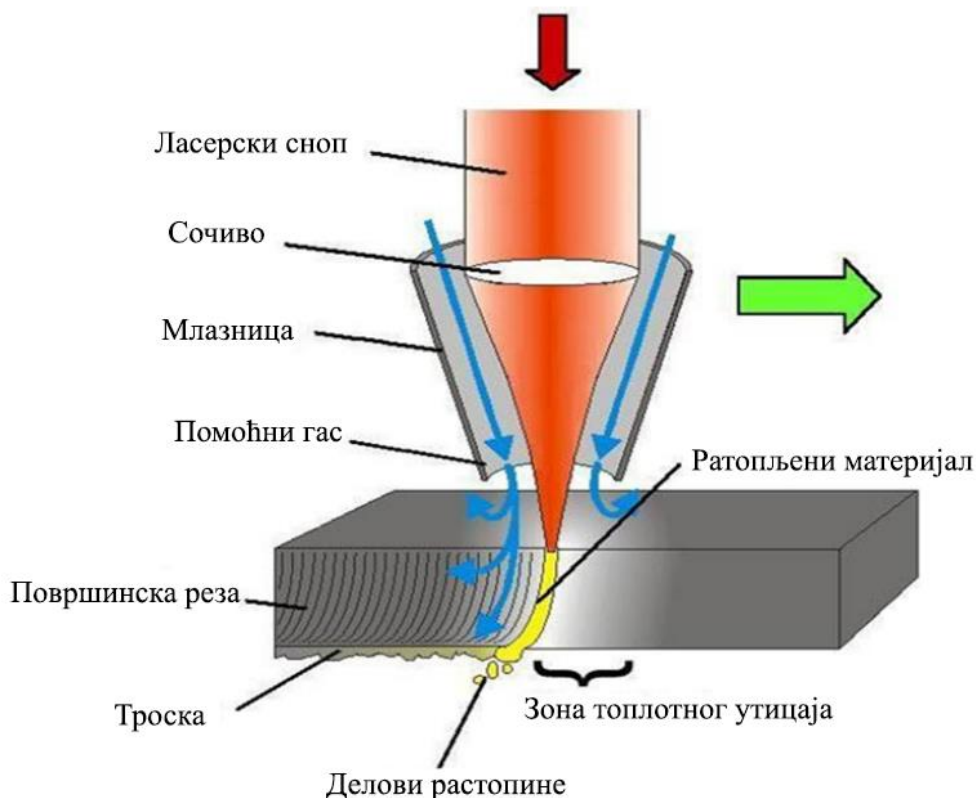


Слика 2.14 Сечење ласером [6]

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 [6].

Са технолошке тачке гледишта, процеси сечења ласером (слика 2.15) доводе до пуног изражаја термичке ефекте (загревање, топљење, испаравање, термичко распадање и ерозија), који настају ласерским зрачењем.

Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. Феноменологија сечења ласером је знатно сложена. Поступак се заснива на озрачењу радног предмета покретним, континуалним или импулсним снопом ласерских зрака, са локалним развојем такве густине снаге q_c , W/cm², која је у стању да произведе најповољније термофизичке, термохемијске, хидродинамичке, гасодинамичке и ерозивне процесе за одвајање материјала [6].



Слика 2.15 Шематски приказ сечења ласером [6]

Методе сечења ласером

Постоје три методе сечења ласером:

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

За сечење метала се најчешће користи реактиван помоћни гас O_2 , док се за сечење неметала користи неутрални гас N_2 или инертни гас Ar [6].

Поступци сечења, засновани на испаривању 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 [6].

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.

Битан показатељ сечења ласером је биланс снаге у зони реза. Биланс снаге код сечења ласером дат је изразом:

$$P_L = P_R + P_O + P_P + P_S$$

Где су:

P_L - снага ласерског зрачења,

P_R - снага утрошена на стварање растопине,

P_O - снага одведена преко растопине и помоћног гаса,

P_P - изгубљена снага услед провођења кроз предмет обраде,

P_S - снага добијена егзотермном реакцијом.

Део снаге ласерског снопа губи се одвођењем кроз предмет обраде и преко растопине и помоћног гаса, али се највећи део користи за стварање растопине на месту реза. Услед загревања, у зони реза, долази до отврдњавања површинског слоја реза. То има знатан утицај на квалитет реза [6].

Фактори процеса сечења ласером

На процес ласерског сечења утичу:

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

На слици 2.16 су приказани фактори који имају утицај на процес ласерског сечења.



Слика 2.16 Фактори који утичу на процес ласерског сечења [6]

Предности и недостаци сечења ласером

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

1. 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.
2. Ласерски сноп представља безконтактни резни алат, што значи:
 - нема деловања сила па ни механичких деформација предмета обраде;
 - нема трошења алата па ни потребе за заменом;

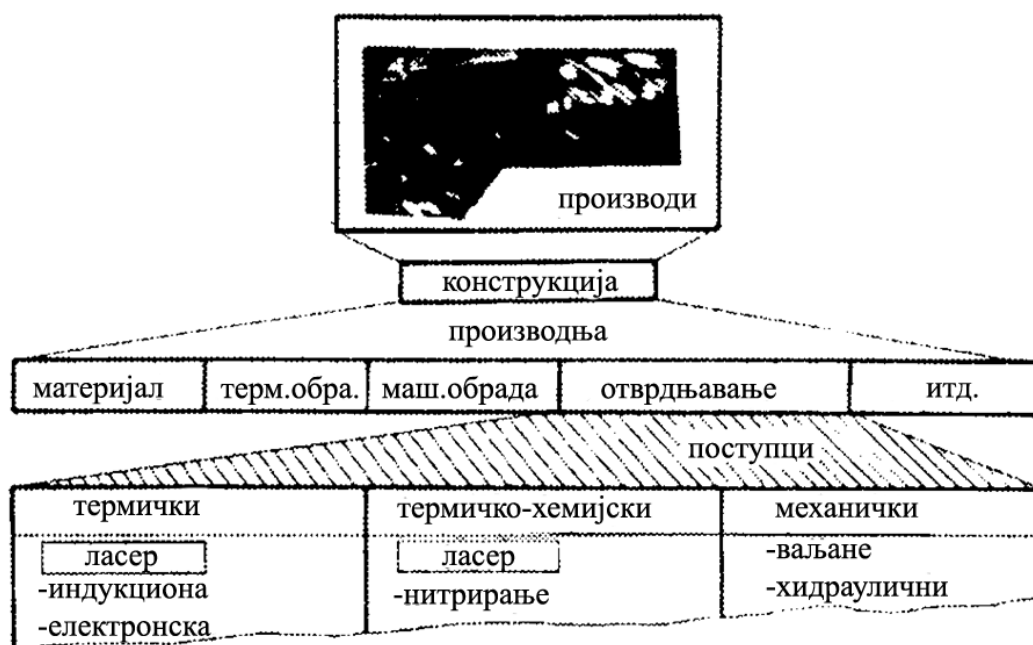
- може да сече материјал без обзира на његову тврдоћу.
- Ласерски сноп је подесан за остваривање високог степена контроле и управљивости и тиме омогућује:
 - потпуну аутоматизацију и лаку интеграцију у технолошким системима;
 - неограничену могућност профилисања;
 - Смањењем времена обраде и помоћних времена повећава се економичност обраде.
 - 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 [6].

2.10 Ласерска термичка обрада

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

На слици 2.17 приказани су поступци отврдњавања површинских слојева ласером.



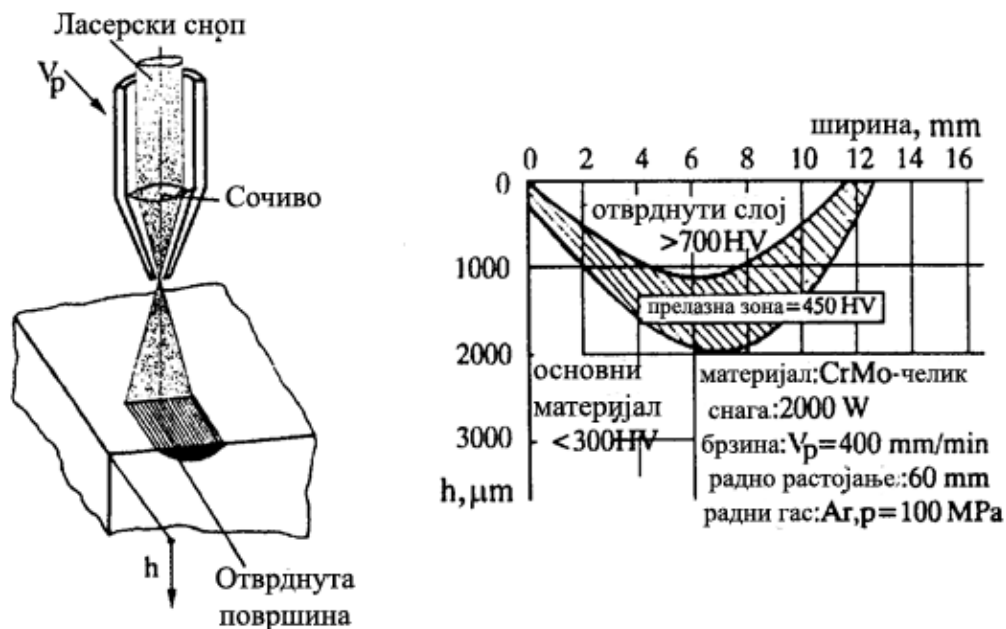
Слика 2.17 Поступци отврдњавања површинских слојева ласером [2]

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

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

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

На слици 2.18 приказан је принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврднутог слоја.



Слика 2.18 Принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврднутог слоја [2]

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

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

3. ЛАСЕРСКО ГРАВИРАЊЕ И 3D ОБРАДА

Ласерско глодање и ласерско микро-сечење имају битну улогу у стварању различитих дводимензионалних фигура као и канала, цепова и других облика. Коришћењем одговарајућих метода машинске обраде, тродимензионални облици се могу креирати, уз изванредну контролу димензија. Када је у питању ласерско глодање на малим дубинама, могуће је постићи веома висок квалитет обрађене површине. Ласерско глодање може бити примењено на велики број материјала. Најчешће се користи за прављење калупа, канала за подмазивање, микрофлуидних и биомедицинских апарата, инјекција, алата за пробијање и другу обраду. Захваљујући прецизној контроли дубине обраде, ласерско глодање се може примењивати у слојевима, како би се створили дубљи облици. Ови слојеви могу бити исте величине, како би се створили нормални зидови, или опадајуће величине, како би се створили степенести или чак профилни зидови.

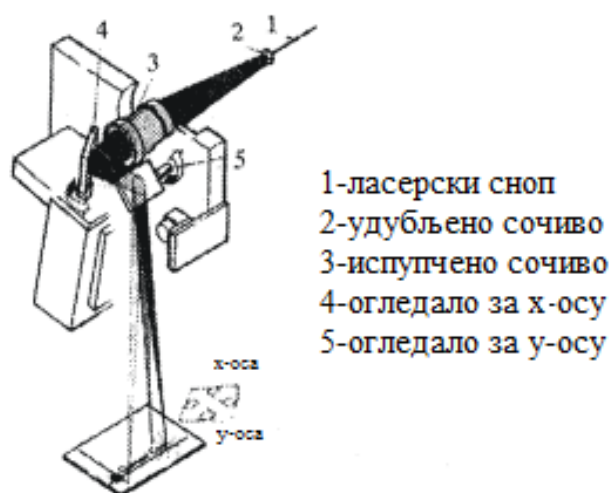
Гравирање ласером или ласерска контурна обрада се користи за различите намене [2]:

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

При коришћењу ласера за маркирање, најчешће се користи YAG-ласер са акустичним оптичким модулатором. Режим рада је пулзирајући. За ову намену довољни су ласери са просечном снагом до 50 W.

Поред YAG, користе се и CO₂ ласери за добро моделовање и веома квалитетно гравирање [2].

На слици 3.1 приказана је шема рада машине за гравирање ласером.



Слика 3.1 Шема рада савремене машине за гравирање ласером [2]

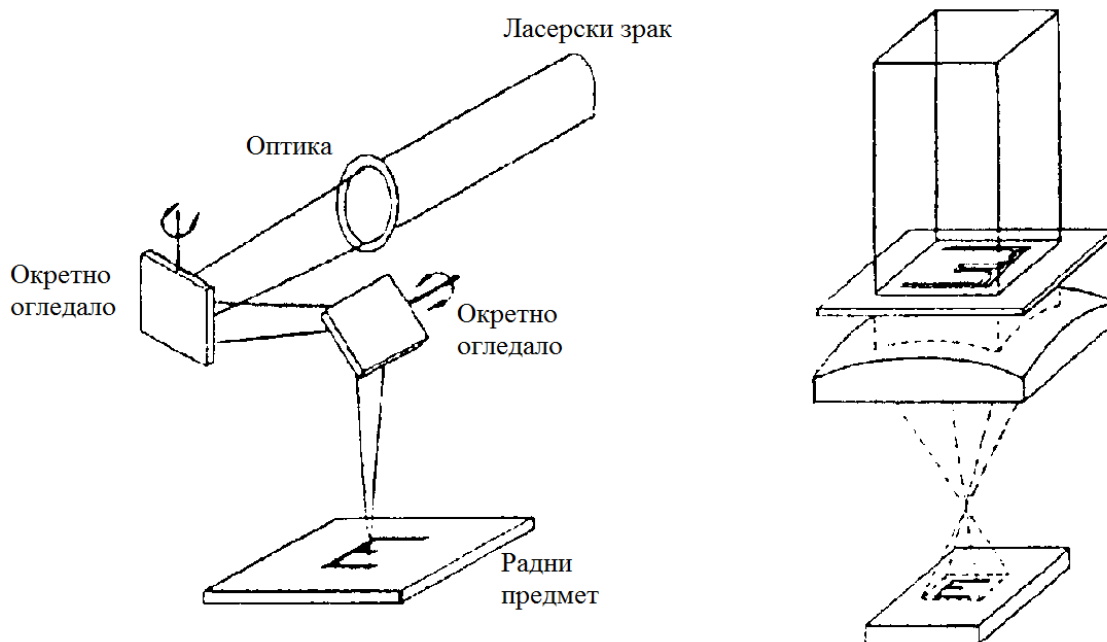
Померање ласерског снопа по програмираној контури врши се помоћу два огледала која се могу окретати, једно око вертикалне а друго око хоризонталне осе.

При томе ласерски сноп може да се креће по одређеној линији (контури и др.) у једној равни. Метода гравирања вођењем ласерског зрака се користи у случајевима када је потребан висок квалитет гравирања и велика флексибилност. Критеријуми за оцену квалитета гравирања су: контраст, оштрина контуре, храпавост површине, отпорност на механичке и хемијске утицаје и др.

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

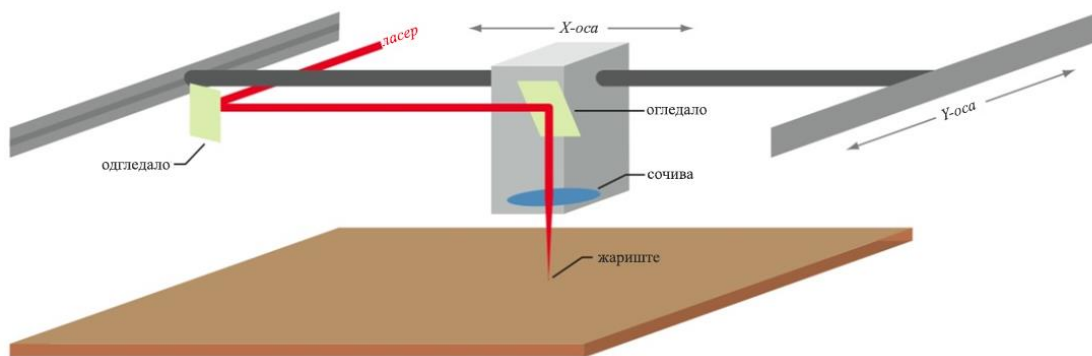
За гравирање маском користе се импулсни ласери. Ласерски зрак осветљава маску на којој се налазе све информације које треба пренети на радни предмет. Пресликавање се врши уз помоћ сочива, једним импулсом ласера на површину радног предмета.

Сви процеси ласерског гравирања су праћени термичким дејством ласерских зрака. Најважнији параметри код методе ласерског гравирања маском су снага и енергија ласерског импулса. С обзиром на то да се гравирање врши једним импулсом, учесталост импулса није релевантна. Код методе гравирања вођењем ласерског зрака учесталост ласерског импулса је веома битна, јер се гравирање врши низом појединачних импулса са одређеним временским размаком. На слици 3.2 приказан је метод гравирања маском [6].



Слика 3.2 Шематски приказ ласерског гравирања маском [2]

На предходне две слике приказано је гравирање помоћу огледала (сочива) које се помера и ствара гравуру. Поред овог метода гравирања постоји и гравирање где долази до померања главе ласера. Овај метод је приказан на слици 3.3.



Слика 3.3 Шематски приказ ласера који врши гравирање померањем главе ласера [5]

Предности гравирања ласером су следеће:

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

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

Ласерско микро резање

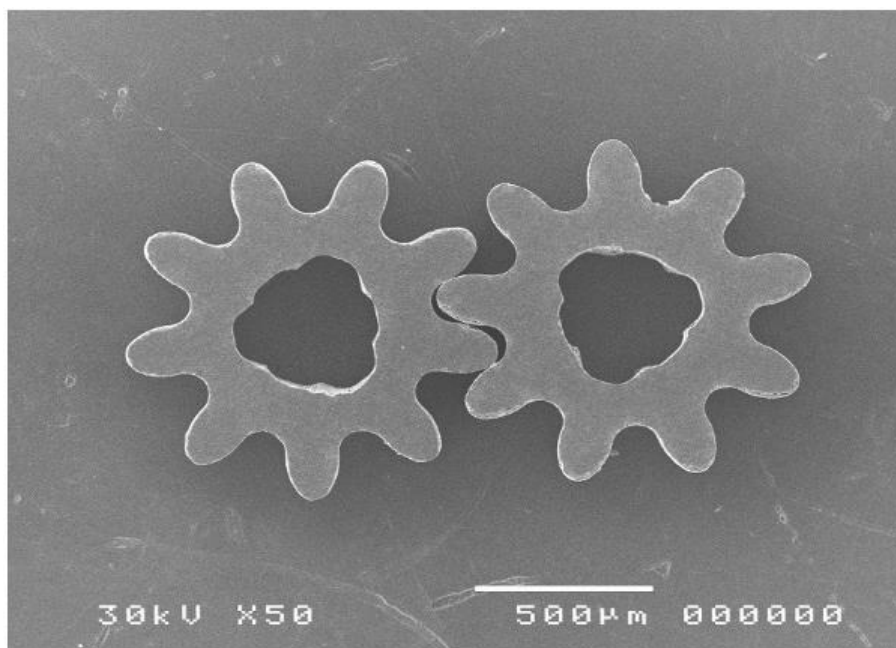
Ласерско глодање и ласерско микро резање се користи у стварању прецизно контролисаних површинских структура, канала, цепова и других карактеристика које захтевају тродимензионалну контролу димензија. Кроз употребу одговарајућих техника ласерског типа и скенирања снопа могуће је израђивати функције са изузетном контролом величине и дубине.

Ласерско глодање је одлична опција за производњу делова где није потребно дубинско одношење материјала, при чему се димензије X и Y мере у милиметрима или сантиметрима, али је дубина само неколико микрона или неколико десетина микрона. У таквим апликацијама често је од критичног значаја ниска површинска храпавост на бази и на зидовима. Преко пажљиве дефиниције параметара процеса могуће је постићи подмикронске нивое храпавости [10].

Ласерско глодање примењује широк спектар материјала и користи се у апликацијама као што су алати за калупе, канали за подмазивање, микрофлуидне и биомедицинске уређаје, алат за утискивање, штанцање и машинску обраду.

Ласерско микро резање се примењује за стварање функција на равним или контурним површинама. Скенирање снопа, снимање маске или комбинација оба дају велику флексибилност у опсегу производа који се могу производити.

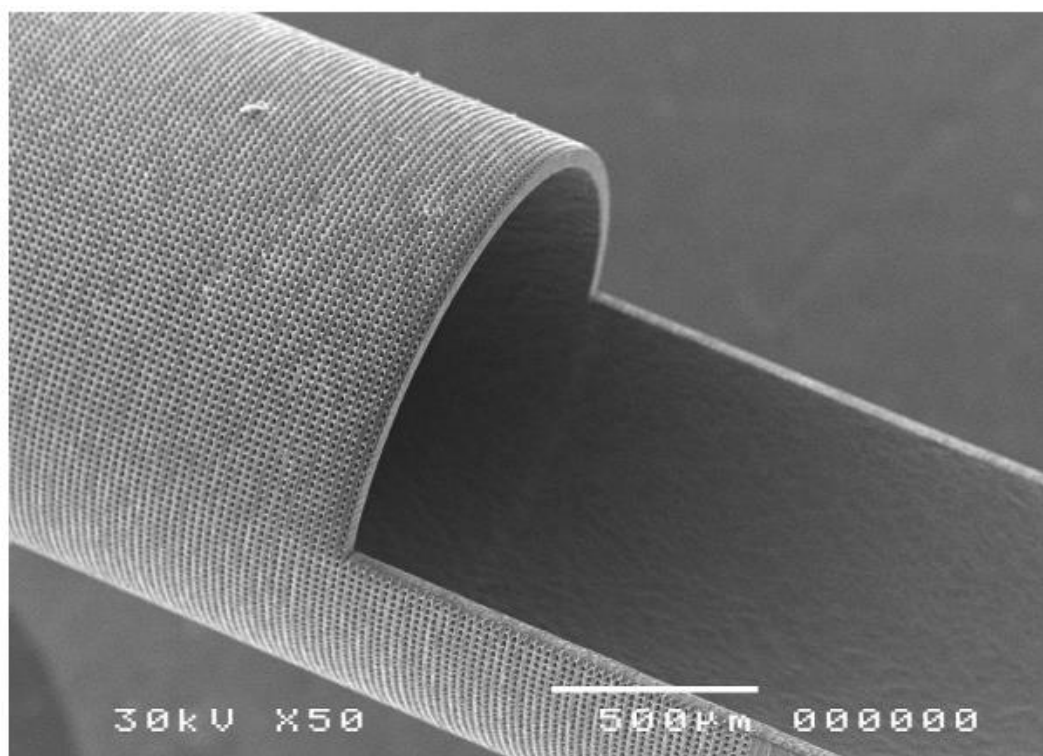
На слици 3.4 су приказани зупчаници који су израђени ласерским микро резањем.



Слика 3.4 Зупчаници који су добијени ласерским микрорезањем [10]

Са прецизном контролом дубине обраде, ласерско резање се може применити за стварање дубљих гравура. Ови слојеви могу бити или исте величине како би се створили стрми зидови, или се могу смањити како би се створила степенаста или чак профилисана површина.

На слици 3.5 је дат пример обраде ласерским микрорезањем.

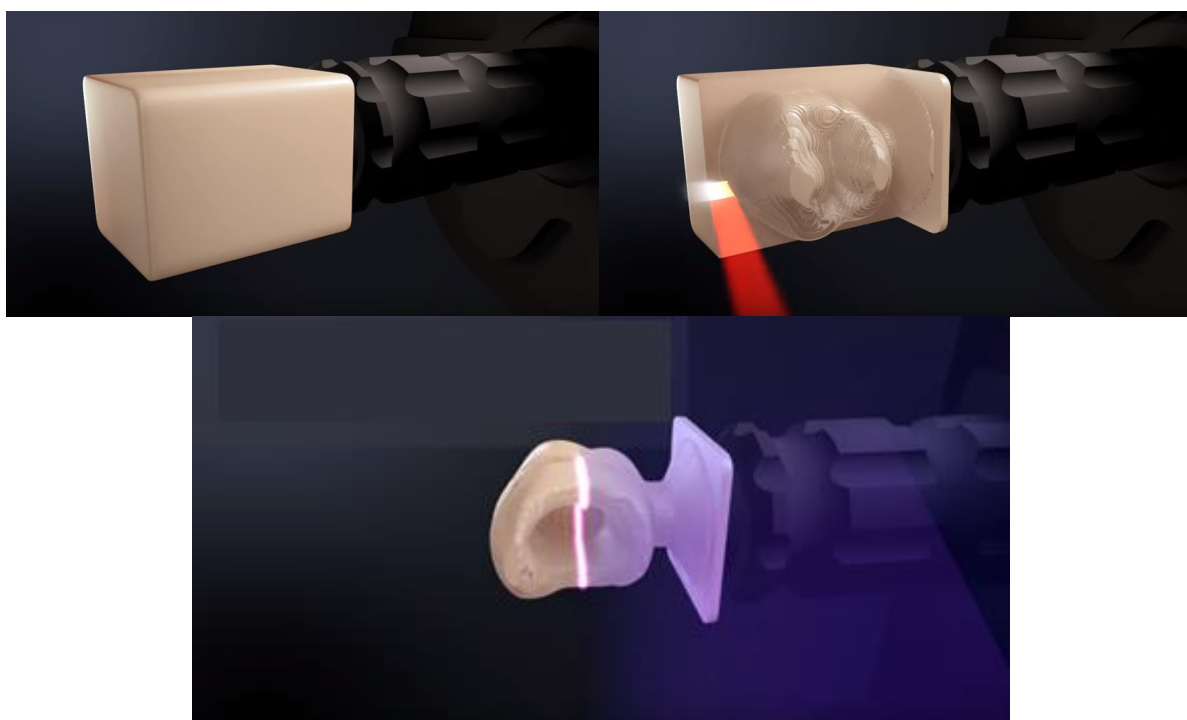


Слика 3.5 Пример обраде ласерским микрорезањем [10]

Практичан пример 3D ласерског глодања

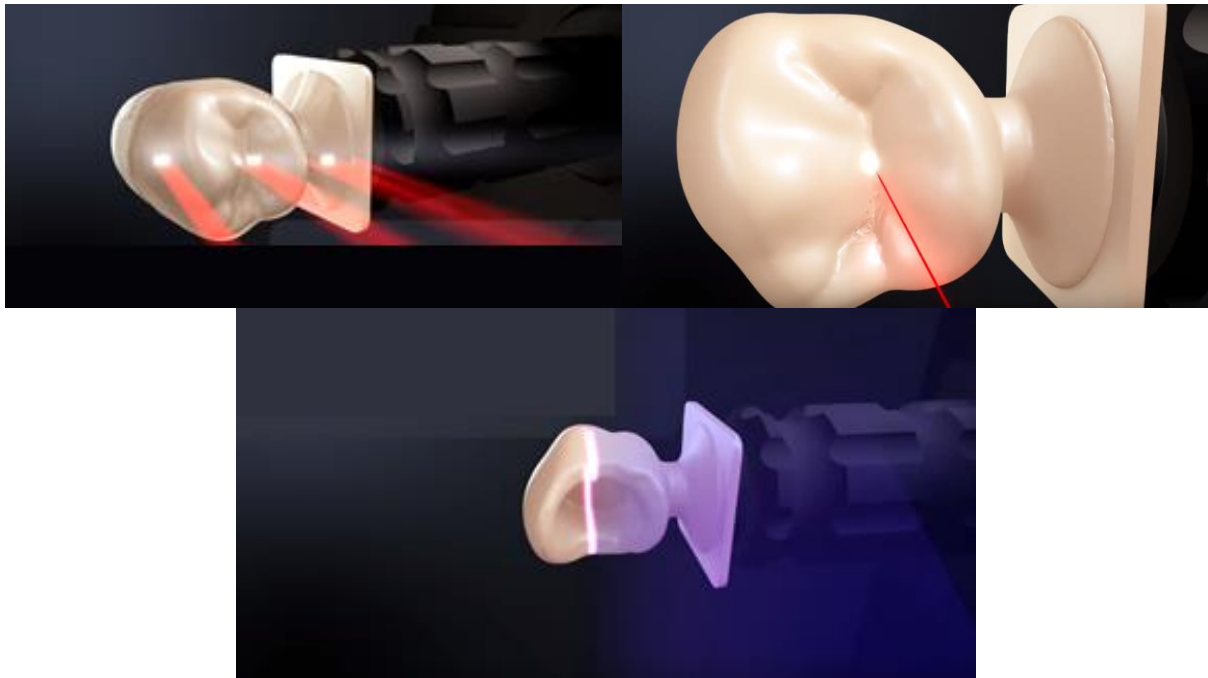
Један од примера где се користи ласер глодање је израда вештачких зуба. Потребно је првенствено направити одговарајући 3D модел, након чега се почетни предмет обраде поставља у специјалну машину чији радни сто има бар једну осу ротације како би се предмет обраде урадио са обе стране. Прво се врши груба обрада при чему се скида већи део материјала и ствара се контура која је габаритно већа од коначне али је облик сличан готовом делу.

Потом следи део који је обавезан, а то је 3D скенирање дела након грубе обраде како би се задали одређени параметри који доводе део на финалну меру. Скенирање је у неким случајевима потребно поновити након пар скинутих слојева материјала. Овај корак је веома битан због тога што се јачим режимима обраде скида већа количина материјала али се добија површина коју није лако одредити јер се материјал не понаша увек исто као што је случај при конвенцијалној обради. На следећој слици је дат приказ како би ово изгледало у примени.



Слика 3.6 Груба обрада и контрола квалитета 3D скенирањем [9]

После скенирања врши се обрада са малим корацима и са малом снагом чији резултат може лакше да се претпостави и тиме се предмет обраде обрађује на финалну површину. У неким случајевима је потребно и завршна обрада, односно детаљисање специфичних делова предмета обраде како би се добила што тачнија површина са веома малом храпавошћу. Након свих корака обраде следи финална контрола 3D скенирањем. На следећој слици су приказани описани кораци.



Слика 3.7 *Завршна обрада и финална контрола 3D скенирањем [9]*

Оваква врста обраде има велике предности у односу на конвенционалне технологије обраде, а неке од њих су [10]:

- Ниски оперативни трошкови - нема делова који би требало да се мењају, нема потребе за расхладним средствима и комплексним системима за овај процес, ниска потрошња енергије и дуготрајност саме машине односно ласера.
- Ефикасно управљање - брзо подешавање и почетак рада, упоредиво време резања са конвенционалним машинама поготово када је у питању обрађивање ситних делова, нема потребе за секундарним корацима кристализације за стаклокерамику.
- Способност обраде разних материјала – поред тога што је могуће обрађивати разне материјале, није потребно мењање ласерског уређаја чиме се додатно смањују оперативни трошкови.
- Технологија и оптимизација материјала - велики потенцијал за оптимизацију коначног резултата коришћењем материјала развијених специфично за технологију ласерске обраде.
- Лако се инсталира и користи - стандардно електрично напајање за обраде ситних делова је сасвим довољно, интернет прикључак, држање магнетног блока, нискошумно управљање и поузданост индустријског ласера. Могуће је управљање машином на даљину као и редефинисање параметара обраде.
- Слобода дизајна - омогућава детаљну и обраду високе тачности, што није могуће са конвенционалним врстама обраде.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Основни циљ експеримента је да се установи веза између параметара ласерске обраде и добијених резултата, односно количине скинутог материјала и храпавости обрађене површине. Обрада ласером је вршена на машини LaserCut-1208 са више различитих параметара како би се дошло до најбољих резултата за потенцијалну примену ласера као главне врсте обраде као што је то на пример глодање. Након тога је вршено мерење дубине обрађене површине и мерење храпавости.

Најпре је извршено прелиминарно испитивање како би се одредио распон параметара. Извршена су два експериментална испитивања. Прво је имало задатак да се изврши обрада површине квадратног облика, величине 10x10 mm, са једним пролазом при следећим параметрима:

- Радијални корак – 0,02 mm; 0,05 mm; 0,1 mm и 0,2 mm,
- Брзина обраде – 100 mm/s, 150 mm/s, 200 mm/s, 250 mm/s и 300 mm/s,
- Снага ласера – 20%, 30%, 40% и 50%,

Други део експеримента је имао задатак да покаже утицај броја пролаза на промену дубине гравуре.

На саму храпавост површине и дубину гравуре утичу следећи параметри:

Снага ласерског зрачења је најважнија карактеристика којом се врши процена ласерске машине. 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 резања. Добијање стабилног излаза ласерског зрачења (просторног и временског) представља кључни фактор за примену ласера у технологији обраде материјала. Под стабилним ласерским излазом подразумева се стабилност снаге, стабилност мода и стабилност концентрисања енергије.

Брзина резања је други по значају параметар за ласерско сечење. Може бити одређена експериментално одређеним формулама у којима фигуришу густина снаге ласера и особине материјала који се сече. Више параметара утиче на брзину резања: снага ласера, мод, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета, иницијалне енергије топљења и испаравања итд. Узимајући у обзир квалитет реза и посматрајући брзину резања у функцији од дебљине материјала радног предмета може се дефинисати област употребљиве брзине резања која је ограничена доњом и горњом граничном кривом. Изван ове области је област непотпуног сечења. Унутар области употребљивих брзина резања променом брзине резања врши се промена квалитета реза (појава и величина шљаке, храпавост итд.). Као максималну брзину резања узимамо вредност изнад које долази до нестабилности обраде. Ова нестабилност се манифестује у појави неравних резова, шљаке и др.

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. У зависности 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 се у зону обраде доводи кроз обрадну главу при чему мора бити коаксијалан са фокусираним ласерским зраком. Коришћењем гаса за продување растопљени и испарени материјал раног предмета лакше се одводи из зоне резања, што директно утиче на чистоћу и квалитет реза. Поред тога, растопљени материјал не може поново да очврсне и претходно исечени радни предмет завари. Коришћењем гаса за продување такође се спречава везивање шљаке са задње стране реза, а сама брзина резања се може повећати до 40%. Задатак помоћног гаса је и да у процесу сечења заштити сочиво од испареног и отопљеног материјала радног предмета. 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 [7].

4.1 Опрема

CNC машина „LaserCut-1208”

CNC машина „LaserCut-1208” (слика 4.1) је ласерски гравер направљен да задовољи ригорозне захтеве индустријске производње. Намењена је првенствено гравирању и резању плочастих материјала. Ова машина врши резање, односно гравирање на тај начин што се глава ласера помера по одређеној путањи и тако врши резање тј. гравирање [3].



Слика 4.1 CNC машина *LaserCut-1208* [3]

Механички склоп машине

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

Вођице

Вођице на машини обезбеђују:

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

Као такве, имају велики утицај на квалитет обраде, стога је приликом пројектовања машине посебна пажња посвећена одабиру одговарајућих клизних

елемената. Машина LaserCut-107 остварује кретања дуж X, Y и Z оса преко високо каљених вођица. Коришћени су висококвалитетни линеарни лежајеви са рециркулирајућом постељицом опремљени брисачима [3].

Погон

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

- Хибридног АС Серво мотора,
- Механичког преносног система.

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

Управљачка јединица

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

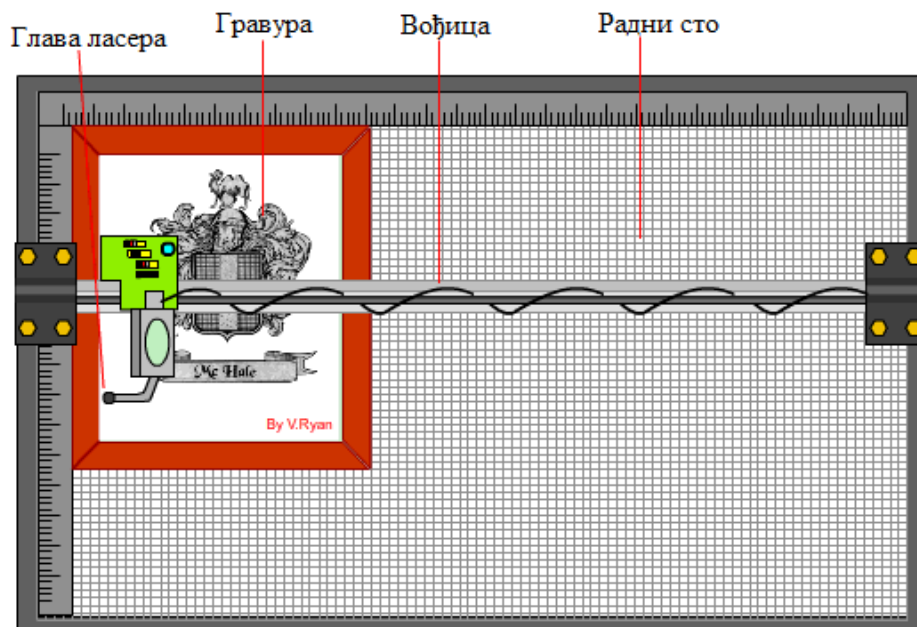
Управљачки софтвер PHCAD служи за контролу процеса обраде прослеђујући податке које добија из G-кода ка управљачкој јединици [3].

Техничке спецификације машине [4]:

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

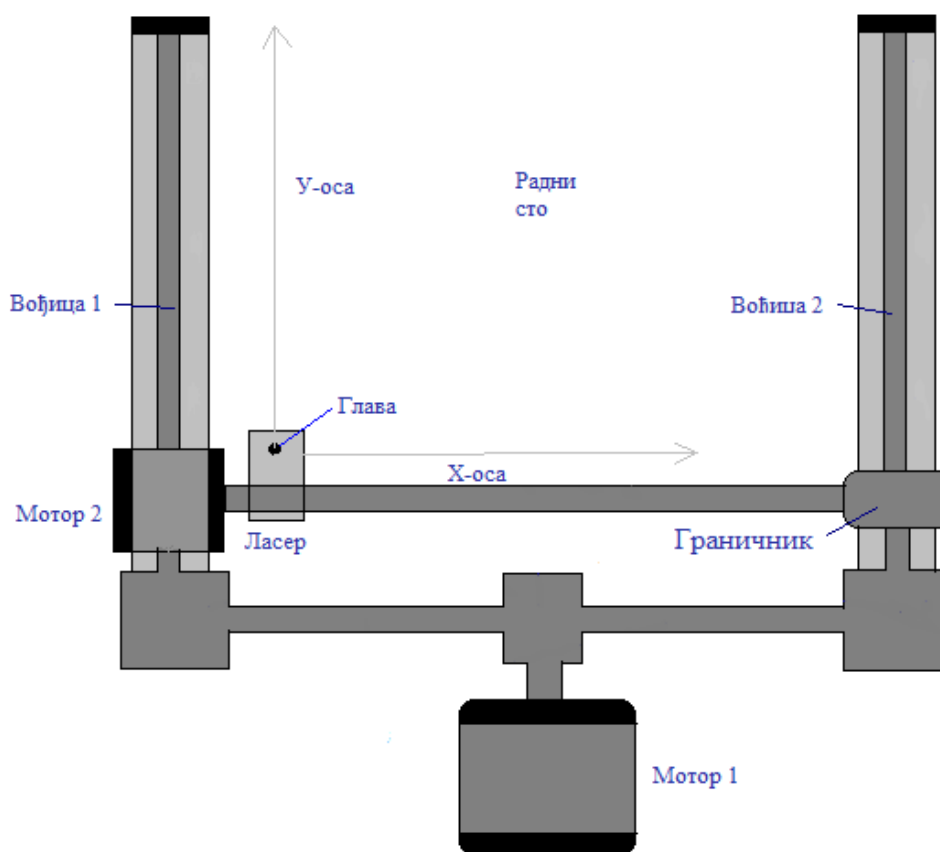
Принцип рада LaserCut-1208

Машина сече или гравира материјал који је постављен на радни сто. Поред тога што се сто може померати по 3 оси, улога овог стола је и да врши ваздушно хлађење ласерске главе али и материјала који се обрађује. Пошто машина ради у три осе, горњи леви угао се сматра координатним почетком (0, 0, 0), и то се назива нулта или полазна тачка. На слици 4.2 је приказан радни сто са главом ласера и вођицама [4].



Слика 4.2 Поглед на радни сто са горње стране [4]

Принцип рада ове машине је веома једноставан. Ласер се од свог извора преко огледала допрема до главе ласера и даље се фокусира на тачно одређено место на ком се врши гравирање, односно сечење. Ласер се преко огледала преноси до главе ласера која врши гравирање. Глава ласера се може кретати по x и y осима. Глава се креће преко вођица машине које покрећу серво мотори. Принцип рада је приказан на слици 4.3.



Слика 4.3 Шема рада LaserCut-107 [4]

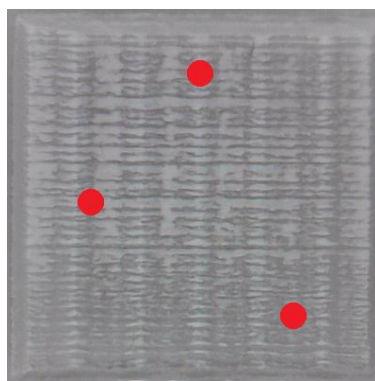
Ако је потребно гравирати или сећи кружни или закривљени производ онда се користи моторизовани ваљак. Ваљци контролишу микропроцесор који кретањем главе ласера правом брзином врши нормално гравирање као да је равна површина [26].

Мерење дубине гравура је извршено на 3D мерном инструменту TESA MICRO-HITE 3D DCC Coordinate Measuring Machine која је приказана на следећој слици.



Слика 4.4 TESA MICRO-HITE 3D DCC Coordinate Measuring

Овај мерни инструмент односно машина је директно повезана са рачунаром преко којег се може испрограмирати путања мерног пипка и тиме постићи што прецизнији резултати са минималном грешком од 2 μm . Дубина гравуре је мерена у три тачке и за сваку је израчуната просечна дубина, распоред тачака је дат на следећој слици.



Слика 4.5 Тачке мерења дубине гравуре

Техничке карактеристике мерне машине [8]:

- Конструкција од лаких легура са столом од гранита,
- Мерна запремина – 460 x 510 x 420 mm,
- Притисак ваздуха – 3,9 бара,
- Моторизовано кретање у три осе са кораком од 1 μm са брзинама од 10 mm/s или 20 mm/s,
- Ручно кретање у три осе са брзинама до 760 mm/s,
- 22 ваздушна лежаја који омогућавају кретање без трења,
- Софтвер - TESA-REFLEX MН3D,
- Оптично-електронски мерни систем базиран на инкременталној стакленој скали,
- Мерни систем – 0,039 μm ,
- Радна температура која гарантује фабричку прецизност - $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$,
- Тежина са гранитним столом – 210 kg,
- ESASTAR-i изменљива глава сонде.

Talysurf

Мерење храпавости вршено је на мерном систему Talysurf, слика 4.6. Мерни систем служи за мерење карактеристика микрогеометрије контактних површина приказан на табели. 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.



Слика 4.6 Talysurf

Коришћењем овог мерног система добили смо вредности параметара микрогеометрије површине обрађеног материјала.

Мерни систем Talysurf има одређени опсег мерења и због тога није било могуће измерити веома грубе површине тако да се ти резултати нису узели у обзир приликом анализирања резултата у даљем делу рада.

5. РЕЗУЛТАТИ

На следећој табели су приказани сви добијени резултати мерењем храпавости и дубине гравуре помоћу које се у даљем делу рада приказују дијаграми зависности различитих параметара.

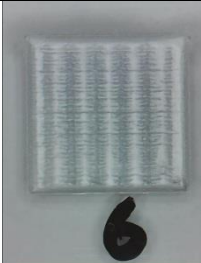
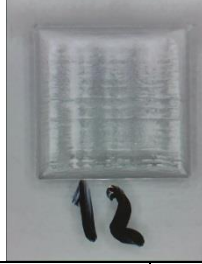
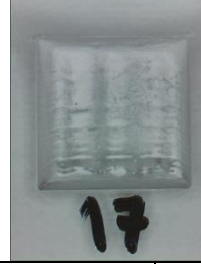
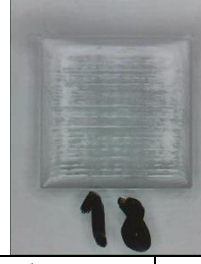
Табела 5.1 Преглед свих добијених резултата мерења

Број плочице	Брзина	Снага	Корак	Притисак	Број пролаза	Дубина гравуре	Ra	Rtm	Ry (Rmax)
	mm/s	%	mm	Bar	/	mm	μm	μm	μm
1	100	20	0.02	1	1	0.59	18.4	99	139
2	150	20	0.02	1	1	0.415	19.4	88	117
3	200	20	0.02	1	1	0.24	15.1	75	83
4	250	20	0.02	1	1	0.185	13.9	70	85
5	300	20	0.02	1	1	0.121	11.7	61	70
6	100	30	0.02	1	1	1.453	8.9	38	64
7	150	30	0.02	1	1	1.201	22.5	92	121
8	200	30	0.02	1	1	0.881	26.3	121	133
9	250	30	0.02	1	1	0.659	25.5	115	156
10	300	30	0.02	1	1	0.51	13.3	68	77
11	100	40	0.02	1	1	4.109	/	/	/
12	150	40	0.02	1	1	3.301	/	/	/
13	200	40	0.02	1	1	2.296	42.7	167	194
14	250	40	0.02	1	1	1.845	23.4	110	129
15	300	40	0.02	1	1	1.37	22.9	100	157
16	100	50	0.02	1	1	5.977	/	/	/
17	150	50	0.02	1	1	4.48	/	/	/
18	200	50	0.02	1	1	3.161	40	134	135
19	250	50	0.02	1	1	2.614	20.7	104	150
20	300	50	0.02	1	1	2.011	42.5	158	176
21	100	20	0.05	1	1	0.257	16.6	74	106
22	150	20	0.05	1	1	0.145	17.2	82	110
23	200	20	0.05	1	1	0.136	12.6	65	70
24	250	20	0.05	1	1	0.103	6.9	35	53
25	300	20	0.05	1	1	0.07	3.85	22	34.4
26	100	30	0.05	1	1	0.621	22.2	102	127
27	150	30	0.05	1	1	0.356	23.3	100	129
28	200	30	0.05	1	1	0.318	14.23	70	75.7
29	250	30	0.05	1	1	0.231	20.2	100	119.9
30	300	30	0.05	1	1	0.202	21.8	90.8	113
31	100	40	0.05	1	1	1.8	4.6	16.3	29.9
32	150	40	0.05	1	1	1.241	30.78	125.4	158.4
33	200	40	0.05	1	1	0.821	15.1	80.2	122.1
34	250	40	0.05	1	1	0.732	16.89	80.1	111.1
35	300	40	0.05	1	1	0.508	13.21	72.4	92.6
36	100	50	0.05	1	1	2.612	5.23	28.9	65.9

37	150	50	0.05	1	1	1.606	17.24	76	99.8
38	200	50	0.05	1	1	1.216	18.3	83	109
39	250	50	0.05	1	1	1.02	27.2	114	153
40	300	50	0.05	1	1	0.817	14.4	73	82
41	100	20	0.1	1	1	0.096	12.4	60	70
42	150	20	0.1	1	1	0.071	11.3	63	68
43	200	20	0.1	1	1	0.054	8.8	45	60
44	250	20	0.1	1	1	0.035	8.6	45	48
45	300	20	0.1	1	1	0.023	7.2	39	48
46	100	30	0.1	1	1	0.247	23.8	115	133
47	150	30	0.1	1	1	0.147	24.7	105	132
48	200	30	0.1	1	1	0.137	18.3	94	108
49	250	30	0.1	1	1	0.141	19.4	95	118
50	300	30	0.1	1	1	0.074	13.3	68	77
51	100	40	0.1	1	1	0.685	17.8	82	109
52	150	40	0.1	1	1	0.433	36.2	146	167
53	200	40	0.1	1	1	0.286	34.2	137	168
54	250	40	0.1	1	1	0.3	37.6	140	192
55	300	40	0.1	1	1	0.242	14.4	77	98
56	100	50	0.1	1	1	1.289	24.3	98	120
57	150	50	0.1	1	1	0.782	39.8	146	180
58	200	50	0.1	1	1	0.585	42.8	157	170
59	250	50	0.1	1	1	0.434	35.4	143	175
60	300	50	0.1	1	1	0.291	28	117	154
61	100	20	0.2	1	1	0.022	9.5	45	81
62	150	20	0.2	1	1	0.001	13.8	65	85
63	200	20	0.2	1	1	0.001	19.2	76	87
64	250	20	0.2	1	1	0.004	18.9	77	82
65	300	20	0.2	1	1	0.005	10.75	41.1	63.4
66	100	30	0.2	1	1	0.035	30.6	135	176
67	150	30	0.2	1	1	0.017	20.2	94	116
68	200	30	0.2	1	1	0.002	22.74	96.7	118.4
69	250	30	0.2	1	1	0.001	23.52	96	104.7
70	300	30	0.2	1	1	0.006	21.32	87.5	95.6
71	100	40	0.2	1	1	0.244	28.13	119.5	142.5
72	150	40	0.2	1	1	0.1	34.82	146	167.2
73	200	40	0.2	1	1	0.064	4.6	28.5	90
74	250	40	0.2	1	1	0.067	27.61	116	158.7
75	300	40	0.2	1	1	0.016	19.23	94.7	124.9
76	100	50	0.2	1	1	0.482	23.56	84.2	121.6
77	150	50	0.2	1	1	0.246	27.49	109.8	152.2
78	200	50	0.2	1	1	0.131	23.9	99	138
79	250	50	0.2	1	1	0.103	18.2	87	151
80	300	50	0.2	1	1	0.034	29.3	131	156

Свака плочица, обрађена површина, је снимана и на следећој табели су приказане слике, параметри и резултати мерења храпавости и дубине гравуре које ће се користити за добијање дијаграма како би се видела зависност добијених резултата променом параметара.

Табела 5.2 Сlike, параметри и резултати мерења храпавости и дубине гравуре

Корак 0,02 mm								
Снага	20%		30%		40%		50%	
Брзина 100 m/s								
	Дубина, mm	0,59	Дубина, mm	1,453	Дубина, mm	4,109	Дубина, mm	5,977
	Ra, μm	18,4	Ra, μm	8,9	Ra, μm	/	Ra, μm	/
Брзина 150 m/s								
	Дубина, mm	0,415	Дубина, mm	1,201	Дубина, mm	3,301	Дубина, mm	4,48
	Ra, μm	19,4	Ra, μm	22,5	Ra, μm	/	Ra, μm	/
Брзина 200 m/s								
	Дубина, mm	0,24	Дубина, mm	0,881	Дубина, mm	2,296	Дубина, mm	3,161
	Ra, μm	15,1	Ra, μm	26,3	Ra, μm	42,7	Ra, μm	40
Брзина 250 m/s								
	Дубина, mm	0,185	Дубина, mm	0,659	Дубина, mm	1,845	Дубина, mm	2,614
	Ra, μm	13,9	Ra, μm	25,5	Ra, μm	23,4	Ra, μm	20,7

Брзина 300 m/s								
	Дубина, mm	0,121	Дубина, mm	0,51	Дубина, mm	1,37	Дубина, mm	2,011
	Ra, μm	11,7	Ra, μm	13,3	Ra, μm	22,9	Ra, μm	42,5
Корак 0,05 mm								
Снага	20%		30%		40%		50%	
Брзина 100 m/s								
	Дубина, mm	0,257	Дубина, mm	0,621	Дубина, mm	1,8	Дубина, mm	2,612
	Ra, μm	16,6	Ra, μm	22,2	Ra, μm	4,6	Ra, μm	5,23
Брзина 150 m/s								
	Дубина, mm	0,145	Дубина, mm	0,356	Дубина, mm	1,241	Дубина, mm	1,606
	Ra, μm	17,2	Ra, μm	23,3	Ra, μm	30,78	Ra, μm	17,24
Брзина 200 m/s								
	Дубина, mm	0,136	Дубина, mm	0,318	Дубина, mm	0,821	Дубина, mm	1,216
	Ra, μm	12,6	Ra, μm	14,23	Ra, μm	15,1	Ra, μm	18,3
Брзина 250 m/s								
	Дубина, mm	0,103	Дубина, mm	0,231	Дубина, mm	0,732	Дубина, mm	1,02
	Ra, μm	6,9	Ra, μm	20,2	Ra, μm	16,89	Ra, μm	27,2

Брзина 300 m/s								
	Дубина, mm	0,07	Дубина, mm	0,202	Дубина, mm	0,508	Дубина, mm	0,817
	Ra, µm	3,85	Ra, µm	21,8	Ra, µm	13,21	Ra, µm	14,4
Корак 0,1 mm								
Снага	20%		30%		40%		50%	
Брзина 100 m/s								
	Дубина, mm	0,096	Дубина, mm	0,247	Дубина, mm	0,685	Дубина, mm	1,289
	Ra, µm	12,4	Ra, µm	23,8	Ra, µm	17,8	Ra, µm	24,3
Брзина 150 m/s								
	Дубина, mm	0,071	Дубина, mm	0,147	Дубина, mm	0,433	Дубина, mm	0,782
	Ra, µm	11,3	Ra, µm	24,7	Ra, µm	36,2	Ra, µm	39,8
Брзина 200 m/s								
	Дубина, mm	0,054	Дубина, mm	0,137	Дубина, mm	0,286	Дубина, mm	0,585
	Ra, µm	8,8	Ra, µm	18,3	Ra, µm	34,2	Ra, µm	42,8
Брзина 250 m/s								
	Дубина, mm	0,035	Дубина, mm	0,141	Дубина, mm	0,3	Дубина, mm	0,434
	Ra, µm	8,6	Ra, µm	19,4	Ra, µm	37,6	Ra, µm	35,4

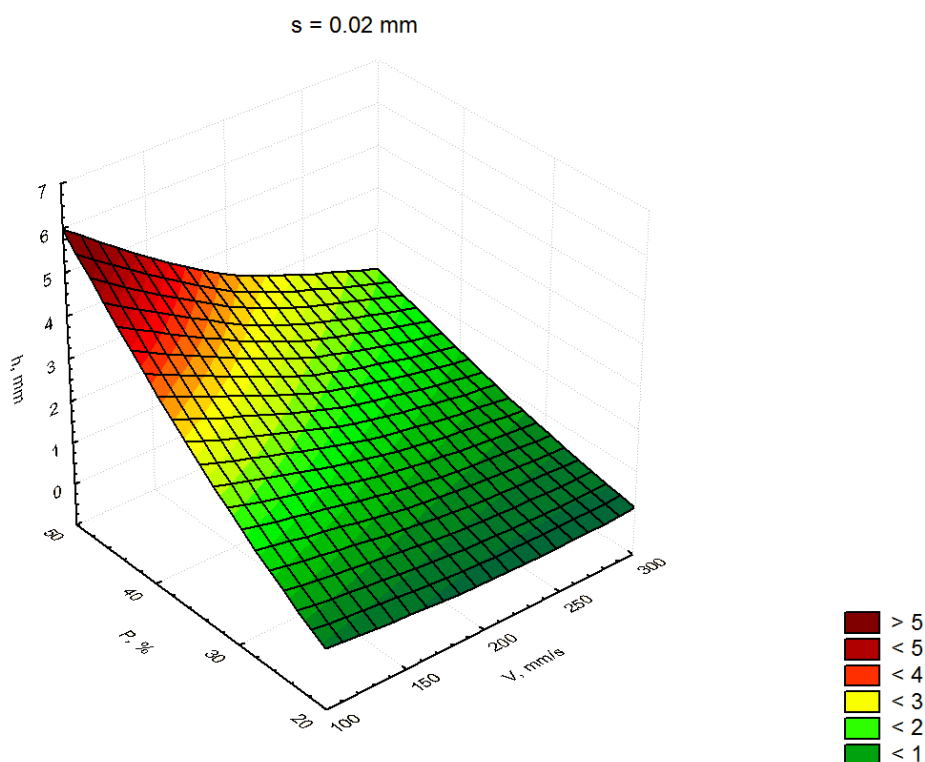
Брзина 300 m/s								
	Дубина, mm	0,023	Дубина, mm	0,074	Дубина, mm	0,242	Дубина, mm	0,291
	Ra, μm	7,2	Ra, μm	13,3	Ra, μm	14,4	Ra, μm	28
Корак 0,2 mm								
Снага	20%		30%		40%		50%	
Брзина 100 m/s								
	Дубина, mm	0,022	Дубина, mm	0,035	Дубина, mm	0,244	Дубина, mm	0,482
	Ra, μm	9,5	Ra, μm	30,6	Ra, μm	28,13	Ra, μm	23,56
Брзина 150 m/s								
	Дубина, mm	0,001	Дубина, mm	0,017	Дубина, mm	0,1	Дубина, mm	0,246
	Ra, μm	13,8	Ra, μm	20,2	Ra, μm	34,82	Ra, μm	27,49
Брзина 200 m/s								
	Дубина, mm	0,001	Дубина, mm	0,002	Дубина, mm	0,064	Дубина, mm	0,131
	Ra, μm	19,2	Ra, μm	22,74	Ra, μm	4,6	Ra, μm	23,9
Брзина 250 m/s								
	Дубина, mm	0,004	Дубина, mm	0,001	Дубина, mm	0,067	Дубина, mm	0,103
	Ra, μm	18,9	Ra, μm	23,52	Ra, μm	27,61	Ra, μm	18,2

Брзина 300 m/s								
	65		70		75		80	
	Дубина, mm	0,005	Дубина, mm	0,006	Дубина, mm	0,016	Дубина, mm	0,034
	Ra, μm	10,75	Ra, μm	21,32	Ra, μm	19,23	Ra, μm	29,3

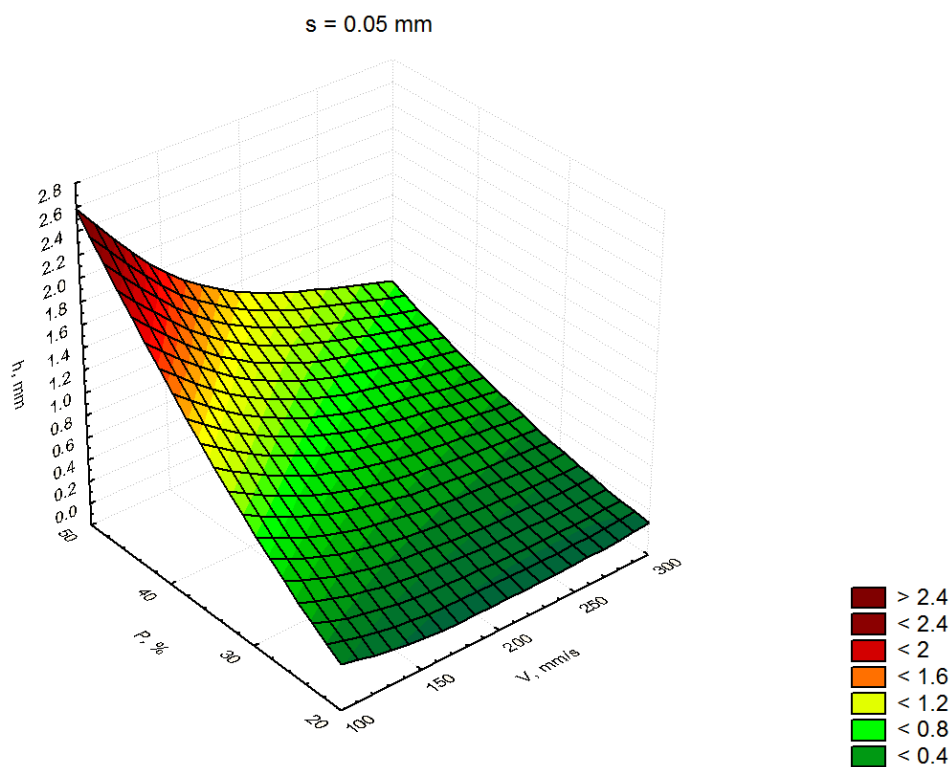
Како би се боље приказала зависност параметара на храпавост и дубину гравуре, приказани су дијаграми у просторном систему који су урађени помоћу програма Statistica.

При обради радијалним кораком од 0,02 mm, брзини обраде од 100 mm/s и 150 mm/s, снази ласера од 40% и 50%, јавиле су се веома грубе површине и није било могуће измерити њихову храпавост. Због овога нису приказани дијаграми зависности параметара на грубоћу обрађене површине при овим условима. Тако да се обрада при овим параметрима не препоручује за фину обраду али се може користити за грубу обраду где је потребно одношење велике количине материјала. Узрок појаве ових аксијалних неравина односно таласања није познат и захтева додатно испитивање.

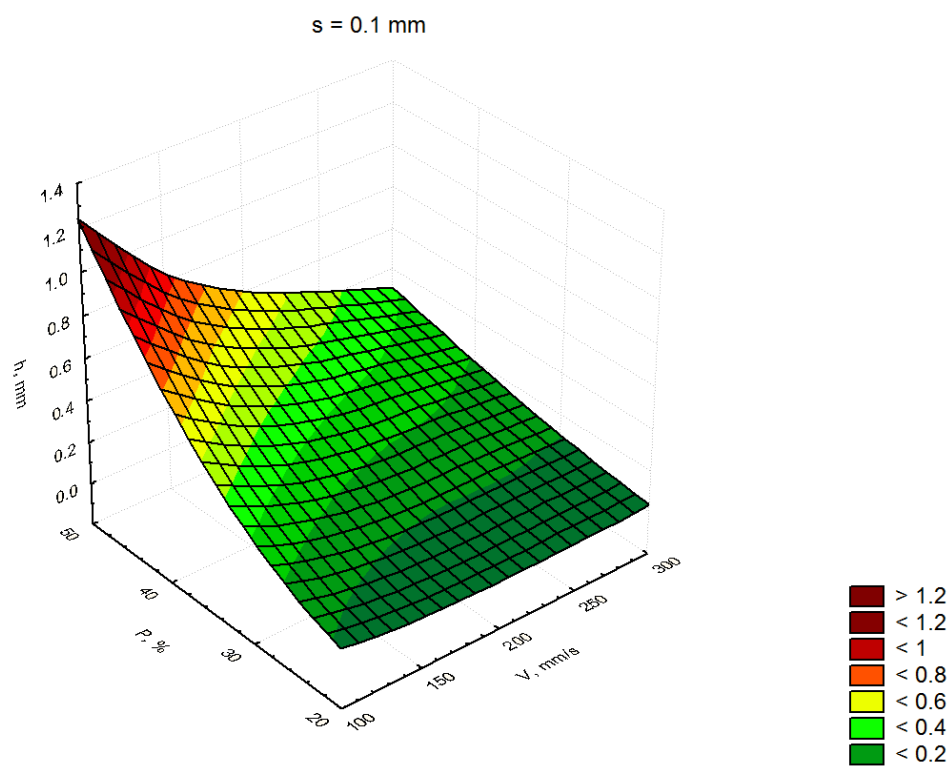
На следећим дијаграмима је приказана зависност храпавости и дубине гравуре при одређеним параметрима обраде.



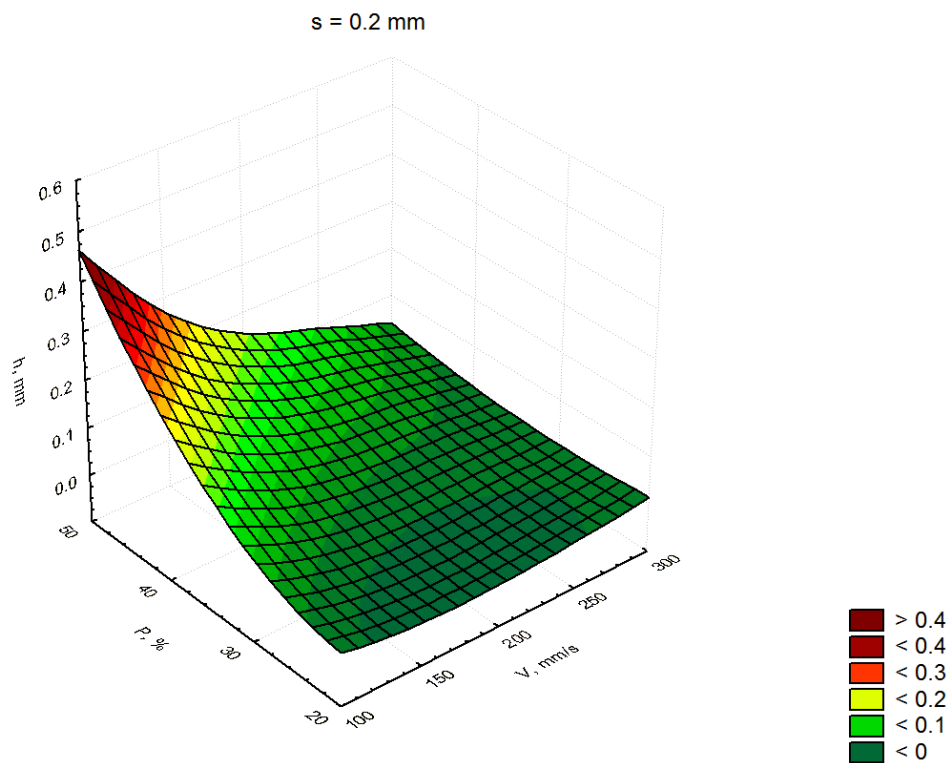
Дијаграм 5.1 Утицај брзине обраде и снаге ласера на дубину гравуре при кораку од 0,02 mm



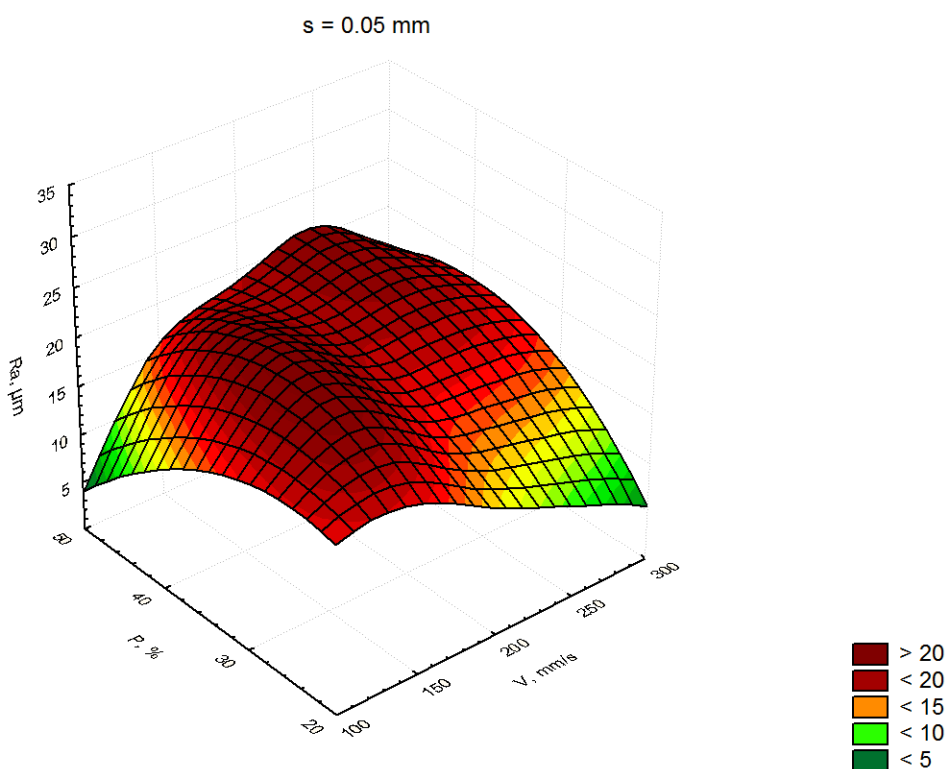
Дијаграм 5.2 Утицај брзине обраде и снаге ласера на дубину гравуре при кораку од $0,05 \text{ mm}$



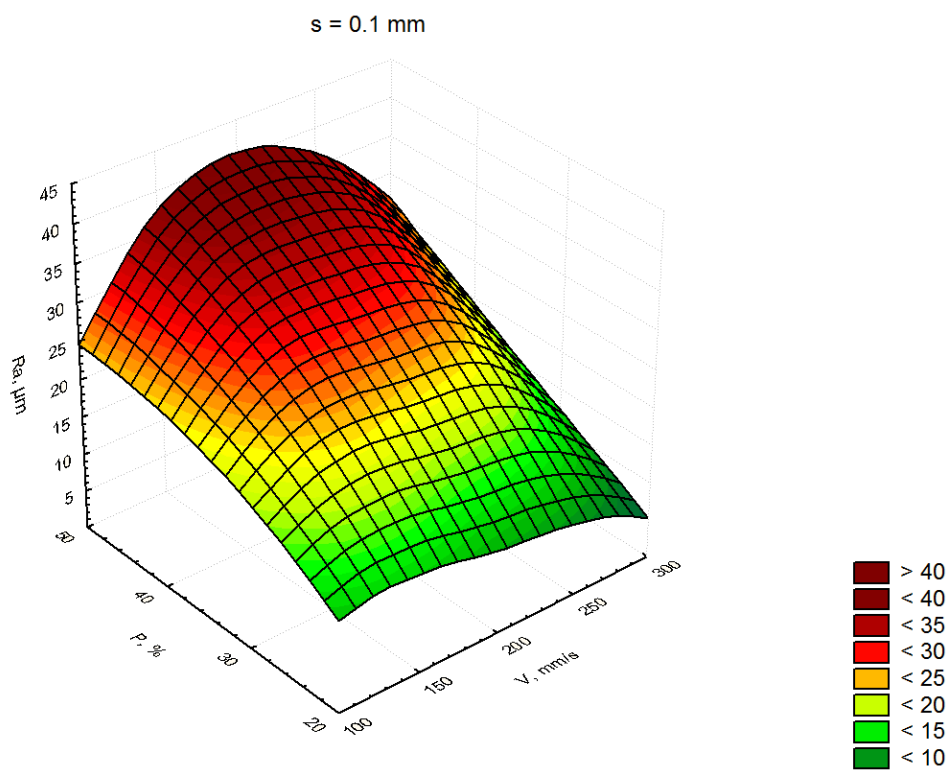
Дијаграм 5.3 Утицај брзине обраде и снаге ласера на дубину гравуре при кораку од $0,1 \text{ mm}$



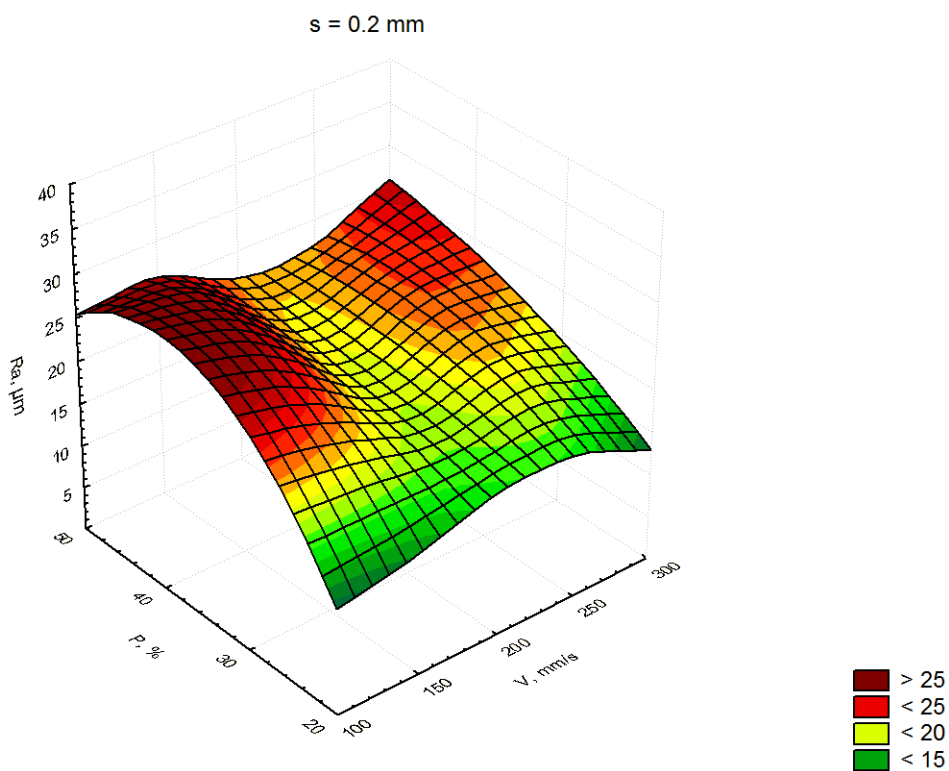
Дијаграм 5.4 Утицај брзине обраде и снаге ласера на дубину гравуре при кораку од 0,2 mm



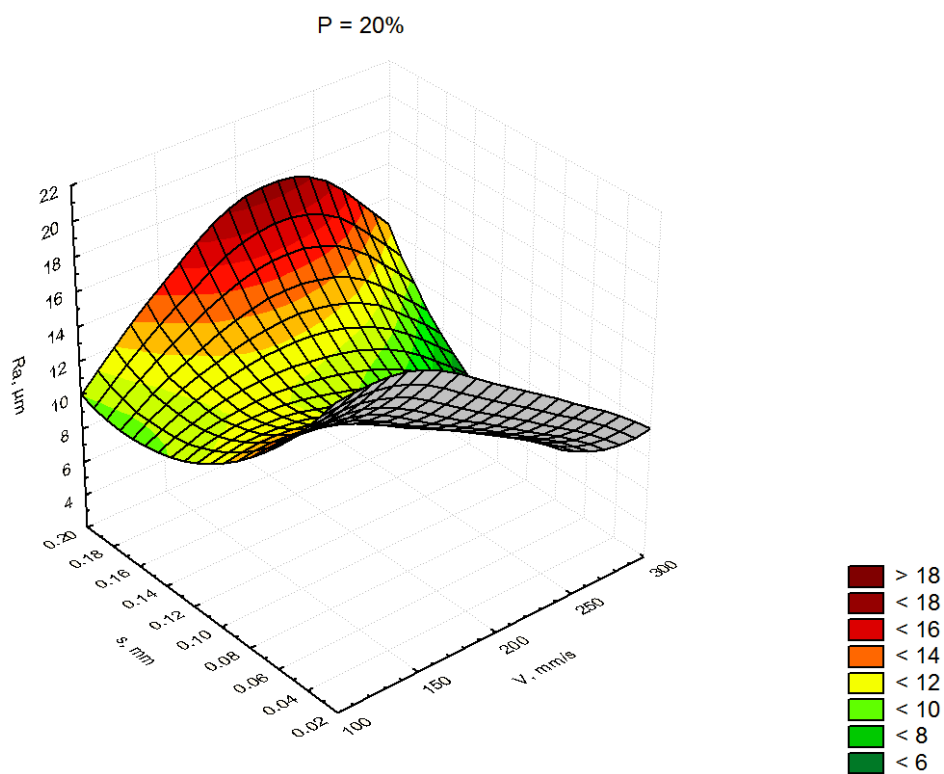
Дијаграм 5.5 Утицај брзине обраде и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при кораку од 0.05 mm



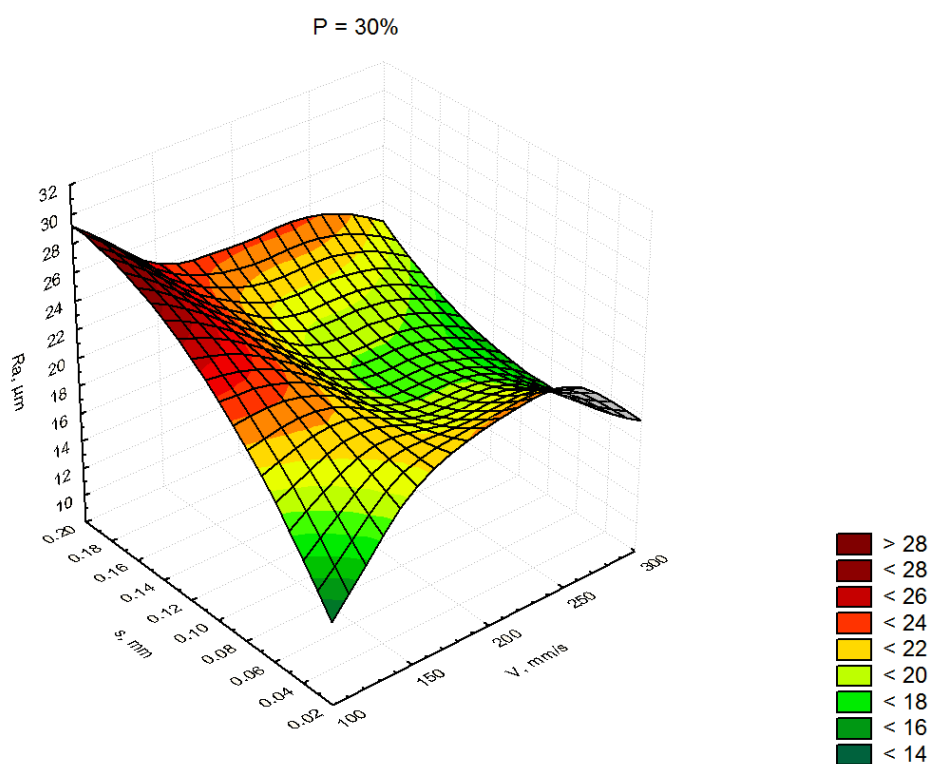
Дијаграм 5.6 Утицај брзине обраде и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при кораку од 0.1 mm



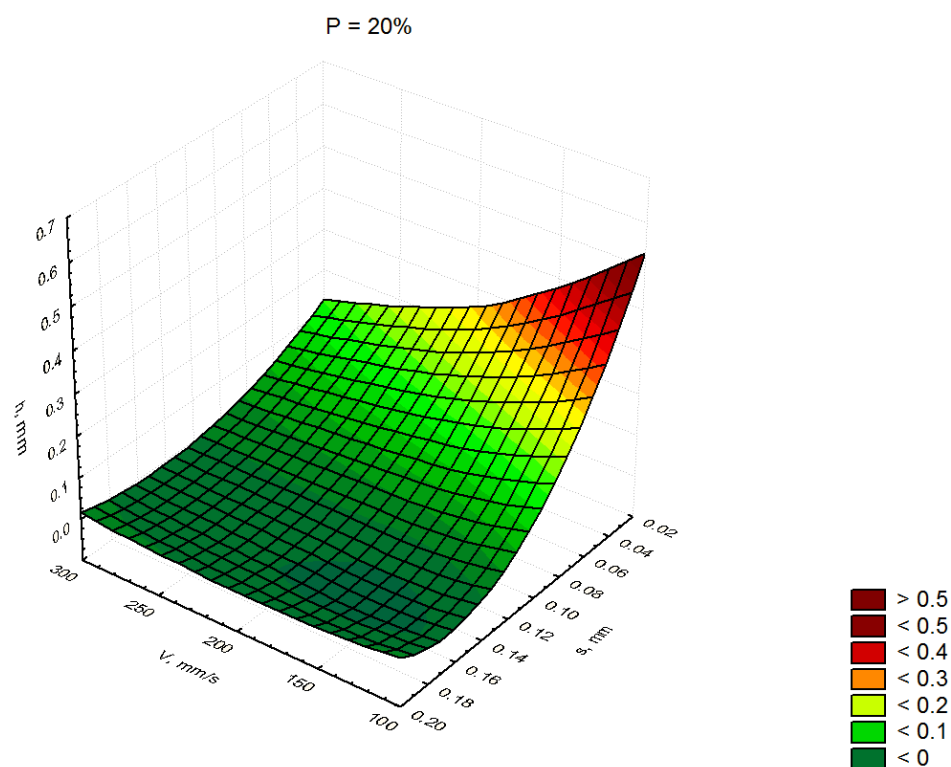
Дијаграм 5.7 Утицај брзине обраде и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при кораку од 0.2 mm



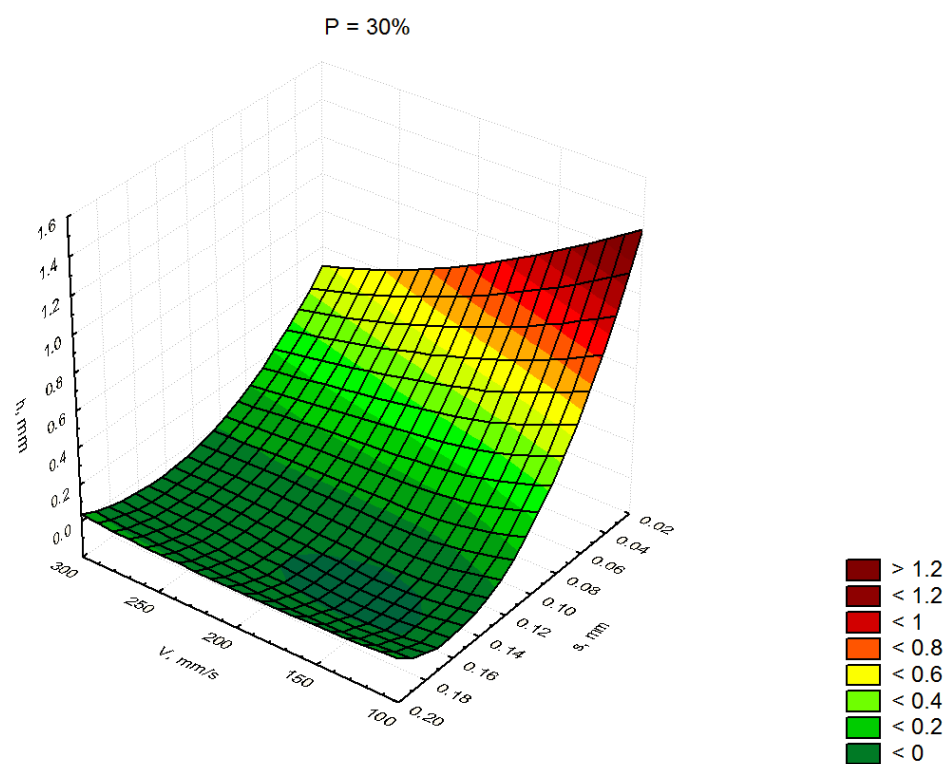
Дијаграм 5.8 Утицај брзине обраде и радијалног корака на грубоћу обрађене површине при снази ласера од 20%



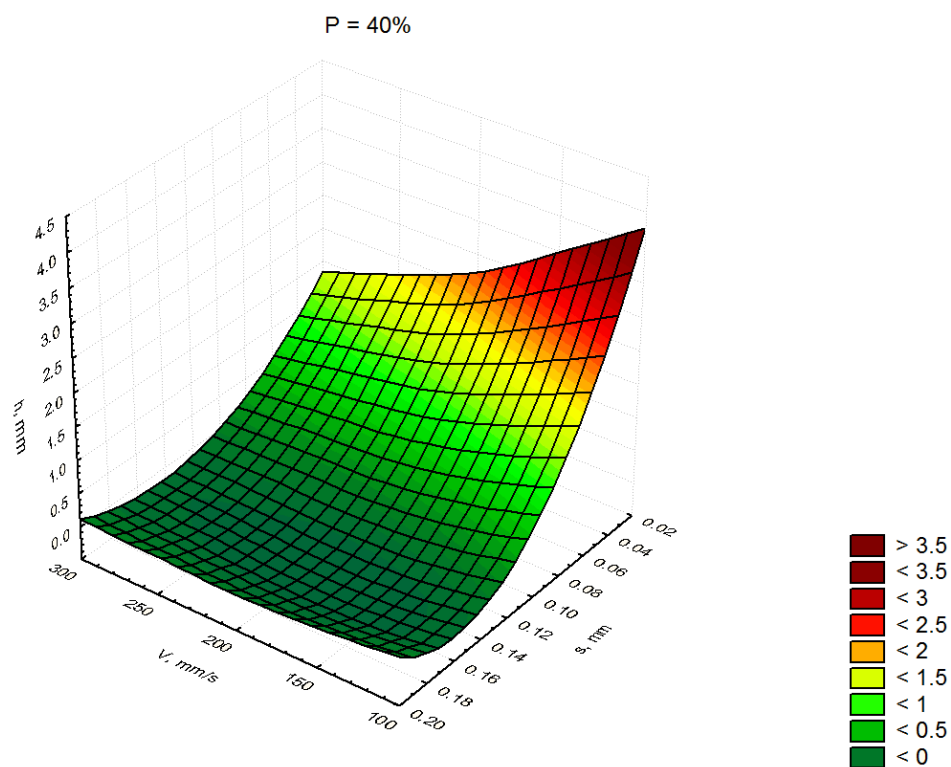
Дијаграм 5.9 Утицај брзине обраде и радијалног корака на грубоћу обрађене површине при снази ласера од 30%



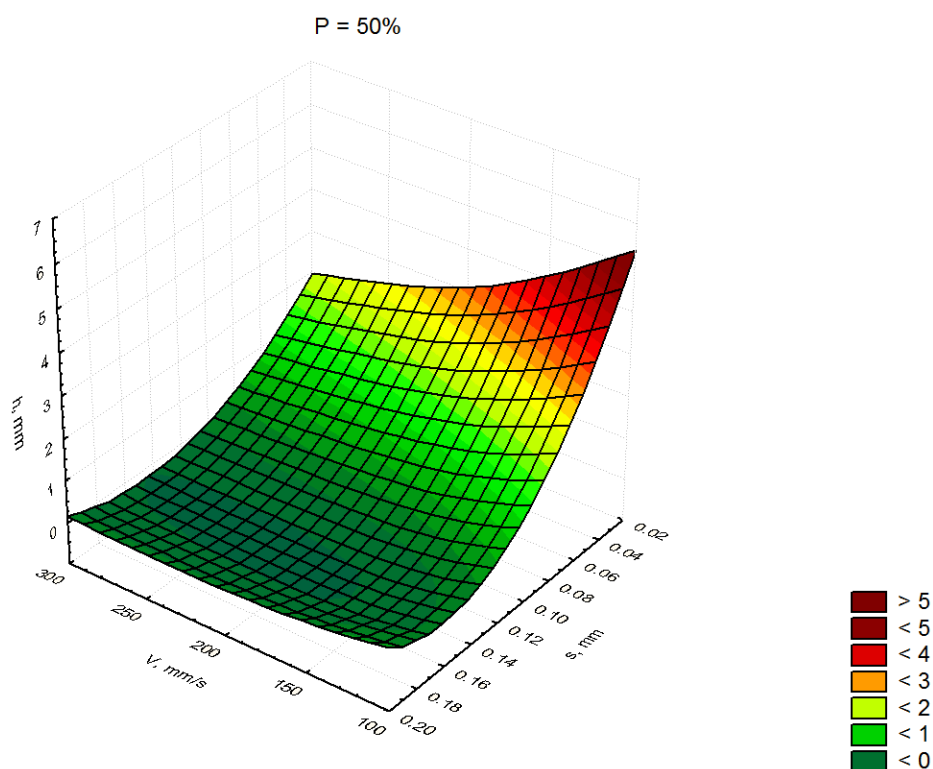
Дијаграм 5.10 Утицај брзине обраде и радијалног корака на дубину гравуре при снази ласера од 20%



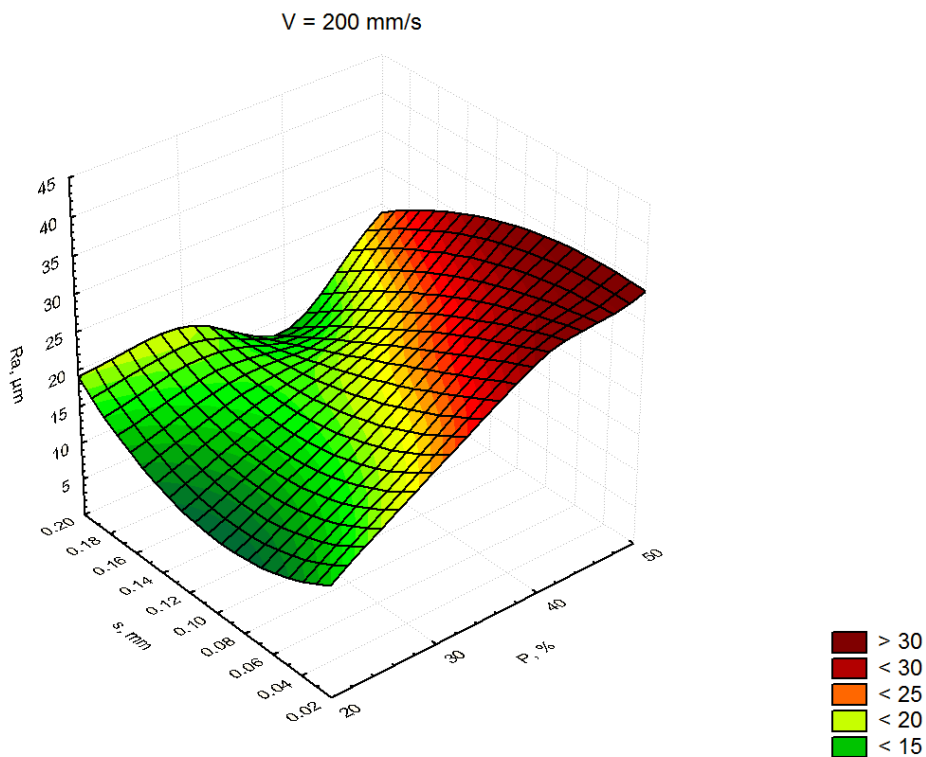
Дијаграм 5.11 Утицај брзине обраде и радијалног корака на дубину гравуре при снази ласера од 30%



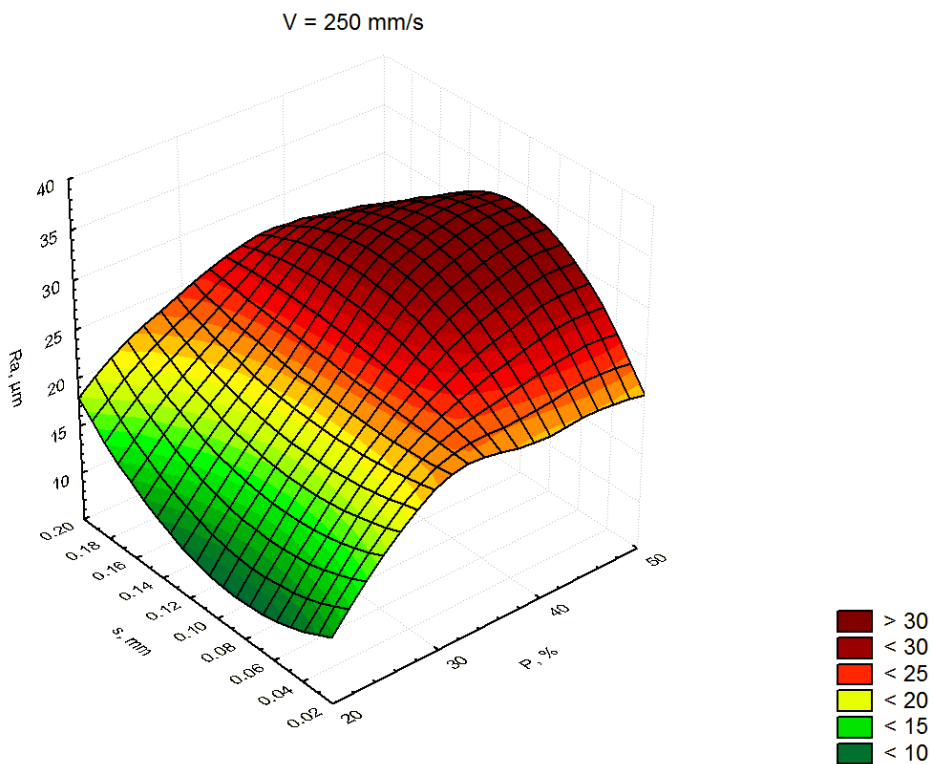
Дијаграм 5.12 Утицај брзине обраде и радијалног корака на дубину гравуре при снази ласера од 40%



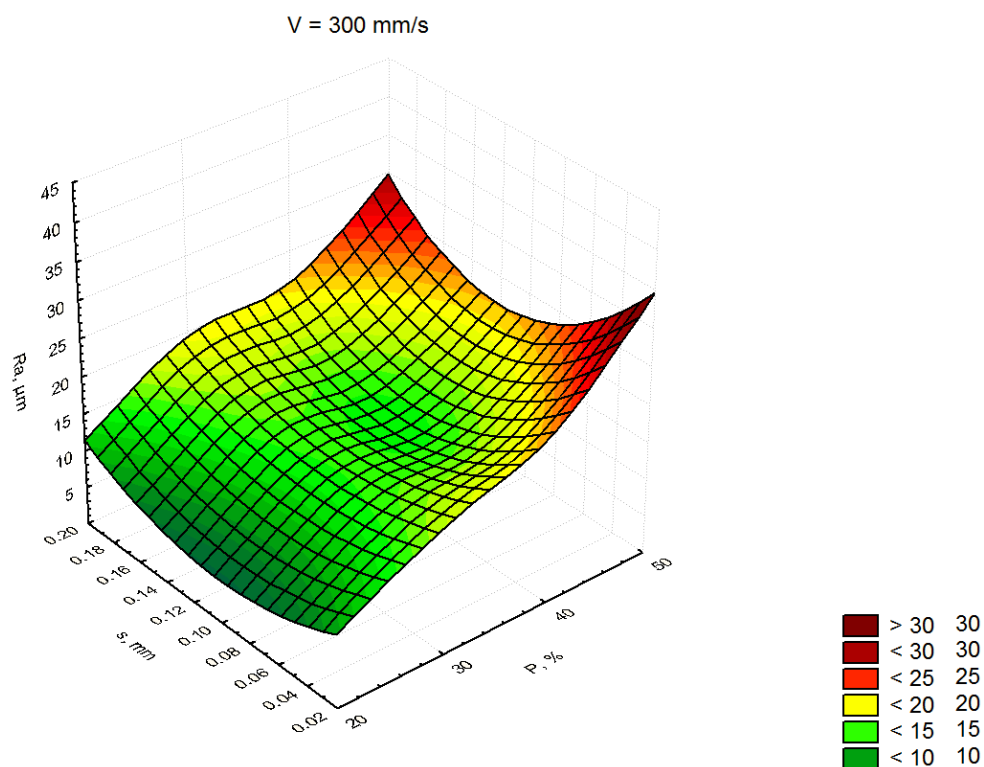
Дијаграм 5.13 Утицај брзине обраде и радијалног корака на дубину гравуре при снази ласера од 50%



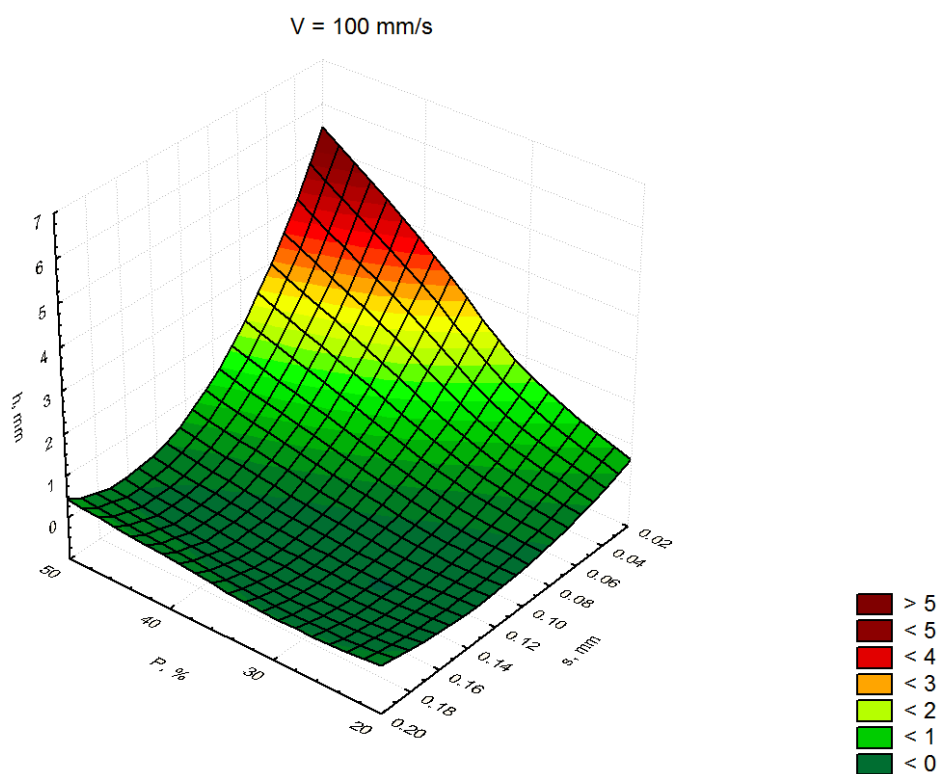
Дијаграм 5.14 Утицај радијалног корака и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при брзини обраде од 200 mm/s



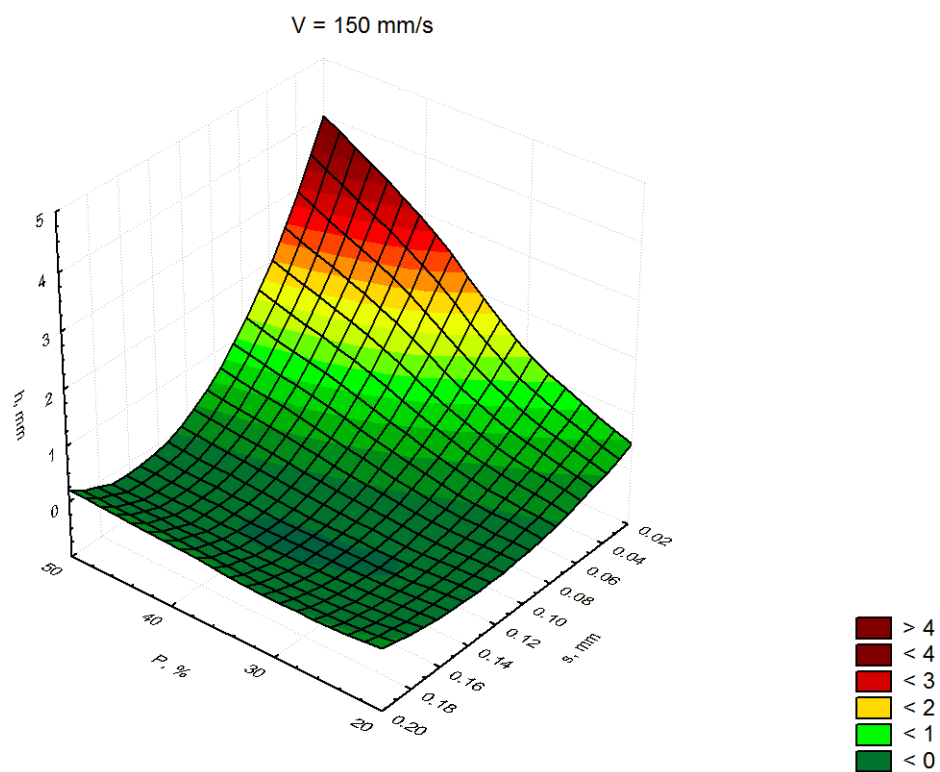
Дијаграм 5.15 Утицај радијалног корака и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при брзини обраде од 250 mm/s



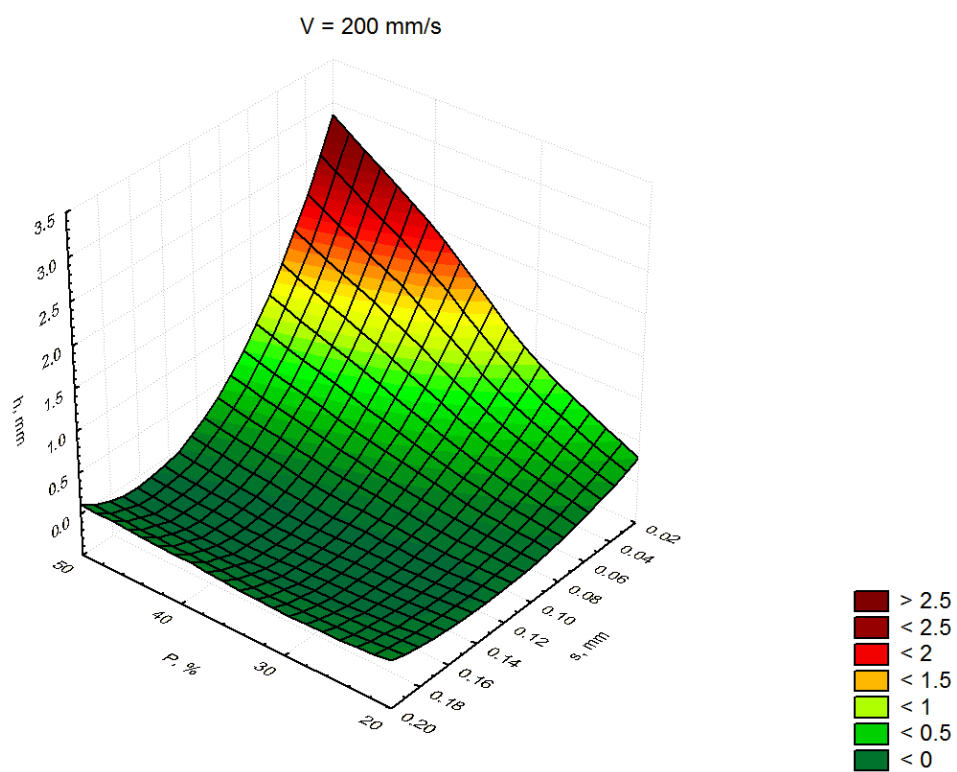
Дијаграм 5.16 Утицај радијалног корака и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при брзини обраде од 300 mm/s



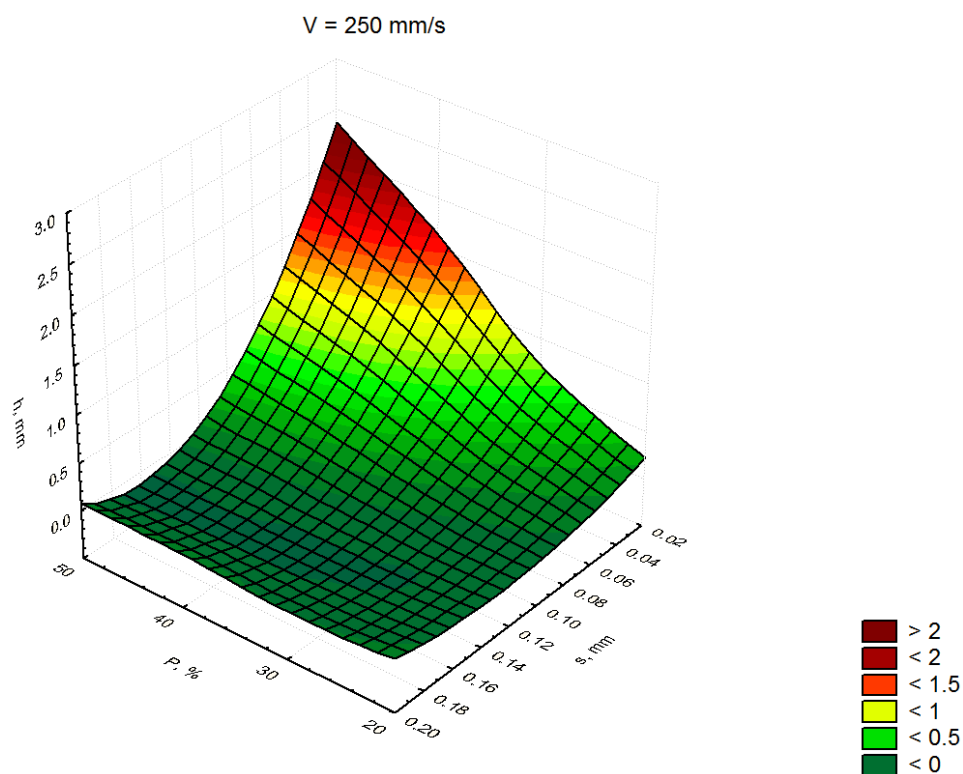
Дијаграм 5.17 Утицај радијалног корака и снаге ласера на дубину гравуре при брзини обраде од 100 mm/s



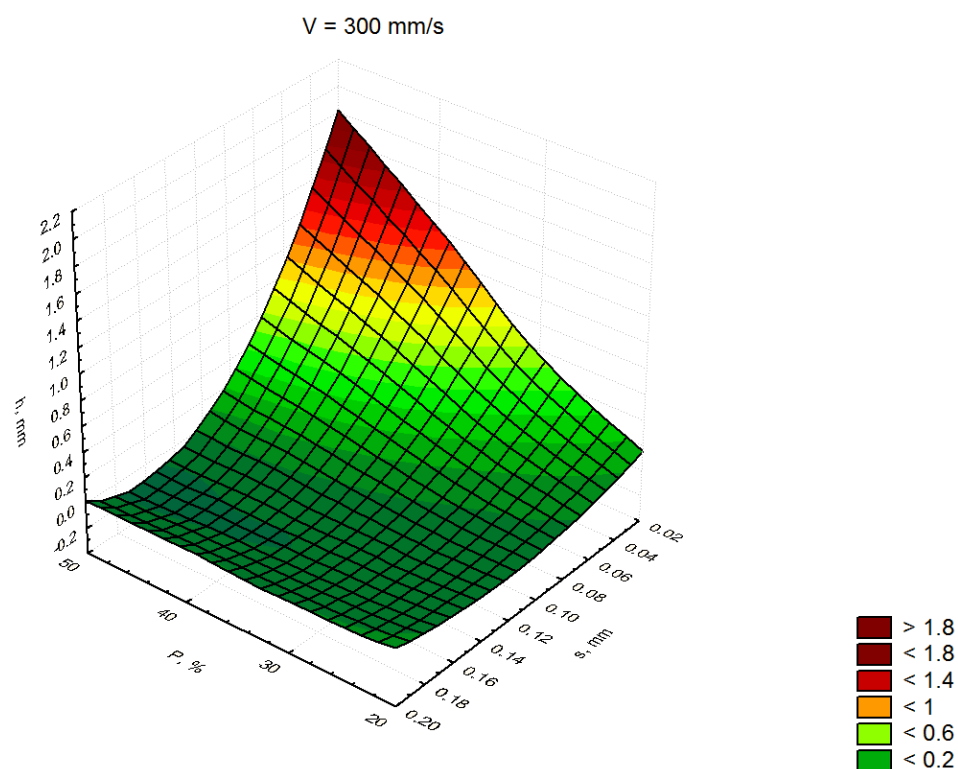
Дијаграм 5.18 Утицај радијалног корака и снаге ласера на дубину гравуре при брзини обраде од 150 mm/s



Дијаграм 5.19 Утицај радијалног корака и снаге ласера на дубину гравуре при брзини обраде од 200 mm/s

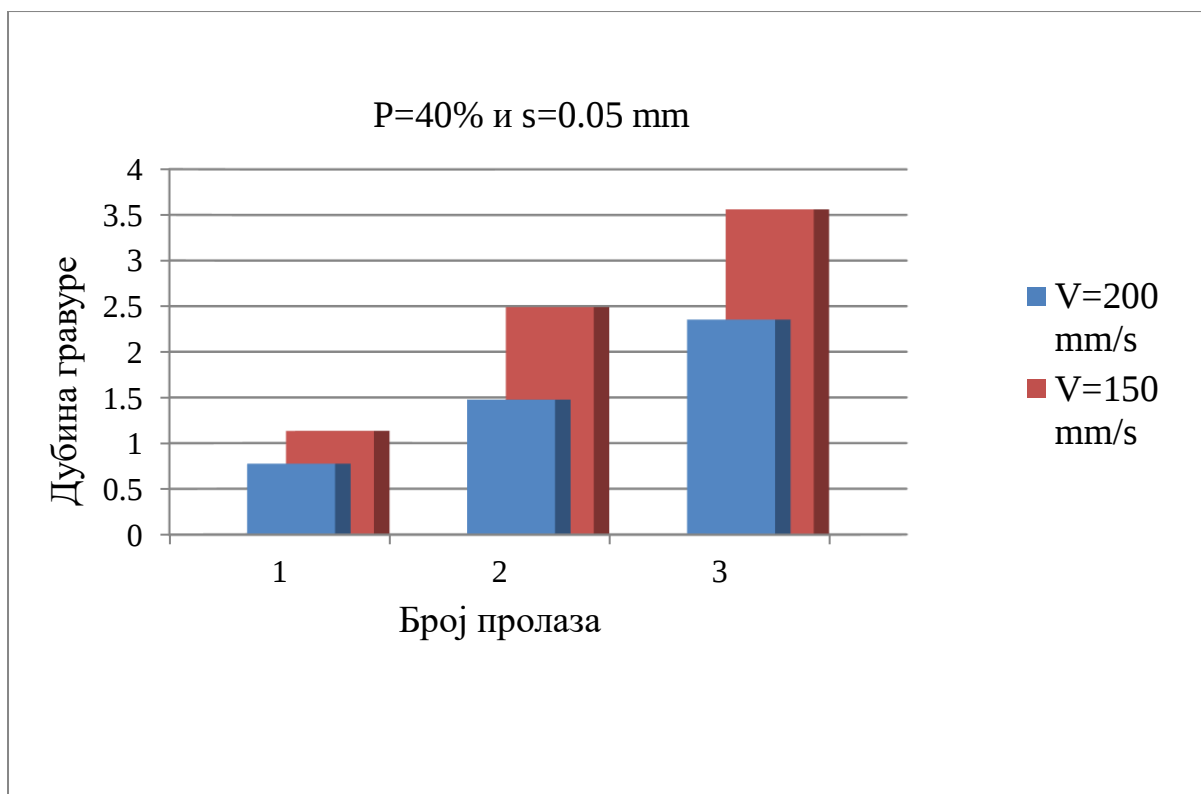


Дијаграм 5.20 Утицај радијалног корака и снаге ласера на дубину гравуре при брзини обраде од 250 mm/s

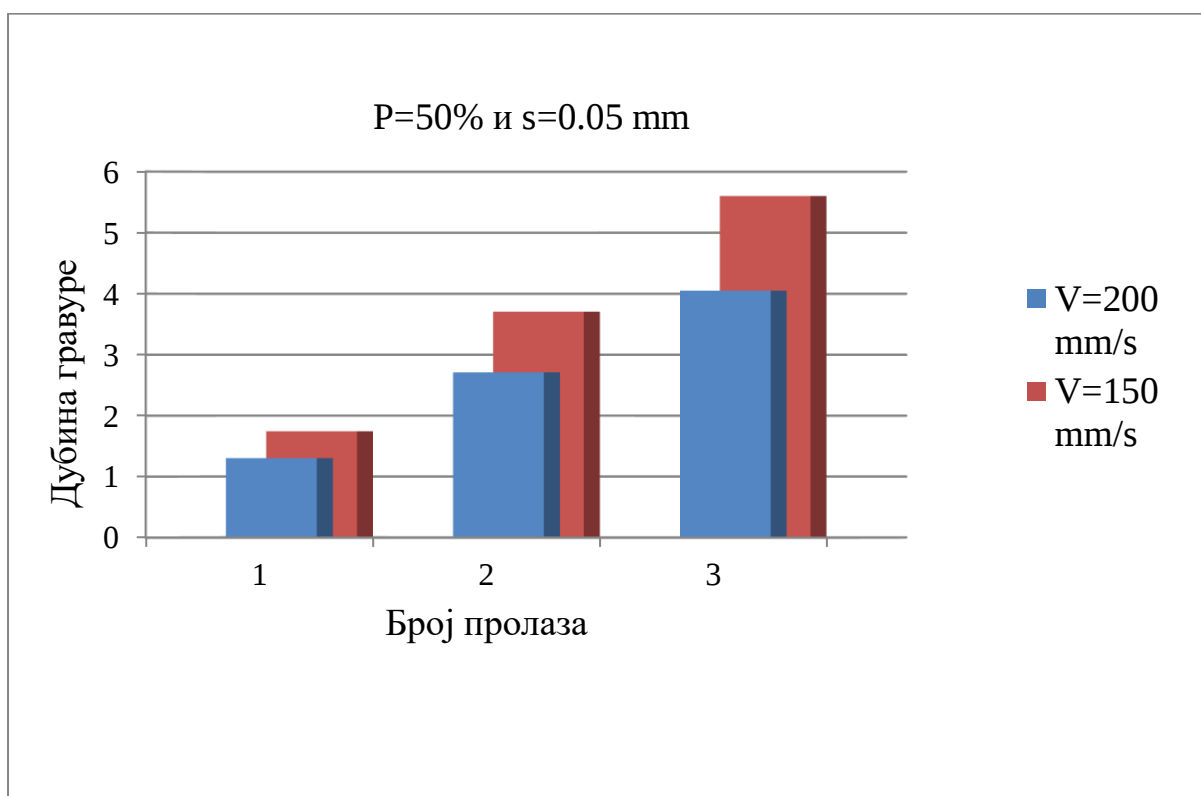


Дијаграм 5.21 Утицај радијалног корака и снаге ласера на дубину гравуре при брзини обраде од 300 mm/s

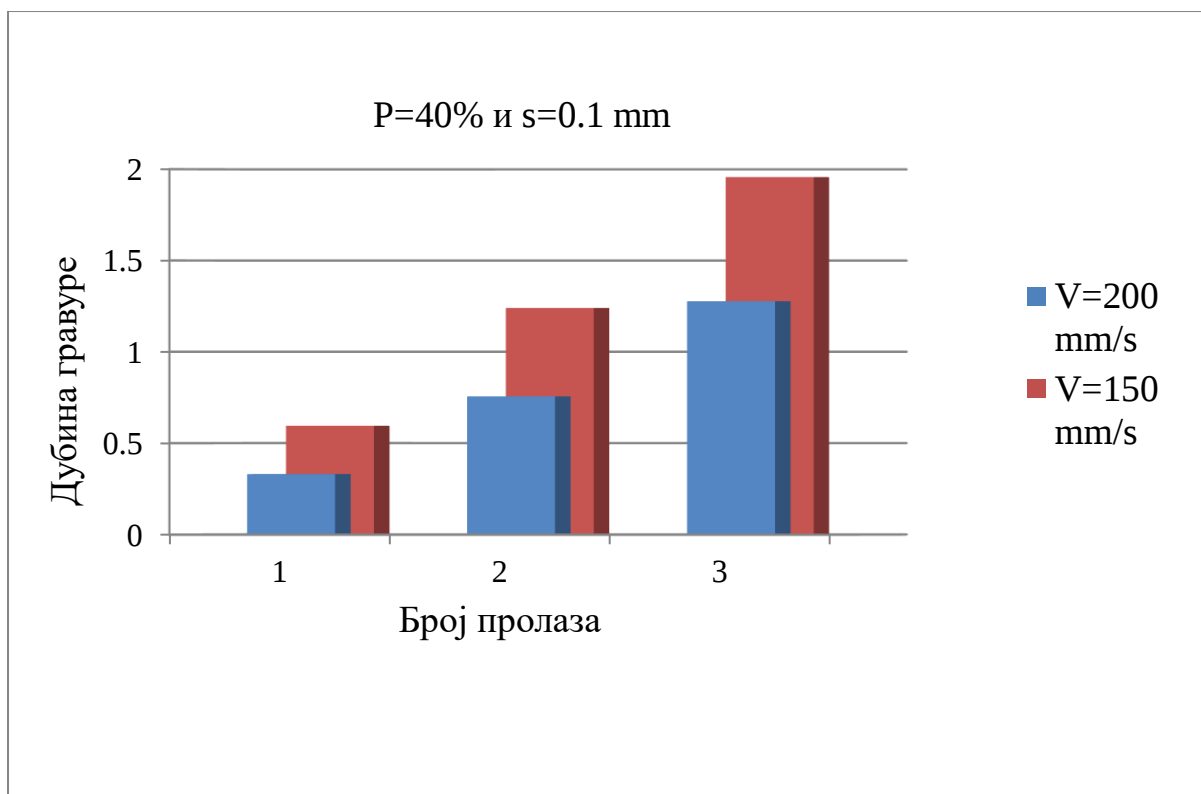
Резултати мерења дубине гравуре другог експеримента су приказани на следећим дијаграмима.



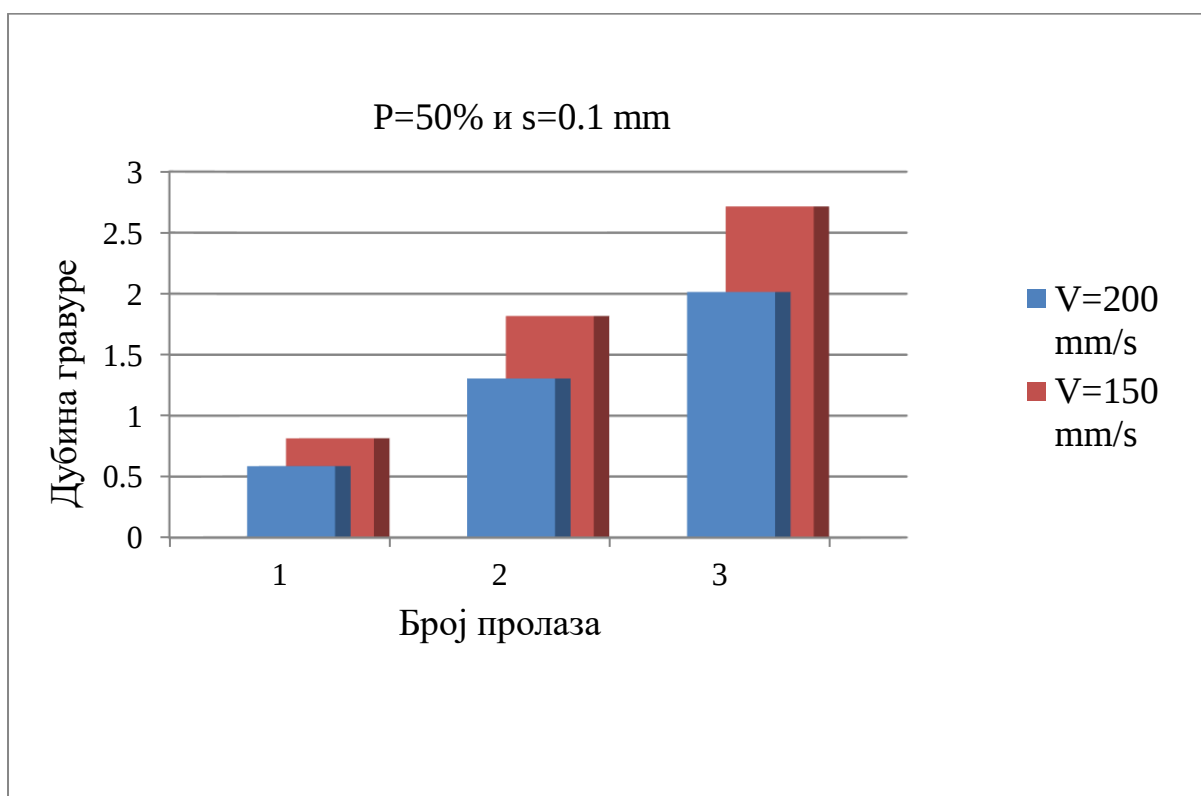
Дијаграм 5.22 Утицај броја пролаза на дубину гравуре при снази од 40%, кораку од 0,05 mm и брзинама од 150 mm/s и 200 mm/s



Дијаграм 5.23 Утицај броја пролаза на дубину гравуре при снази од 50%, кораку од 0,05 mm и брзинама од 150 mm/s и 200 mm/s



Дијаграм 5.24 Утицај броја пролаза на дубину гравуре при снази од 40%, кораку од 0,1 mm и брзинама од 150 mm/s и 200 mm/s



Дијаграм 5.25 Утицај броја пролаза на дубину гравуре при снази од 50%, кораку од 0,1 mm и брзинама од 150 mm/s и 200 mm/s

5.1 Анализа резултата

Анализом дијаграма утицаја брзине обраде и снаге ласера на дубину гравуре при радијалним корацима од 0,02 mm до 0,2 mm (дијаграми 5.1, 5.2, 5.3 и 5.4) може се закључити да се при повећању брзине и радијалног корака дубина гравуре смањује. Повећањем снаге ласера долази до повећања дубине гравуре. Исти принцип се може приметити и на осталим дијаграмима (дијаграми 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 и 5.21) где се јасно види да се највише материјала скида при најмањим брзинама обраде, највећој снази ласера и најмањем радијалном кораку јер се при тим условима обраде долази до највеће концентracије енергије на одређеној запремини материјала. Самим тим долази до највећег сагоревања материјала односно до његовог одношења.

Дијаграм 5.5 утицаја брзине обраде и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при кораку од 0.05 mm претставља зависнос ових параметара и може се приметити да је најбољи квалитет обраде при највећој брзини обраде и најмањој снази ласера, као и при најмањој брзини обраде и највећој снази ласера али ови резултати се не могу узети у обзир због тога што се при овим параметрима јављају велике неравнине у правцу кретања ласера. Из овог дијаграма се не може видети јасни утицај параметара на грубоћу обрађене површине.

Анализом дијаграма 5.6 и 5.7, брзине обраде и снаге ласера на грубоћу обрађене површине при корацима од 0.1 mm и 0.2 mm, се већ јасније види утицај промене параметара на грубоћу обрађене површине. Може се закључити да се најбољи резултати добијају при најмањој снази, а променом брзине није могуће јасно видети утицај на храпавост добијене површине. Повећањем снаге ласера се добијају површине веће грубоће.

Детаљном анализом дијаграма 5.8 и 5.9, који приказује утицај брзине обраде и радијалног корака на грубоћу обрађене површине при снази ласера од 20% и 30%, се може видети да се најбољи резултати храпавости површине добијају при највећим брзинама и при кораку од 0,1 mm који одговара ширини снопа ласерског зрака. Утицај осталих параметара се не може јасно видети и због тога је потребно детаљније испитивање обраде при овим параметрима. Такође се исто може видети и на дијаграмима 5.14, 5.15 и 5.17 где се најбоље обрађене површине јављају при кораку који је исти као и ширина ласерског снопа и при најмањој снази ласера.

Резултати другог дела експеримента су представљени на дијаграмима 5.22, 5.23, 5.24 и 5.25. Може се уочити да се додатним пролазима скида материјал у скоро истим количинама као и при првом пролазу. Због самог облика гравуре долази до нагомилавања праха, односно материјала у деловима гравуре одакле почиње обрада па због овога при другом и трећем пролазу ласерски зрак мора прво да склони односно сагори ту прашину. Због тога се јављају веома грубо обрађене површине па зависност параметара на грубоћу обрађене површине није приказана у овом раду. На слици 5.1 је приказана гравура након три пролаза где се јасно уочава нагомилавање материјала и примећује се да је дубина гравуре мања на почетку гравуре и повећава се до краја где је измерена највећа дубина гравуре. Услед ове појаве, мерење дубине гравуре је извршено у три тачке и израчуната је средња дубина која је и приказана у претходним дијаграмима.



Слика 5.1 *Нагомилавање материјала при обради са три пролаза*

Услед нагомилавања прашине која се јавља приликом обраде, односно нагомилавања материјала који је уклоњен, могуће су грешке приликом мерења храпавости као и при мерењу дубине гравуре. Због овога је свака обрађена површина, пре мерења, очишћена са благом четком како би се нагомилани материјал отклонио. При обради са два и три пролаза није се вршило чишћење обрађене површине између пролаза како би се увидела ова појава.

6. ЗАКЉУЧАК

Ласерска обрада спада у неконвенционалне поступке обраде али се све чешће користи за разне поступке обраде. Неки од тих обрада су сечење, бушење, заваривање, отврђивање, термичка обрада и гравирање.

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитује у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије. Ласери се могу поделити према агрегатном стању активне средине, према режиму рада, према начину побуђивања и према спектру генерисања.

Такозваним 3D гравирањем је могуће вршити обраду разних материјала чиме се добијају облици као при конвенционалном резању. Разлика између конвенционалног резања и ласерског резања је у томе што се не троши алат, нема замене алата и могуће је добити површине веома малих и тачних димензија. Постоји посебна врста обраде ласером која се зове микрорезање при чему се добијају делови који се могу мерити у микрометрима.

За експерименте који су рађени у овом раду коришћен је ласер на CO_2 . За мерење дубине гравуре коришћена је мерна машина Tesa и за мерење храпавости гравуре је коришћен Talysurf. Рађена су два експеримента, први је имао за задатак да установи везу између параметара и добијених резултата на основу промене брзине обраде, снаге ласера и радијалног корака. Задатак другог експеримента је да установи утицај више пролаза на добијену површину.

Анализом добијених резултата је утврђено да се при највећим брзинама обраде и најмањој снази ласера, при кораку који је исти као и ширина ласерског снопа, добијају најквалитетније обрађене површине тј. јављају се површине са најмањом грубоћом. При најмањим брзинама обраде, највећој снази ласера и најмањем радијалном кораку долази до највећег отклањања материјала односно до највеће дубине гравуре.

Ласерско гравирање се све чешће користи и могућа је обрада уз веома прецизно контролисање површина која је могућа са савременим 3D скенерима, при чему се утврђује површина према којој се модификују наредни пролази обраде. Обрада се врши прво режимима при којима се отклања највише материјала, након којих следе пролази са режимима за добијање финих површина.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић, Б., Лазих, М., Неконвенционални поступци обраде (поглавље о обради ласером, књига у рукопису), Машински факултет, Крагујевац, 2008.
- [2] „Обрада ласером“, (скрипта за ученике), Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [3] „LaserCut“ упуство за употребу, Београд, 2016.
- [4] <http://www.technologystudent.com/laser1/laser8.html> (22.09.2018.)
- [5] http://mchalegentile.com/iduartsshop/lc_howto.html (29.10.2018.)
- [6] Иван Миликић, Квалитет обраде ласером, Дипломски рад, машински факултет Крагујевац.
- [7] <https://www.or-laser.com/en/facts-laser-engraving/laser-engraving-acrylic/> (28.10.2018.)
- [8] <http://www.microtop.ro/en/product/manual-cmm-micro-hite-3d.html> (28.10.2018.)
- [9] <http://www.dentalwings.com/products/laser-milling-system/> (18.09.2018.)
- [10] <https://www.oxfordlasers.com/laser-micromachining/laser-micro-milling/> (15.09.2018.)