

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Никола З. Костић

Квалитет површине реза код сечења ласером

Мастер рад

Крагујевац, 2019.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Индустијски инжењеринг

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 343/2017

Никола З. Костић

**Квалитет површине реза код сечења ласером
Мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Индустријски инжењеринг**

Име и презиме: **Никола Костић**

Број индекса: **343/2017**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Квалитет површине реза код сечења ласером**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о обрадном систему за сечење ласером *Bodor laser F series*. Потребно је описати принцип сечења ласером и принцип рада конкретне машине. Извршити експериментална истраживања утицаја параметара услова рада машине на тачност резања и квалитет површине реза.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Принцип и суштина сечења ласером,
3. Карактеристике машине *Bodor laser F series*,
4. Експериментална истраживања,
5. Анализа резултата,
6. Закључци,
7. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 17.05.2019.

Резиме:

Обрада материјала ласерским снопом сапада у групу неконвенционалних поступака обраде која поприма све већи значај у модерној индустрији. Са технолошког аспекта, технологија ласерског сечења представља веома сложен процес интеракција ласерског снопа, помоћног гаса и материјала обрадка на чије перформансе утиче велики број фактора. У овом раду ће бити приказан утицај параметар на квалитет ласерског сечења.

Кључне речи: *ласер, обрада, квалитет, материјал*

Abstract

Laser beam machining processes is a group of unconventional machining processes that are getting more and more importance in the modern industry. From the technological point of view, laser cutting is a very complex process of interactions between the laser beam, assist gas and workpiece material, whose performances are influenced by a number of factors. This paper presents the effect of those parameter on the quality of laser cutting process.

Keywords: *laser, machining, quality, material*

Садржај:

1. УВОД	1
2. ИНДУСТРИСКИ ЛАСЕР	3
2.2. Особине ласерског зрачења	6
2.3. Подела ласера.....	8
2.3.1. Ласери са чврстом активном средином	9
2.3.2. Течни ласери.....	12
2.3.3 Гасни ласери	14
2.4. Принципи ласерске обраде	16
2.5. Технолошке операције ласерске обраде.....	20
2.5.1. Ласерско бушење	22
2.5.2. Сечење ласером.....	25
2.5.3. Ласерско заваривање	29
2.5.4. Ласерска термичка обрада	31
2.5.5. Ласерско гравирање	32
3. ЛАСЕРСКА МАШИНА	33
3.2. Постоље ласера.....	35
3.3. Попречни носач	36
3.4. Радни сто	36
3.5. Вертикални носач.....	37
3.6. Систем за довођење гасова под пристиском.....	38
3.7. Ласерски извор.....	38
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	40
4.1. Резултати испитивања.....	43
5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА.....	71
6. ЗАКЉУЧАК.....	79
ЛИТЕРАТУРА.....	81

1. УВОД

Процеси машинске обраде се могу поделити у две групе, постоје примарни и секундарни процеси, тј. процеси без скидања стругорине и са скидањем струготине. Док једни служе да обезбеде основни облик и величину по захтеву пројектанта – конструктора, нпр. ковање и ливење, други обезбеђују финални облик и димензије са већом тачношћу димензија и квалитета обрађене површине [1].

Пораст захтева купаца за квалитетним производима и жеља компанија да остану доминантне на постојећим тржиштима као и да изврше продор и освајање нових, довела је до брзог развоја нових комплексних производа као и кратких рокова за њихову израду и пласирње на тржиште. За израду производа новије генерације све чешће се користе висококвалитетни материјали као и материјали новије генерације, који су развијени да би задовољили све захтевније захтеве тржишта.

Материјали новије генерације се одлукују бољим механичким и триболошким карактеристикама, високом отпорношћу на високим и ниским температурама, знатно већу отпорност на хабање, итд. Обрада материјала новије генерације у многим случајевима применом конвенционалних поступака обраде је изузетно тешка па чак и немогућа. За обраду оваквих материјала јавља се потреба за израду скупих алата, присутан је ниски ниво производности као и високе цене самих производа. Како би се превазишли предходно наведени проблеми користе се и развијају неконвенционлани поступци обраде који омогућавају брзу израду захтеваног дела, нижу цену и елиминисање израде скупих алата [1].

Ласерска обрада је обрада материјала која омогућава задовољење високих захтева везаних за квалитет обраде и као таква је постала незамењива у појединим грана индустрије. Ласерска обрада пружа могућности прецизне и економичне обраде, која задовољава ова два најбитнија критеријума за пословање у савременом пословном окружењу. У односу на поступке гасног сечења, плазма сечења, сечења тестером и просецања предности ласерског сечења су: узан рез, минимална зона топлотног утицаја, правилан профил реза, глатке и равне ивице, минимална или никаква деформација радног предмета, могућност обраде великим брзинама, израда сложених профила и брза адаптација на промену производног програма.

Ласерска обрада као вид обраде материјала са собом носи одређене технолошке проблеме који проистичу из недовољног познавања правилне примене као и недостатака података везаних за примену ласера на основу којих би се могло вршити планирање.

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

У другом поглављу је дат историјат и развој ласера, основни принципи рада, врсте ласера као и основне технолошке опреције ласерске обраде.

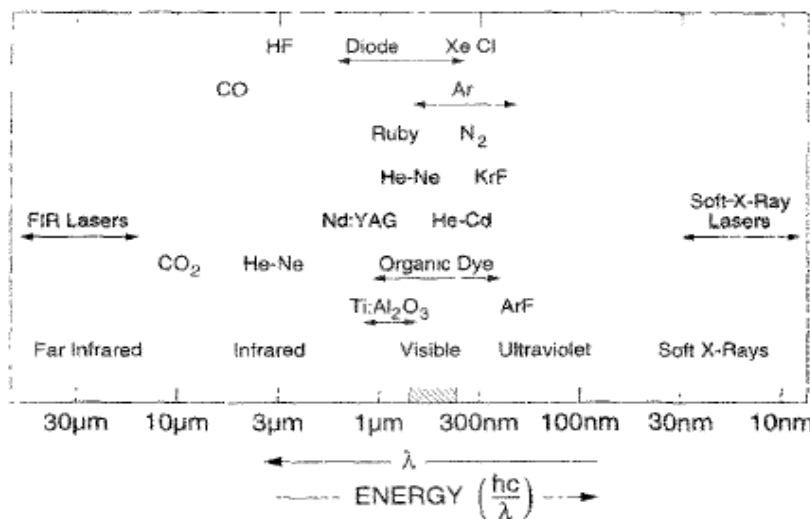
У трећем поглављу је описана ласерска машина на којој је вршено сечења материјала.

У четвртом поглављу је дат план експеримента као и резултати испитивања.

На крају рада дат је закључак и преглед коришћене литературе.

2. ИНДУСТРИСКИ ЛАСЕР

Ласер (скрећеница од *light amplification by stimulated emission of radiation*) је уређај који омогућава појачавање светлости и његово веома прецизно усмеравање. Пречник ласерског зрака може да се креће од десетог дела пречника људске длаке па до пречника неких великих објеката, опсег снаге ласера се може кретати од 10^{-9} до 10^{20} W, Таласна дужина ласера се може простирати од микроталаса до благих X-зрака (*soft-X ray*) са одговарајућом фреквенцијом од 10^{11} до 10^{17} Hz. Ласер се може користити за бушење и сечење издржљивијих материјала па све до финих захвата као што су операције на мрежњачи ока [3].



Слика 2.1.Таласне дужине различитих врста ласера [3]

Први кораке за разумевање ласера је 1704. године направио Њутн када је светлост представио као струјање честица. Спровођењем експеримента поларизације светлости Јанг је 1803. год. променио схватања научног света у то време да се светлост понаша као талас. Планк је 1900. године поставио теоријске основе квантне механике према којој енергија има дисконтинуални карактер, па се емитује и апсорбује у облику кванта енергије који представља најмању количину енергије. Алберт Ајнштајн је 1917. године у свом раду „О квантној теорији зрачења”, дао теоријски концепт стимулисане емисије светлости и повезао је са Планковом теоријом о квантној природи светлости, по којој је фотон најмања количина светлости која се емитује. На тај начин је створена основа за развој ласера и његову практичну примену [3, 4].

Први уређај који је емитовао усмерени сноп кохерентне светлости високог интензитета конструисан је 1954. године и познат је под називом масер. Конструисао га је Таунс, а независно од њега исте године Басов и Прохоров. Масер је уређај који ради

на исти начин као и ласер, али у другом фреквенцијском подручју и емитује светлост у микроталасном делу спектра [3].

Први функционални ласер је направљен 1960. године у „*Hughes Research Laboratories*“ од стране инжењера и физичара Theodore Harold "Ted" Maiman. Овај ласер је користио као појачивач (радну средину) рубински кристал од алуминијум оксида (Al_2O_3) коме су били додати атоми хрома у малим количинама око 0,05%, а као извор побуде (енергије) је коришћена блиц-лампа (инплусна лампа). Када би блиц-лампа била активирана на крају рубинског штапа би се јављао црвени сноп светлости јаког интензитета [3, 4].

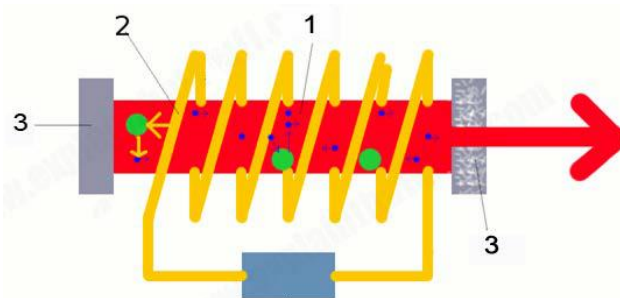
Након проналаска рубинског ласера 1960. године, долази до развоја других ласера, њихове примене:

- 1962. године - Роберт Хол конструисао је полупроводнички ласер,
- 1964. године - Ц. К. Н. Пател конструисао је гасни CO_2 ласер,
- 1972. године - први пут у ратним условима (Вијетнам) ласер је коришћен за означавање мета,
- 1974. године - ласер први пут примењен у супермаркетима као читач бар кодова,
- 1979. године - у космосу у маглини Орион откривено зрачење, блиско инфрацрвеном делу спектра, које одговара карактеристикама ласерског зрачења.
- 1979. године - употребом ласера направљен први CD плејер (Philips).
- 1980. године - конструисан ласер који емитује ласерску светлост у подручју X-зрачења.
- 1981. године - у атмосфери Марса и Венере откривен је CO_2 ласер, што указује на постојање процеса у космосу који доводе до настанка ласера (и масера) природног порекла.
- 1985. године - конструиран први комерцијални ласер за примену у офталмологији (хирургија ока).

2.1. Принцип рада ласера

Као што је претходно речено ласер је уређај који врши појачавање светлости и његово прецизно усмеравање ка површини која треба бити обрађена. Основни делови ласера који учествују у стварању ласерског зрака су (слика 2.2):

- активна средина (1),
- уређај за побуђивање (2),
- резонатор, са непропусним огледалом са једне стране и полу пропустивим са друге стране (3).



Слика 2.2. Шематски приказ рубинског ласера [5]

Активна средина ласера је супстанца чији атоми (молекули) учествују у процесима стимулисане емисије и може бити у гасовитом, течном или чврстом стању, слика 2.3.



Слика 2.3. Стимулисање извора радијације [5]

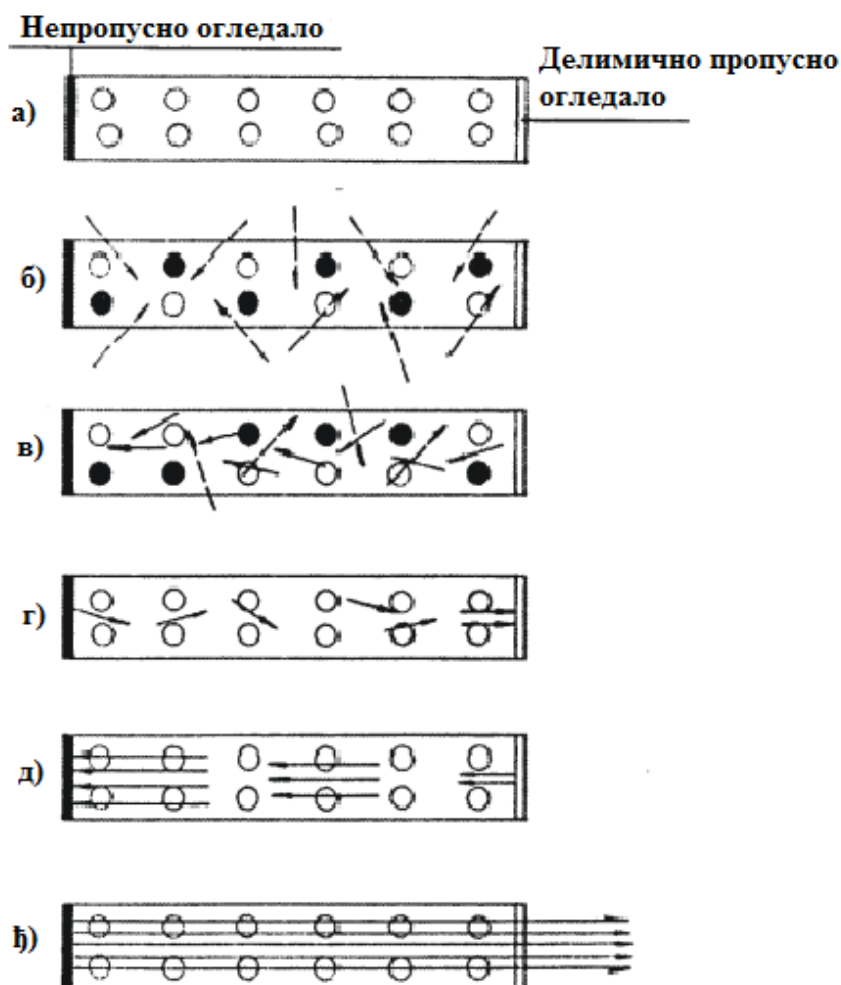
Уређај за побуђивање врши промену енергетског нивоа атома (молекула) активне средине оптичком побудом, путем електричног пражњења, хемијским реакцијама итд.

Резонатор је осцилаторни систем ограничен са два огледала, једним непропусним и другим делимично пропусним, унутар кога се осциловањем електромагнетних таласа (светлости) врши појачавање светлости кроз процесе стимулисане емисије.

До укључења уређаја за побуђивање, јони хрома се налазе у основном стању (а, бели кружићи на слици 2.4). Када се кристал рубина осветли снажном лампом (испрекидане стрелице) јони хрома апсорпцијом упадних фотона бивају побуђени на један од виших енергетских нивоа (б, в - црни кружићи на слици 2.4) [5].

Са виших енергетских нивоа јони хрома прелазе не зрачећи светлост (вишак енергије се предаје кристалној решетци) на метастабилни ниво. Са метастабилног нивоа врше индуковање и прелазе у основно стање и емитују фотоне одређене енергије. Сваки емитовани фотон (стрелица) индукује прелаз следећег јона и број фотона се повећава [5].

Ефекат појачања постоји за оне фотоне који се крећу паралелно оси цилиндричног кристала (г, д на слици 2.4). Након неколико узастопних рефлексија на чеоним плочама снажни флуks фотона пролази кроз полупосребрено огледало (ђ на слици 2.4) [1].



Слика 2.4. Основне фазе настанка ласерског зрака [1]

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 распрострањања. Зрачење ласера има висок степен монохроматичности, тј. садржи веома уски интервал таласних дужина. Монохроматичност одређује дијапазон фреквенција, односно таласних дужина, садржаних у зрачењу, тј. ширину спектра ласерског зрачења.

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

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

Где је: $\Delta\lambda$ - ширина спектра.

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

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

Где су: d - пречник ласерског материјала (активне средине),

λ - таласна дужина зрачења.

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

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

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

Где су: θ - стварни угао дивергенције,

f_s - жижна даљина сочива.

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

$$q = \frac{E}{A_f \cdot t_i} = \frac{4E}{\pi d^2}$$

Где су: E - енергија импулса ласерског зрачења,

t_i - трајање импулса зрачења и

A_f - површина светлосне мрље.

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

Енергија импулса ласерског зрачења је:

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

Где су: $P_l(t)$ - снага ласерског зрачења у моменту t_i

t_i - трајање импулса.

Средња снага импулсасерског зрачења је:

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

Трајање једног импулса ласерског зрачења је:

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

2.3. Подела ласера

Поделу ласера може се извршити на више начина, један од подела је према критеријумима као што су (слика 2.5):

- агрегатном стању активне средине,
- режиму рада,
- према начину побуђивања
- према спектру генерисања ласерског зрака



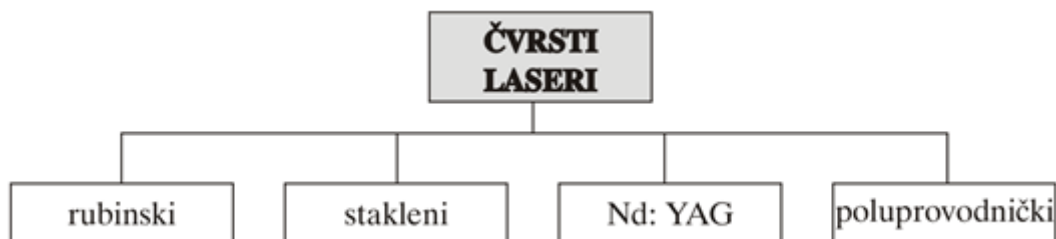
Слика 2.5. Подела ласера [4]

У даљем раду ће бити приказани ласери подељени према агрегатном стању активне средине. Сваки ласер подељен према агрегатном стању се може сврстати у зависности од критеријума и у друге групе.

2.3.1. Ласери са чврстом активном средином

Ласери са чврстом активном средином могу се поделити на (слика 2.6):

- Рубински
- Стаклени
- Nd:YAG
- Полу-проводнички



Слика 2.6. Подела ласера са чврстом активном средином [4]

Код ласера чврстог стања активна средина је у чврстом стању на собној температури и састоји се од кристалних или аморфних чврстих материјала, најчешће у облику шипке. На крајевима шипки се налазе огледа од којих је јено непропусно а друго делимично пропусно. У чврстим активним средима се налази се знатно већи број активних честица него у гасним радним средима али као оптичака средина има већи дисперзивне губитке светлости. Због нехомогености оптичке средине код чврстих активних средина долази до све већих губитака светлости и смањења квалитета резонатора са повећањем дужине радне средине. Како би се избегли губици и код нај хомогенијих материјала чврсте радне средине дужина не прелази 60 cm [4].

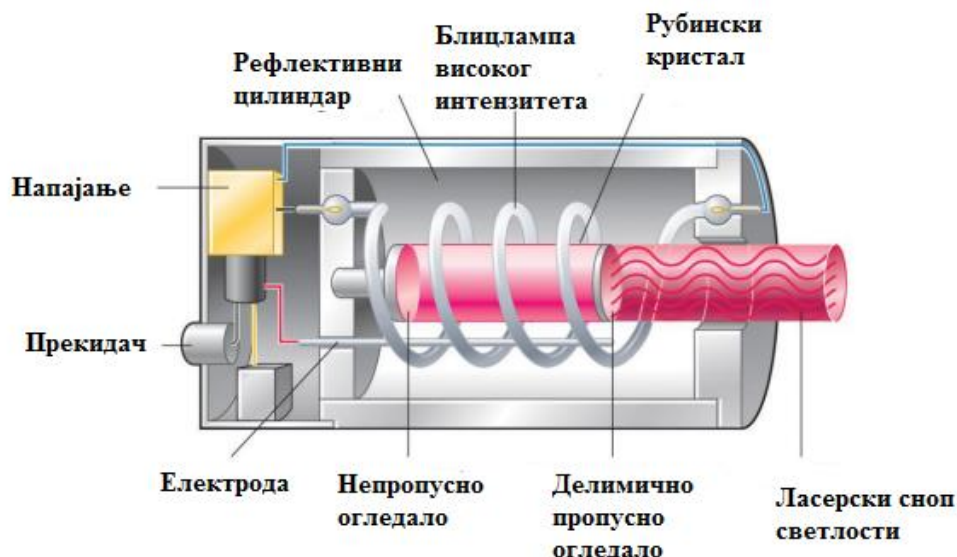
Како би се одабрала одговарајућа радна средни за ласер потребано је знати за шта је ласер намењен. Најчешћи захтеви који се траже од радне средине су да има [3]:

- механичку чврстоћу,
- хемијску стабилност,
- термичку стабилност,
- добру прозрачност и
- оптичку хомогеност.

За израду активне средине у чврстом стању користе се материјали као што су рубин, калцијум-молибдат, калцијум-флуорид (CaF_2), калијум-волфрамат, итријум алуминијум гранат (YAG), ербијум (Er), талијум (Tm), празеодијум (Pr), итербијум (Yb), холмијум (Ho), неодимијум итријум алуминијум гранат (Nd:YAG), пластичне масе, стакло, итд. [3].

Побуђивања атома у радној средини код ласера са чврстом радном средином се најчешће постиже оптичким извором побуде. Оптички уређаји које се најчешће користе су ксенонске лампе, бљескалице и LED диоде [3].

Рубински лазер је био први функционални лазер и он спада у најпознатије ласера са чврстом активном средином (слика 2.7). Активна средина овог ласера је од алуминијумовог оксида (Al_2O_3) у виду цилиндра коме су били додати тровалентни атоми хрома (Cr^{3+}) у малим количинама око 0,05%. Боја овог кристала се креће од бледо ружичасте боје па до јарко црвене боје, где се може уочити да преовладава црвена боја таласне дужине светлости $\lambda = 0.6943 \mu\text{m}$. Придодати атоми хрома у овом ласеру се носиоци стимулисане енергије зрачења.



Слика 2.7. Рубински лазер [6]

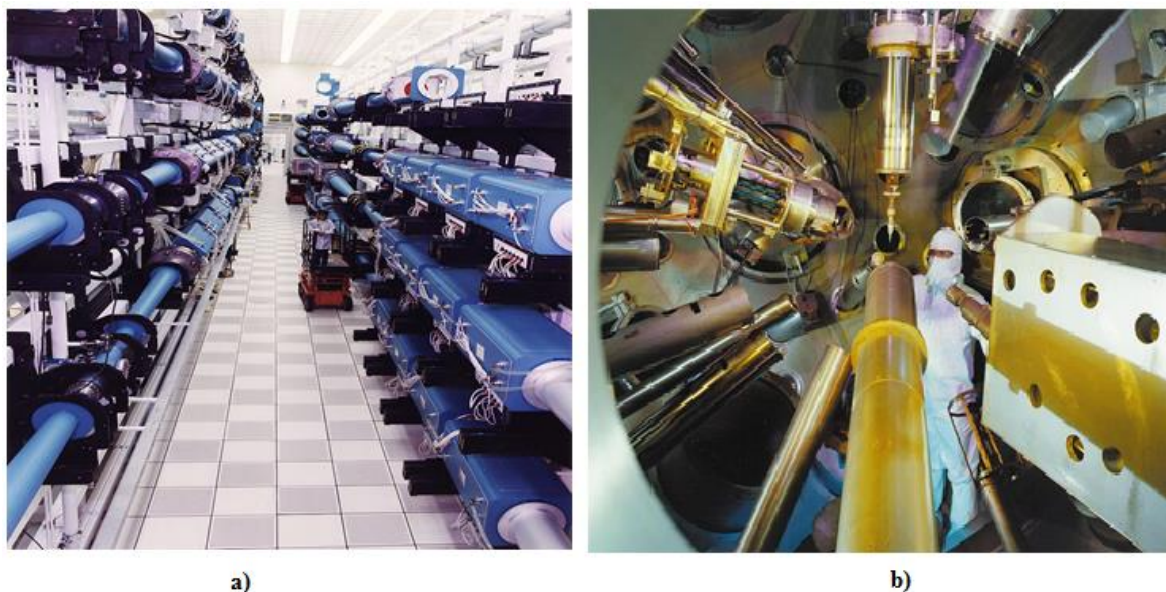
Рубински ласери су ласери који могу да раде и у импулсном и континуалном режиму рада. Рубински ласери приликом рада у континуалном режиму имају веома мали степен искоришћења, свега 1%, и при томе се много загревају. Рубински ласери који раде на континуалном режиму рада захтевају специјалне системе хлађења како се не би преглејали. Због својих карактеристика рубински ласери се најчешће израђују за импулсни режима рада.

Стаклени ласери су ласери чија је рада средина стакло које спада у групу аморфних материјала. Активна средина стакленог ласера је високопрозрачно стакло у коме су распоређени дисперзивно јони нијодиума (Nd^{3+}) [3, 4].

Постоје два вида стаклених ласера [4]:

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

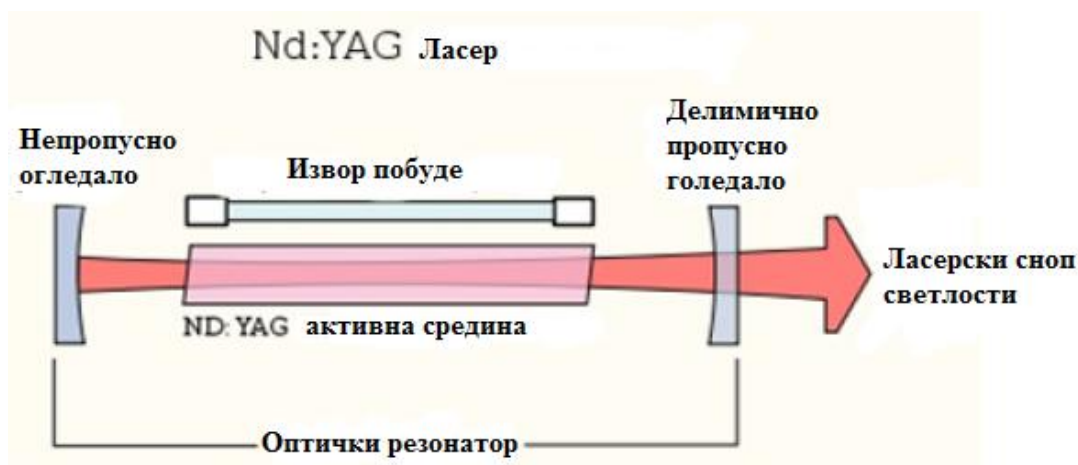
Стаклени ласери при малим енергијама импласа од 20 J имају степен искоришћења до 3%. Због своје једноставне конструкције могуће изградити изградити релативно велика ласерска тела. Један од великих стаклених ласера је лазер под називом NOVA, слика 2.8. NOVA лазер је лазер који се користио за испитивање ласерске фузије. NOVA лазер се састојао од 8 засебних линија (цилиндара за спровођење светлости) са појачивача светлости који добијају енергију од једног осцилатора. Свака линија засебно се састоји од 20 нивоа појачивања од којих сваки користи од 3 до 5 импулсних-лампи као побуђивач стаклених појачивача (радне средине) [3, 4].



Слика 2.8. Систем ласера NOVA,
а) појачивачи NOVA, б) радна комора NOVA ласера [7]

Стакло као материјал активне средине одликују лоша топлотна проводљивост и отпорност због чега се не може користити код високих фреквенција. Стакло поседује велику оптичку разнородност и као такво приликом нагомилавања излазне енергије долази до повећања расипања ласерског снопа. Ласери од стакла се могу израђивати да буду великих димензија и као такви могу да превазиђу проблем губитака оваки ласери се користе за експериментална истраживања као предходно наведени NOVA ласер [3,4].

Nd: YAG ласер је ласер који има значајну количину примене у индустрији и научним испитивањима, слика 2.9. Скраћеница Nd представља скраћеницу од неодимијум (Nd^{3+}) а YAG представља скраћеницу од итријум-алуминијум-гранат ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Учешће неодимијума у укупној маси активне средине је око 1%, такође се користи и код ласера са стакленом активном средином као додатак. Nd: YAG ласер емитује светлост у инфрацрвеном делу спектра, најчешће са таласном дужином око $1,06 \mu\text{m}$ [3, 4].

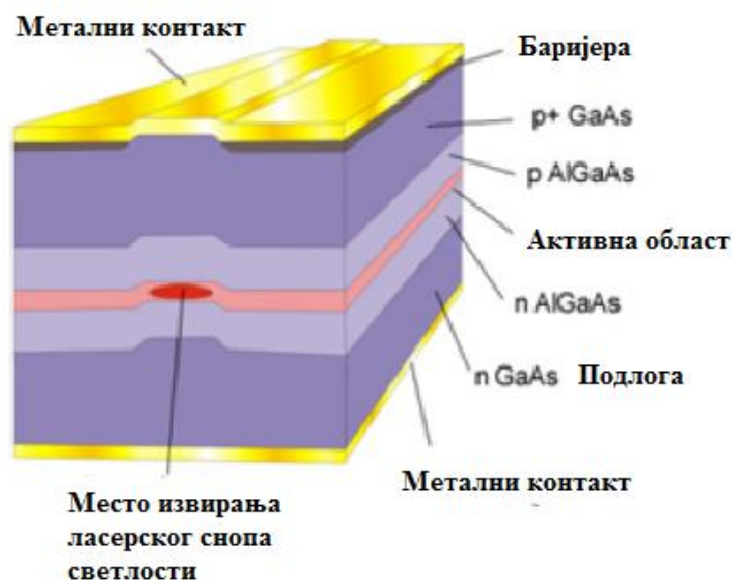


Слика 2.9. Шема Nd: YAG ласера [8]

Nd: YAG ласер је ласер који може да ради и у импулсном и континуалном режиму рада тако што се приликом рада у импулсном режиму користе ксенонске лампе а приликом континуалног се користе криптонске [3].

Предност Nd: YAG ласер се огледа у томе што поседује висок степен топлотне проводљивост и отпорност, малу осетљивост на високе температурне градијенте чиме се омогућава његово хлађење, такође овај ласер одликује висока прозирност и висок степен полирања. Недостатак овог ласера је у томе што активна средина овог ласера спада у групу врло тврдих материјала који у својој обради захтевају коришћење дијамантских алата и као такав је тежак за израду [4].

Код полупроводничких ласера активна средина је полупроводник и у чврстом је агрегатном стању, али су издвојени у посебну групу због специфичности везаних за начин формирања инверзне насељености и процеса настанка емисије ласерског зрачења, слика 2.10. Постоји више врста полупроводничких ласера који имају различиту структуру.



Слика 2.10. Полупроводнички ласер [9]

Полупроводнички ласери се израђују најчешће са малим јачинама и као такви немају примену у обради материјала већ се користе у мерној техници, холографији и фотографској техници због своје мале јачине [4].

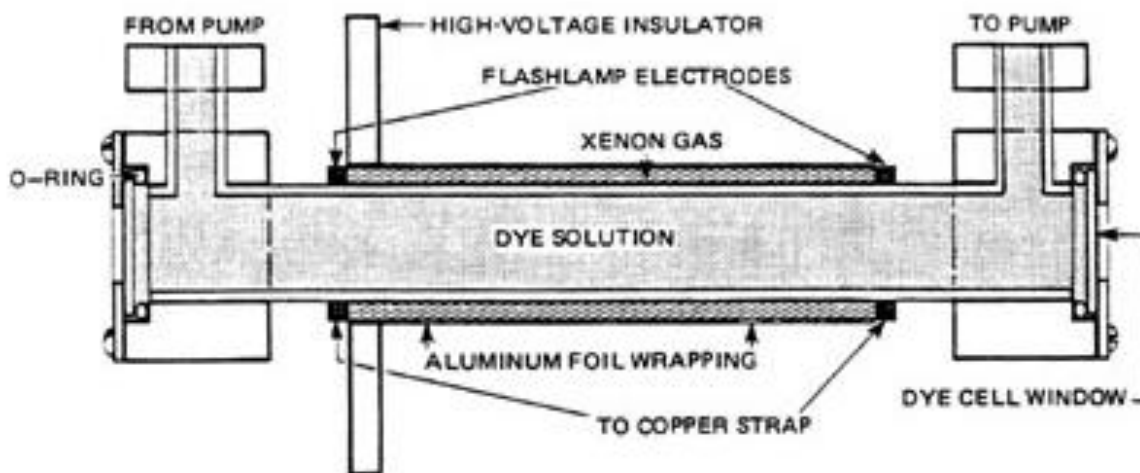
2.3.2. Течни ласери

Течни ласери су они ласери код којих је радна средина у течном агрегатном стању. Први течни ласер је направљен 1961 године. Течни ласери се могу поделити у две велике групе на основу типа раствора (активне средине) и то на [3, 4]:

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

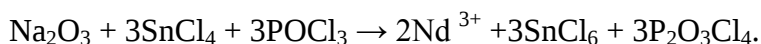
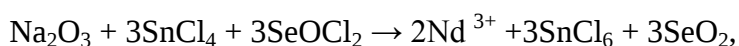
У течним ласерима количина активних честица је иста као и код чврстих ласера што омогућава добијање велике енергије зрачења по јединици запремине као код чврстих ласера. За разлику од чврстих ласера оптичка хомогеност код течних ласера је већа (зато што у чврстим телима постоје неправилности) а самим тим се смањују и губици. Хлађење активне средине се врши циркулацијом, слика 2.11 [4].

Недостатак ових ласера се огледа у томе што се у раствору ствара талог који смањује ласерско зрачење. Стварање талоба означава временску нестабилност раствора који почиње да има значајан утицај после максимално два месеца.



Слика 2.11. Импулсни ласер на бази органских боја[10]

Ласери на бази неорганских једињења су они ласери који користе као радну средину растворе са неорганским једињењима базираним на раствореним солима неодијума у неорганским течностима као што су SeOCl_2 (селен оксидихлорид) и POCl_3 (фосфороксихлорид) у приситви SnCl_4 или ZrCl_4 . У оваквим рстворима настају следећа хемијска једињења [3]:



Ласери на бази органских једињења су ласери са веома добрим карактеристикама као што је особина да се њихове таласне дужине могу мењати континуирано у широком опсегу. Зрачење ових ласера може бити у области од блиског ултраљубичастог до блиског инфрацрвеног подручја спектра. Таласна дужина светлости течних ласера са органским бојама може се мењати континуално у ширим интервалима таласне дужине него код гасних и ласера чврстог стања, а ширина опсега таласних дужина је често (50–100) nm и више [3, 4].

Органске боје које се најчешће користе као активна средина код ових ласера су: родамин 6G, родамин В, П -терфенил, кумарин 2, кумарин 6, итд. Као растварачи ових боја се могу користити алкохоли (етил-алкохол, метил-алкохол), бензол, етанол или вода. Приликом побуђивања ласера са органским бојама долази до разлагања боја што доводи до смањења излазне снаге ласера и губитака енергије [3, 4].

2.3.3 Гасни ласери

Гасни ласери су ласери код којих је активна средина у гасовитом агрегатном стању. Гасови који се најчешће користе за активну средину код гасних ласера су мешавина хелијума и неона (He-Ne), аргон (Ar), криптон или угљендиоксид (CO₂) [3].

Гасове као активну средину одликује оптичка хомогеност која је већа него код активних средина у чврстом и течном стању. Због своје мале густине у гасовима не долази до расипања ласерског зрака и његовог изобличења. Због оваквих карактеристика радне средине могуће је изградити ласера код којих је раздаљина између огледала у резонатору велика која је последица велике оптичке хомогености радне средине за разлику од чврстих. Код ласера са гасном активном средином се лакше постиже усмеравање ласерског зрака као и монохроматичност [4].

Код ласера са гасовитом радном средином побуде се може извршити пражњењем кроз гас оптичким, радиоталасима, али најчешће примењиван облик побуде код ових ласера се остварује сударом са слободним електронима за време пражњења гаса. Овај поступак се постиже тако што се на електроде, уграђене у цев ласера, доводи се електрични напон након чега, под дејством електричног поља електрони између аноде и катоде се убрзавају и сударају са честицама гаса и долази до екситације гаса у цеви. Електрон заправо, предаје део енергије честици и доводи је у побуђено стање [3, 4].

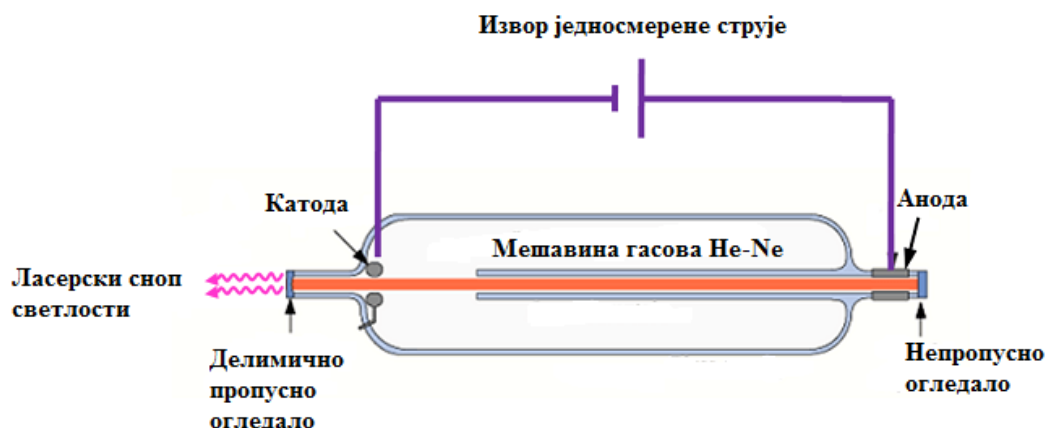
Недостатак гасне активне средине се огледа у томе да не постоји велика концентрација активних честица која могу да ућествују приликом побуђивања и да стварају светлост приликом ослобађања енергије. Као последица мале количине активних честица ласери са оваквом активном средином не могу да постигну импулсе велике снаге [4].

У пракси се разликују три типа ласера на бази пражњења гасова [4]:

- ласери са неутралним атомима,
- јонски ласери и
- молекуларни ласери.

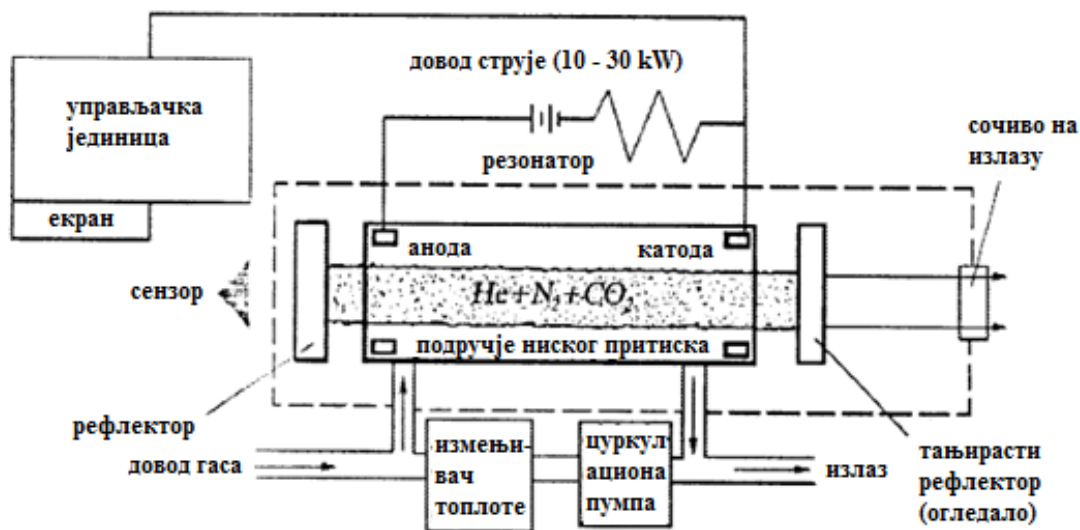
He-Ne ласер је ласер који као активну средину котишти мешавину гасова Хелијума и неона (слика 2.12). Овај ласер се користи у случајевима када није потребна велика снага као што је скенирање бар-кодова, различита мерења, итд. Побуда активне супстанце врши се електричним пражњењем кроз смешу хелијума и неона при притиску од око 100 Pa. Пражњењем у смеси гасова настаје и одржава се струја јачине 10 mA – 20 mA. Активна супстанца код овог ласера је смеша хелијума и неона у размери 10:1 [3].

Побуда се постиже електричним пражњењем кроз гасну мешавину Хе-Не једносмерном или наизменичном струјом. Електрони који се убрзавају између аноде и катоде се сударају са атомима хелијума и неона у ласерској цеви и тако велики број атома хелијума и неона прелази у побуђено стање [3].



Слика 2.12. He-Ne ласер [11]

CO₂ ласер се састоји од гасне смеше CO₂, He и N₂, са односом унутар смеше 1:1:8 при чему активну средину ласера сачињавају молекули CO₂. CO₂ ласер спада у групу молекулских ласера. Ласерски снап има таласну дужину светлости $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, која је десет пута већа од стаклених и YAG-ласера. Ови ласери могу да раде у импулсном и континуалном режиму, а као индустријски ласери имају снагу и до 15 kW (слика 2.13) [3, 4].



Слика 2.13. Принципијелна шема CO₂ ласера

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 [4]:

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

CO₂ ласер се одликује великом излазном снагом и високом ефикасношћу (10-30%) конверзије електричне енергије у оптичку. Хелијум има висок коефицијент топлотне проводљивости и његово додавање активној средини CO₂ ласера доприноси бољем хлађењу угљендиоксида [3].

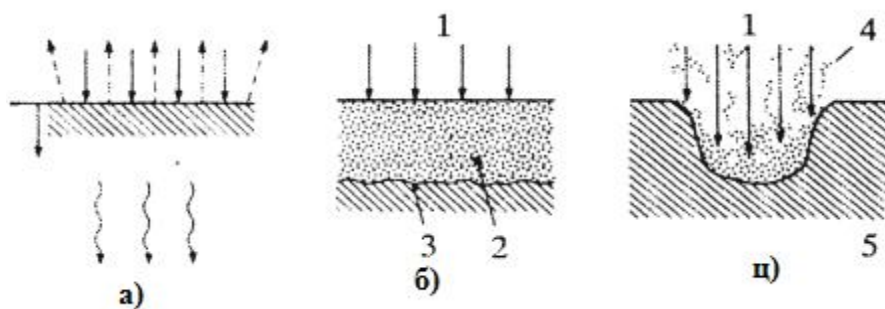
Овакви ласери имају велику снагу, а у импулсном режиму рада и већу него у континуалном режиму па су нашли широку примену у металопрерађивачкој индустрији за радне операције као што су бушење, сечење, заваривање, маркирање, термичка обрада на различитим материјалима, наношење тврдох превлака итд. [3, 4].

2.4. Принципи ласерске обраде

Принцип ласерске обраде се заснива на излагању радног кома од чврстог непрозирног материјала ласерском снопу светлости, приликом оваког процеса у површинском слоју материјала и одређеној дубини изложене површине јављају се различити физички процеси. Приликом дејства ласерског снопа у подручју дејства долази до загревања материјала, топљења и на последку испаравања материјала из зоне обраде. Приликом обраде ласером могу се уочити следеће фазе (слика 2.14) [4] :

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

Поред наведених процеса које се одвијају постоје још многи други процеси као што су хемиски процеси и фазне трансформације које имају утицај на карактеристике ласерског дејства [4].



Слика 2.14. Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом

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

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

Приликом падања на материјал у обраде део ласерског снопа од одбија (рефлектује) и таласне дужине светлости, густине снаге ласерског зрачења, топлотне проводљивости материјала предмета обраде, специфичне енергије потребне за одређену обраду итд. [4].

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 [4]:

- густина снаге ласерског зрачења q ,
- просторна расподела густине снаге q_r ,
- време трајања импулса t_i ,
- таласна дужина ласерског зрачења λ ,
- услови фокусирања,
- дубина продирања ласерског импулс у материјал x ,
- апсорбовани део ласерског зрачења $\alpha=1-R$.
- рефлексија ласерског зрачења R (табела 2.1), итд.

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

Таласна дужина ласерског зрачења μm	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

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

- Гаусова и
- равномерна.

За нормалну расподелу густине снаге важи израз:

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

где су:

q_0 - максимална густина снаге,

k - коефицијент који одређује степен оштрине просторне расподеле и

r - радијална компонента.

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

Израз за густину снаге ласерског млаза на озраченој површини, да би се достигла температура топљења материјала [4]:

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

где су:

λ_θ - коефицијент топлотне проводљивости материјала предмета обраде и

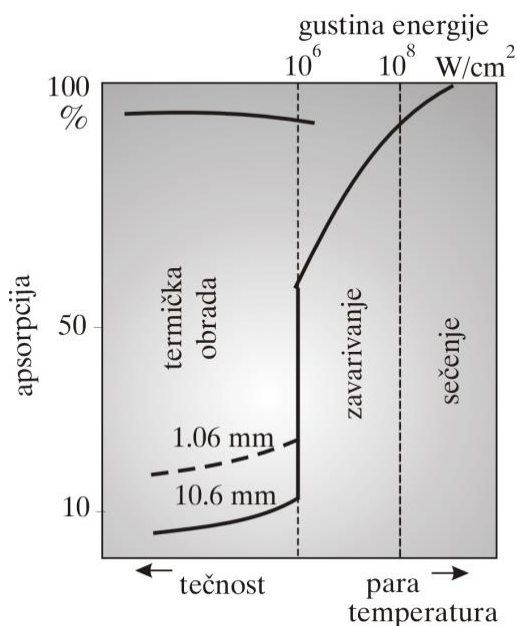
T_t - температура топљења материјала предмета обраде.

Падајући на материјал, свелосни сноп ласерских зрака се у мањој или већој мери апсорбује у његовој површини. Апсорпција снопа фотона у материјалу врши се у правцу снопа нормално на површину. Густина снаге ласерског зрачења слаби са дубином продирања, по закону [4]:

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

Дубина продирања зрачења x у материјал предмета обраде, окарактерисана је растојањем на коме се густина снаге зрачења смањује e пута ($e=2.7182$) [4]. Ово растојање једнако је реципрочној вредности коефицијента апсорпције α .

За већи број метала, поред пораста температуре површинских слојева, поспешује се стварање оксидног слоја, који има значајно мали коефицијент рефлексије, односно велики коефицијент апсорпције и при $\lambda=10.6\mu m$, слика 2.15 [4].



Слика 2.15. Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала

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[4]:

$$\alpha = 1 - R$$

Карактеристично је да коефицијент апсорпције и рефлексије, са једне стране, зависе од карактеристика извора ласерског зрачења и оптичког система, а са друге, од особина обрађиваног материјала. Апсорпција зависи и од стања површине предмета обраде параметра храпавости, предходне обраде, нечистоће, оксидних превлака, итд, као и од режима обраде брзина померања снопа ласерских зрака, димензија светлосне мрље.

Повећањем брзине обраде и пречника светлосне мрље, може се битно повећати апсорпциона способност $A \%$. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снижити рефлексиона способност повећањем храпавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака [4].

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

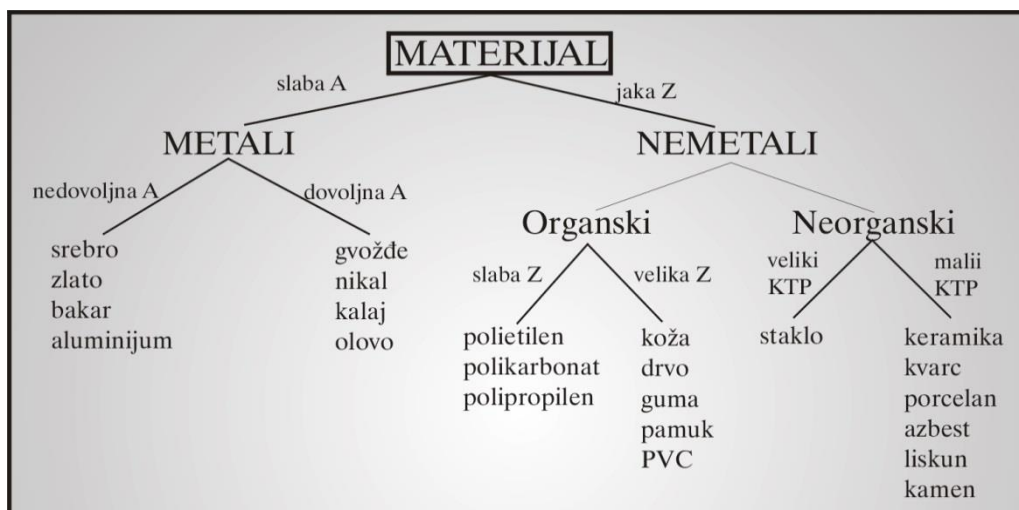
$$A = a + bT$$

где је:

T , K - температура површине која апсорбује зрачење и

a , b - коефицијенти добијени експериментом.

На слици 2,16 приказан је утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост



Слика 2.16. Утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост [4]

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

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

где је:

k - термичка проводност материјала предмета обраде,

T_t - температура топљења материјала предмета обраде,

λ - температура топљења материјала предмета обраде,

α - коефицијент апсорпције и

C - константа блиска јединици која узима у обзир апроксимације.

Апсорпција је битна само у првом тренутку интеракције снопа ласерских зрака са материјалом предмета обраде, касније доминантну улогу има топлотна дифузија материјала предмета обраде, која се означава са a и изражава у cm^2/s . Помоћу коефицијента топлотне дифузије може да се одреди дубина продирања топлоте за време t помоћу израза [4]:

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

или време топлотне дифузије за материјале дебљине X [4].:

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

За танке лимове може се израчунати температуру у центру светлосне мрље, помоћу израза [4]:

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

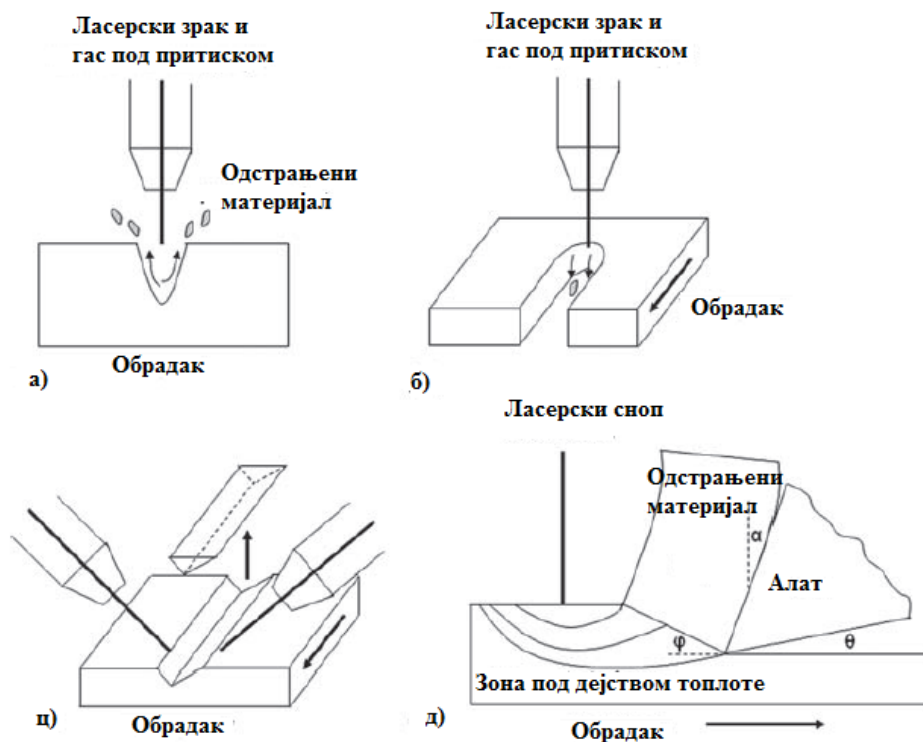
Сви ови параметри и њихова међузависност указују на комплексност ласерске обраде. Истраживања и прорачуни су утолико сложенији што ови параметри не остају константни за време обраде материјала већ се непрекидно мењају услед промене температуре, густине и притиска [4].

2.5. Технолошке операције ласерске обраде

Због својих карактеристика и убрзања процеса обраде ласери се користе у индустрији као средство за обраду материјала и у зависности од тога колико степена слободе и кретања поседује материјал који се обрађује и систем за довођење ласерског зрака постоје једно-осни, дво-осни и три-осни ласери. У зависности које радне операције се примењује од тога ће такође зависити и степени слободе кретања ласера. Ласери се у највећој мери у индустрији примењују за бушење, сечење и наношење материјала, слика 2.17. У индустријама где се врши брза и масовна производња употреба ласера је подразумевана јер је економична и ефикасна у многим производним операцијама [12].

Приликом обраде ласером постоје одрађена ограничења у погледу геометрије делова који се могу обрадити и дубини избушених рупа. Овај проблем се може превазићи пажљивим дизајнирањем система обраде и самим тим се могу померити

границе ограничења. Приликом коришћења ласерске обраде могу се појавити нежељене последице у погледу одступања од задате геометрије као и металуршки дефекти као што су конус и слој материјала оштећен утицајем топлоте [12].



Слика 2.17. Основни процеси обраде ласером

а) бушење, б) сечење, в) глодање и г) комбинована метода обраде [12]

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:

- густина снаге q_c и
- трајање дејства ласерског снопа τ

Густина снаге је:

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

где је:

N, W - снага ласерског снопа и

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

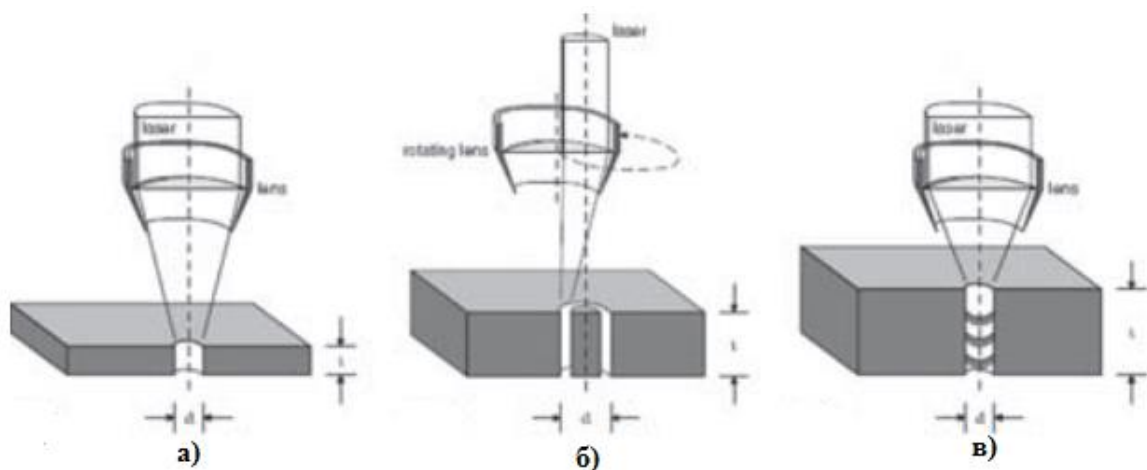
2.5.1. Ласерско бушење

Прва намена првог направљеног ласера са рубинском активном средином је била да врши процес бушења рупе у материјала. Ласерско бушење се најчешће примењује у астронаутичкој, авио и аутомобилској индустрији. У астронаутичкој индустрији је на[ао примену за бушење великог бороја рупа изузетно малих пречника са малим размацама и високим квалитетом, ова обрада се користи код турбинских мотора како би се побољшало хлађење појединих компонента мотора [12].

Бушење једним импулсом (*Single pulse drilling*) је бушење које се користи за бушење уских рупа пречника мањег од 1 mm у материјалу мање дебљине од 1 mm. Висока количина енергије се користи приликом бушења једним импулсом зато што је потребно да се у зони обраде доведе довољна количина енергије како би се материјал испарио у једном импулсу, слика 2.18а) [12].

Кружно бушење (*In trepanning*), је процес бушења рупа у материјалу пречника до 3mm на материјалу дебљине до 10 mm серијом бушења рупа по ободу кружнице. У том процесу се буши низ рупа које се преклапају по ободу кружнице и на крају тог процеса остаје језгро које испада и настаје жељена рупа у материјалу. Описани процес је сличан процесу сечења контуре у материјалу. Овај процес се може спровести када ласер ради у континуалном режиму и импулсном режиму рада. CO₂ и Nd:YAG ласери се најчешће користе приликом ове методе бушења ласером [12].

Бушење кратким импулсима (*In percussion drilling*), је процес бушења у који се састоји од бушења у кратим импулсима трајања 10^{-12} s до 10^{-3} s са размаком између сваког импулса дужег од 10^{-2} s. Сваки од ових импулса је усмерен у исту тачку. Сваки импулс ласера скида одређену количину материјала. Импулсни Nd:YAG ласери су идеални за овакав процес бушења због своје велике снаге по импулсу [12].

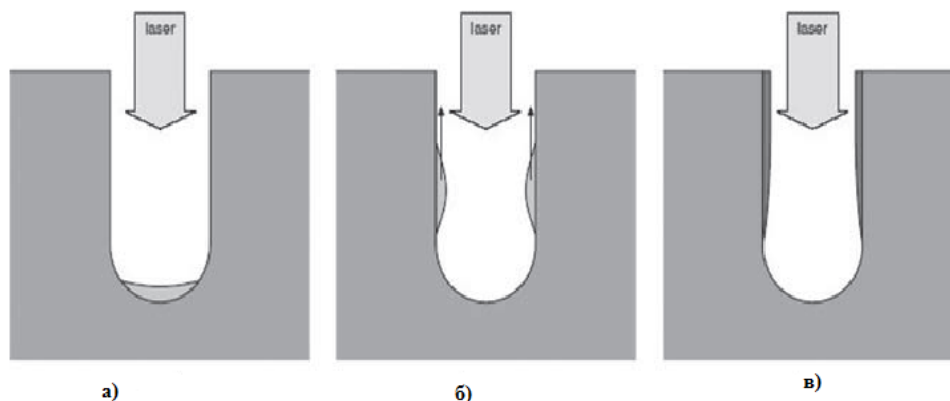


Слика 2.18. Методе ласерског бушења

а) Једнопулсно бушење, б) Кружно бушење (*In trepanning*), в) Бушење кратким импулсима [12]

Физички процеси који се јављају у процесу ласерског бушења могу се поделити у три фазе које су приказани на слици 2.19 физички процеси приликом ласерског бушења.

У првој почетној фази мала површинска количина материјал врши апсорпцију енергије ласера (топлотну енергију). После одређеног време изложена површина која је прешла у течно стање достиже температуру испаравања. Нагло ширење паре која је испарила из истопљеног материјала доводи до фазе прстакања (the splashing stage), када повратни пристисак изгура истопљени материјал вертикално из зоне обраде. Ова фаза настаје када пристисак достигне довољну количину силе да савлада површинске силе отпора у истопљеном материјалу. Приликом ибацивања истопљеног материјала из рупе која се буши један део истопљеног материјала се лепи на зидове рупа и не бива избачен из зоне обраде. Материјал који заостане у зони обраде после одређеног времена се хлади и формира филм заосталог материјала [12].



Слика 2.19. Физички процеси приликом ласерског бушења

- а) формирање истопљеног материјала, б) фаза избацивања истопљеног материјала
в) формирање чврстог слоја од заосталог материјала [12]

Најчешће коришћени начини за одвођење истопљеног материјала приликом ласерског бушења из зоне обраде јесу испаравањем материјала и физичким одстрањивањем. Приликом одвођења материјала чисто испаривањем, нема заостали материјал и са правилног геометријом рупе. Са друге стране отклањање материјала испаравањем захтева велику количину енергије. Генерално посматрано за испаравање материјала из зоне обраде је потребно до четири пута више енергије него код физичког одстрањивања материјала. Док код физичког одстрањивања истопљеног материјала јавља се неправилности као и геометријска неправилности избушених рупа. Ова два упоређивања доводе до закључка да идално обрађена површина се постиже испаравањем материјала уз високу цену обраде док се за обраду физичким одстрањивањем требају радити делови који захтевају мањи квалитет обраде или се врши додатна обрада како би се део довео у жељени опсег квалитета [12].

Максимална количина уклоњеног материјала може да се одреди под претпоставком да је укупна количина апсорбоване енергије (E) искоришћена за испаравање материјала и да је облик рупе који се добија цилиндричан, површине A и дубине H .

Енергија потребна за испаравање јединице запремине материјала предмета обраде тада је дата изразом:

$$E_1 = \rho [c_v + c(T_i - T_o)]$$

Где су:

ρ - специфична густина материјала предмета обраде,
 c_v - латентна топлота испаравања материјала предмета обраде,
 c - специфична топлота материјала предмета обраде,
 T_i - температура испаравања материјала предмета обраде,
 T_o - температура околине.

Дубина бушења је одређена изразом:

$$H = \frac{\varepsilon \cdot E}{A \cdot \rho [c_v + c(T_i - T_o)]}$$

У пракси се, за одређивање дубине и пречника рупе код ласерског бушења, користе експериментално добијени изрази облика:

$$H = C_H E^{x_H} \cdot t_i^{y_H} \cdot f_s^{z_H}$$

$$D = 2.44 \frac{\lambda}{d} C_D E^{x_D} \cdot f_s$$

Где су: C_H, C_D - коефицијент обрадљивости материјала,

E - енергија зрачења,

t_i, s - трајање импулса зрачења,

f_s, cm - жижна даљина сочива,

λ - таласна дужина зрачења ласера,

d, mm - пречник ласерског материјала,

x_H, y_H, z_H, x_D - експоненти зависни од материјала обрадљивости.

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

Параметар којим се дефинише храпавост код ласерског бушења, најчешће се одређује на основу експериментално добијених израза, облика:

$$R_z = C \cdot E^x \cdot t_i^y \cdot n^z$$

Где су: $R_z, \mu\text{m}$ средња висина неравнина,

C - коефицијент,

E, J - енергија импулса,

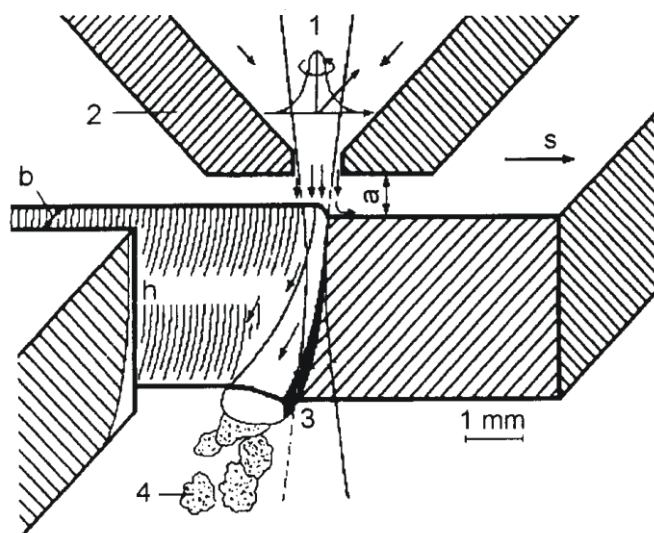
t_i, s - трајање импулса,

n - број импулса,

x, y, z - експоненти.

2.5.2. Сечење ласером

Процес сечења материјала ласером је дво-димензионални поступак обраде у коме се ласерски сноп светлости усмерава ка предмету обраде. Процес сечења се одвија тако што се површина материјала загрева и топи (испара у зависности од процеса) све док се не пробије у дубину материјала и на тај начин начини почетак путање сечења. Истопљени материјал се из зоне обраде уклања уз помоћ усмереног гаса под притиском. Помоћни гас приликом сечења нема само улогу уклањања истопљеног материјала, него и подпомаже и подстиче процес одстрањивања материјала кроз хемиске реакције. Након почетне фазе сечења процес се наставља тако што се помера ласерска глава по површини материјала. Овај процес се може спровести и померањем материјала, слика 2.20. Процес померања зависи од конструкције вођења ласерске машине.



Слика 2.20. Шематски приказ ласерског сечења

Процес сечења ласером је брз процес, поновљив и поуздан где се могу сећи разне врсте материјала и дебелина при чему се добија рез са уским пречником. Овај процес сечења је нарочито погодан за полуаутоматске или потпуно аутоматизоване процесе сечења при серијама великог обима. Неке од предности ласерског сечења су:

- Безконтактни процес: обрадак не мора да се стеже или да се позиционира у стегима као код конвенционалних поступака. У процесу сечења нема варијација у квалитету зато што не постоји алат који би се трошио.
- Аутоматизација: већина ласерски машина се контролише ЦНЦ-ом чиме се обезбеђује прецизно вођење и постизање задатих димензија резања уз велике брзине резања.
- Велика брзина резања: ласерско сечење је брз процес. Типичне брзине сечења материјала за угљеничне челике дебелине 4 mm са CO₂ ласером снаге 1,250 W износе 3 m/min.

- Фин и прецизан пречник сечења: ласерско сечење оже да се одвије се веома уским резом око 0.1mm, како би се процес могао користити за фино сечење профила.
- Бољи квалитет реза: ласер загрева и топи материјал у локалној средини тако да је минимално топлотно дејство на материјал.
- Флексибилан процес: ласерско сечење се може користити за различите врсте материјала како металних тако и неметалних.

Постоје три методе сечења ласером:

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

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

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

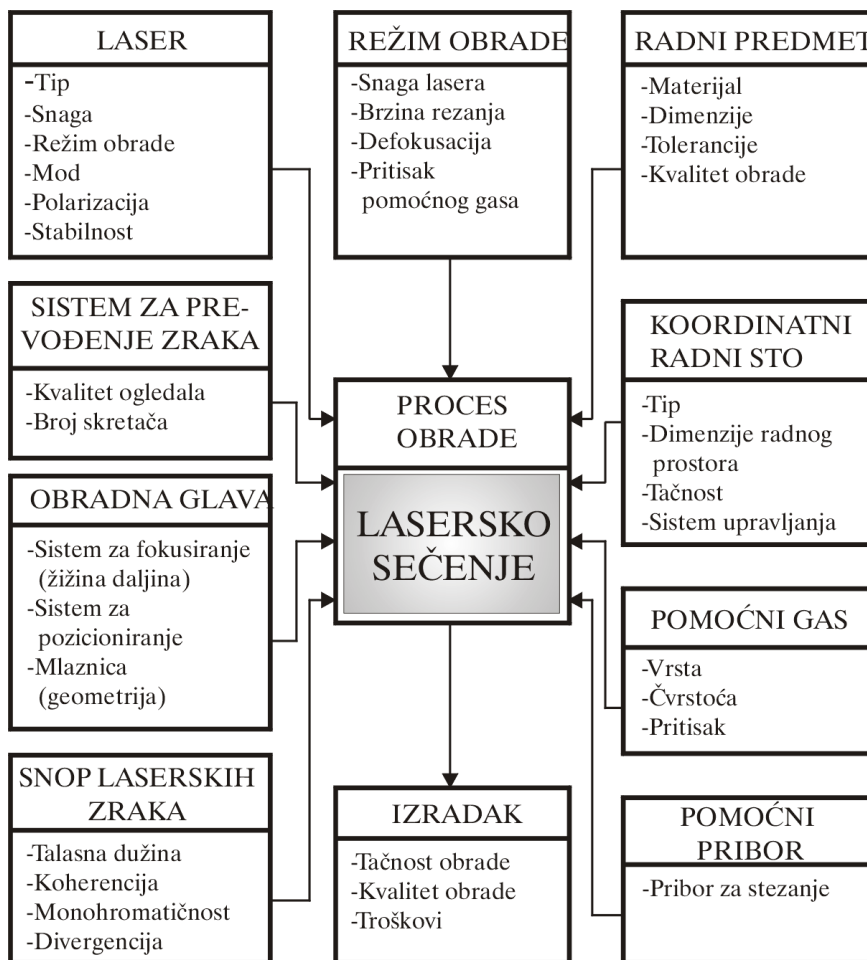
Где су:

- 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.

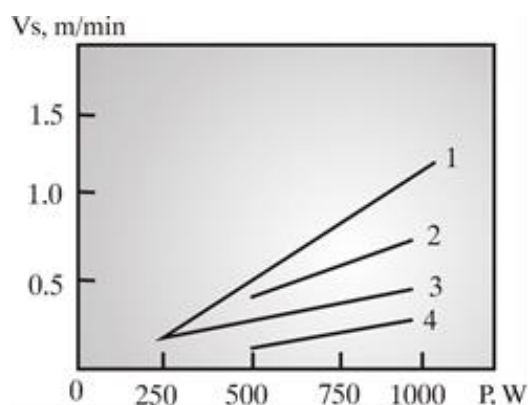
Параметри који навише утичу на процес ласерског сечења могу се видети на слици 2.21. и могу сврстати у следеће групе везане за:

- ласер;
- снап ласерских зрака који представља алат у процесу обраде;
- обрадна глава;
- координатни радни сто;
- радни предмет
- прибор за стезање;
- режими обраде и
- околина (радни услови: чистоћа, вибрације).



Слика 2.21. Фактори који утичу на процес ласерског сечења

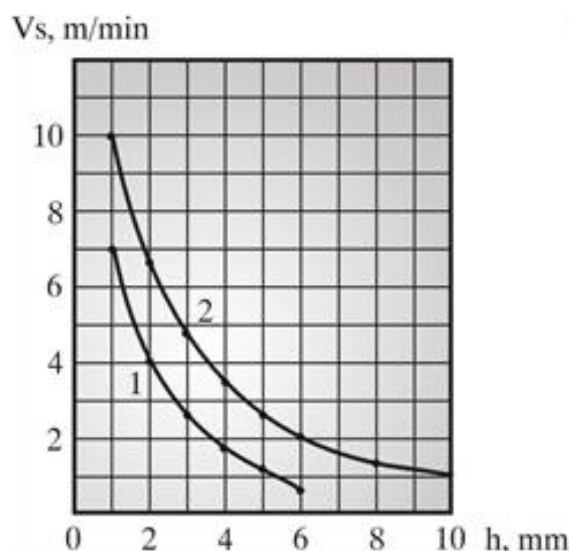
Снага ласера је једано од главних карактеристика ако не и најважнина на основу које се врши одабир ласерске машине за обраду. Сечење ласером је термички процес обраде материјала и као такав има велики утицај на могућности ласер. Како се повећава снага ласера тако се могу сећи дебљи материјали и повећавати сама брзина сечења ласером. На слици 2.22. може уочити утицај снаге ласера на брзина сечења материјала.



Слика 2.22. Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале:

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

Продуктивност било које производње зависи од брзине обављања процеса, такав је случај и са ласерском обрадом. По значају брзина сечења материјала се налази одмах испод снаге ласера и зависи од следећих фактора: снаге ласера, мода, величине светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета итд. Ако се при истој дебљини материјала већа снага ласерског зрачења онда се може извршити и повећање брзине сечења материјала. Као максимална брзина сечења узима се она брзина изнад које настају одређене нестабилности у процесу обраде као што су појава неравнина резова, појава шљаке итд. Једна од зависности се може уочити на слици 2.23.



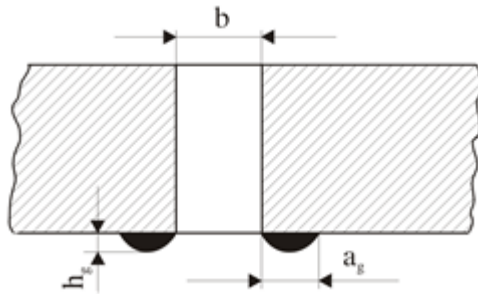
Слика 2.23. Зависност максималне брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике: 1. $P=625\text{ W}$, 2. $P=1250\text{ W}$

Жижна даљина сочива има утицај на густину снаге, потребно је изабрати одговарајуће сочиво како би се добио жељени квалитет реза. Светлосна мрља у жижи расте са порастом жижне даљине пропорцијално. Сочива мале жижне даљине имају могућност веће концентрације снопа ласерског зрака и дају велику количину енергије али њихова обрадне могућности су ограничене. Оваква сочива су погодна за сечење материјала млих дебљина при чему је брзина сечење велика. Сочива веће жижне даљине имају мању густину снаге али се могу користити за сечење дебљих материјала. Одабир жижне даљине се врши на основу врсте материјала који се обрађује и његове дебљине и она се позиционира на или незнатно испод површине предмета обраде. Приликом сечења материјала жижа мора да здржи задату димензију одстојања од површине предмета обраде.

Помоћни гас у процесу резања има задатак да заштити сочиво и помогне у процесу опдстрањивања истопљеног материјала. У монгим процесима се користе и гасови као што је кисеоник који спада у групу реактивних гасова који потпомаже процес сечења са повећањем брзине од 25% до 40%.

Квалитет обраде код сечења ласером је одређен квалитетом реза и тачношћу облика и димензија. Квалитет реза се обично дефинише геометријским карактеристикама (ширина реза, храпавост обрађене површине) и физичко-хемијским карактеристикама на израженој површини материјала предмета обраде. Квалитет и тачност обраде сечења ласером, у највећем степену зависе од: брзине резања, снаге

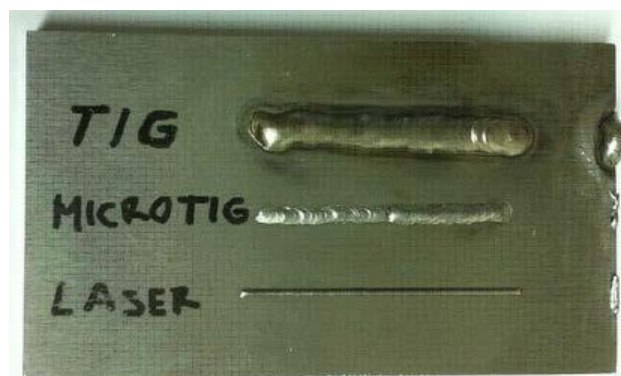
ласерског млаза, врсте и притиска гаса, пречника и положаја млазнице у односу на површину предмета обраде, као и од квалитета управљачке јединице у случају НЦ или ЦНЦ ласерске машине за сечење лима. Храпавост материјала је један од значајних фактора при ласерској обради и показује колико је процес прилагођен материјалу. Визуално се може уочити да постоје две зоне храпавости једна на улазу ласерског зрака а друга на излазу ласерског зрака. Разлика између ових две зона расте са порастом дебљине материјала а код материјала мањих дебљина готово да није приметна. Такође као показатељи квалитета јесу и гребени који представљају заостали материјал на излазној страни који знатно утичу на знатно погоршање квалитета, слика 2.24.



Слика 2.24. Појава гребена при ласерском сечењу

2.5.3. Ласерско заваривање

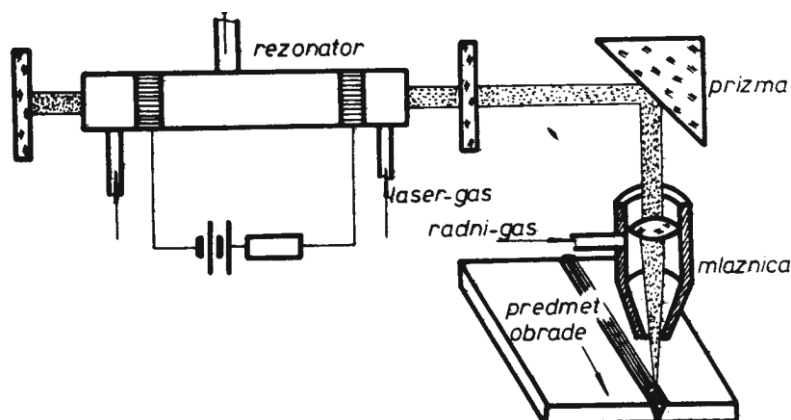
Ласерско заваривање се у модерној индустрији развило у битан процес за спајање различитих врста материјала који могу бити метали и неметали. Развојем ласера високе снаге процес заваривања ласером се развио да може врши заваривње дебљих материјала високом брзином и бољим квалитетом од осталих метода. Због своје безконтактне методе обраде материјала омогућен је високи степен слободе обраде материјала и економичност, слика 2.25 [12].



Слика 2.25. Упоредни приказ ласерског заваривања [13]

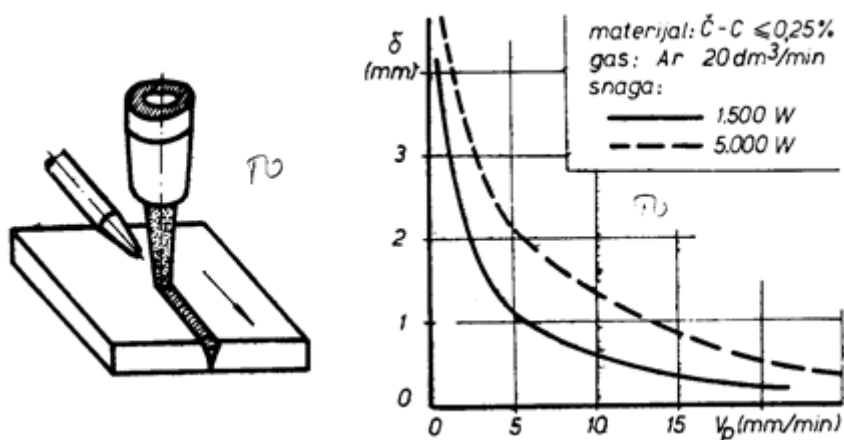
Заваривање ласером представља технолошки процес код кога се спајање материјала одвија топљењем материјала на месту спајања два елемента. Приликом заваривања ласер производи импулсе у дугачиким временским интервалима од $1-10\text{ ms}$ са максималном снагом од $10-100\text{ kW}$. Трајање импулса мора да буде довољно дуго да

се у нижим деловима материјала достигне температура топљења одвођењем топлоте са горњег дела површине. Приликом овог процеса треба водити рачуна да се не подиже температура материјала изван границе топљења како не би дошло да испаравања материјала из зоне обраде и самим тим смањио квалитет заварног споја (слика 2.26).



Слика 2.26. Принципијална шематски заваривања ласером

Код процеса заваривања ласером ласерски зрак врши продор у материјал и ствара танку рупу око које се налази истопљени материјал. Померањем ласерског снопа претходно направљени празан простор се испуњава истопљеним материјалом и формира уску заварену зону, слика 2.27.



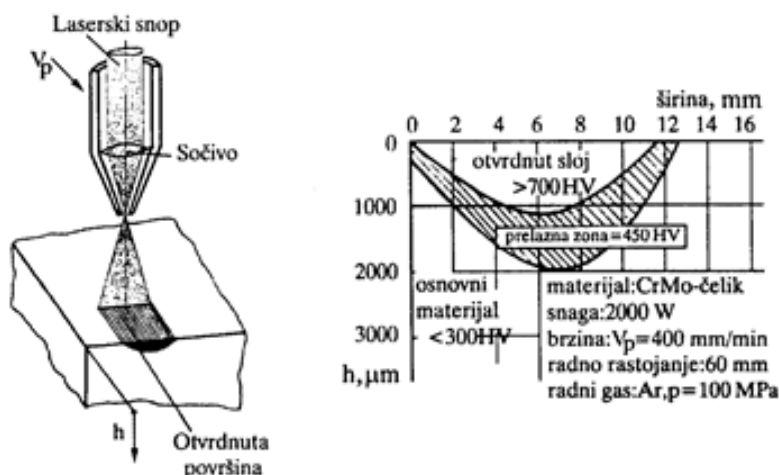
Слика 2.27. Принципијелна шема постројења и брзина процеса заваривања елемената

Ласерска техника и технологија се све шире примењује за извођење производних операција заваривања, јер обезбеђује низ предности:

- загревање веома уске зоне у околини шави,
- непропустљивост спојева на резервоарима испуњеним различитим течностима,
- микрозаваривање код микрошема и других елемената микроелектронике,
- заваривање неметала (стакла, керамике и сл.).

2.5.4. Ласерска термичка обрада

Ласерска термичка обрада подразумева отврдњавање површине материјала загревањем, топљењем и ударним оптерећењем. Термичка обрада се може спровести за целу повшину дела који се обрађује а може се вршити и отврдњавање само одређеног дела површине који ће бити изложен хабању. Приликом процес отврдњавања битно је доводити правилно средства за хлађење како би се површина правилно обрадила и не би дошло да нежељених ефеката, слика 2.28 [4].



Слика 2.28. Принцип отврдњавања ласером и облик и димензије отврднутог слоја

Саме карактеристика отврднутог слоја материјала ће зависти највише од ласерског снопа и других параматара, ови параметри ће се мењати како се мења дебљина отврднутог слоја као и ширина тог слоја. Тврдоћа слоја обрађеног материјала ласером је 3-5 пута већа у ондосу на индукционо каљење, отпорност на хабање и повећање производности чак за 70-80%. 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.

Погодности ласерске термичке обраде се огледају у томе да се могу обрађивати само одређени делови површине неког материјала без додатног утицаја на материјал чије основне особине остају непромењене.

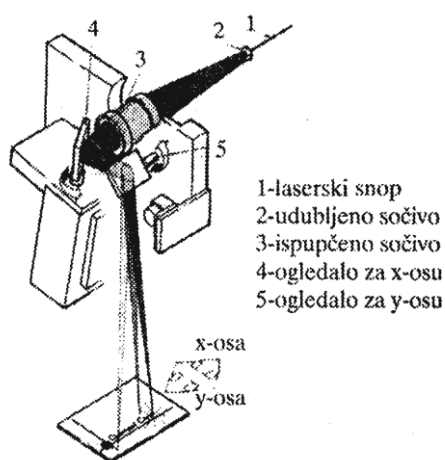
Зависно од густине снаге ласерског зрачења и времена његовог дејства, остварују се поједини поступци површинског отврдњавања:

- ласерско каљење;
- ласерско уситњавање зрна структуре материјала;
- ласерско покривање површине додатним материјалом;

- ласерско легирање површинског слоја и
- ласерско отврдњавање површине дејством ударног таласа.

2.5.5. Ласерско гравирање

Ласерско гравирање представља процес приликом кога долази до загревања (паљења код поједних материјала), топљења и испаравања материјала који је изложен ласерском снопу. Сам процес је чист, нема контакта, без влаге, флексибилан и веома економичан. Технологија гравирања ласером омогућава штампу на различитим неметалним материјалима као што су дрво, кожа, клирит, пластика, гума, стакло, мермер и слично (слика 2.29) [12].



Слика 2.29. Шема рада савремене машине за гравирање ласером

Предности брендирања артикала ласерском гравуром, у односу на било коју штампу, је што је гравуру немогуће скинути нити оштетити јер се приликом гравуре скида слој материјала где је прошао ласерски сноп. Отисак - гравура је отпорна на хемикалије, УВ зрачења и огреботине [12].

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

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

3. ЛАСЕРСКА МАШИНА

Ласер је произведен од стране компаније под називом „Jinan Bodor Laser Corporation“ Кина, и спада у групу ласере под ознаком F, слика 3.1. Ознака F означава да ласер спада у групу фибер ласера. Ова врста ласера је намењена за сечење металних материјала. Процес сечења се одвија излагањем материјала који се обрађује ослобођеној енергији, а вишак материјала се уклања из зоне обраде уз помоћ одређене врсте гаса под притиском [14].



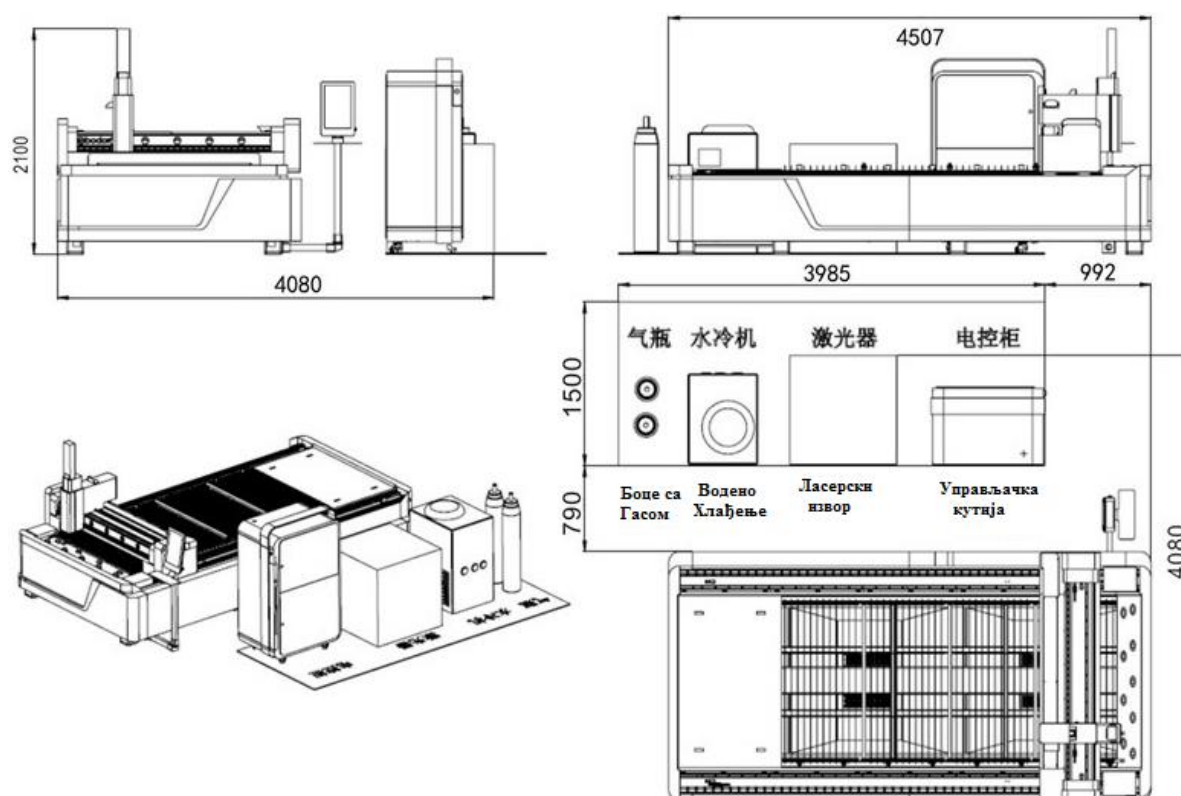
Слика 3.1.Изглед ласера серије F1530[14]

Процес сечења ласером је једна од напреднијих метода сечења која омогућава високу ефикасност и прецизност вођења као и глаткоћу одсечене површине које немгуће или веома тешко постићи другим методама сечења [14].

Неке од главних карактеристика предходно приказаног ласера су [14]:

- високо квалитетни извор и стабилни оперативни систем ласера омогућава оптималну ефикасност,
- одлично хлађење, подмазивање и систем за одстрањивање прашине омогућавају стабилан, поуздан и ефикасан рад машине,
- покретно постоље и уређаји за контролисање кретања попречног носача чине уређај прецизним и стабилним као и отпорним на вибрације и ударе,

- аутоматски систем подешавања омогућава одржање константне жижне удаљености и самим тим одржава квалитет сечења,
- омогућава сечење разних врста металних материјала и остварује добре и стабилне резултате приликом сечења,
- вођење помоћу линеарних вођица и зупчaste летве као преносних елемената омогућава високо прецизно и брзо вођење,
- Опремљеност са специјалним аутоматским CAD/CAM програмирањем и програмом за максимално искоришћење материјала у току обраде, оптимизација распореда елемената на табли,
- Могућност контроле и праћења процеса сечења на даљину се одвија директном комуникациом преко интернета са нумеричким системом за управљање.



Слика 3.2. Цртеж делова машине [14]

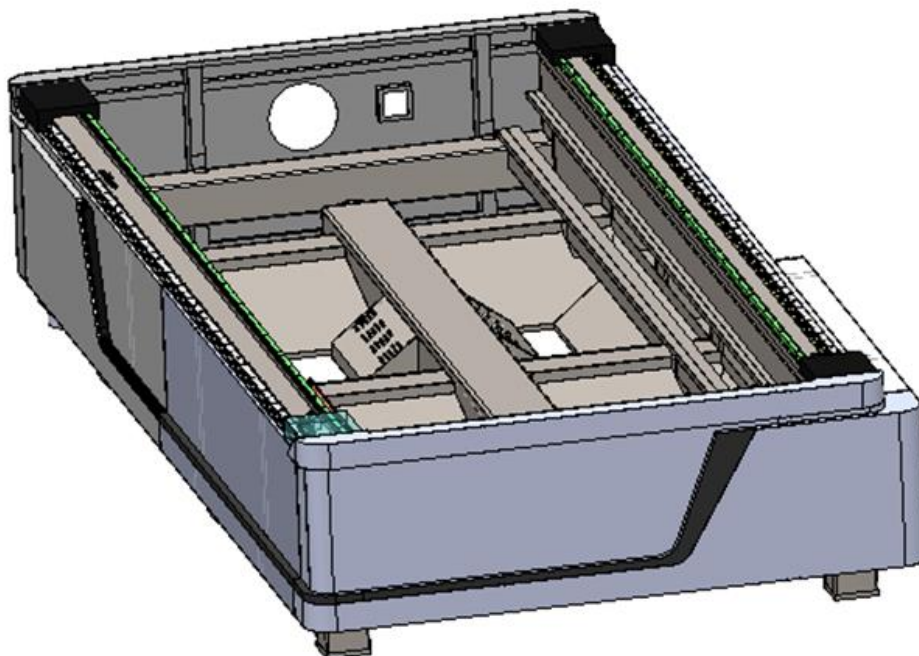
Од стране произвођача је дата препорука како би требало да се изврши повезивање и распоред саставних делова ласера како би се постигле максималне могуће перформансе ласера и испоштовале мере безбедности. Не поштовањем ових препорука могло би доћи до умањења преформанси ласера као и излагање опреме и запослених повећаном ризику о настанку нежељеног догађаја. На слици 3.1. приказан је цртеж препорученог распореда делова машине за сечење ласером и удаљености делова опреме [14]. У табели 3.1 дате су основне техничке карактеристике машине.

Табела 3.1. Техничке карактеристике машине за сечење ласером [14]

Модел	F1530
Максимални обрадни простор	1,500×3,000 mm
Кретање по X оси	1,500 mm
Кретање по Y оси	3,000 mm
Кретање по Z оси	120 mm
Прецизност позиционирања X/Y оси	0.03 mm
Максимална брзина кретања по X/Y оси	100 m/min
Максимално убрзање	1.2 G
1,000W Бруто снага извора	15 kW снага на излазу
Димензије (L * W * H)	4,550*2,300*2,000
Укупна тежина машине	3,000 kg

3.2. Постоље ласера

Постоље ласера је механички део ласера на који се постављају остали радни делови ласера и чини основу конструкције радног дела ласера, слика 3.3. Постоље ласера се израђује од угљеничног челика високог квалитета [14].



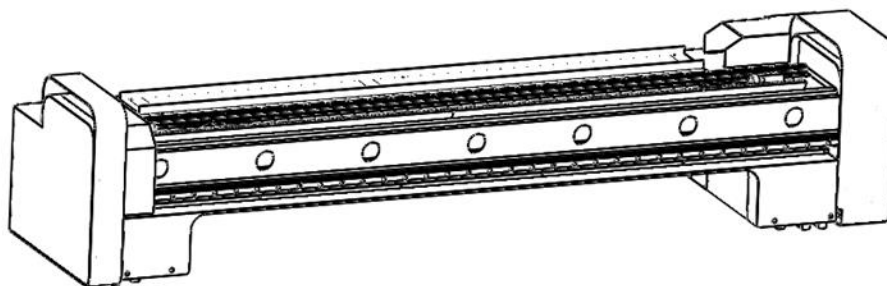
Слика 3.3. Постоље ласера [14]

Постоље је израђено заваривањем како би се добио почетни жељени облик а касније је подвргнуто термичкој обради ради елиминисања заосталих напона у структури материјала. На левој и десној страни постоља ласера се налазе шине за праволиниско вођење попречног носача ласера, које му омогућавају кретање напред и

назад. На крају сваке шине за вођење налази се урађаји за заустављање и прекидање рада ласера. Ова двострука заштита омогућава безбедан и проуздан рад ласера [14].

3.3. Попречни носач

Попречни носач је део ласера који се монтира на постоље ласера и омогућава позиционирање ласерске главе. Вођење се остварује тако што се попречни носач креће по шинама које се налазе на постољу ласера, слика 3.4 [14].



Слика 3.4. Попречни носач [14]

Попречни носач ласера је израђен ливењем из једног дела од легуре алуминијума и ојачан темичком обрадом. Легура алуминијума има ниску густину и велику чврстоћу као и малу масу која испуњава захтеве за велику брзину и прецизност обраде [14].

Попречни носач је опремљен шином за линијско вођење и зупчастом летвом као преносни механизам. Попречни носач омогућава попречна кретање носача ласерске главе. На обадва карај се налазе урађаји за кочење и заустављање кретања ласерске главе који обезбеђују двоструку заштиту приликом кретања.

3.4. Радни сто

Радни сто на ласеру служи за постављање радног материјала у зону обраде и омогућава позиционирање материјала у зону обраде, слика 3.5 [14].



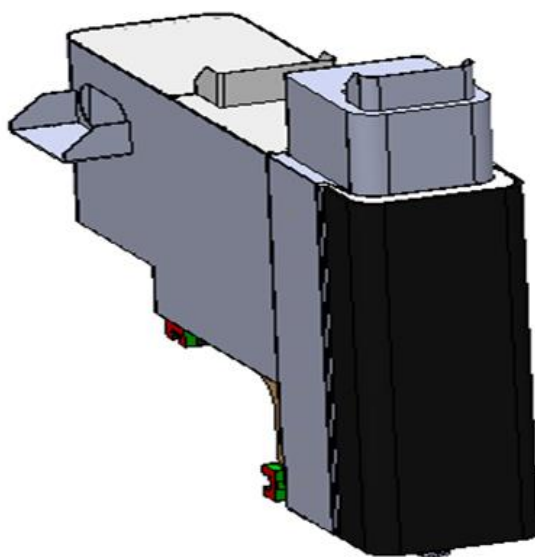
Слика 3.5. Радни сто [14]

Радни сто је добијен заваривањем. Радни сто на себи поседује три погонска ваљкаста транспортера. Ваљкасти транспортери служе као помоћни уређаји приликом постављања материјала на радни сто. Применом ваљкастих транспортера се избегава оштећење материјала приликом постављања материјала у зону обраде. Ваљци имају могућност да се подигну приликом позиционирања материјала у зону обраде а након завршетка се спуштају како не би ометали процес обраде и како не би дошло до самог оштећења ваљака [14].

На радном столу се такође налазе и куглични транспортери који омогућавају лакше уклањање готових делова (обработка) из зоне обраде. Куглични транспортери омогућавају заштиту материјала од оштећења (огреботина) као и смањење замора радника.

3.5. Вертикални носач

Вертикални носач је уређај који врши позиционирање ласерске главе на одређеној раздаљини од материјала по вертикалној оси. Кретање се остварује помоћу серво мотора који се нумерички програмирају. Контрола максималног могућег кретања навише и наниже се регулише помоћу сензора за близину који спречавају даље кретање вертикалног носача, слика 3.6 [14].

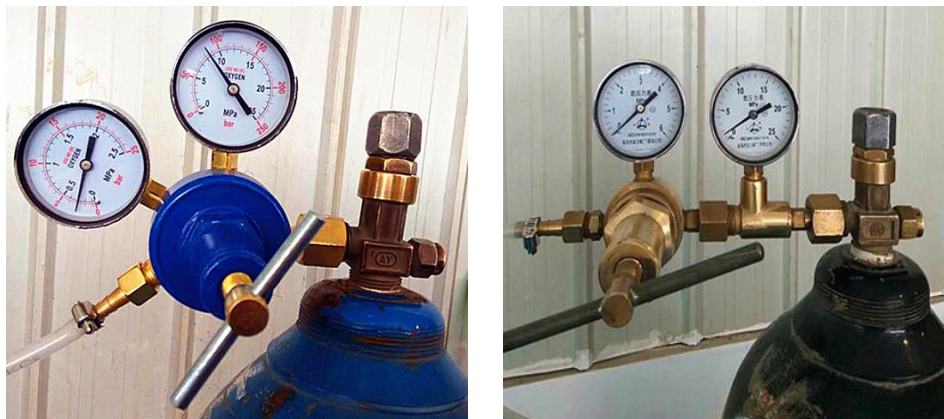


Слика 3.6. Вертикални носач [14]

Кретање вертикалног носача је независно од других кретања и може се вршити истовремено када се врше и друга кретања. Како би се обезбедио константан квалитет резања на ласерској глави се уградјују сензори за процену растојања између ласерске главе и материјала. Константно одржавање раздаљине се постиже тако што сензори шаљу сигнал када дође до поремећаја тај сигнал се обрађује и шаље као команда степ моторима који врше корекцију растојања између ласерске главе и материјала који се обрађује [14].

3.6. Систем за довођење гасова под притиском

Систем за довођење гасова под притиском се састоји од два дела. Први део система је систем који доводи радни гас који може бити азот или кисеоник у зону обраде. Други део систем је систем који врши компресију ваздуха из атмосфере и користи се за довођење у систем цилиндара на радном столу [14].



Слика 3.7. Боце са помоћним гасом (са леве стране кисеоник са десне азот)

Подешавање количине и притиска доведеног гаса у зони обраде се врши преко софтвера а контрола количине осталог гаса и притиска у боцама се може видети на уређајима за мерење који су приказани на слици 3.7 [14].

3.7. Ласерски извор

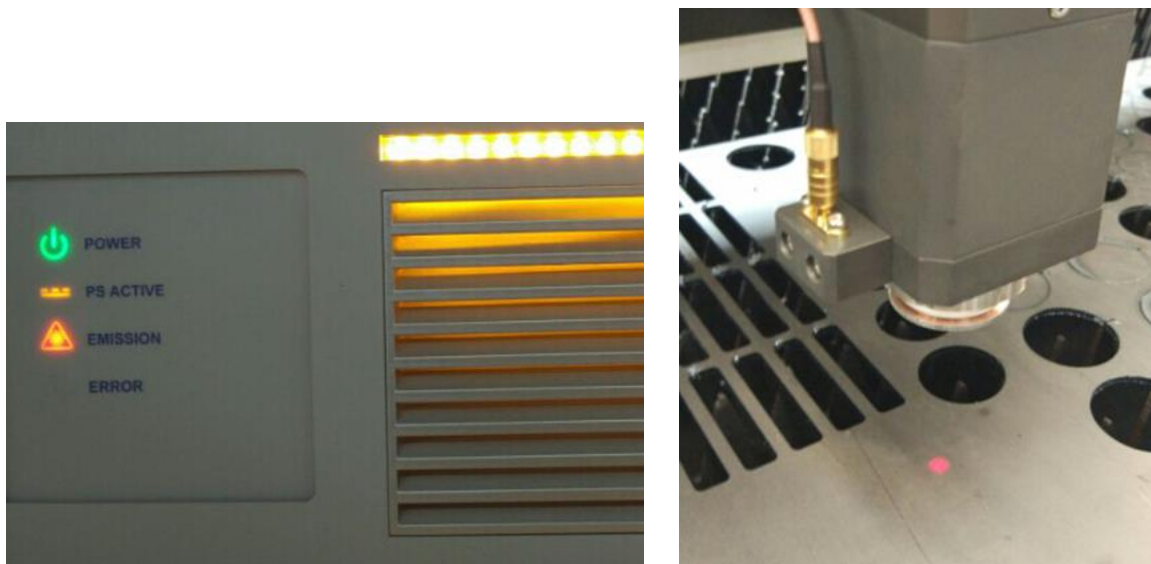
Ласерски извор овог ласера је 1000 W. Због својих малих димензија ласерски извор је интегрисан у контролну кабину. Контролна кабина се поставља са десне стране од постоља ласера, слика 3.8.



Слика 3.8. Положај ласерског извора у контролној кабини [14]

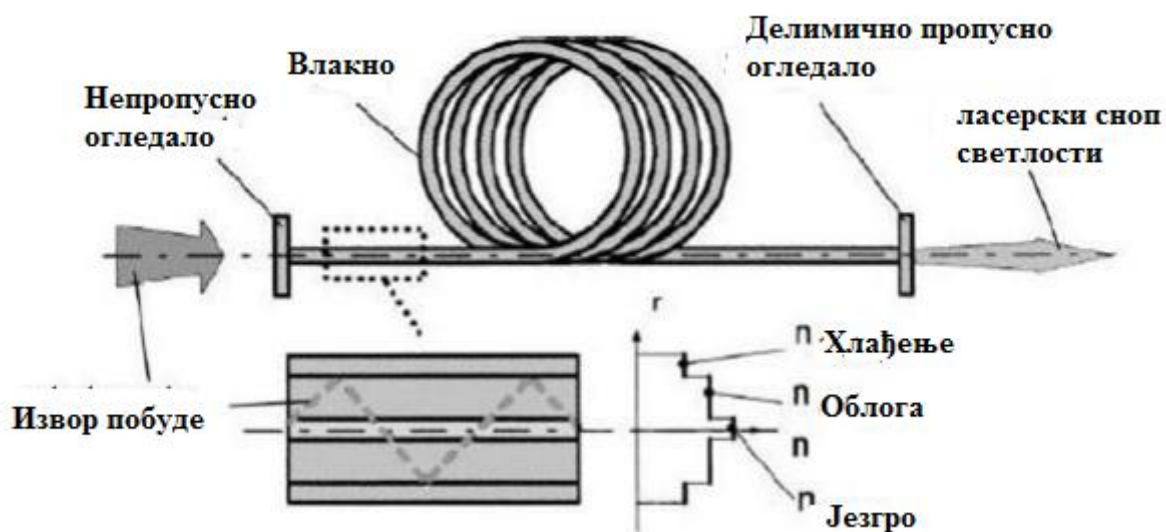
Пошто се ласерски извор не налази у оквиру постоља ласера ласерска глава се повезује специјалним оптичким каблом који се пажљиво спроводен до вертикалног носача главе ласера где се врши спајање са ласерског лавом, слика 3.8.

Генерисање ласеског зрака на ласеру се постиже тако што се претходно на ласеру укључи извор и сачека се неколико секунди док се не укључи на ласерско извору зелени индикатор *POWER* што означава да ласер има напајање. Приликом активирања опције у програму *Laser on* на ласерском извору ће се појавити индикатор *EMISSION* у црвеној боји и ласерска глава ће емитовати светлост црвене боје као на слици 3.9.



Слика 3.9. Ласерски извор у раду и ласерска глава [14]

Фибер Ласери велике снаге од влакана састоје се од активних оптичких влакана и полупроводничких диода. Фибер ласери користе једноструке емитаторе (*Single emitter*) полупроводничке диоде као извор светлости за стварање активних таласа. Емитирани ласерски зрак се налази у оптичким влакнима и путује кроз изоловани флексибилни кабли. Активна влакна су специјална оптичка влакна обogaћена јонима ретких материјал што им омогућава стварање екстремно јаке светлости из врло малог активног језгра, слика 3.10.



Слика 3.10. Принцип стварања ласерског зрака код фибер ласера [14]

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Експериментална истраживања су имала за циљ да се утврди утицај параметара обраде на квалитет резања код ласерског сечења. Испитивања су вршена на ласерској машини Jinan Bodor Laser F1530, која је детаљно описана у поглављу 3.

Материјал предмета обраде је S235 JRG2 (Č0361), његове карактеристике су дате у табели 4. 1.

Табела 4.1. Карактеристике испитиваног материјала

Врста материјала	Хемијски састав				Механичке особине
	C, %	Mn, %	Si, %	P, S, %	R _e , N/mm ²
S 235 JRG2 (Č0361)	≤ 0.17	≤ 1.40	0.03 - 0.30	≤ 0.045	≥ 235

Мерење храпавости вршено је на мерном систему *Talysurf 6*. Мерни систем служи за мерење карактеристика микрогеометрије контактних површина приказан је на слици 4.2. 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.



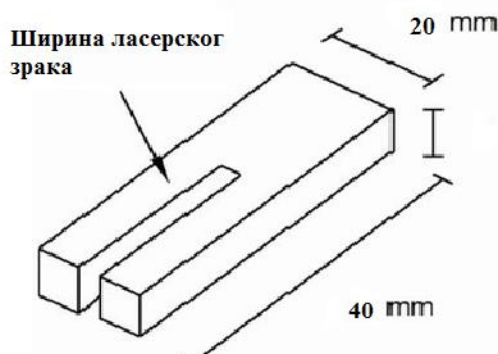
Слика 4.2 Уређај за мерење храпавости *Talysurf-6*

Мерење храпавости материјала је вршено по средини бочне ивице испитиваних узорака чија дебљина је била 3, 4 и 5 mm. Цртеж узорака са димензијама приказан је на слици 4.3. На узорцима је извршено резање по средини одређене дужине на којој је вршено мерење ширине реза са горње и доње стране.

Микрогеометрија контактних површина испитиваних узорака представљена је преко основних и допунских параметара храпавости.

Табела 4.2. *Мерени параметри на Talsurf-6*

Rt1	Максимална висина неравнина у првом сегменту дужине оцењивања
Rt2	Максимална висина неравнина у другом сегменту дужине оцењивања
Rt3	Максимална висина неравнина у трећем сегменту дужине оцењивања
Rt4	Максимална висина неравнина у четвртом сегменту дужине оцењивања
Rt5	Максимална висина неравнина у петом сегменту дужине оцењивања
Ra	Средња аритметичко одступање профила на дужини оцењивања
Rq	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
Ry	Максимална висина неравнина
Rtm	Средња Rti вредност
Rv	Највећа дубина удубљења профила на дужини оцењивања
Rp	Највећа висина испупчења профила на дужини оцењивања
Sm	Средњи корак испупчења профила на дужини оцењивања
Δq	Средња вредност угла нагиба профила
Rsk	Коефицијент асиметрије профила - мера асиметрије расподеле амплитуда
Rku	Мера заострености криве расподеле амплитуда
S	Средњи корак локалних испупчења профила на дужини оцењивања
R3z	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања
Rpm	Средња вредност Rpi вредности одређених на референтним дужинама
R3y	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтним дужинама у оквиру дужине оцењивања



Слика 4.3. *Димензије узорка за сечење и мерење*

Ширина ласерског реза је мерена на универзалном алатном микроскопу UIM-21, приказаном на слици 4.4.



Слика 4.4. Универзални микроскоп UIM-21

План испитивања са променљивим параметрима је дат у табелама 4.3 и 4.4 са константним параметрима: снаге ласера од 1000 W, жижна даљина 4,3 mm, кисеоник под притиском од 0.21 bar. Променљиви фактори су били дебљина материјала, растојање ласерске главе од обрадка и брзина сечења материјала.

Табела 4.3. Фактори и ниво

Ниво	дебљина s, mm	SOF mm	Брзина сечења v, m/min
-1	3	0.7	1
0	4	1	1,3
1	5	1.4	1,6

Брзина сечења је други по значају параметар за ласерско сечење, одмах иза снаге ласерског снопа. Може бити одређена експериментално и применом израза у којима фигуришу густина снаге ласера и особине материјала који се сече. Многи параметари утичу на брзину резања: снага ласера, мод, величина светлосне жиже, врста и дебљина материјала радног предмета, иницијалне енергије топљења и испаравања, итд. Квалитет реза се одређује у зависности од брзине резања за различите дебљине материјала радног предмета. На основу испитивања се дефинише област употребљиве брзине резања која је ограничена доњом и горњом граничном вредношћу. 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 максимална брзина резања узима се вредност изнад које долази до нестабилности обраде. Ова нестабилност се манифестује у појави неравних резова, шљаке, уваривања на појединим местима и др.

Положај жиже сочива за фокусирање (SOF) у односу на површину обрадка (дефокусација) показује различит утицај на квалитет реза. Зависно од врсте материјала и дебљине обратка жижа се позиционира на или незнатно испод површине обратка. У току процеса ласерског сечења жижа сочива за фокусирање снопа ласерских зрака мора бити стално позиционирана на исти начин у односу на површину обратка како би се обезбедили најбољи ефекти сечења.

Табела 4.4. *План испитивања*

Опит	X ₁	X ₂	X ₃	s mm	SOF mm	v m/min
1	-1	-1	-1	3	0,7	1
2	-1	-1	0	3	0,7	1,3
3	-1	-1	1	3	0,7	1,6
4	-1	0	-1	3	1	1
5	-1	0	0	3	1	1,3
6	-1	0	1	3	1	1,6
7	-1	1	-1	3	1,3	1
8	-1	1	0	3	1,3	1,3
9	-1	1	1	3	1,3	1,6
10	0	-1	-1	4	0,7	1
11	0	-1	0	4	0,7	1,3
12	0	-1	1	4	0,7	1,6
13	0	0	-1	4	1	1
14	0	0	0	4	1	1,3
15	0	0	1	4	1	1,6
16	0	1	-1	4	1,3	1
17	0	1	0	4	1,3	1,3
18	0	1	1	4	1,3	1,6
19	1	-1	-1	5	0,7	1
20	1	-1	0	5	0,7	1,3
21	1	-1	1	5	0,7	1,6
22	1	0	-1	5	1	1
23	1	0	0	5	1	1,3
24	1	0	1	5	1	1,6
25	1	1	-1	5	1,3	1
26	1	1	0	5	1,3	1,3
27	1	1	1	5	1,3	1,6

4.1. Резултати испитивања

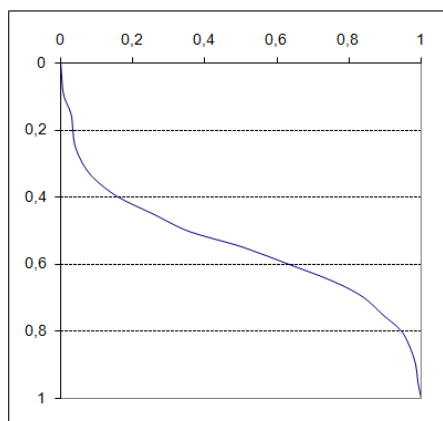
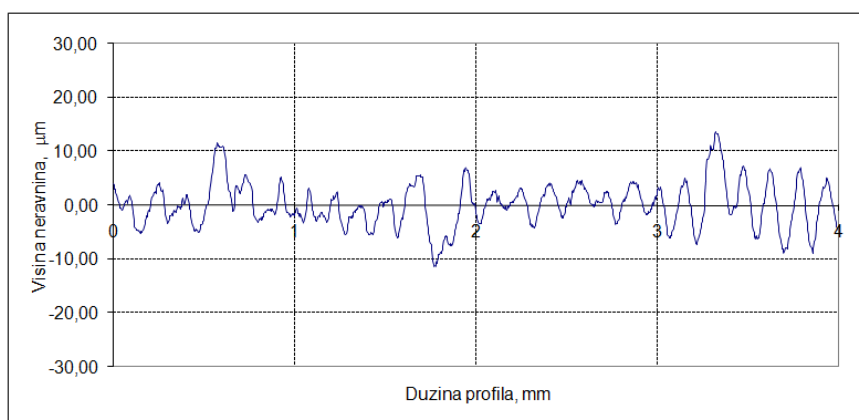
У наредном делу текста приказани су резултати мерења димензија узорака након сечења, димензије ширине реза са улазне и излазне стране реза и прерачунати укупни угао реза. У оквиру ових резултата дати су икомплетни резултати мерења топографије добијене површине

Табела 4.5.1. Експеримент 1

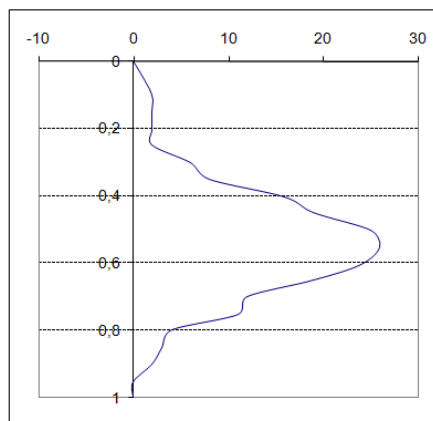
Узорак 1	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.61	19.6	0.428	0.702	5.22

Параметри топографије узорка 1

Rt1 = 16.8 μm	Ry = 22.5 μm	Sm = 153 μm
Rt2 = 11.3 μm	Rtm = 16 μm	S = 55 μm
Rt3 = 18.3 μm	Rv = 11.3 μm	DELQ = 9.7 deg
Rt4 = 11.1 μm	Rp = 13.6 μm	Rsk = 0.3
Rt5 = 22.5 μm	R3z = 9.6 μm	Rku = 3.6
Ra = 3.15 μm	Rpm = 8.4 μm	
Rq = 4.11 μm	R3y = 13.4 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



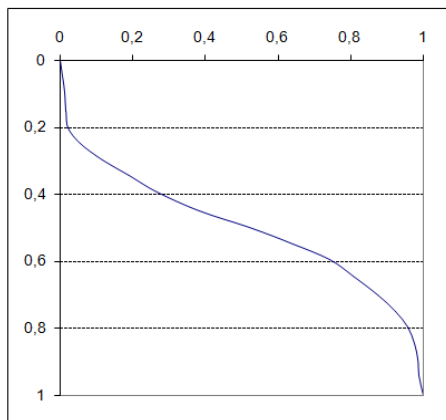
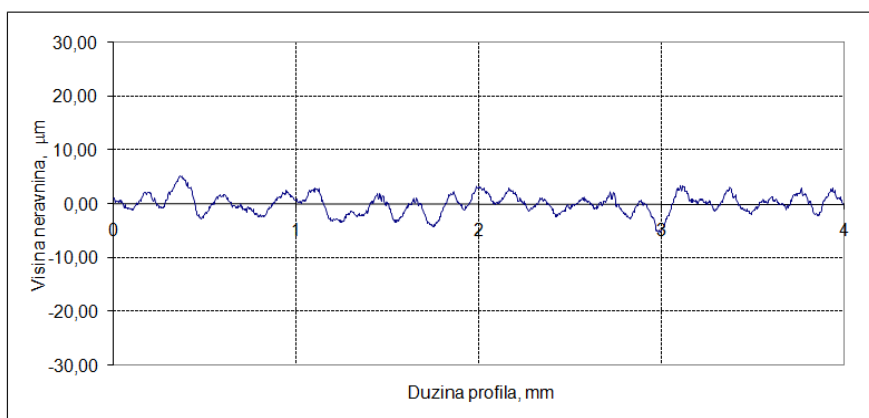
Узорак 1

Табела 4.5.2. Експеримент 2

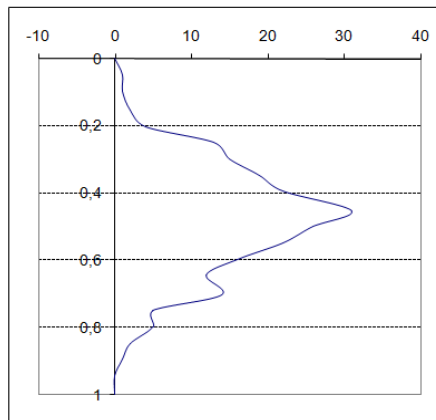
Узорак 2	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.63	19.61	0.445	0.663	4.16

Параметри топографије узорка 2

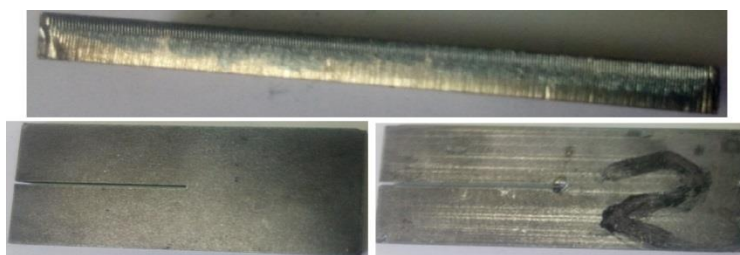
Rt1 = 8 μm	Ry = 8.7 μm	Sm = 145 μm
Rt2 = 6.3 μm	Rtm = 7.1 μm	S = 23 μm
Rt3 = 7.4 μm	Rv = 5.2 μm	DELQ = 4.7 deg
Rt4 = 8.7 μm	Rp = 5.2 μm	Rsk = -0.1 ☐
Rt5 = 5.2 μm	R3z = 6.4 μm	Rku = 3.1 ☐
Ra = 1.38 μm	Rpm = 3.6 μm	
Rq = 1.76 μm	R3y = 7.9 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



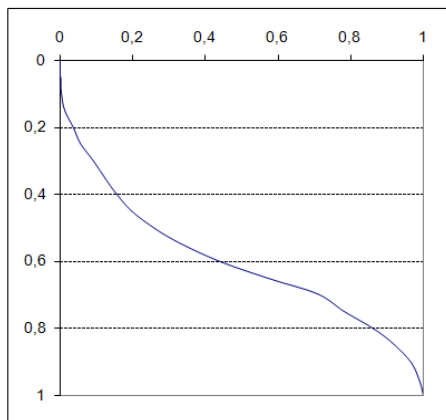
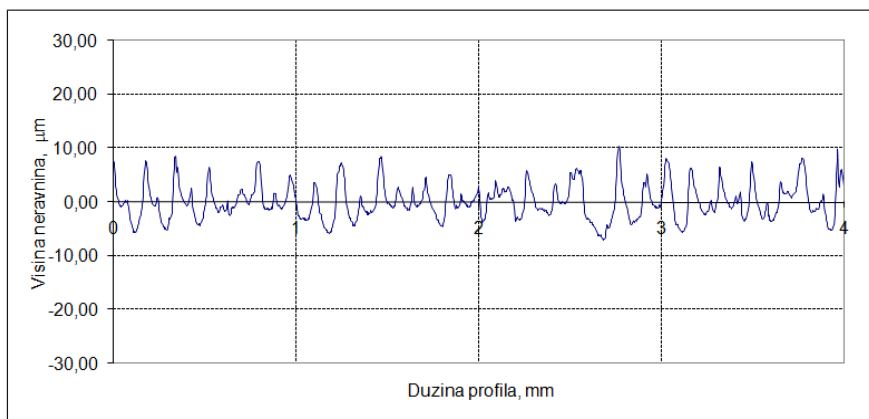
Узорак 2

Табела 4.5.3. Експеримент 3

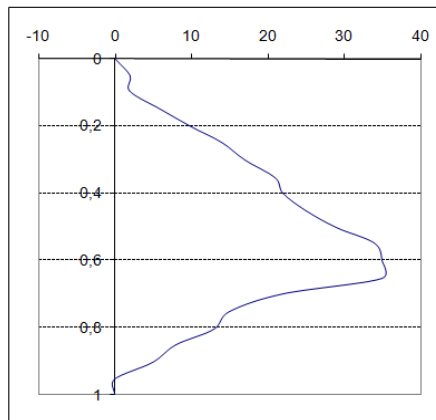
Узорак 3	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.64	19.64	0.468	0.615	2.81

Параметри топографије узорка 3

Rt1 =	14.1 μm	Ry =	17.3 μm	Sm =	111 μm
Rt2 =	14.3 μm	Rtm =	14.3 μm	S =	60 μm
Rt3 =	10.4 μm	Rv =	7 μm	DELQ =	12 deg
Rt4 =	17.3 μm	Rp =	10.3 μm	Rsk =	0.5 $\square$
Rt5 =	15.1 μm	R3z =	9.9 μm	Rku =	3 $\square$
Ra =	2.55 μm	Rpm =	8.6 μm		
Rq =	3.26 μm	R3y =	11.1 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



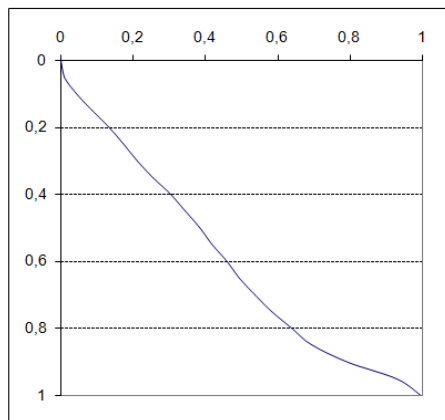
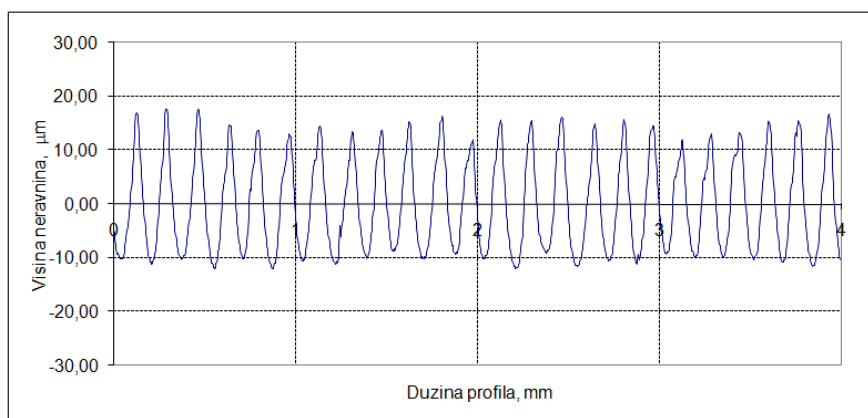
Узорак 3

Табела 4.5.4. Експеримент 4

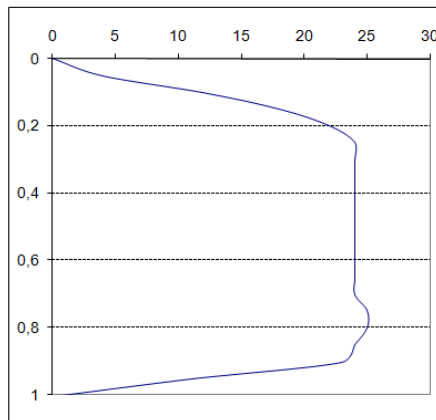
Узорак 4	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.62	19.54	0.638	0.715	1.47

Параметри топографије узорка 4

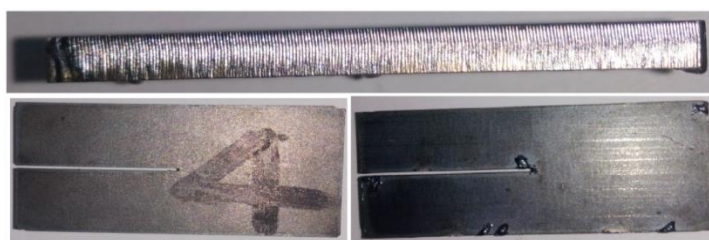
Rt1 =	29.7 μm	Ry =	29.7 μm	Sm =	165 μm
Rt2 =	26.5 μm	Rtm =	28 μm	S =	136 μm
Rt3 =	28.2 μm	Rv =	12 μm	DELQ=	20.5 deg
Rt4 =	27.7 μm	Rp =	17.6 μm	Rsk =	0.3 $\square$
Rt5 =	28.2 μm	R3z =	25.6 μm	Rku =	1.7 $\square$
Ra =	7.71 μm	Rpm =	16.2 μm		
Rq =	8.68 μm	R3y =	27.2 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



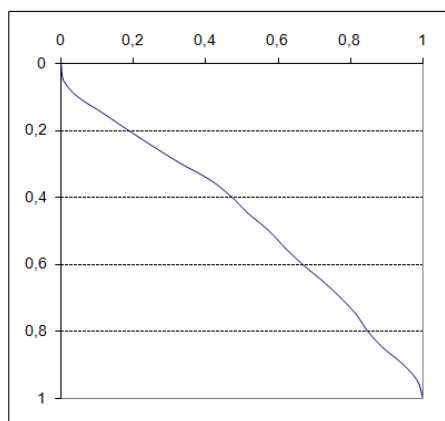
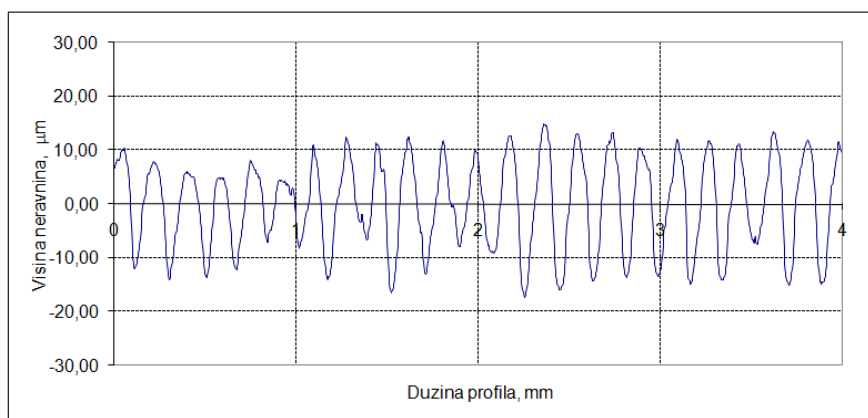
Узорак 4

Табела 4.5.5. Експеримент 5

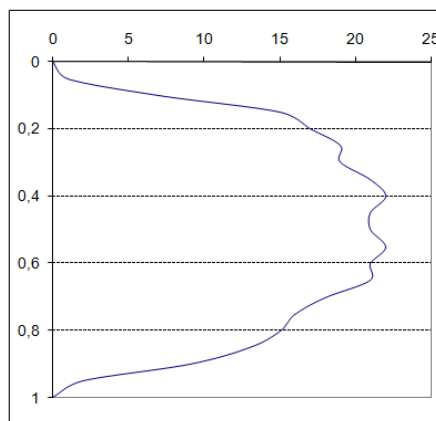
Узорак 5	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.6	19.6	0.523	0.685	3.09

Параметри топографије узорка 5

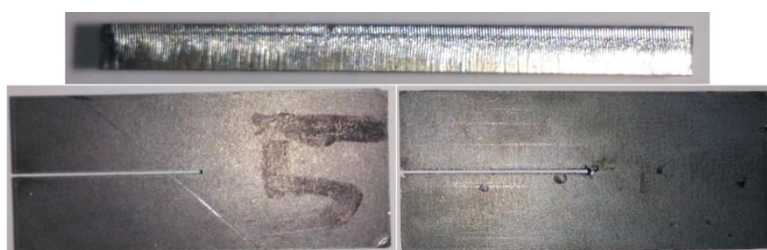
Rt1 =	24.5 μm	Ry =	32.1 μm	Sm =	180 μm
Rt2 =	28.8 μm	Rtm =	28.6 μm	S =	151 μm
Rt3 =	32.1 μm	Rv =	17.3 μm	DELQ=	18.6 deg
Rt4 =	29.3 μm	Rp =	14.8 μm	Rsk =	-0.3 $\square$
Rt5 =	28.5 μm	R3z =	22.3 μm	Rku =	1.9 $\square$
Ra =	7.2 μm	Rpm =	12.9 μm		
Rq =	8.34 μm	R3y =	25.8 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



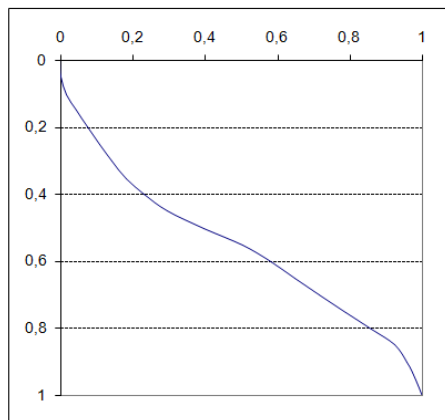
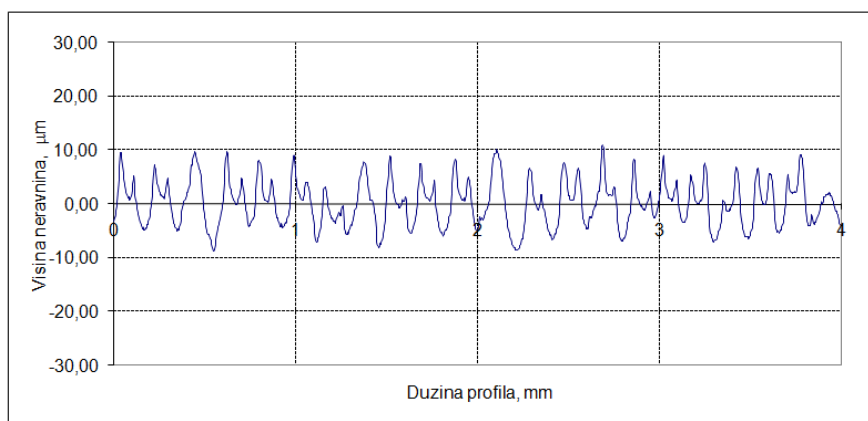
Узорак 5

Табела 4.5.6. Експеримент 6

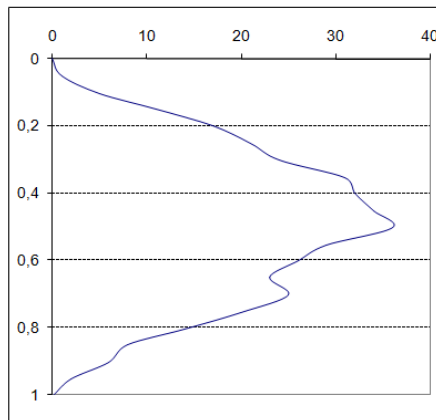
Узорак 6	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.62	19.64	0.508	0.672	3.13

Параметри топографије узорка 6

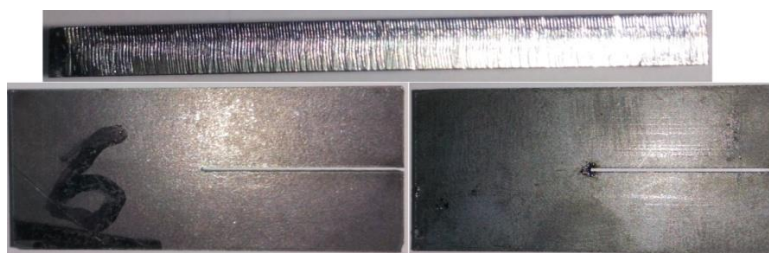
Rt1 =	18.5 μm	Ry =	18.7 μm	Sm =	138 μm
Rt2 =	17.1 μm	Rtm =	17.6 μm	S =	75 μm
Rt3 =	18.7 μm	Rv =	8.7 μm	DELQ =	14.1 deg
Rt4 =	17.7 μm	Rp =	10.8 μm	Rsk =	0.2 $\square$
Rt5 =	16.1 μm	R3z =	13.3 μm	Rku =	2.4 $\square$
Ra =	3.47 μm	Rpm =	9.7 μm		
Rq =	4.25 μm	R3y =	14.9 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



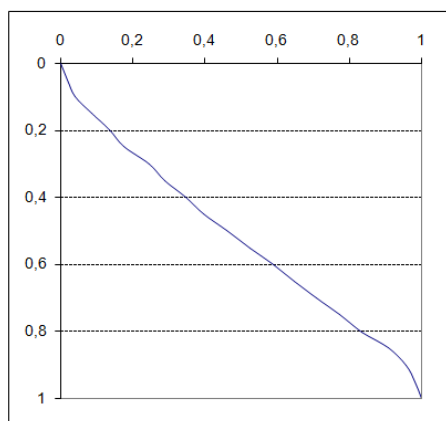
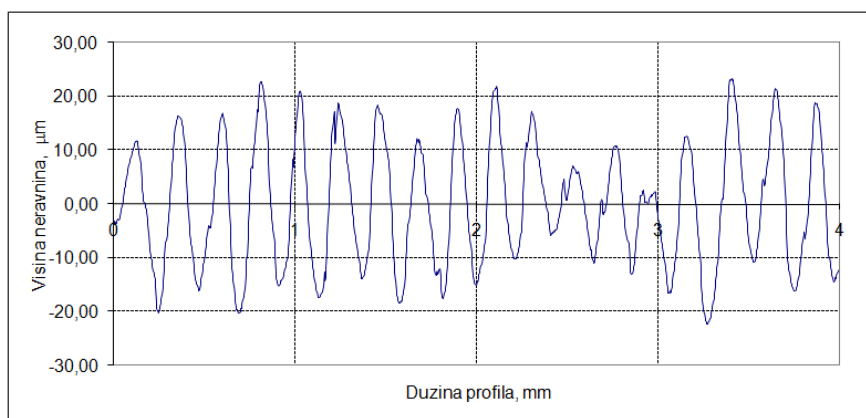
Узорак 6

Табела 4.5.7. Експеримент 7

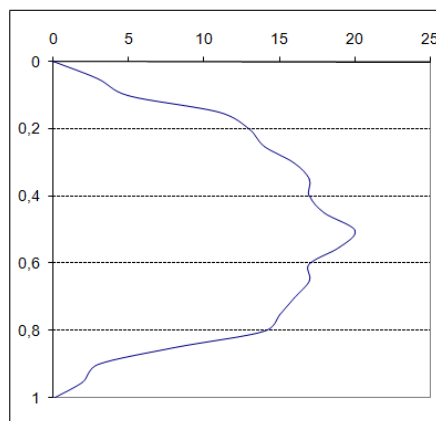
Узорак 7	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.54	19.59	0.54	0.76	4.19

Параметри топографије узорка 7

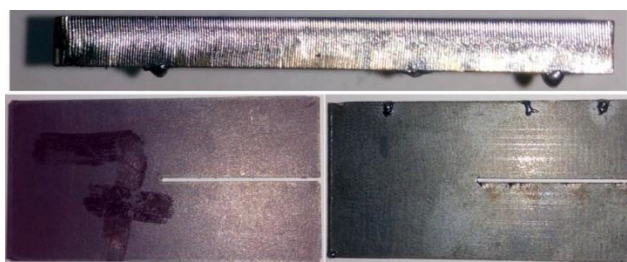
Rt1 =	37.9 μm	Ry =	45.6 μm	Sm =	210 μm
Rt2 =	41 μm	Rtm =	38.6 μm	S =	129 μm
Rt3 =	39.4 μm	Rv =	22.3 μm	DELQ =	20.2 deg
Rt4 =	29.1 μm	Rp =	23.2 μm	Rsk =	0.1 $\square$
Rt5 =	45.6 μm	R3z =	27.9 μm	Rku =	2 $\square$
Ra =	9.75 μm	Rpm =	19.6 μm		
Rq =	11.42 μm	R3y =	33.6 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



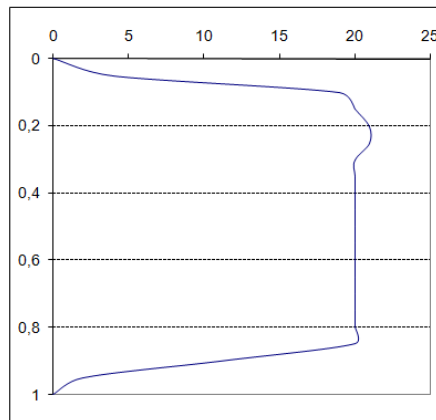
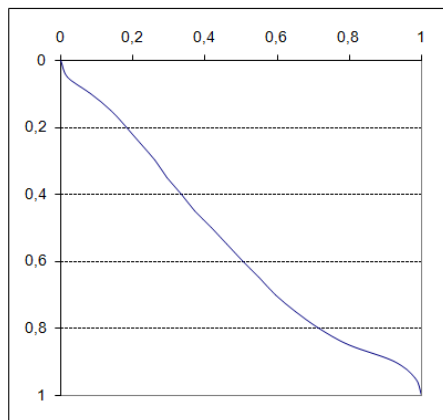
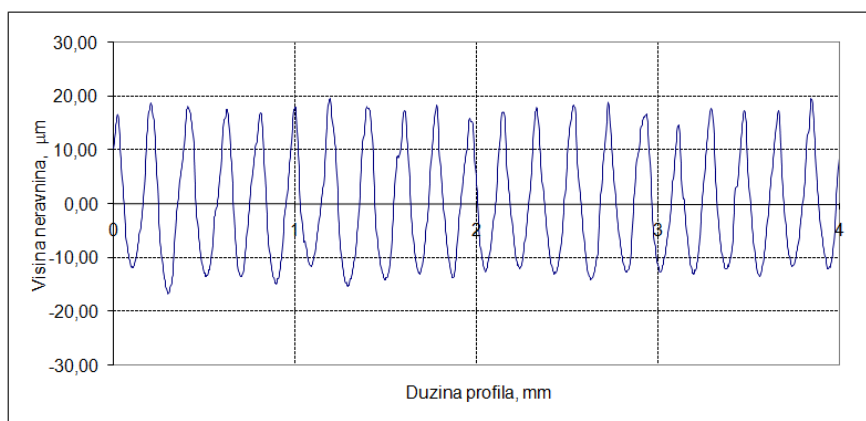
Узорак 7

Табела 4.5.8. Експеримент 8

Узорак 8	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.56	19.57	0.545	0.743	3.78

Параметри топографије узорка 8

Rt1 =	35.3 μm	Ry =	35.3 μm	Sm =	191 μm
Rt2 =	35 μm	Rtm =	33.6 μm	S =	182 μm
Rt3 =	32 μm	Rv =	16.6 μm	DELQ =	21.4 deg
Rt4 =	32.8 μm	Rp =	19.7 μm	Rsk =	0.3 $\square$
Rt5 =	33.1 μm	R3z =	30.3 μm	Rku =	1.7 $\square$
Ra =	9.26 μm	Rpm =	19.1 μm		
Rq =	10.49 μm	R3y =	32.1 μm		



Kriva nošenja

Amplitudna distribucija



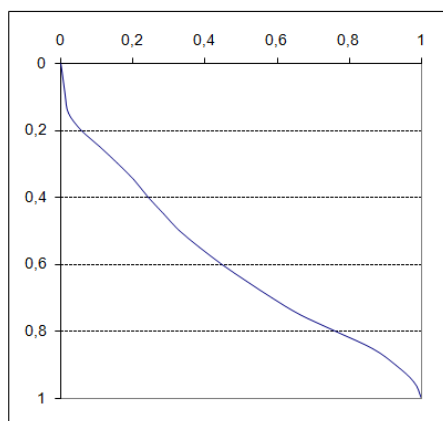
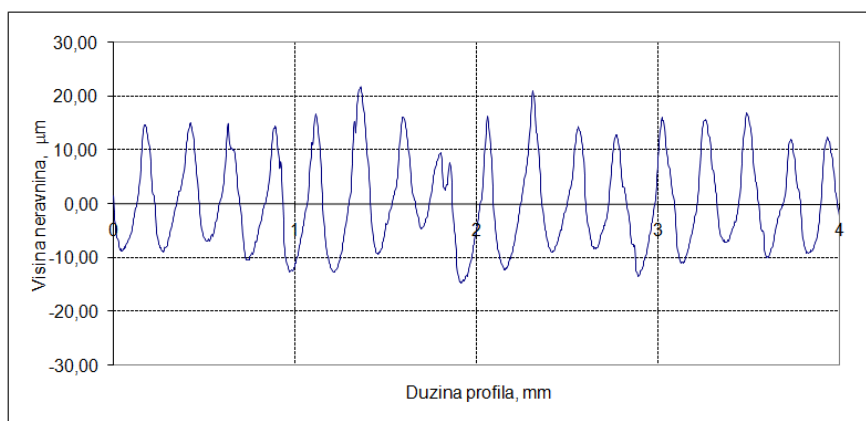
Узорак 8

Табела 4.5.9. Експеримент 9

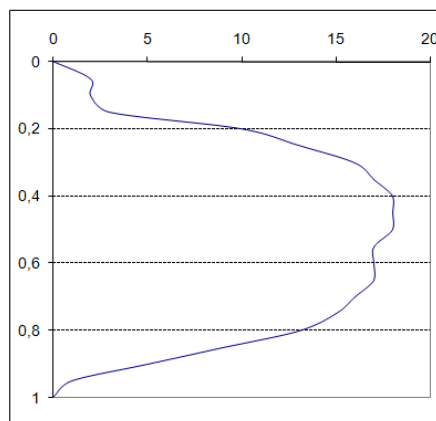
Узорак 9	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.59	19.59	0.543	0.74	3.76

Параметри топографије узорка 9

Rt1 =	25.5 μm	Ry =	35.8 μm	Sm =	236 μm
Rt2 =	34.4 μm	Rtm =	30.4 μm	S =	198 μm
Rt3 =	35.8 μm	Rv =	14.7 μm	DELQ =	15.8 deg
Rt4 =	29.5 μm	Rp =	21.7 μm	Rsk =	0.4 $\square$
Rt5 =	26.8 μm	R3z =	20.5 μm	Rku =	2.1 $\square$
Ra =	7.32 μm	Rpm =	18.1 μm		
Rq =	8.59 μm	R3y =	24.6 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



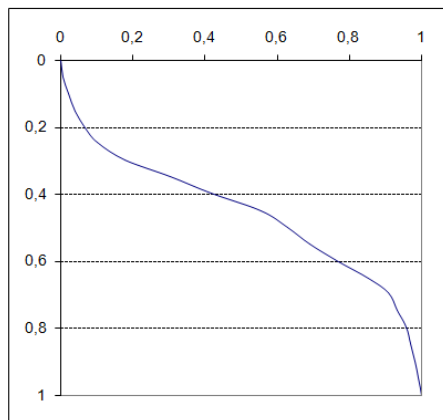
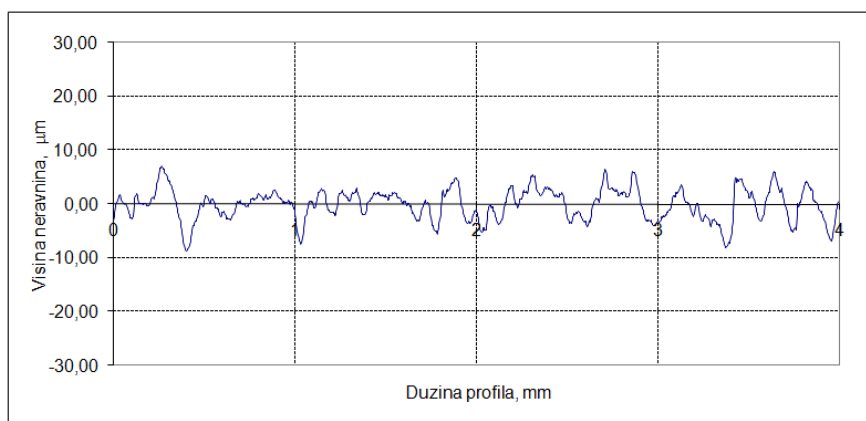
Узорак 9

Табела 4.5.10. Експеримент 10

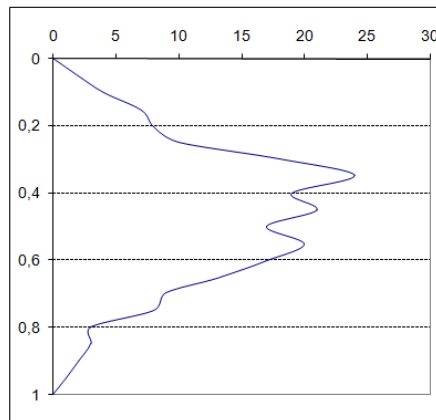
Узорак 10	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.54	19.54	0.601	0.905	4.35

Параметри топографије узорка 10

Rt1 = 15.8 μm	Ry = 15.8 μm	Sm = 189 μm
Rt2 = 10.3 μm	Rtm = 12.4 μm	S = 49 μm
Rt3 = 11 μm	Rv = 8.8 μm	DELQ = 7.2 deg
Rt4 = 10.7 μm	Rp = 7 μm	Rsk = -0.3 ☐
Rt5 = 14.1 μm	R3z = 7.5 μm	Rku = 3 ☐
Ra = 2.33 μm	Rpm = 5.6 μm	
Rq = 2.9 μm	R3y = 11.5 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



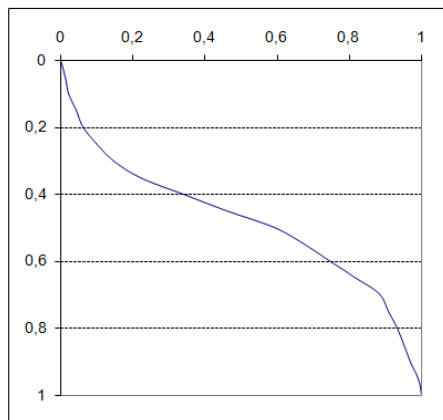
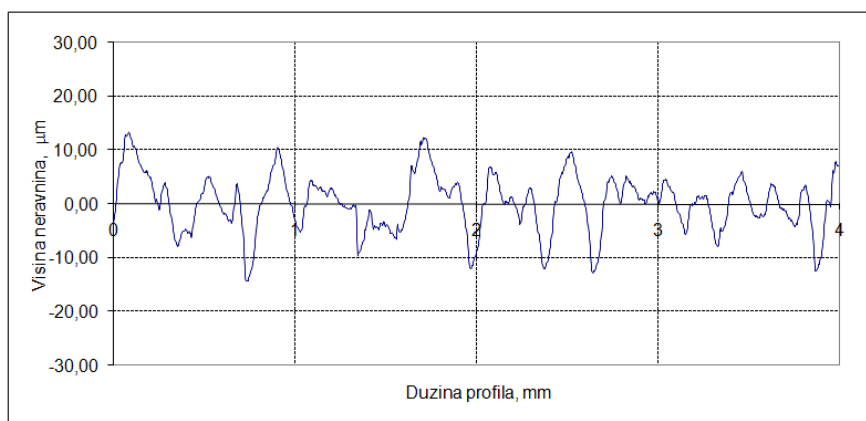
Узорак 10

Табела 4.5.11. Експеримент 11

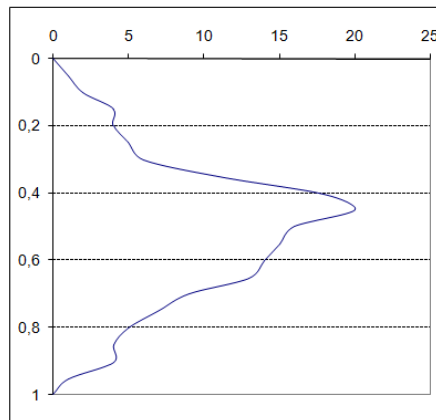
Узорак 11	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.55	19.56	0.565	0.91	4.93

Параметри топографије узорка 11

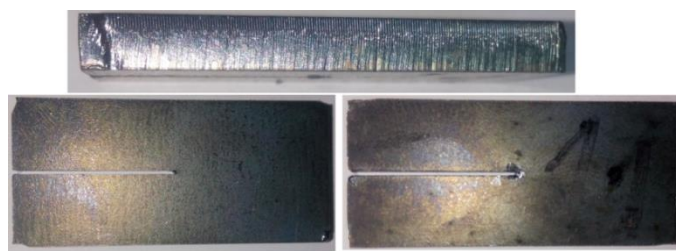
Rt1 = 27.6 μm	Ry = 27.6 μm	Sm = 187 μm
Rt2 = 20 μm	Rtm = 22.9 μm	S = 81 μm
Rt3 = 24.3 μm	Rv = 14.3 μm	DELQ = 10 deg
Rt4 = 22.4 μm	Rp = 13.3 μm	Rsk = -0.3 ☐
Rt5 = 20.2 μm	R3z = 8.9 μm	Rku = 3.1 ☐
Ra = 4.07 μm	Rpm = 10.7 μm	
Rq = 5.25 μm	R3y = 11 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



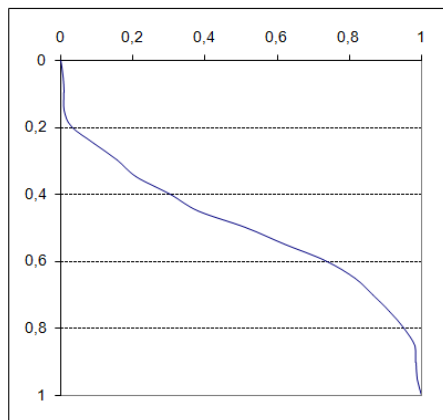
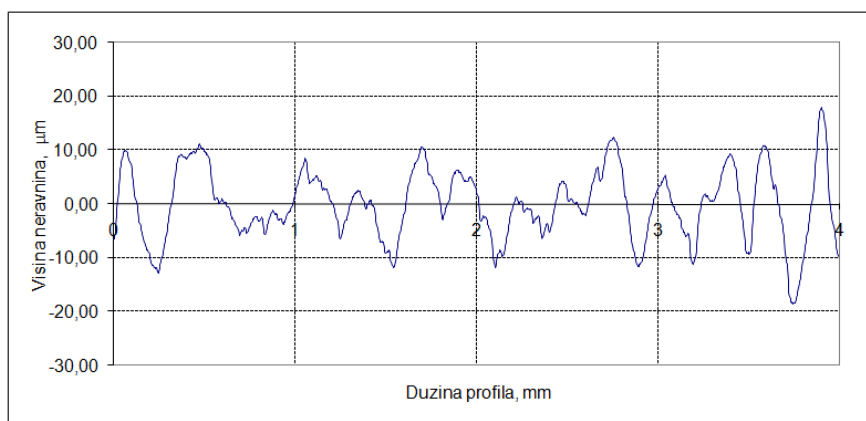
Узорак 11

Табела 4.5.12. Експеримент 12

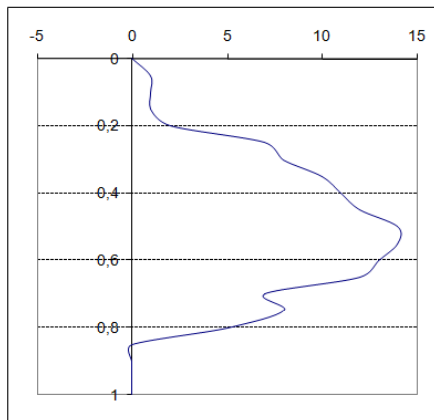
Узорак 12	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.57	19.6	0.56	0.765	2.93

Параметри топографије узорка 12

Rt1 = 23.9 μm	Ry = 36.4 μm	Sm = 294 μm
Rt2 = 20.2 μm	Rtm = 25.4 μm	S = 116 μm
Rt3 = 22.3 μm	Rv = 18.5 μm	DELQ = 9.8 deg
Rt4 = 23.9 μm	Rp = 17.9 μm	Rsk = -0.1 $\square$
Rt5 = 36.4 μm	R3z = 9.6 μm	Rku = 2.9 $\square$
Ra = 5.18 μm	Rpm = 12 μm	
Rq = 6.5 μm	R3y = 14.7 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



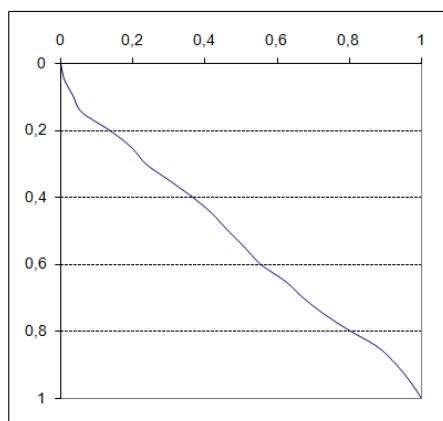
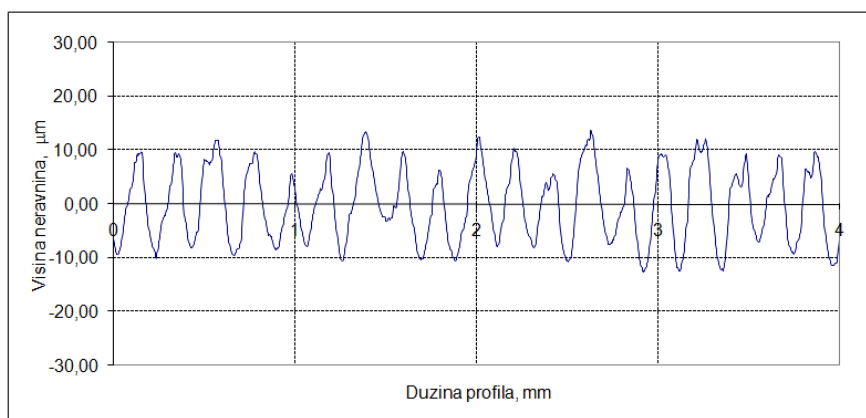
Узорак 12

Табела 4.5.13. Експеримент 13

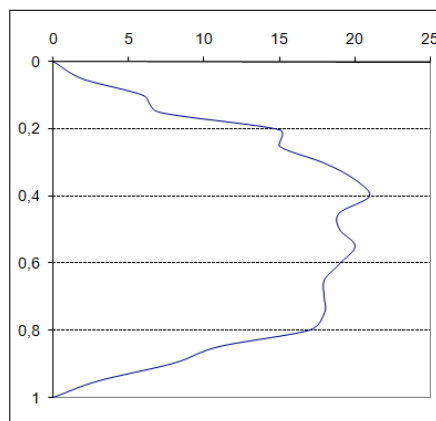
Узорак 13	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.51	19.51	0.625	0.885	3.72

Параметри топографије узорка 13

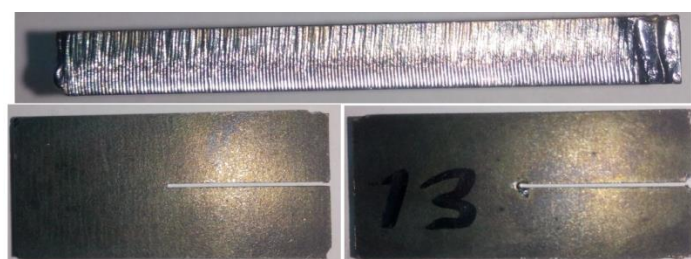
Rt1 = 21.9 μm	Ry = 26.3 μm	Sm = 207 μm
Rt2 = 24.1 μm	Rtm = 24 μm	S = 129 μm
Rt3 = 23.1 μm	Rv = 12.6 μm	DELQ = 13.3 deg
Rt4 = 26.3 μm	Rp = 13.7 μm	Rsk = 0.1 $\square$
Rt5 = 24.5 μm	R3z = 16.1 μm	Rku = 1.8 $\square$
Ra = 6 μm	Rpm = 12.7 μm	
Rq = 6.86 μm	R3y = 19.8 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



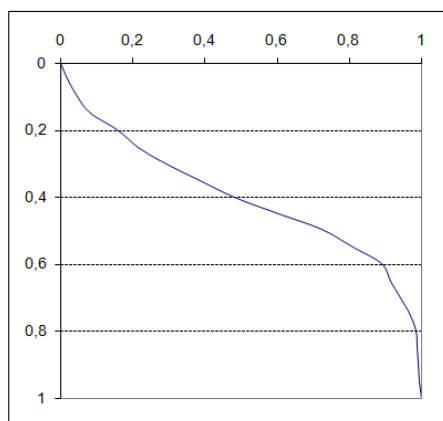
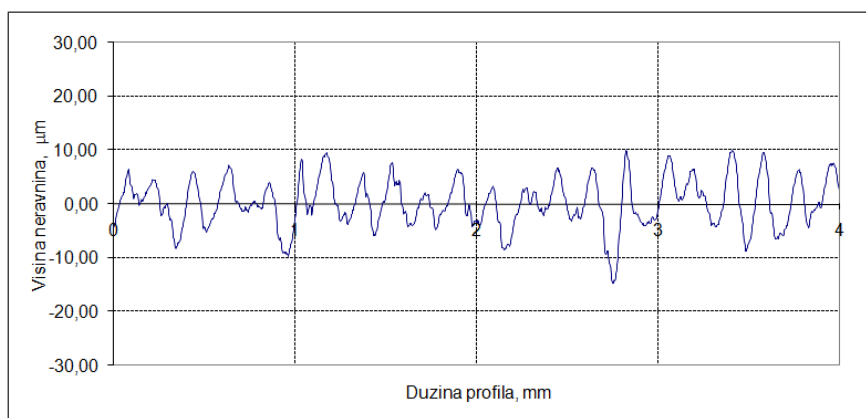
Узорак 13

Табела 4.5.14. Експеримент 14

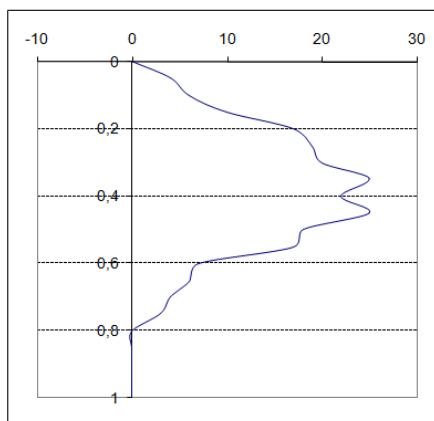
Узорак 14	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.6	19.62	0.455	0.81	5.07

Параметри топографије узорка 14

Rt1 = 15.4 μm	Ry = 24.6 μm	Sm = 176 μm
Rt2 = 19.1 μm	Rtm = 18.5 μm	S = 71 μm
Rt3 = 14.9 μm	Rv = 14.7 μm	DELQ = 10.5 deg
Rt4 = 24.6 μm	Rp = 10 μm	Rsk = -0.2 $\square$
Rt5 = 18.7 μm	R3z = 11.3 μm	Rku = 3.1 $\square$
Ra = 3.54 μm	Rpm = 8.5 μm	
Rq = 4.45 μm	R3y = 14 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



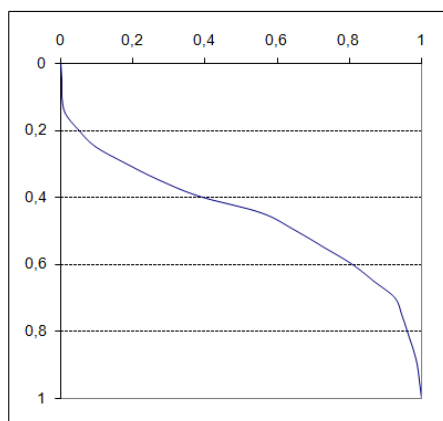
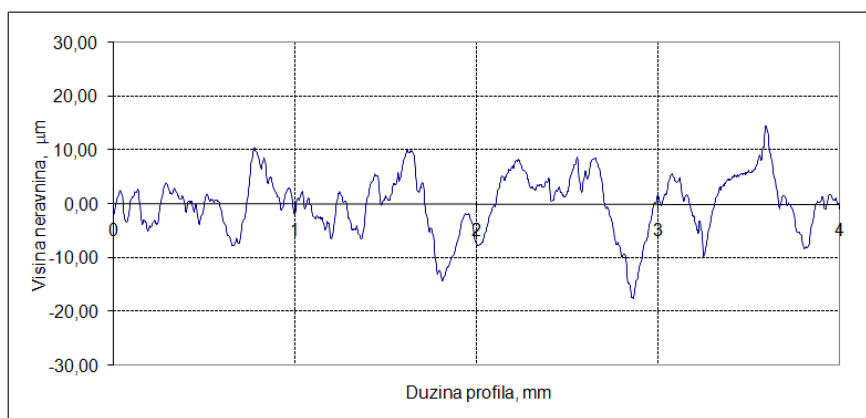
Узорак 14

Табела 4.5.15. Експеримент 15

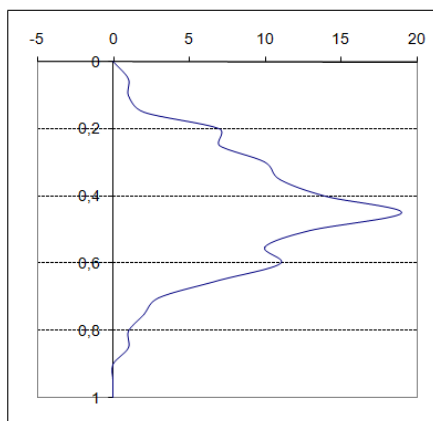
Узорак 15	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.61	19.62	0.46	0.816	5.09

Параметри топографије узорка 15

Rt1 = 18.3 μm	Ry = 26.2 μm	Sm = 209 μm
Rt2 = 15.2 μm	Rtm = 21.6 μm	S = 70 μm
Rt3 = 24.2 μm	Rv = 17.6 μm	DELQ = 8.7 deg
Rt4 = 26.2 μm	Rp = 14.5 μm	Rsk = -0.5 $\square$
Rt5 = 24.2 μm	R3z = 10.5 μm	Rku = 3.3 $\square$
Ra = 4.23 μm	Rpm = 10.4 μm	
Rq = 5.42 μm	R3y = 13.7 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



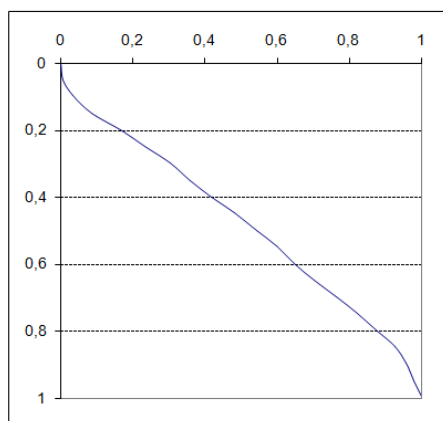
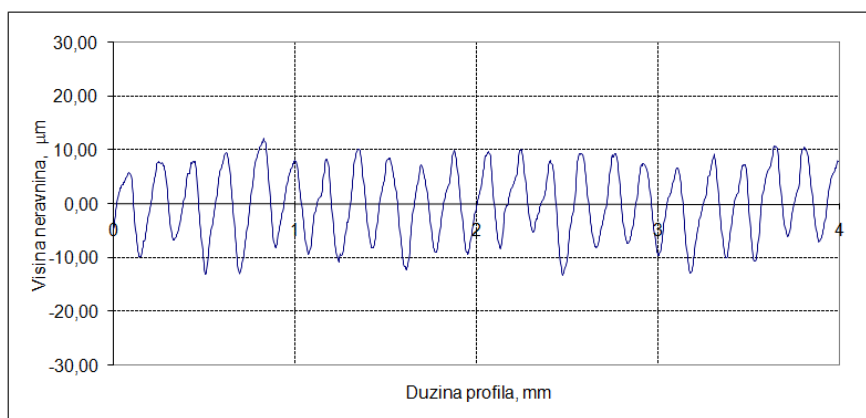
Узорак 15

Табела 4.5.16. Експеримент 16

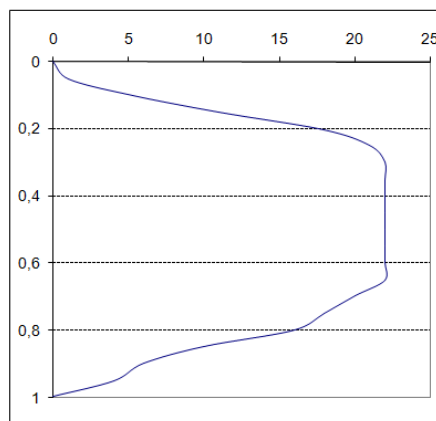
Узорак 16	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.54	19.57	0.563	0.83	3.82

Параметри топографије узорка 16

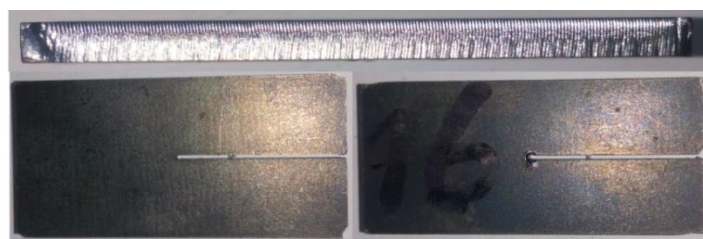
Rt1 = 22.6 μm	Ry = 22.8 μm	Sm = 178 μm
Rt2 = 22.8 μm	Rtm = 22.3 μm	S = 162 μm
Rt3 = 22.3 μm	Rv = 13.2 μm	DELQ = 13.6 deg
Rt4 = 22.6 μm	Rp = 12.2 μm	Rsk = -0.2 $\square$
Rt5 = 21.3 μm	R3z = 17.2 μm	Rku = 1.9 $\square$
Ra = 5.41 μm	Rpm = 10.4 μm	
Rq = 6.28 μm	R3y = 18.6 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



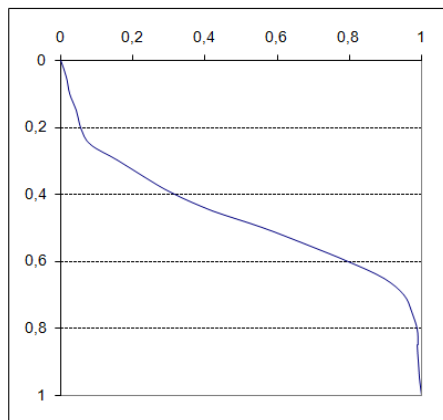
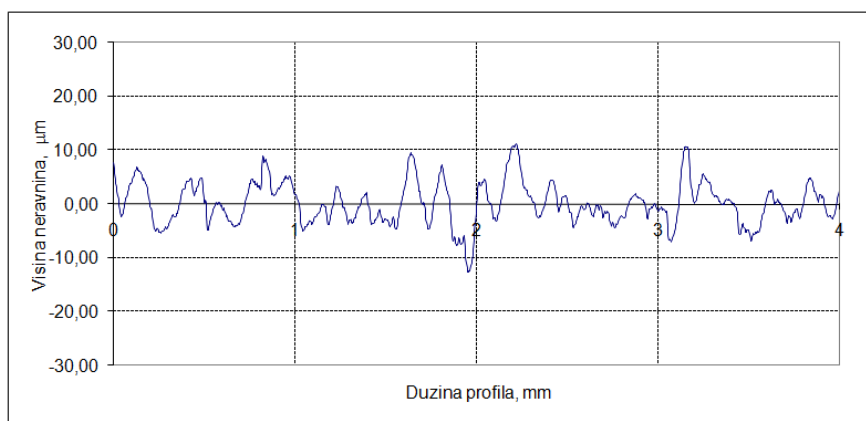
Узорак 16

Табела 4.5.17. Експеримент 17

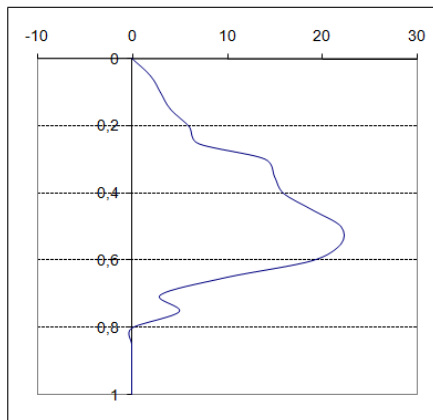
Узорак 17	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.62	19.61	0.53	0.829	4.27

Параметри топографије узорка 17

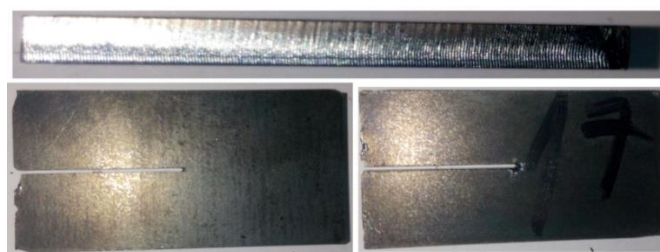
Rt1 = 13 μm	Ry = 23.8 μm	Sm = 206 μm
Rt2 = 13.9 μm	Rtm = 16.2 μm	S = 65 μm
Rt3 = 23.8 μm	Rv = 12.7 μm	DELQ = 8.7 deg
Rt4 = 17.6 μm	Rp = 11.1 μm	Rsk = 0.2 $\square$
Rt5 = 12.6 μm	R3z = 9.5 μm	Rku = 3.5 $\square$
Ra = 3.04 μm	Rpm = 8.8 μm	
Rq = 3.88 μm	R3y = 14.7 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



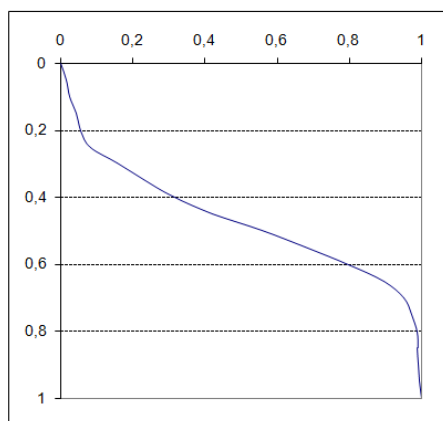
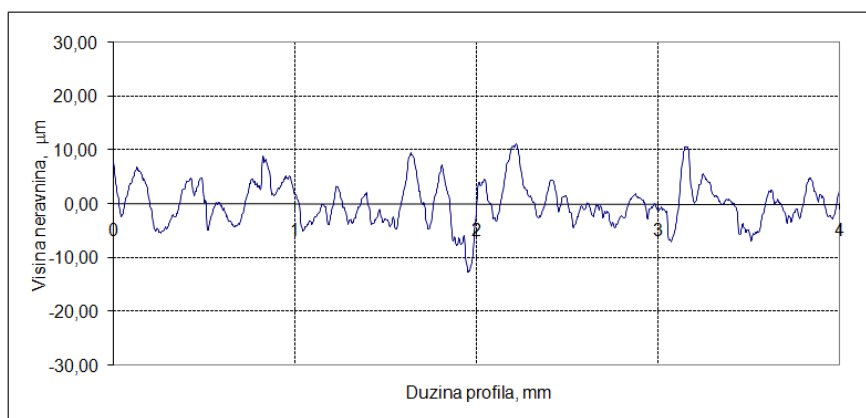
Узорак 17

Табела 4.5.18. Експеримент 18

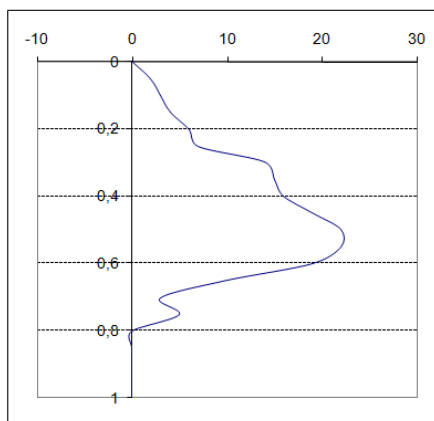
Узорак 18	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.6	19.62	0.545	0.861	4.52

Параметри топографије узорка 18

Rt1 = 13 μm	Ry = 23.8 μm	Sm = 206 μm
Rt2 = 13.9 μm	Rtm = 16.2 μm	S = 65 μm
Rt3 = 23.8 μm	Rv = 12.7 μm	DELQ = 8.7 deg
Rt4 = 17.6 μm	Rp = 11.1 μm	Rsk = 0.2 $\square$
Rt5 = 12.6 μm	R3z = 9.5 μm	Rku = 3.5 $\square$
Ra = 3.04 μm	Rpm = 8.8 μm	
Rq = 3.88 μm	R3y = 14.7 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



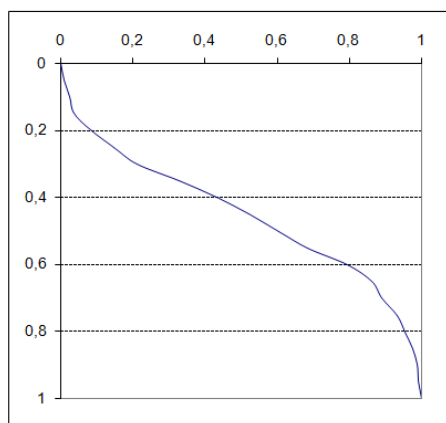
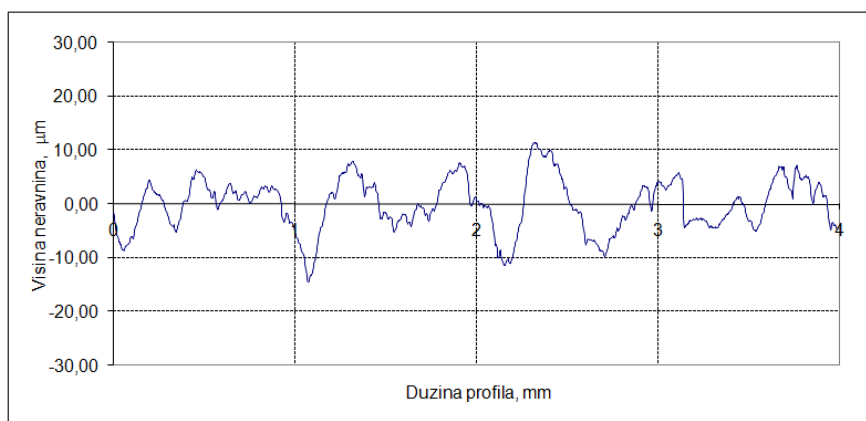
Узорак 18

Табела 4.5.19. Експеримент 19

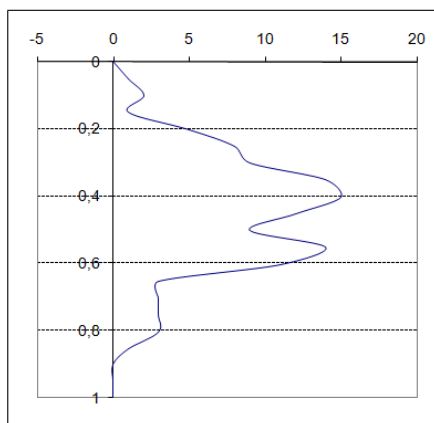
Узорак 19	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.64	19.69	0.45	0.9	5.14

Параметри топографије узорка 19

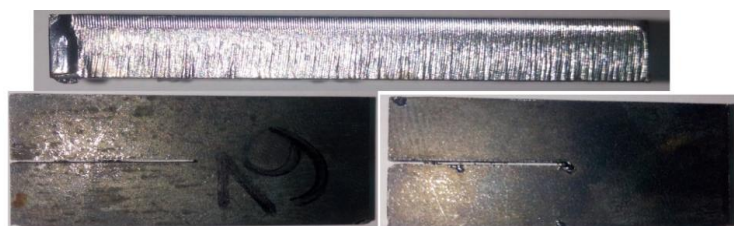
Rt1 = 15 μm	Ry = 22.8 μm	Sm = 312 μm
Rt2 = 22.4 μm	Rtm = 18.4 μm	S = 70 μm
Rt3 = 22.8 μm	Rv = 14.5 μm	DELQ = 7.4 deg
Rt4 = 19.8 μm	Rp = 11.4 μm	Rsk = -0.2 $\square$
Rt5 = 12.2 μm	R3z = 11.1 μm	Rku = 2.8 $\square$
Ra = 3.98 μm	Rpm = 8.6 μm	
Rq = 4.9 μm	R3y = 16.3 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



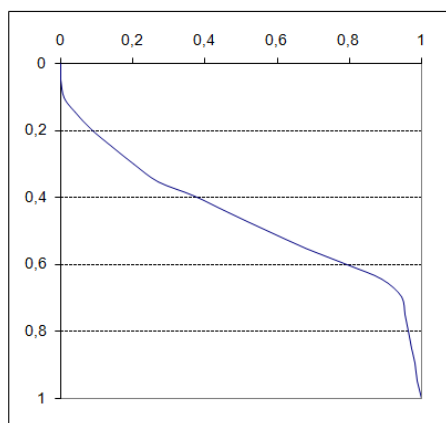
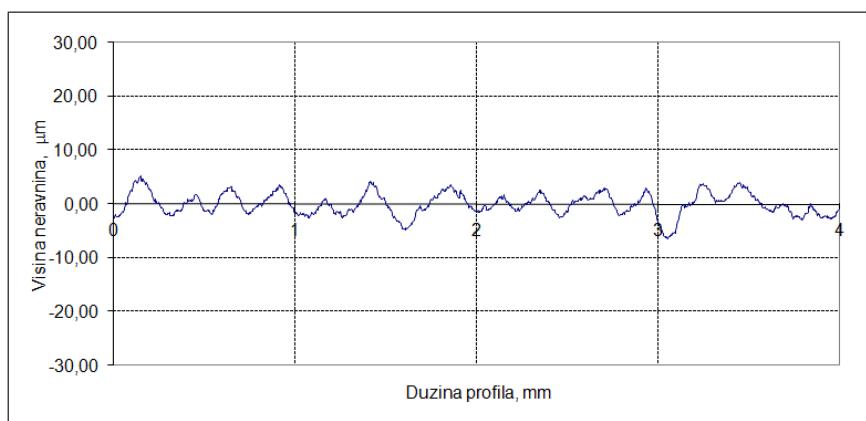
Узорак 19

Табела 4.5.20. Експеримент 20

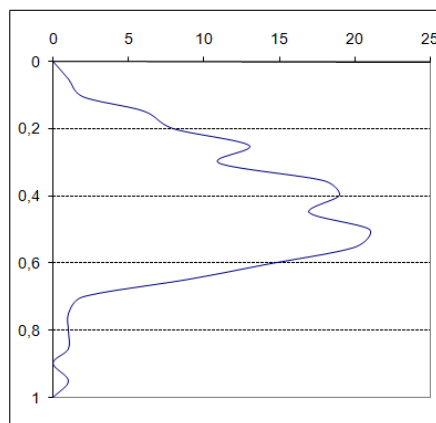
Узорак 20	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.64	19.67	0.439	0.93	5.61

Параметри топографије узорка 20

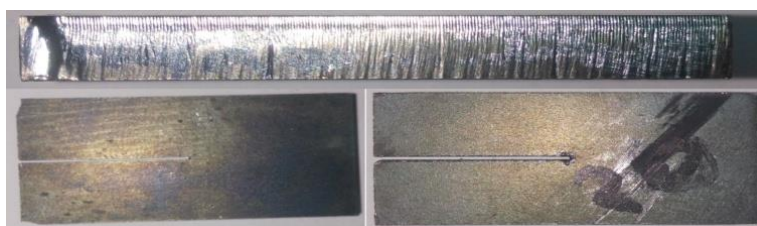
Rt1 = 7.7 μm	Ry = 9.3 μm	Sm = 222 μm
Rt2 = 8.8 μm	Rtm = 8.2 μm	S = 34 μm
Rt3 = 8.3 μm	Rv = 6.4 μm	DELQ = 4.1 deg
Rt4 = 9.3 μm	Rp = 5.2 μm	Rsk = -0.2 ☐
Rt5 = 6.9 μm	R3z = 6.4 μm	Rku = 3.1 ☐
Ra = 1.66 μm	Rpm = 4 μm	
Rq = 2.06 μm	R3y = 8.7 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



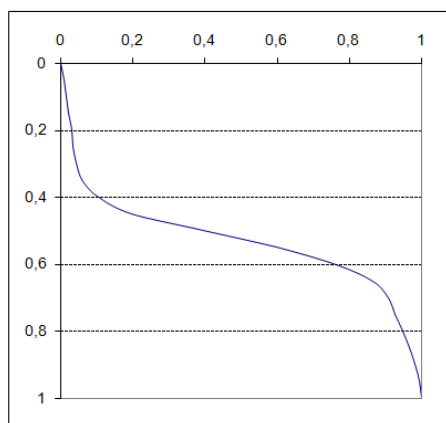
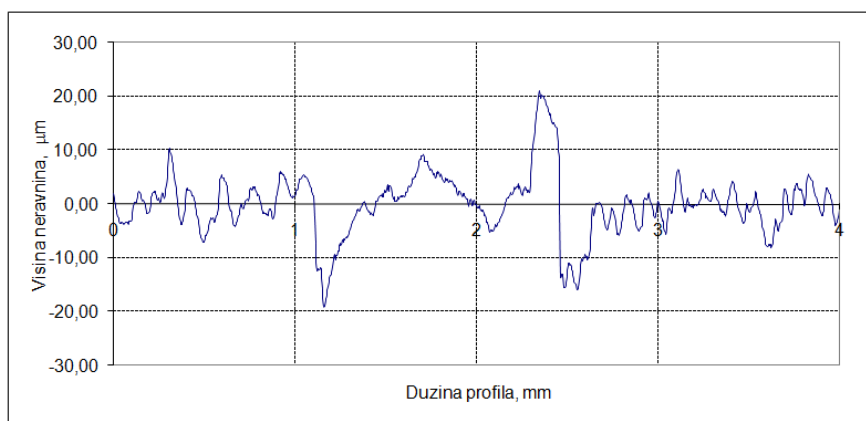
Узорак 20

Табела 4.5.21. Експеримент 21

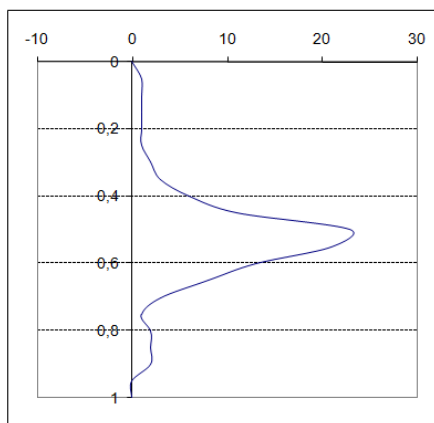
Узорак 21	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.63	19.69	0.439	0.9	5.27

Параметри топографије узорка 21

Rt1 = 17.5 μm	Ry = 32.8 μm	Sm = 173 μm
Rt2 = 25.1 μm	Rtm = 23 μm	S = 72 μm
Rt3 = 26.2 μm	Rv = 19.1 μm	DELQ = 12.5 deg
Rt4 = 32.8 μm	Rp = 21 μm	Rsk = 0.2 $\square$
Rt5 = 13.6 μm	R3z = 9.4 μm	Rku = 5.6 $\square$
Ra = 3.93 μm	Rpm = 12 μm	
Rq = 5.73 μm	R3y = 13.9 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



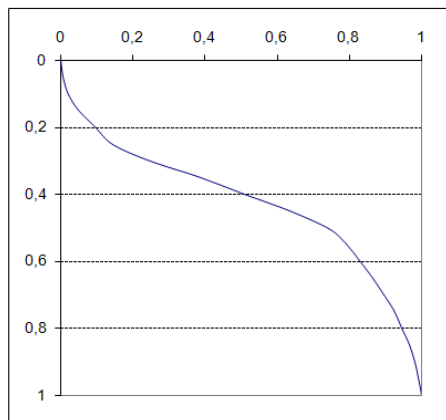
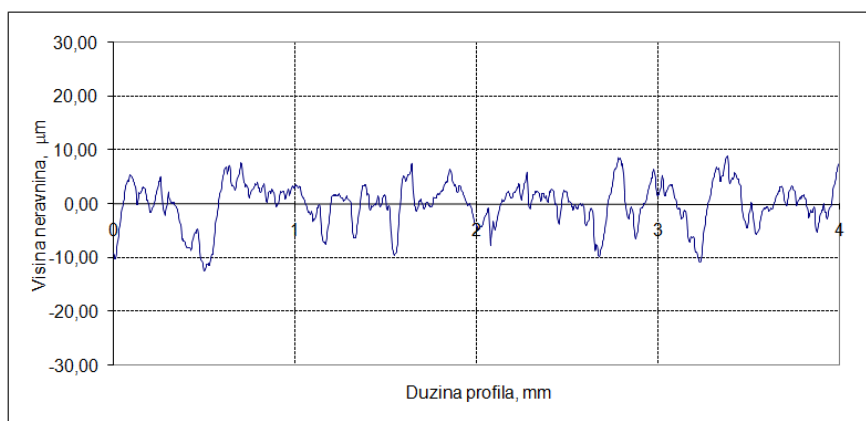
Узорак 21

Табела 4.5.22. Експеримент 22

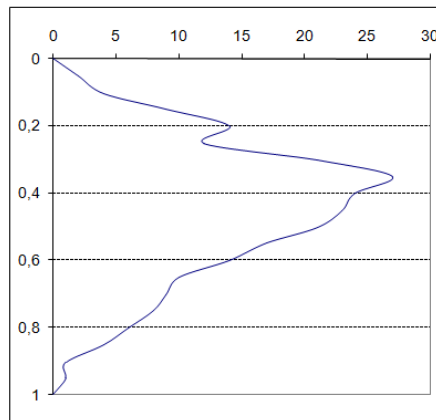
Узорак 22	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.58	19.58	0.5	0.935	4.97

Параметри топографије узорка 22

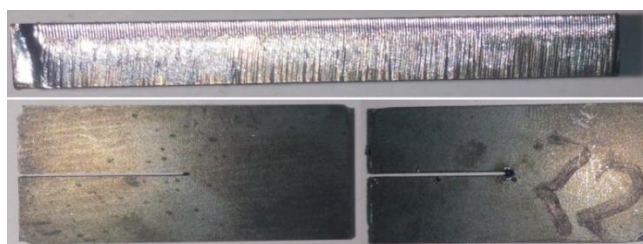
Rt1 = 20.2 μm	Ry = 20.2 μm	Sm = 177 μm
Rt2 = 14.6 μm	Rtm = 17.6 μm	S = 52 μm
Rt3 = 15.2 μm	Rv = 12.5 μm	DELQ = 10.9 deg
Rt4 = 18.4 μm	Rp = 9 μm	Rsk = -0.7 $\square$
Rt5 = 19.8 μm	R3z = 12.4 μm	Rku = 3.3 $\square$
Ra = 3.12 μm	Rpm = 7.6 μm	
Rq = 4.06 μm	R3y = 17 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



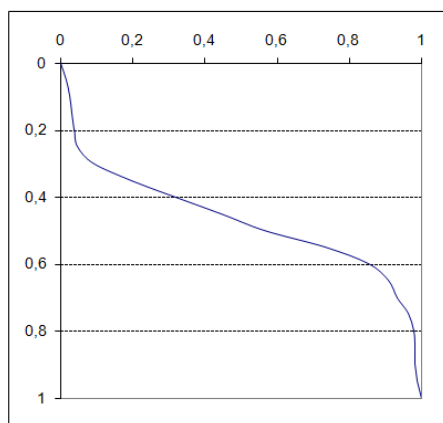
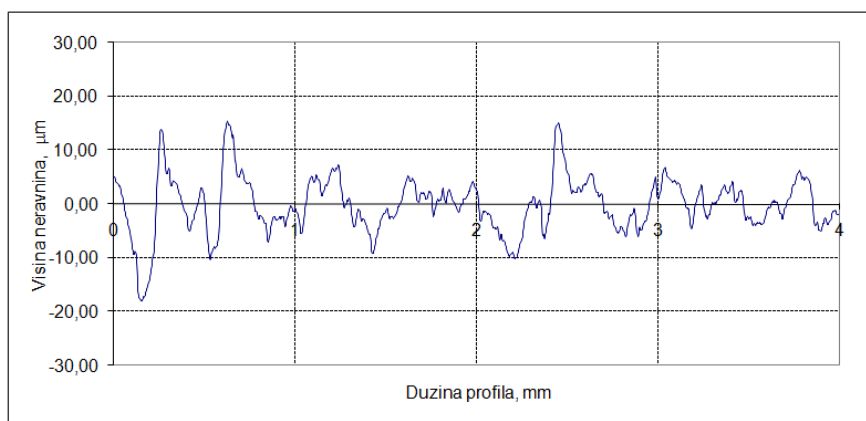
Узорак 22

Табела 4.5.23. Експеримент 23

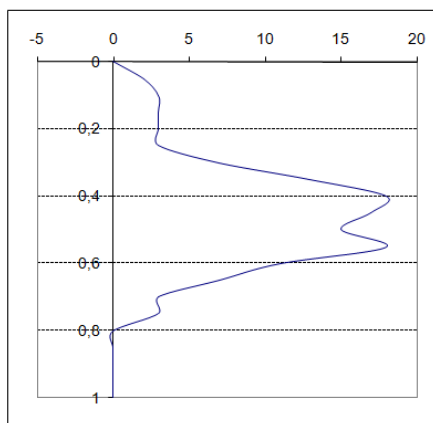
Узорак 23	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.57	19.62	0.453	0.98	6.02

Параметри топографије узорка 23

Rt1 = 33.4 μm	Ry = 33.4 μm	Sm = 231 μm
Rt2 = 16.4 μm	Rtm = 19.5 μm	S = 67 μm
Rt3 = 15.3 μm	Rv = 18 μm	DELQ = 10.3 deg
Rt4 = 21.2 μm	Rp = 15.4 μm	Rsk = -0.1 ☐
Rt5 = 11.1 μm	R3z = 12.3 μm	Rku = 4.5 ☐
Ra = 3.9 μm	Rpm = 9.9 μm	
Rq = 5.15 μm	R3y = 22.1 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



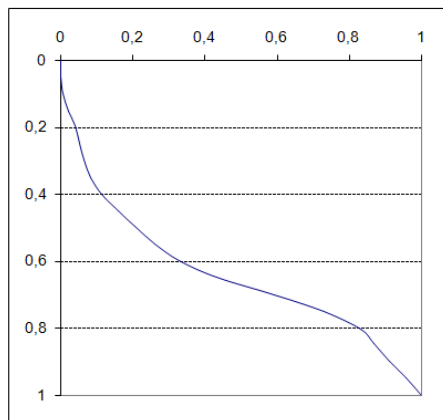
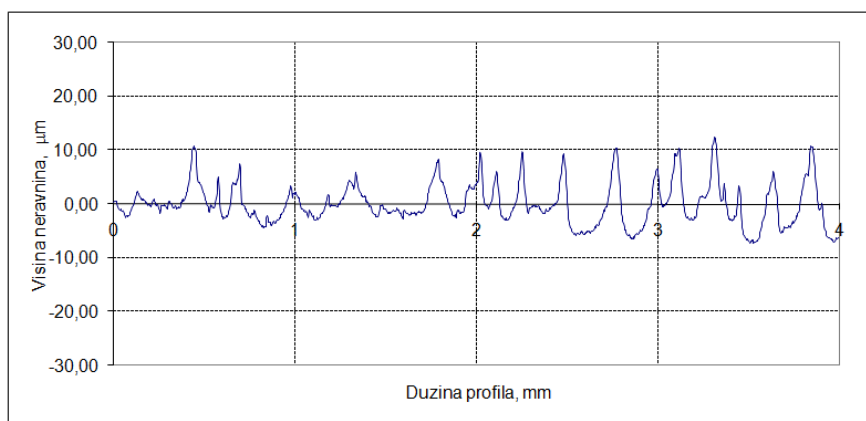
Узорак 23

Табела 4.5.24. Експеримент 24

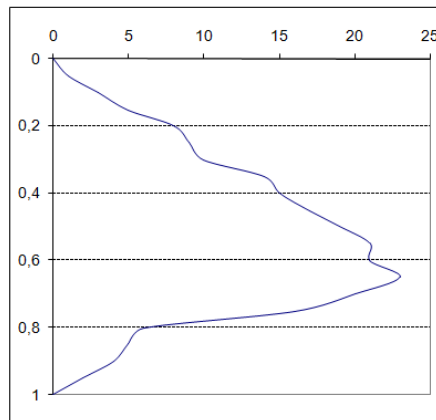
Узорак 24	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.63	19.65	0.458	1.227	8.74

Параметри топографије узорка 24

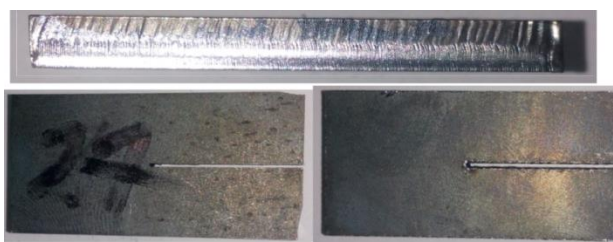
Rt1 =	13.8 μm	Ry =	19.7 μm	Sm =	189 μm
Rt2 =	10.3 μm	Rtm =	14.7 μm	S =	57 μm
Rt3 =	12.7 μm	Rv =	7.2 μm	DELQ=	10.4 deg
Rt4 =	16.9 μm	Rp =	12.5 μm	Rsk =	0.7 $\square$
Rt5 =	19.7 μm	R3z =	10.5 μm	Rku =	3.5 $\square$
Ra =	2.9 μm	Rpm =	9.8 μm		
Rq =	3.82 μm	R3y =	15.1 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



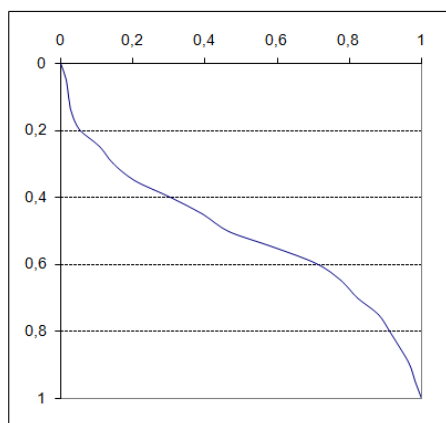
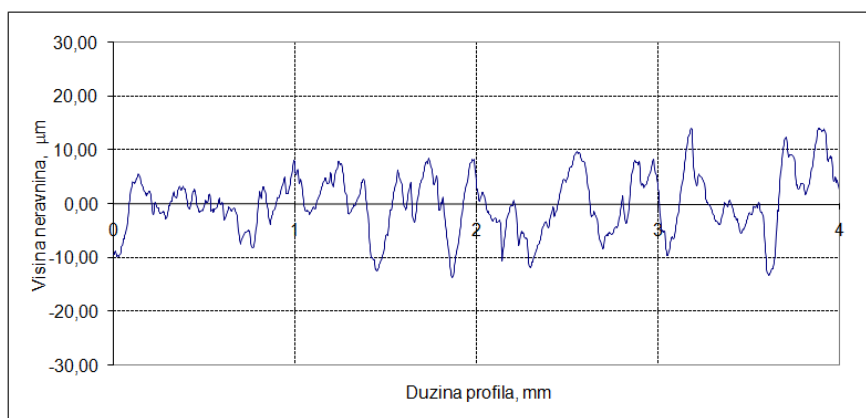
Узорак 24

Табела 4.5.25. Експеримент 25

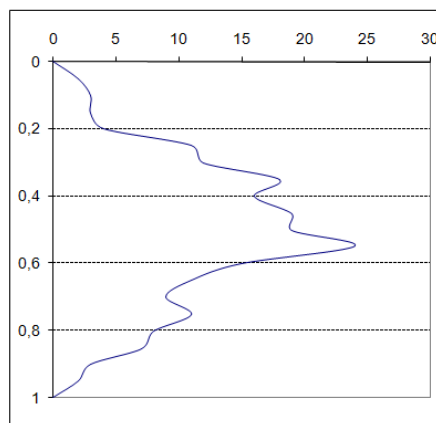
Узорак 25	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.54	19.58	0.555	0.958	4.61

Параметри топографије узорка 25

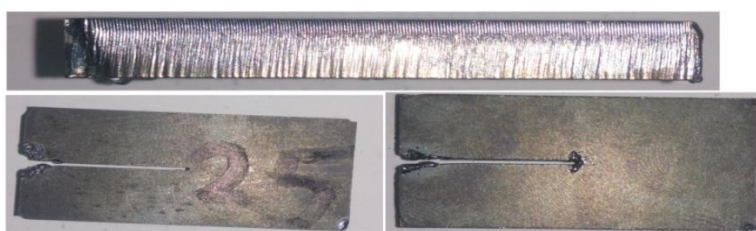
Rt1 = 15.2 μm	Ry = 27.4 μm	Sm = 179 μm
Rt2 = 20.6 μm	Rtm = 21.8 μm	S = 62 μm
Rt3 = 22.1 μm	Rv = 13.6 μm	DELQ = 11.5 deg
Rt4 = 23.7 μm	Rp = 14.1 μm	Rsk = -0.1 $\square$
Rt5 = 27.4 μm	R3z = 13.7 μm	Rku = 2.8 $\square$
Ra = 4.39 μm	Rpm = 10 μm	
Rq = 5.55 μm	R3y = 18.5 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



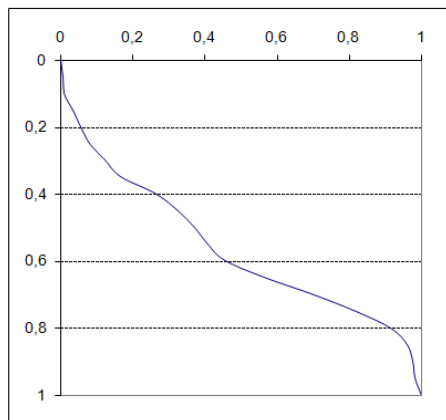
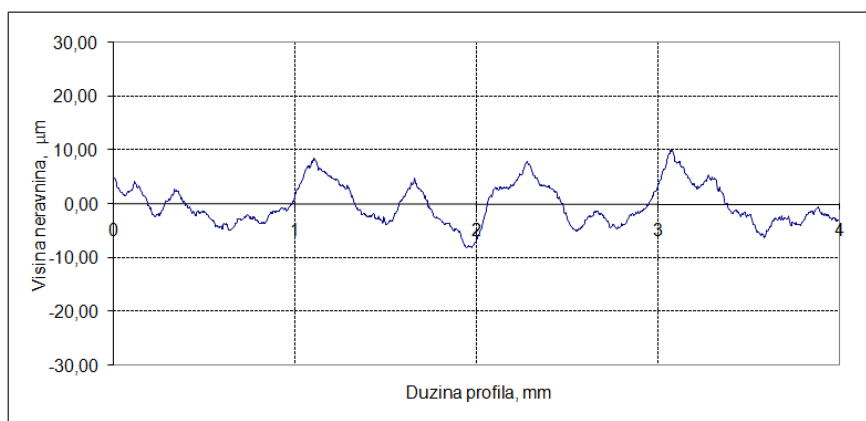
Узорак 25

Табела 4.5.26. Експеримент 26

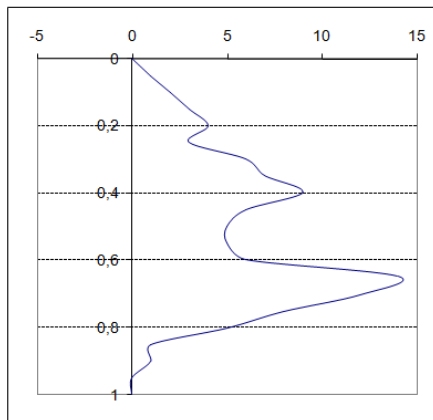
Узорак 26	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.58	19.6	0.515	1.093	6.59

Параметри топографије узорка 26

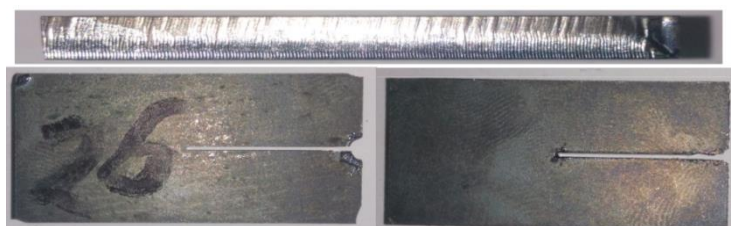
Rt1 = 9.8 μm	Ry = 15.9 μm	Sm = 773 μm
Rt2 = 12.2 μm	Rtm = 12.9 μm	S = 54 μm
Rt3 = 15.9 μm	Rv = 8.1 μm	DELQ = 4.1 deg
Rt4 = 15 μm	Rp = 10 μm	Rsk = 0.4 $\square$
Rt5 = 11.5 μm	R3z = 8 μm	Rku = 2.4 $\square$
Ra = 3.17 μm	Rpm = 7.3 μm	
Rq = 3.72 μm	R3y = 9.5 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



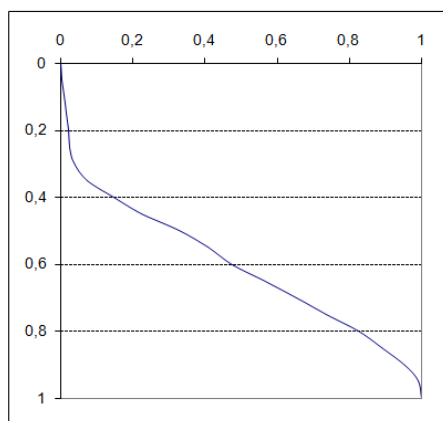
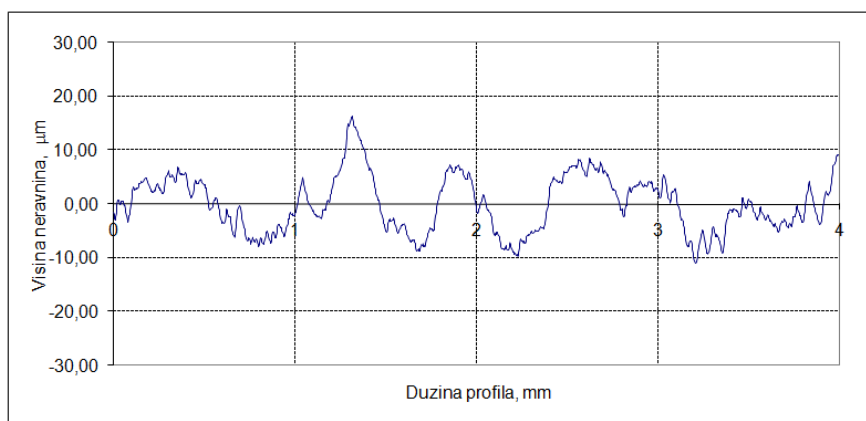
Узорак 26

Табела 4.5.27. Експеримент 27

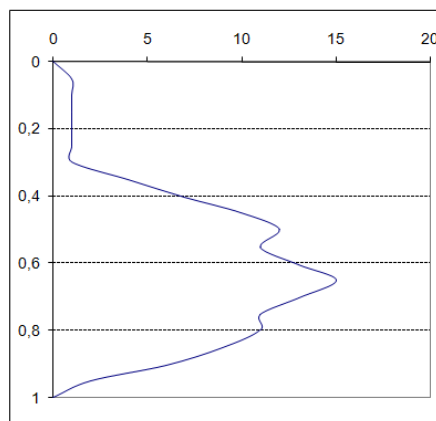
Узорак 27	Дужина, x (задато 40 mm) mm	Ширина, y (задато 20 mm) mm	Ширина реза са горње стране, mm	Ширина реза са доње стране, mm	Угао реза, °
	39.59	19.61	0.525	1.247	8.22

Параметри топографије узорка 27

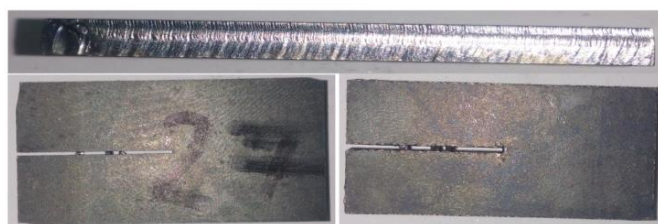
Rt1 = 14.3 μm	Ry = 24.3 μm	Sm = 299 μm
Rt2 = 24.3 μm	Rtm = 18.8 μm	S = 51 μm
Rt3 = 16.9 μm	Rv = 11 μm	DELQ = 7.8 deg
Rt4 = 18.4 μm	Rp = 16.4 μm	Rsk = 0.3 $\square$
Rt5 = 20.2 μm	R3z = 11.2 μm	Rku = 2.7 $\square$
Ra = 4.36 μm	Rpm = 9.6 μm	
Rq = 5.2 μm	R3y = 14.6 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Узорак 27

5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Систематизацијом података из претходних табела 4.5.1 - 4.5.27 добијају се резултати експерименталних испитивања приказани у табели 5.1.

Табела 5.1. Збирни приказ резултата

Опит бр.	s mm	sof mm	v m/min	Ra μm	Rmax μm	Sm μm	x mm	y mm	Wa mm	Wb mm	α °
1	3	0.7	1	3.15	22.5	153	39.61	19.6	0.428	0.702	5.22
2	3	0.7	1.3	1.38	8.7	145	39.63	19.61	0.445	0.663	4.16
3	3	0.7	1.6	2.55	17.3	111	39.64	19.64	0.468	0.615	2.81
4	3	1	1	7.71	29.7	165	39.62	19.54	0.638	0.715	1.47
5	3	1	1.3	7.2	32.1	180	39.6	19.6	0.523	0.685	3.09
6	3	1	1.6	3.47	18.7	138	39.62	19.64	0.508	0.672	3.13
7	3	1.4	1	9.75	45.6	210	39.54	19.59	0.54	0.76	4.19
8	3	1.4	1.3	9.26	35.3	191	39.56	19.57	0.545	0.743	3.78
9	3	1.4	1.6	7.32	35.8	236	39.59	19.59	0.543	0.74	3.76
10	4	0.7	1	2.33	15.8	189	39.54	19.54	0.601	0.905	4.35
11	4	0.7	1.3	4.07	27.6	187	39.62	19.6	0.565	0.91	4.93
12	4	0.7	1.6	5.18	36.4	294	39.60	19.6	0.56	0.765	2.93
13	4	1	1	6	26.3	207	39.51	19.51	0.625	0.885	3.72
14	4	1	1.3	3.54	24.6	176	39.6	19.62	0.455	0.81	5.07
15	4	1	1.6	4.23	26.2	209	39.61	19.62	0.46	0.816	5.09
16	4	1.4	1	5.41	22.8	178	39.54	19.57	0.563	0.83	3.82
17	4	1.4	1.3	3.04	23.8	206	39.55	19.59	0.53	0.829	4.27
18	4	1.4	1.6	3.04	23.8	206	39.57	19.6	0.545	0.861	4.52
19	5	0.7	1	3.98	22.8	312	39.64	19.69	0.45	0.9	5.14
20	5	0.7	1.3	1.66	9.3	222	39.64	19.67	0.439	0.93	5.61
21	5	0.7	1.6	3.93	32.8	173	39.63	19.69	0.439	0.9	5.27
22	5	1	1	3.12	20.2	177	39.58	19.58	0.5	0.935	4.97
23	5	1	1.3	3.9	33.4	231	39.57	19.62	0.453	0.98	6.02
24	5	1	1.6	2.9	19.7	189	39.63	19.65	0.458	1.227	8.74
25	5	1.4	1	4.39	27.4	179	39.54	19.58	0.555	0.958	4.61
26	5	1.4	1.3	3.17	15.9	773	39.58	19.6	0.515	1.093	6.59
27	5	1.4	1.6	4.36	24.3	299	39.59	19.61	0.525	1.247	8.22

У табели су:

Ra - средње одступање линија профила од средње линије профила,

Rmax - максимална висина неравнина,

Sm - средњи корак испупчења профила неравника,,

x - задата вредност је 40 mm,

y - задата вредност је 20 mm,

W_a - ширина реза на улазној страни ласерског снопа,

W_b - ширина реза на излазној страни ласерског снопа,

α - укупан угао реза.

Анализа резултата истраживања мерења параметара топографије површине је показала да се може довољно квалитетно успоставити зависност између услова обраде сечењем ласером и мерених величина. Накнадном визуелним увидом у површину испитиваних узорана и начина мерења констатовано је да није изабрано место мерења топографије на квалитетан начин. Мерење параметара топографије је вршено приближно на средини дуже димензије узорка и на приближно средини дебљине узорка. У зависности од параметара услова обраде на узорцима се уочавају два различита појаса са различитом топографијом по дебљини узорка. На улазном делу, најчешће мање ширине, уочена је површина са мањом храпавошћу, док је на излазном делу на појединим узорцима значајна храпавост, слика 5.1. Закључено је да се мерења параметара топографије површине морају поново измерити. Нова мерења треба извршити посебно на улазном делу а посебно на излазном делу, а такође потребно је измерити и ширину ових појаса.



Узорак 4 (3 мм)

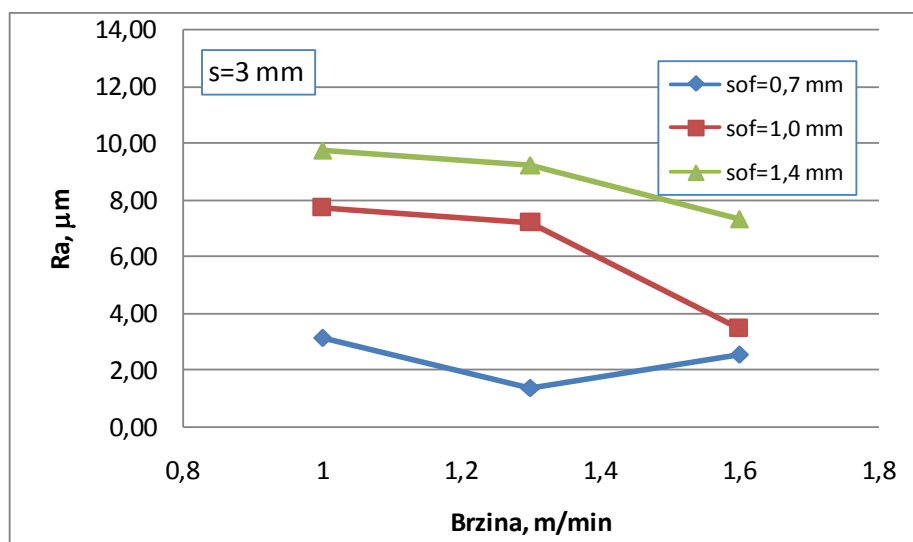


Узорак 25 (5 мм)

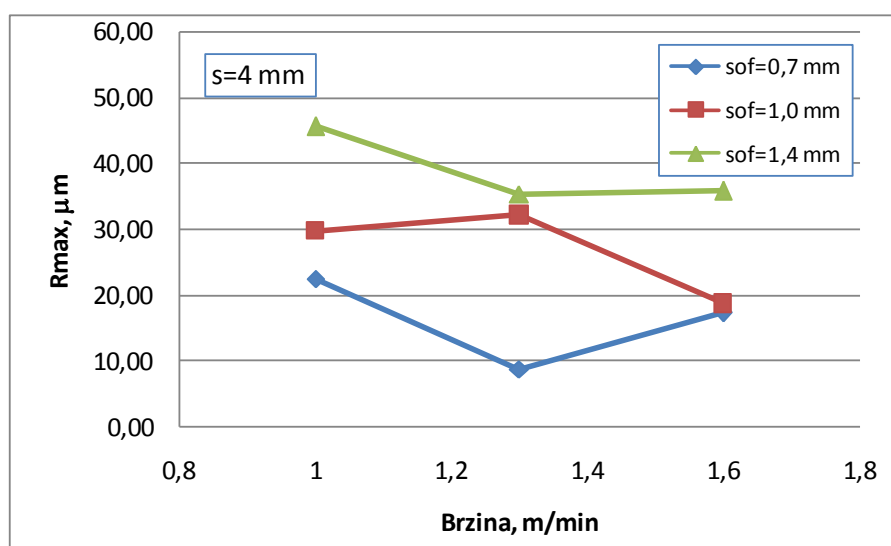
Слика 5.1. *Различита топографија површине на улазном (горњем) и излазном (дољем) делу узорка 25*

На сликама од 5.3 до 5.5 приказани су резултати мерења топографије површине на узорцима дебљине 3 мм. На овим узорцима је уочена најмања разлика у топографији улазног и излазног појаса на површини реза. Може се закључити да са повећањем брзине резања долази до повећања квалитета површине, односно смањења висине неравнина. Површине са најбољим квалитетом површине са аспекта храпавости су површине добијене са најмањим растојањем ласерске главе од површине сечења. Највеће висинаме неравнина, односно храпавост је добијена са највећим растојањем. Може се такође закључити да утицај параметара услова обраде има сличан карактер на висинске (R_a , R_{max}) и на дужинске (S_m) параметри храпавости.

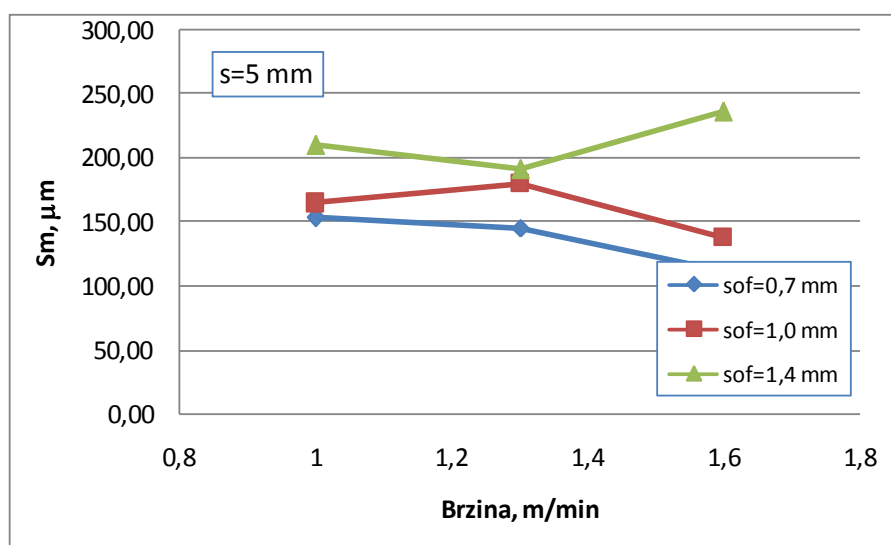
Како мерни систем Talysurf-6 сада није у функцији (у квару је) и није могуће поновити мерења топографије површина у скоријем времену, у даљем делу рада извршена је анализа осталих резултата мерења.



Слика 5.3. Зависноти параметра Ra хrapавости реза за обрадак дебљине 3 mm

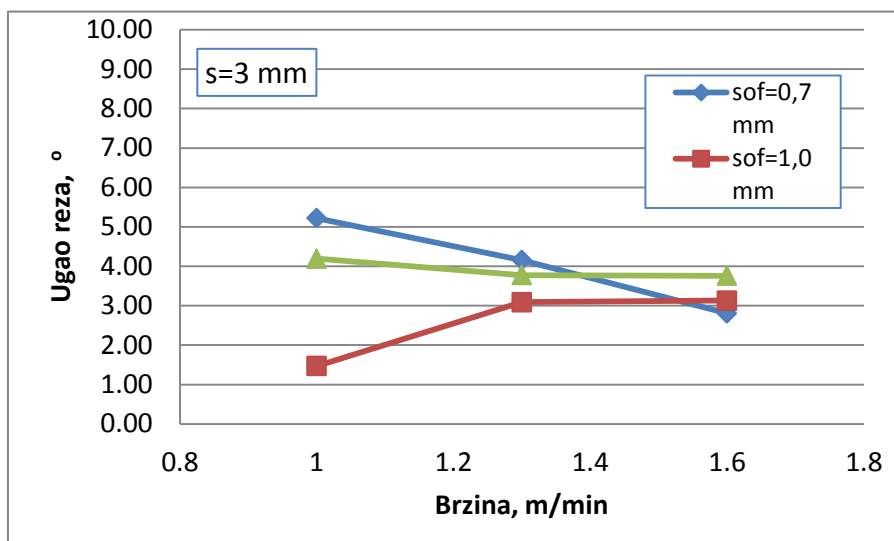


Слика 5.4. Зависноти параметра $R_{\max}$ хrapавости реза за обрадак дебљине 3 mm



Слика 5.5. Зависноти параметра S_m хrapавости реза за обрадак дебљине 3 mm

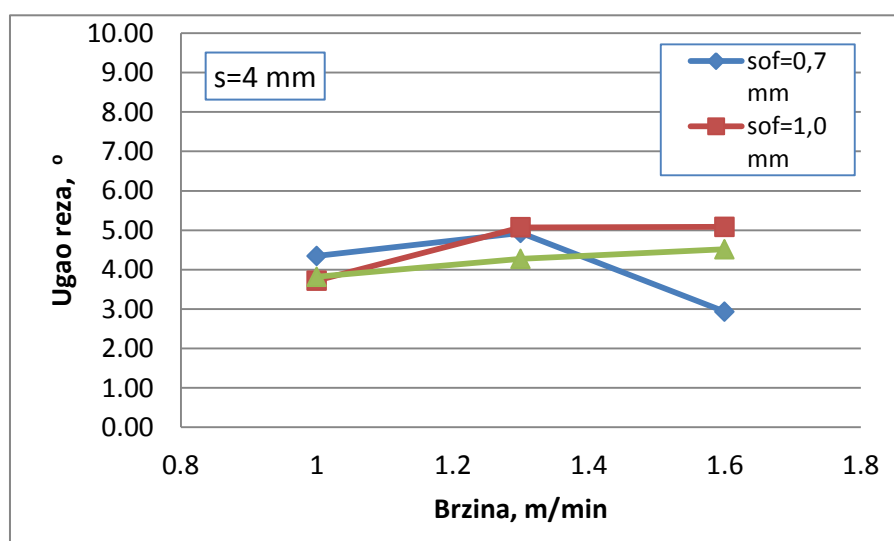
На сликама 5.6 до 5.11 су приказани резултати зависности укупног угла реза од услова обраде: дебљине испитиваног материјала, брзине резања и одстојања ласерске главе од предмета обраде.



Слика 5.6 Зависности угла реза од брзине сечења ласером при различитим одстојањима ласерске главе од обрадка дебљине 3 mm

Добијени резултати указују да променом брзине резања ласером на материјалу дебљине 3 mm се јавља следеће:

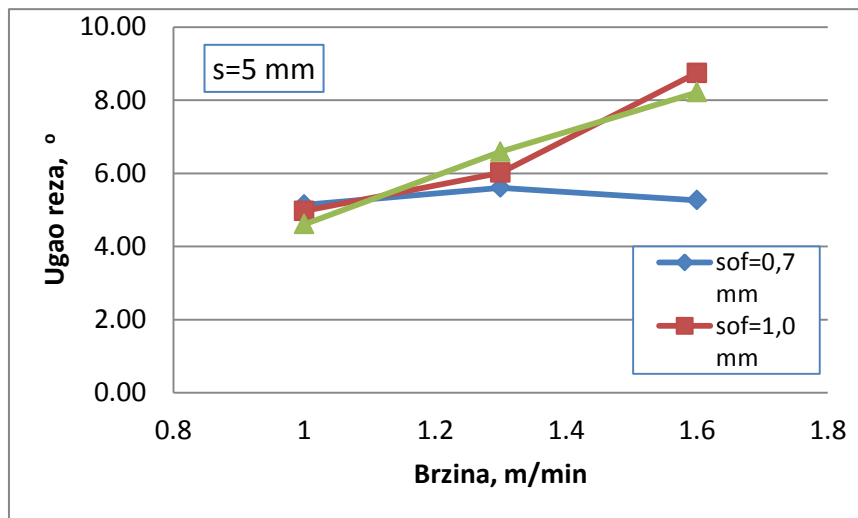
- При растојању ласерске главе од материја 0,7 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза опада, при растојању ласерске главе од материја 1 mm и 1,4 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза расте,
- Највећи угао реза је код најмањег растојања ласерске главе од материја, а са повећањем растојања угао реза у највећем броју случајева опада.



Слика 5.7. Зависности угла реза од брзине сечења ласером при различитим одстојањима ласерске главе од обрадка дебљине 4 mm

Добијени резултати указују да променом брзине резања ласером на материјалу дебљине 4 mm се јавља следеће:

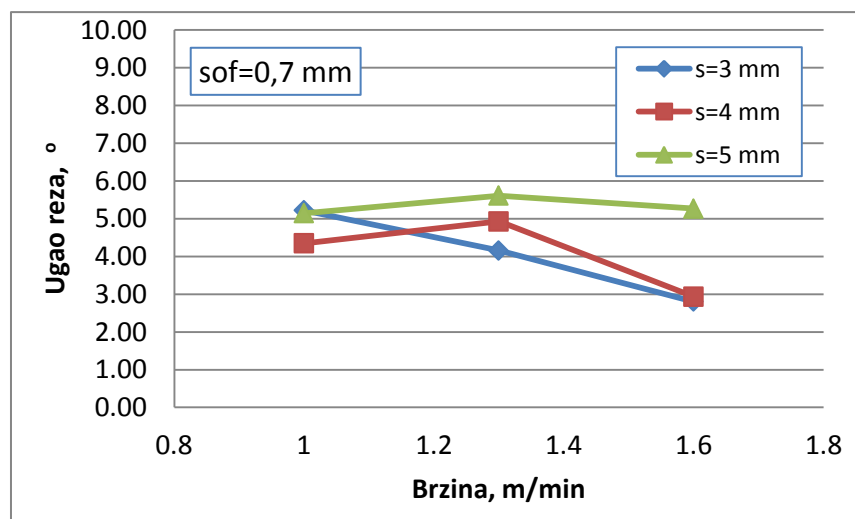
- При растојању ласерске главе 0,7 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза расте до брзине од 1,3 m/min а затим опада, при растојању ласерске главе 1 mm и 1,4 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза расте,
- У највећем броју случајева растојање ласерске главе од материја нема значајнији утицај на величину угла реза.



Слика 5.8. Зависности угла реза од брзине сечења ласером за обрадак дебљине 5 mm

Добијени резултати указују да променом брзине резања ласером на материјалу дебљине 5 mm се јавља следеће:

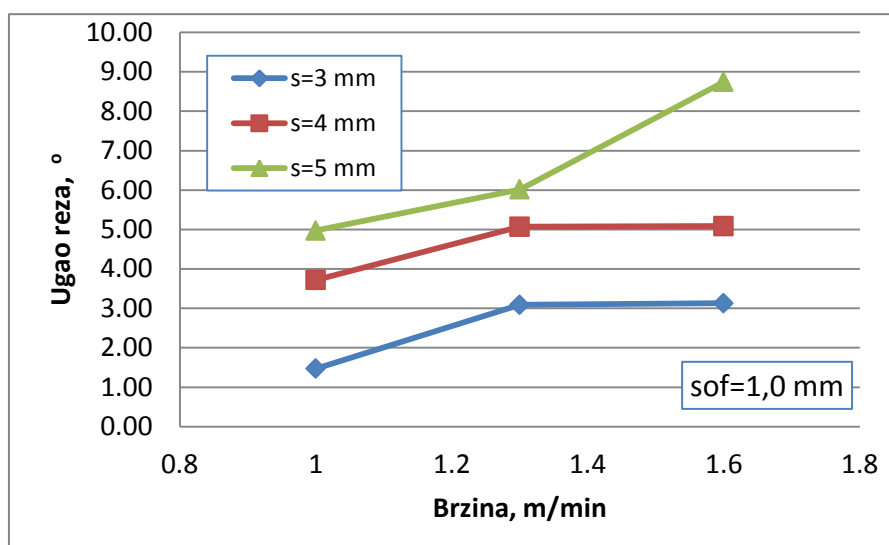
- При растојању ласерске главе од материја од 0,7 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза се незнатно мења, при растојању ласерске главе од материја од 1 mm и 1,4 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза расте,
- У највећем броју случајева растојање ласерске главе од материја нема значајнији утицај на величину угла реза. Уочено је да само у случају највеће брзине резања и најмањег растојања угао реза има мању вредност у односу на остале услове испитивања.



Слика 5.9. Зависности угла реза од брзине сечења ласером при одстојању ласерске главе 0.7 mm

Добијени резултати указују да променом брзине резања ласером на материјалу са одстојањем ласерске главе 0,7 mm се уочава следеће:

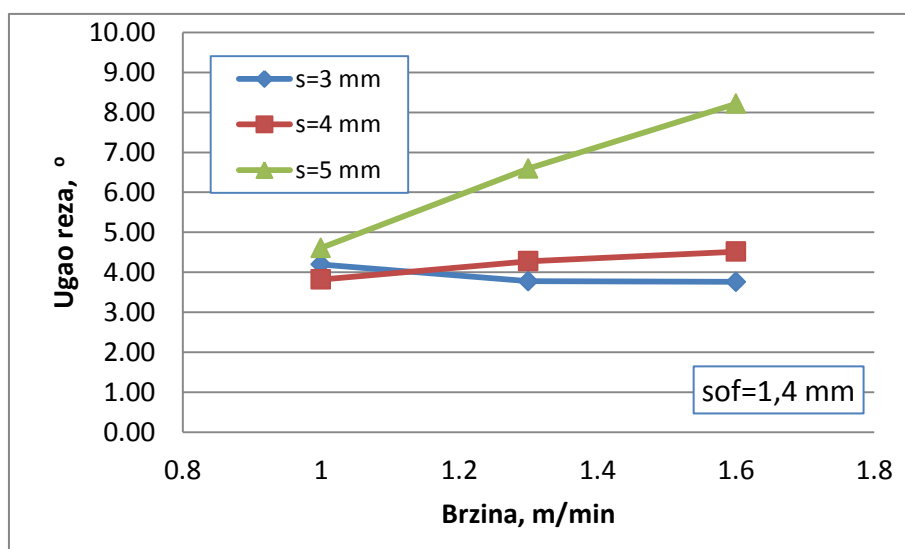
- При дебљини материјала од 3 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза опада, при дебљини материјала 4 mm и 5 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза се незнатно мења, стим да при сечењу материјала 4 mm угао реза опада након брзине сечења од 1.3 m/min,
- Најмањи угао реза је при обради метеријала дебљине 3 mm, а највећи код највеће дебљине материјала.



Слика 5.10. Зависности угла реза од брзине сечења ласером при одстојању ласерске главе 1 mm

Добијени резултати указују да се са променом брзине резања ласером на материјалу са одстојањем ласерске главе 1 mm добија следеће:

- При свим дебљинама са повећањем брзине сечења угао реза расте,
- Најмањи угао реза је при обради метеријала дебљине 3 mm, а највећи код највеће дебљине материјала.

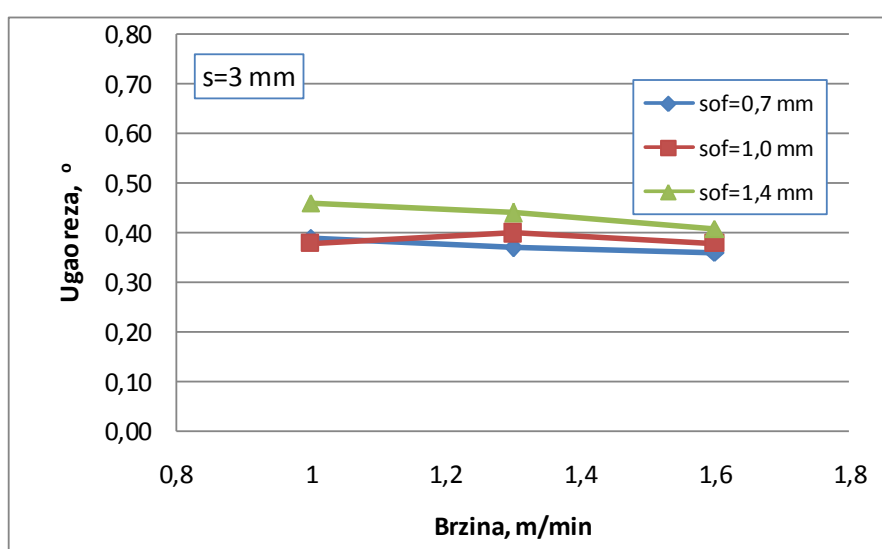


Слика 5.11. Зависности угла реза од брзине сечења ласером при одстојању ласерске главе 1.4 mm

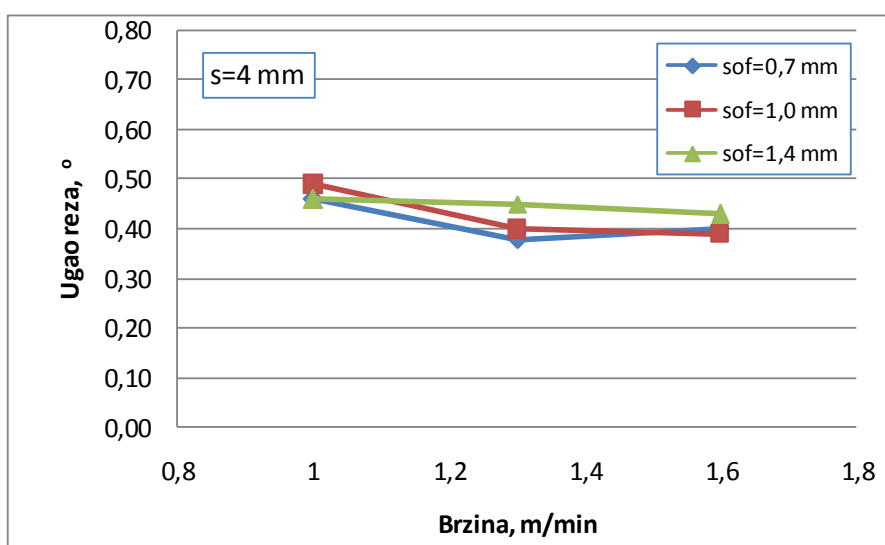
Добијени резултати указују да се променом брзине резања ласером на материјалу са одстојањем ласерске главе 1.4 mm добија се следеће:

- При дебљини материјала од 3 mm и 4 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза се незнатно мења, при дебљини материјала 5 mm са повећањем брзине сечења материјала угао реза се повећава,
- Најмањи угао реза је при обради материјала дебљине 3 mm, а највећи код највеће дебљине материјала.

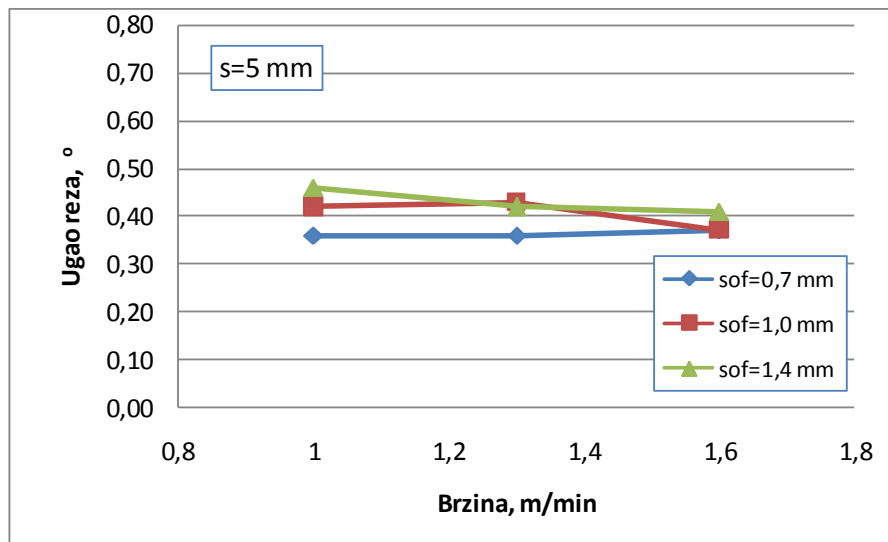
На сликама 5.12 до 5.14 су приказани резултати мерења одступања добијене дужине узорка од називне мере (40 mm). Одступања ширине узорка од називне мере (20 mm) су приближно истих вредности и због тога нису разматрана у оквиру ове анализе.



Слика 5.12. Промена дужине узорка у зависности од брзине сечења ласером при различитим одстојањима ласерске главе од обрадка дебљине 3 mm



Слика 5.13. Промена дужине узорка у зависности од брзине сечења ласером при различитим одстојањима ласерске главе од обрадка дебљине 4 mm



Слика 5.14. Промена дужине узорка у зависности од брзине сечења ласером при различитим одстојањима ласерске главе од обрадка дебљине 5 mm

Анализом утицаја дебљине материјала и параметара обраде на одступање добијене дужине узорка од називне мере може се закључити следеће:

- Са повећањем брзине сечења у свим случајевима испитивања је дошло до смањења одступања,
- Највеће одступање од називне мере је код узорака са највећим растојањем ласерске главе од материјала 1,4 mm, а најмање код узорака са растојањем ласерске главе од материјала 0,7 mm. Уочене разлике димензија су до 0,1 mm.
- На основу добијених резултата мерења не може се јасно утврдити утицај дебљине узорака на промену димензија узорака након сечења.

6. ЗАКЉУЧАК

Применом ласерских поступака обраде материјала могуће је задовољити и навише захтеве везане за квалитет обраде. Поступци ласерске обраде су постали неземљиви у индустријама које израђују делове који захтевају висок степен прецизности. Ласерско сечење као процес обраде материјала поседује низ предности у односу на конвенционалне поступке обраде. Ширина реза је мала, површине реза су равне, топлотно деформисани слој је мали, могуће је сећи радни предмети компликованих контура са великом прецизношћу, могућа је обрада готово свих познатих врста материјала, додатна обрада није потребна, чист је и еколошки прихватљив, не захтева израду алата као код конвенционалних поступака и пружа висок степен флексибилности у процесу обраде због могућност промене параметар у току обраде.

Са технолошког аспекта, технологија ласерског сечења представља веома сложен процес интеракција ласерског снопа, помоћног гаса и материјала обратка на чије перформансе утиче велики број фактора. Недовољно познавање процеса, као и недостатак довољно поузданих практичних података и знања о утицајним факторима процеса доводи до недовољне искоришћености технологије ласерског сечења с обзиром на могућности које она пружа, али и до тога да квалитет обраде често не задовољава кориснике.

Реализована испитивања су показала да дебљина материјала и услови сечења ласерским снопом утичу на параметре квалитета одбраде и да им се пре почетка обраде мора посветити значајна пажња. За услове испитивања може се закључити:

- Храпавост површина реза је различита по ширини реза и потребно је вршити посебно мерења на улазном и излазном делу. На излазном делу је значајно већа храпавост.
- Са повећањем брзине резања (у области брзина у којима је вршено испитивање) долази до повећања квалитета површине, односно смањења висине неравнина. Површине са најбољим квалитетом површине са аспекта храпавости су површине добијене са најмањим растојањем ласерске главе од површине сечења. Највеће висинаме неравнина, односно храпавост је добијена са највећим растојањем. Може се такође закључити да утицај параметара услова обраде има сличан карактер на висинске (R_a , R_{max}) и на дужинске (S_m) параметри храпавости.
- Са повећањем брзине резања у највећем броју случајева долази до повећања угла реза, који се креће у границама од 3 до 8 °. Не може се утврдити зависност дебљине материјала и растојања ласерске главе од материјала на угао реза. Потребна су обимнија испитивања.

- Са повећањем брзине сечења у свим случајевима испитивања је дошло до смањења одступања дужине узорка од називне мере, највеће одступање од називне мере је код узорака са највећим растојањем ласерске главе од материјала 1,4 mm, а најмање код узорака са растојањем ласерске главе од материјала 0,7 mm. Уочене разлике димензија су до 0,1 mm и на основу добијених резултата мерења не може се јасно утврдити утицај дебљине узорака на промену димензија узорака након сечења.

Реализована испитивања, измерене вредности и анализа резултата указују да потребу поновног мерења узорака и понављања експеримента у случајевима значајног одступања измерене вредности од очекиване, односно у случајевима значајних одступања измерених вредности од литературних података или резултата претходни испитивања. Такође, потребан је други, шири план експеримента који би обухватио веће опсеге параметара услова сечења. Такође испитивањима је потребно узети у обзир и утицај снаге ласерског снопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миодраг Лазић; Неконвенционални поступци обраде; Научна књига, Београд 1990.
2. Недић Б., Лазић М.: Производне технологије: Обрада метала резањем – предавања, скрипта, Машински факултет Крагујевац, 2007.
3. William T. Silvast, „Laser Fundamentals“ друго издање, Cambridge University press 2004, ISBN 0-521-83345-0.
4. Недић Б., Неконвенционални поступци обраде (поглавље Обрада ласером), књига у рукопису, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
5. <https://www.explainthatstuff.com/lasers.html>, приступљено 06.09.2019
6. <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/how-lasers-work/>, приступљено 06.09.2019
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/Nova_\(laser\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Nova_(laser)), приступљено 08.09.2017
8. https://sh.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera, приступљено 10.09.2017
9. <http://britneyspears.ac/physics/fplasers/fplasers.htm>, приступљено 10.09.2017
10. https://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-999-LaserCourse/C03-M10-LiquidDyeLasers/mod03_10.htm, приступљено 11.09.2019
11. <https://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/heliumneonlaser.html>, приступљено 11.09.2019
12. Narendra B. Dahotre, Sandip P. Harimkar, „Laser Fabrication and Machining of Materials“ 2008 Springer, ISBN 978-0-387-72343-3
13. <http://www.laserskovarenje.com.hr/index.php/>, приступљено 11.09.2019.
14. F Series User Manual, Jinan Bodor Laser Corporation Limited.