

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Никола М. Марић

**Примена сечења ласером за израду епрувета за
испитивање механичких карактеристика**

мастер рад

Крагујевац, 2018.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвекционални поступци обраде

Број индекса: 394/2015

Никола М. Марић

**Примена сечења ласером за израду епрувета за
испитивање механичких карактеристика**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

МАСТЕР РАД

са темом:

ПРИМЕНА СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ ЗА ИЗРАДУ ЕПРУВЕТА ЗА ИСПИТИВАЊЕ МЕХАНИЧКИХ КАРАКТЕРИСТИКА

За кандидата: Марић Никола, број индекса: 394/2015

У оквиру мастер рада кандидат треба да размотри проблематику поступака обраде ласером, елементе опреме и карактеристике машина и примере примене. У посебном делу рада потребно је описати машину Salvagnini L3, која се налази у предузећу Металац Посуђе, Горњи Милановац. Потребно је извршити експериментална испитивања утицаја режима обраде сечења ласером на квалитет обрађене површине и на резултате испитивања механичких карактеристика лимова St13.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања
2. Анализа процеса обраде ласером
3. Преглед и карактеристике машине Salvagnini L3
4. Програмирање машине
5. Експериментална испитивања
6. Закључак
7. Литература.

ПРЕДМЕТНИ НАСТАВНИК

Проф. др Богдан Недић

Крагујевац, 2018. год.

РЕЗИМЕ

У овом раду је описана је анализа процеса сечења ласером, принципи рада најзаступљенијих ласера у индустрији. Посебан осврт је дат опису фибер ласера Salvagnini L3 који се налази у компанији Металац Посуђе, Горњи Милановац и програмирању ове машине. Извршено је сечење 9 епрувета на овој машини, од 3 различита добављача лима. Измерена је хрпавост и извршено је испитивање на кидалици тестом једноосног затезања. Приложени су резултати испитивања и изведени су закључци.

Кључне речи:

епрувета, сечење, ласер, испитивање, фибер ласер.

ABSTRACT

This paper describes the analysis of the laser cutting process, the working principle of the most common lasers in the industry. A special attention is given to the description of the fiber laser Salvagnini L3, which is located in the company Metalac Posudje, Gornji Milanovac and programming of this machine. Cutting of 9 specimens was carried out on this machine, from 3 different sheet metal suppliers. Roughness was measured and then specimens were put to tensile testing. The results of the test were attached and conclusions were drawn.

Keywords:

specimen, cutting, laser, testing, fiber laser.

Садржај

1. Уводна разматрања	1
2. Анализа процеса обраде ласером	3
2.1 Историјат и врсте индустријског ласера	3
2.2 Принцип рада ласера са чврстим емитером	4
2.3 Принцип рада CO ₂ ласера.....	7
2.4 Принцип рада фибер ласера	9
2.5 Енергетске и геометријске карактеристике ласерског зрака	13
2.6 Принцип обраде ласером.....	16
2.6.1 Утицај положаја фокуса у односу на површину обратка	22
2.7 Технолошки поступци обраде ласером.....	23
2.7.1 Ласерско Сечење.....	24
3. Преглед и карактеристике фибер ласера Salvagnini L3	33
4. Програмирање фибер ласера Salvagnini L3	41
5. Експериментална испитивања.....	45
5.1 Утицај параметара обраде сечењем на квалитет обрађене површине	48
5.1.1 Резултати испитивања квалитета обрађене површине.....	50
5.2 Испитивање механичких карактеристика епрувете затезањем	62
5.2.1 Резултати испитивања на кидалици.....	63
6. Закључак	69
7. Литература	71

1. Уводна разматрања

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

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

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

Сечење помоћу ласерског зрака и то скоро свих врста материјала је најраспрострањенија примена ласера у подручју обраде материјала. Ласерско сечење се данас широко примењује при сечењу сложених контура од тврдых и кртих материјала. Има примену и при обради сложених делова који се израђују на преси за просецање и пробијање, ако се ради у малим серијама и при честој промени облика и димензија, за шта је израда алата скупа и дуготрајна.

Циљ овог рада је упознавање са процесом сечења на ласеру, упознавање са ласер машинама за сечење, а посебно фибер ласером Salvagnini L3, затим сечење епрувета на поменутој машини, испитивању епрувета у циљу одређивања зависности квалитета обраде од одређених радних параметара ласерске машине, као и испитивању епрувета на кидалици у циљу одређивања утицаја промене параметара сечења на механичке карактеристике епрувета, а све у циљу одређивања могућности примене ласерског сечења за израду епрувета за испитивање механичких карактеристика.

У другом поглављу је описан кратак историјат и подела индустријског ласера, принципи рада највише примењиваних типова ласера, принцип обраде ласером, као и примена ласера са посебним освртом на ласерско сечење.

У трећем поглављу је дат преглед и карактеристике фибер ласера Salvagnini L3, који се налази у компанији Металац Посуђе, Горњи Милановац, а на ком је извршено сечење епрувета за експериментално испитивање које је дато у петом поглављу.

У четвртом поглављу је приказан поступак програмирања описане машине у софтверу Streamlaser.

У петом поглављу је приказано експериментално испитивање утицаја промене параметара обраде ласерским сечењем на квалитет резане површине, и испитивање механичких карактеристика исечених епрувета како би се преиспитала могућност примене сечења ласером за израду епрувета за испитивање механичких карактеристика.

На крају рада су дати закључци и преглед коришћене литературе.

2. Анализа процеса обраде ласером

2.1 Историјат и врсте индустријског ласера

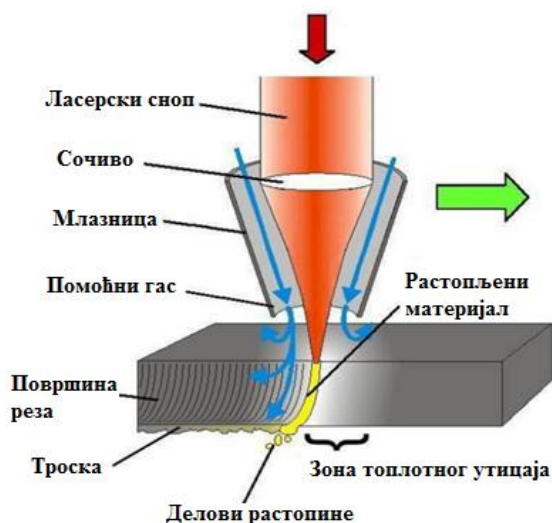
Ласер (LASER- light amplification by stimulated emission of radiation), у преводу “појачање светлости помоћу стимулисане емисије зрачења”, представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. Године 1704. Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Ласери су уређаји за генерисање и појачавање монохроматских кохерентних електромагнетних таласа у видљивом, инфрацрвеном ултраљубичастом и у последње време рендгенском делу спектра.

Ајнштајн је постулирао постојање фотона као појавног облика светлости. Светлост има способност таласања. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица.

Први ласер је пронађен у Мајамију, маја 1960. године, као побуда је коришћен рубинов кристал. Касније те године је измишљен и први гасни ласер (хелијум-неонски), први Nd:YAG ласер и CO₂ 1964 године итд.

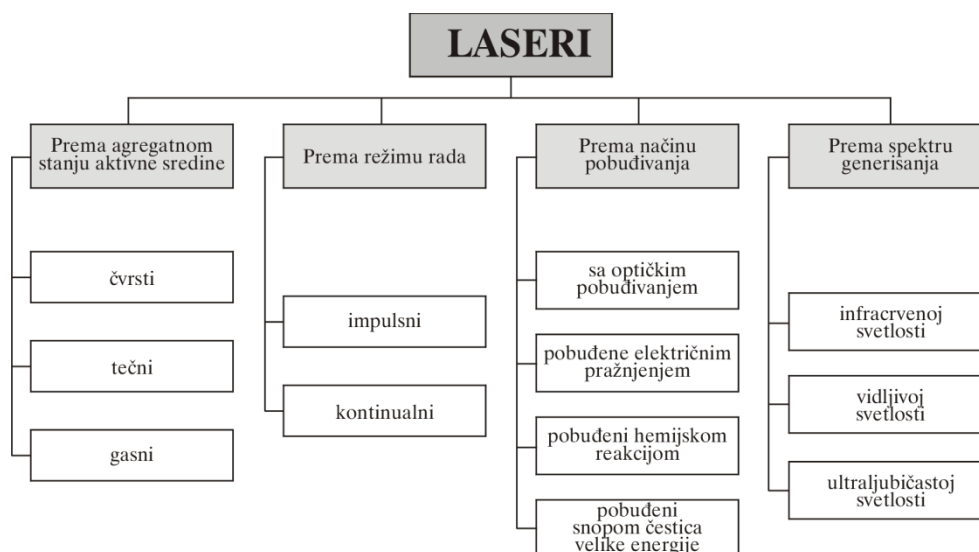
Ласерски сноп, који емитује ласерско тело разликује се од других познатих видова светлости: ласерски зраци су монохроматски, тј. имају само једну одређену таласну дужину; ласерски зрак је висококохерентан, са паралелним зрацима исте фазе; ласерски зрак може да се фокусира на веома малу површину и да обезбеди високу густину.

Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером (слика 2.1) добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде. Овај нови правац обраде материјала добио је назив ласерска технологија [1].



Слика 2.1 Принципијална шема ласерске обраде [1]

Ласери се могу поделети према више критеријума: према агрегатном стању активне средине, према режиму рада, према начину побуђивања, према спектру генерисања. На слици 2.2 је приказана најчешћа подела:



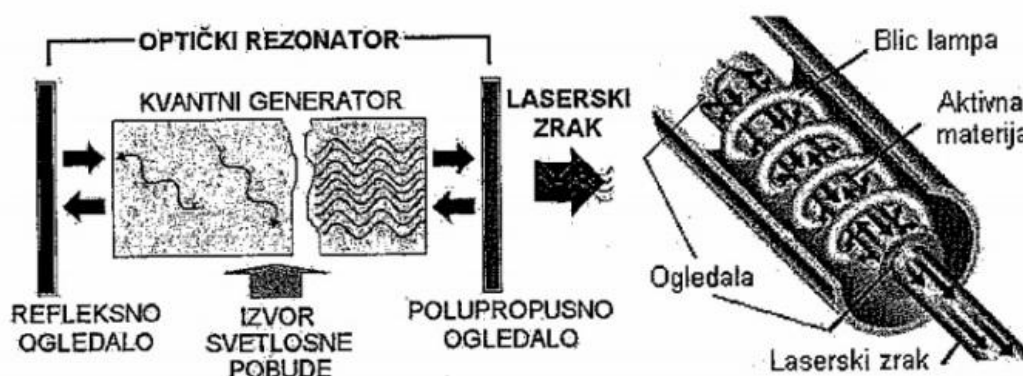
Слика 2.2 Подела ласера [3]

2.2 Принцип рада ласера са чврстим емитером

Ласери су квантни генератори у којима се светлосни сноп формира индукованим (принудним или стимулисаним) зрачењем атома и молекула.

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитије у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије.

Ласерски зрак се добија у ласерском резонатору, чија је принципијална шема дата на слици 2.3. Саставни делови тог резонатора су: квантни генератор, кога чини ласерски активна материја, извор светлосне побуде и два паралелна огледала; лево које рефлектује светлост и десно које делимично пропушта светлост (највише до 10%), овде називамо полу пропусно огледало [4].

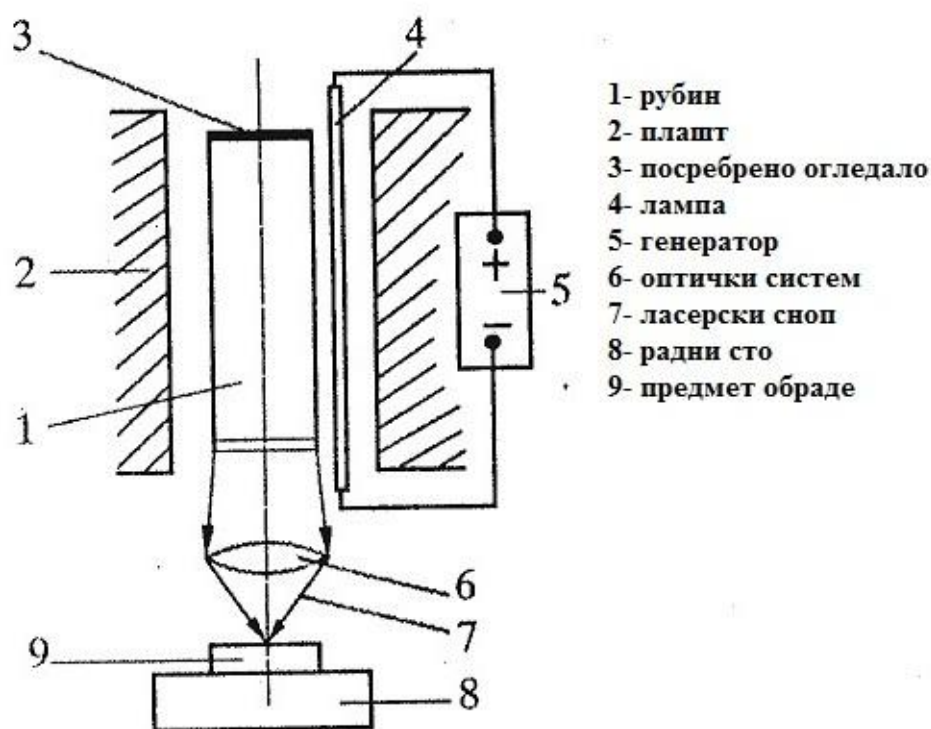


Слика 2.3 Шема извора ласерског снопа - оптичког резонатора [5]

Физикални процес добијања ласерског зрака се заснива на стимулацији емисије зрачења. Процес се одиграва у ласерски активној материји – квантном генератору под непосредним дејством спољашње светлосне побуде.

Код ласера са чврстим емитером, побуђивање зрачења обично се врши претходним обасјавањем активне средине светлошћу лампе бљескавице. Код рубинског ласера, на пример, користи се импулсна ксенонова лампа, иако ова лампа емитује светлост у широком интервалу таласних дужина, блиску сунчевој, за постизање ласерског ефекта користи се само уска плавозелена област $\lambda=560 \text{ nm}$. Због тога, као и због некорисног загревања средине, спонтаног зрачења, губитка у резонатору и активној средини, степен корисног дејства кристалног ласера је мали (1-4%).

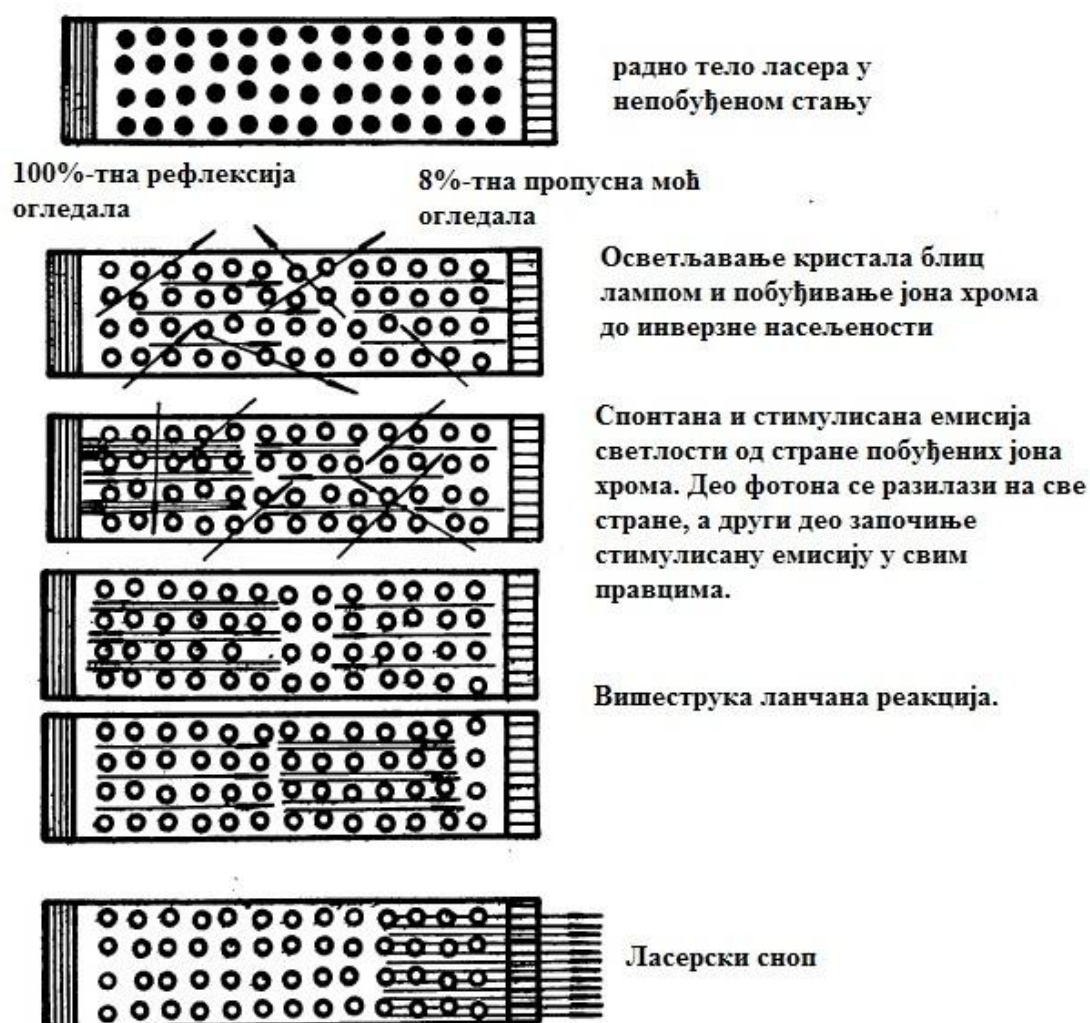
Поларни вештачки кристал рубина величине оловке, пречника 7 mm и дужине 125 mm, ставља се унутар спиралне импулсне лампе или паралелно са правом лампом. Горње чело кристала је посребрено, а доње је полупосребрено, или се близу чела кристала ставе два квалитетна огледала, строго паралелна и нормална на осу кристала, која представљају оптички резонатор. Око рубинског штапа и лампе налази се плашт са рефлектујућом површином. Код савремених ласера сви елементи ласера стављају се у омотач ласера који се хлади посебним системом хлађења ваздушним или воденим. Импулсна лампа спојена је са импулсним генератором снаге 2-6 kW. Импулсни генератор састоји се од извора напајања високог напона, од 1000 V и више, који преко исправљача напаја батерије кондензатора. Шема ласера са чврстим емитером је дата на слици 2.4.



Слика 2.4 Шема рубинског ласера [4]

Сам процес настанка и емитовања светлости-ласера, на пример код ласера заснованог на рубинском кристалу, са малим примесам хрома, се састоји из неколико карактеристичних фаза (слика 2.5). Осветљавањем рубиновог кристала долази до:

1. преласка јона хрома из непобуђеног-основног стања у побуђено-нестабилно стање,
2. стимулисане и спонтане емисије светлости. Након престанка дејства светлосног извора долази до емитовања светлости у различитим правцима. Део светлости одлази кроз спољашњу површину рубиновог кристала (цилиндричну површину) у виду луминесцентне (хладне) светлости и губи се, док се други део усмерава и креће паралелно са осом кристала, у виду снопа фотона,
3. вишеструко поновљене ланчане реакције односно образовања нових фотона и веома снажног светлосног снопа и
4. појаве ласера, врло уског светлосног снопа потпуно дефинисане и константне таласне дужине.



Слика 2.5 Основне фазе настанка ласера [4]

Принцип формирања ласера заснива се на појави да атоми и молекули неког кристала или друге активне средине-материје, озрачени одговарајућом светлошћу, прелазе у више енергетско стање (из основног у побуђено). При повратку из побуђеног стања, атоми и молекули, у кратком временском периоду од 1-2 микросекунде, емитују интензивну светлост. Ако је повратак атома и молекула из нестабилног у стабилно стање строго контролисан, уз кратко задржавање на различитим енергетским нивоима између метастабилног и стабилног стања, долази до вишеструке ланчане реакције и формирања веома снажног светлосног снопа [4].

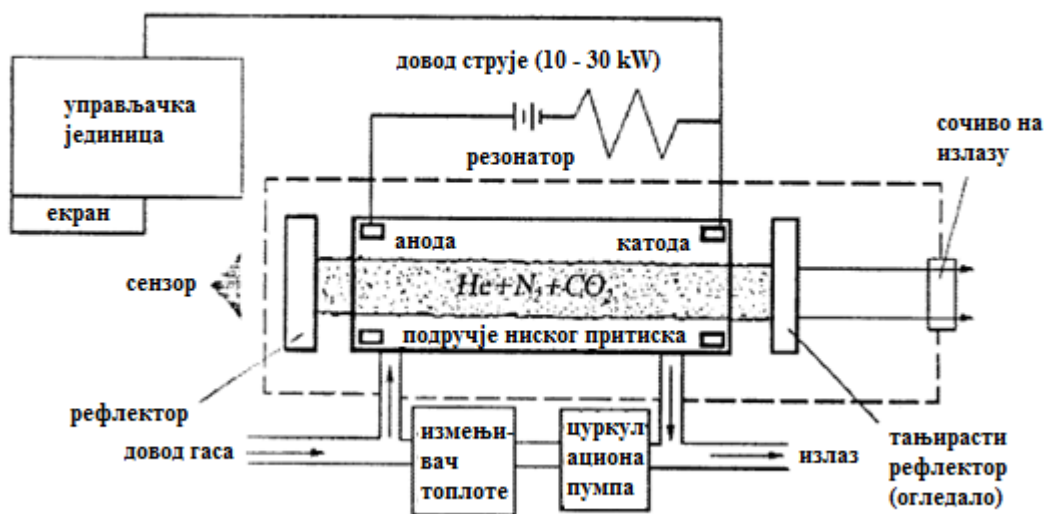
2.3 Принцип рада CO₂ ласера

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

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

Тело CO₂ ласера се састоји од гасне смеше CO₂, He и N₂, при чему активну средину чине молекули CO₂. Ови ласери се одликују високом монохроматичношћу и великим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину светлости десет пута већу од стаклених и YAG-ласера [1].

Оптички резонатор код гасних ласера је стаклена цев у којој се налази смеша гасова: угљениковог диоксида, азота, хелијума и евентуално неког другог гаса. На крајевима цеви се налазе два паралелна огледала, која су премазана слојем силикона, молибдена или злата, која рефлектују ласерски зрак натраг у цев и формирају резонатор. Сочива и прозори су направљени од германијума и цинк-селенида ZnSe. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон. Високи напон производи мноштво брзих електрона у цеви који сударима предају своју енергију молекулима гаса. Шема CO₂ ласера дата је на слици 2.6 [4].



Слика 2.6 Принцип обраде CO_2 ласером [4]

Повећање температуре гаса услед електричног пражњења, води ка изразитом смањењу излазне снаге, због чега је потребно интензивно хлађење гасне смеше. Према начину хлађења, CO_2 ласери се деле на:

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

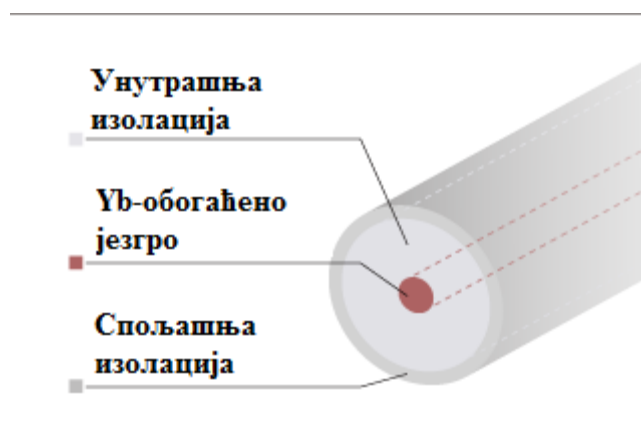
При дифузном хлађењу, гасна смеша се хлади хлађењем ласерског тела, а при конвенционалном хлађењу, изменом гасне смеше у ласерском телу а потом њеним хлађењем.

Према начину протока гасне смеше низ оптички резонатор и према правцу електричног пражњења низ гасни флуид, разликују се више врста CO_2 ласера:

- ласери са аксијалним електричним пражњењем и аксијалним протоком гаса,
- ласери са аксијалним електричним пражњењем и аксијалним брзим протоком гаса,
- ласери са трансферзалним електричним пражњењем и трансферзалним протоком гаса,
- ласери са трансферзалним електричним пражњењем и трансферзалним протоком гаса, са претходном јонизацијом гаса [6].

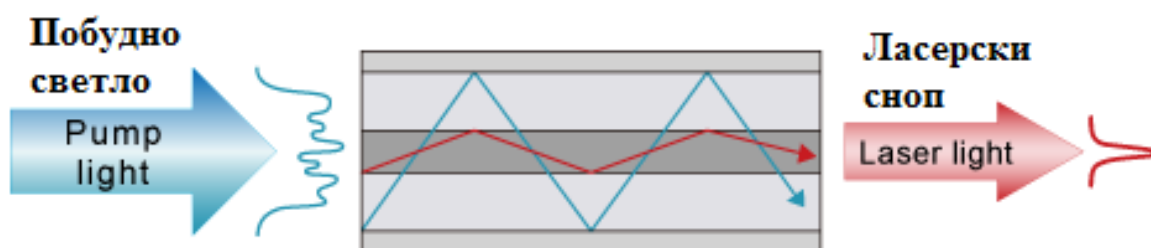
2.4 Принцип рада фибер ласера

Фибер ласери носе тај назив јер код њих оптички резонатор (слика 2.7) је оптичко влакно (fiber), односно ласерски сноп се добија у оптичком влакну чије језгро је обогаћено неким од ретких хемијских елемената као што су: итербијум (Yb), ербијум (Er), тулијум (Tm), неодијум (Nd), диспрозијум (Dy), холмијум (Ho), празеодијум (Pr) [7].



Слика 2.7 Оптичко влакно- оптички резонатор [8]

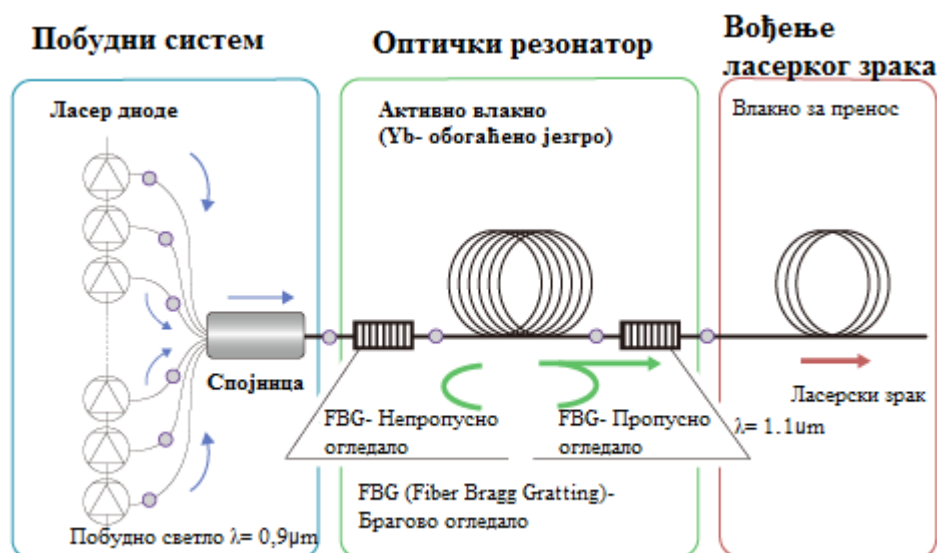
Обогаћено језгро оптичког влакна је активна материја ласера, осветљавањем језгра долази до побуђивања јона, односно стимулисане емисије светлости од стране побуђених јона елемента језгра (слика 2.8).



Слика 2.8 Формирање ласерског снопа у оптичком влакну [8]

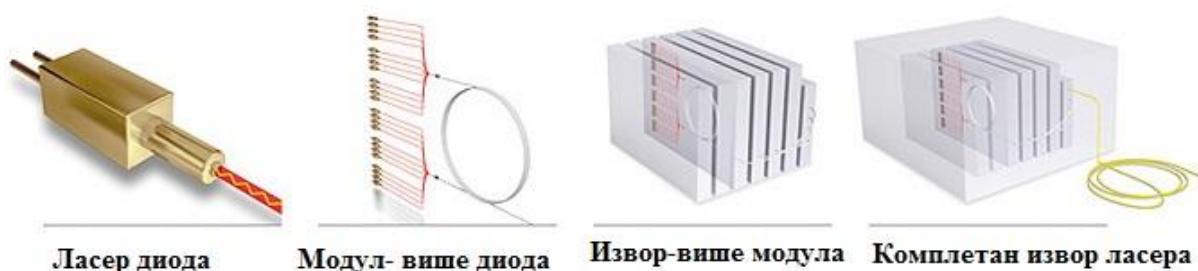
На слици 2.9 је приказан принцип рада фибер ласера. Фибер ласер се у основи састоји из 3 система:

- систем за побуду
- оптички резонатор
- систем за пренос ласерског зрака



Слика 2.9 Принцип рада фибер ласера [8]

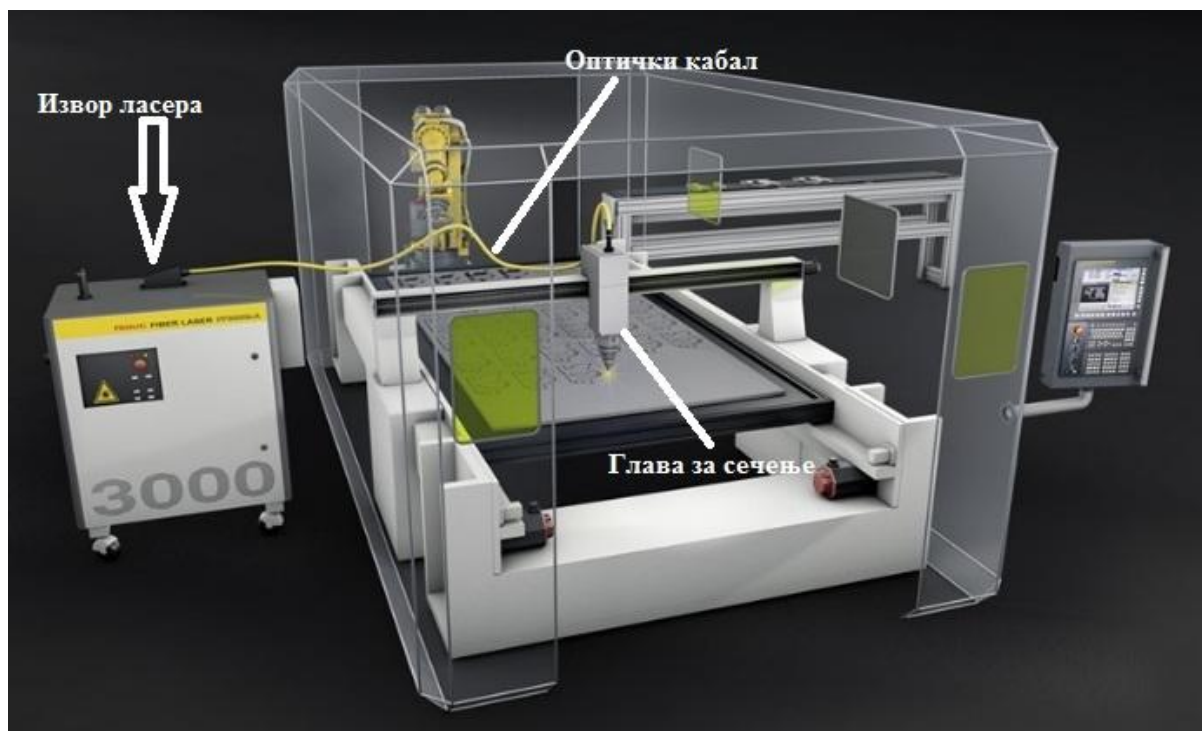
Побудни систем се састоји из више ласерских диода (слика 2.10), које емитују ласерски зрак. Ласерски зрак се преноси оптичким каблом до спојнице. Пошто има више извора, односно ласерских диода, ласерски зрак се обједињује у спојници [8].



Слика 2.10 Побудни систем [9]

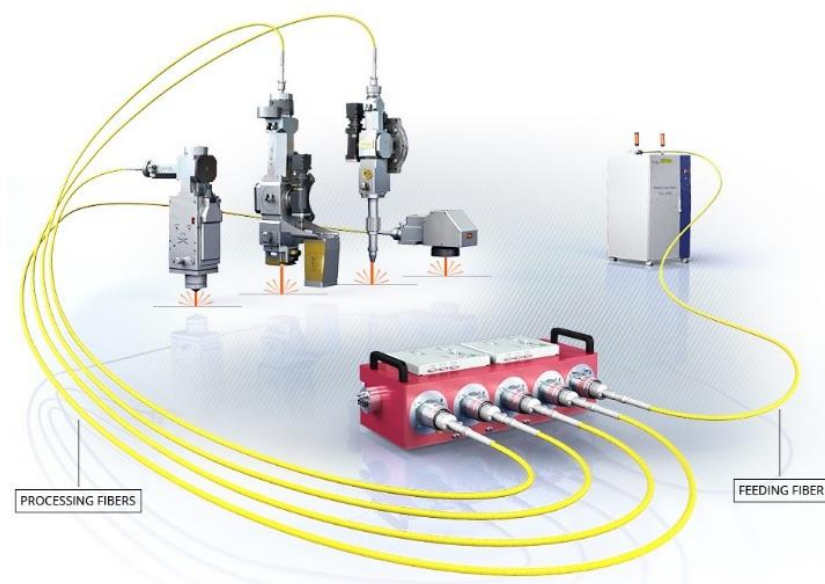
Ласерски зрак улази у оптички резонатор, односно у активно оптичко влакно, чије језгро је обогашено итербијумом. Јони итербијума бивају побуђени, па при повратку из побуђеног стања емитују интензивну светлост, та светлост се даље одбија од зидова влакна и од Брагових огледала (fiber Bragg grating-FBG), па се ствара ланчана реакција и формирање снажног светлосног снопа. Даље се тај зрак кроз полупросно Брагово огледало пропушта и формира се монохроматски и кохерентан ласерски зрак. Брагова решетка (огледала) се налазе директно у активном оптичком влакну.

Систем за пренос ласерског зрака (слика 2.11) је заправо оптички кабал, што представља огромну предност овог типа ласера због једноставности, јер нема комплексног оптичког система огледала за вођење ласерског зрака као код других типова ласера.



Слика 2.11 Пренос ласера од извора до главе за сечење [10]

Код оваквих типова ласера, баш због једноставног система преноса ласерског зрака могуће је искористити један извор фибер ласера за више машина/операција обраде ласером истовремено (слика 2.12).

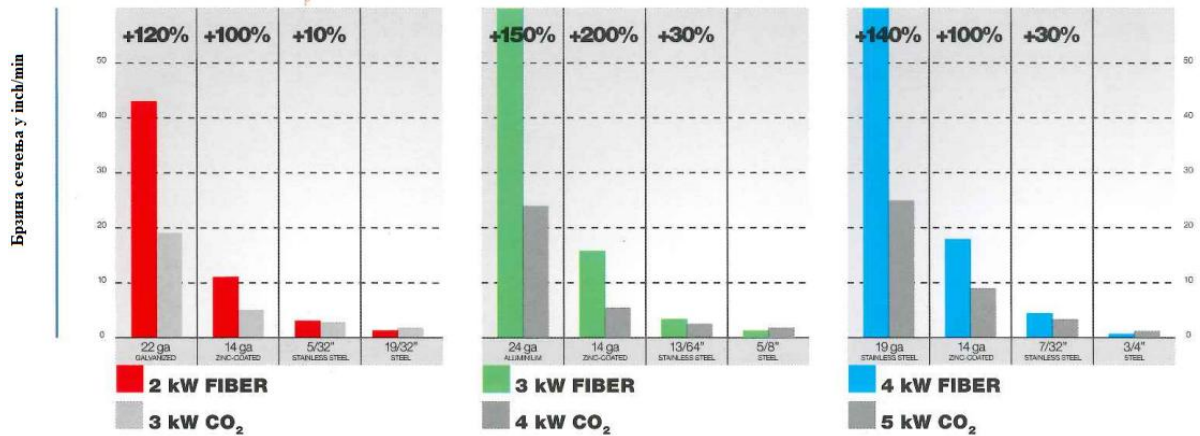


Слика 2.12 Разводник ласера [9]

Највећи проблем код ласера са чврстим медијем је одвођење топлоте, те је снага ласера ограничена тиме. Код фибер ласера, влакна су дугачка и танка, па је одвођење топлоте знатно побољшано.

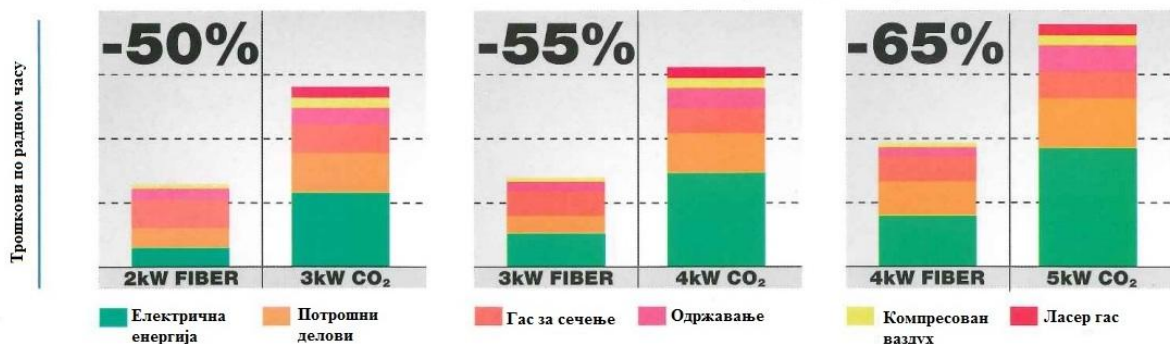
Главне предности фибер ласера у односу на CO₂ ласер су:

- једноставан пренос ласера од извора, нема комплексног оптичког система огледала
- већа брзина сечења без жртвовања квалитета (слика 2.13)



Слика 2.13 Поређење брзине сечења фибер и CO₂ ласера [11]

- могућност преноса ласерског зрака чак на више десетина метара,
- знатно једноставније и јефтиније одржавање машине,
- знатно поузданији,
- много ефикаснија потрошња електричне енергије,
- мањи оперативни трошкови рада машине (слика 2.14) с обзиром да не захтевају радне гасове за добијање ласерског зрака, а имају могућност сечења са компресованим ваздухом,



Слика 2.14 Поређење оперативних трошкова фибер и CO₂ ласера [11]

- могућност сечења бакра, месинга и алуминијума с обзиром да нема повратне рефлексије као код CO₂ ласера,
- компактност [11].

2.5 Енергетске и геометријске карактеристике ласерског зрака

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 распрострања.

Зрачење ласера има висок степен монохроматичности, тј. садржи веома уски интервал таласних дужина. Монохроматичност одређује дијапазон фреквенција, односно таласних дужина, садржаних у зрачењу, тј. ширину спектра ласерског зрачења. Степен монохроматичности за неку спектралну линију са таласном дужином λ_0 (фреквенција ν_0) одређује се изразом:

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

где је $\Delta\lambda$ - ширина спектра.

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

Дивергенција (разилажење) снопа ласерских зрака одређује се према:

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

где је: d - пречник ласерског материјала (активне средине), λ - таласна дужина зрачења.

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

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

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

где је: θ - стварни угао дивергенције, f_s - жижна даљина сочива.

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

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

где је: E - енергија импулса ласерског зрачења; t_i - трајање импулса зрачења; A_f - површина светлосне мрље.

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

Енергија импулса ласерског зрачења је: $E = P_i t_i$;

где је: P - снага ласерског зрачења у моменту ; t_i - трајање импулса

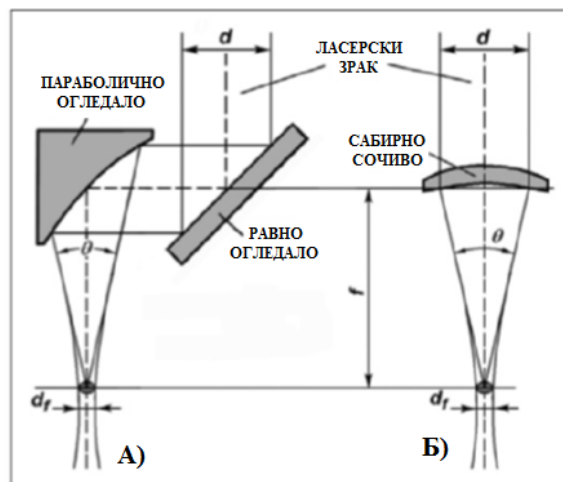
Средња снага импулса ласерског зрачења је:

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

Трајање једног импулса ласерског зрачења је:

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

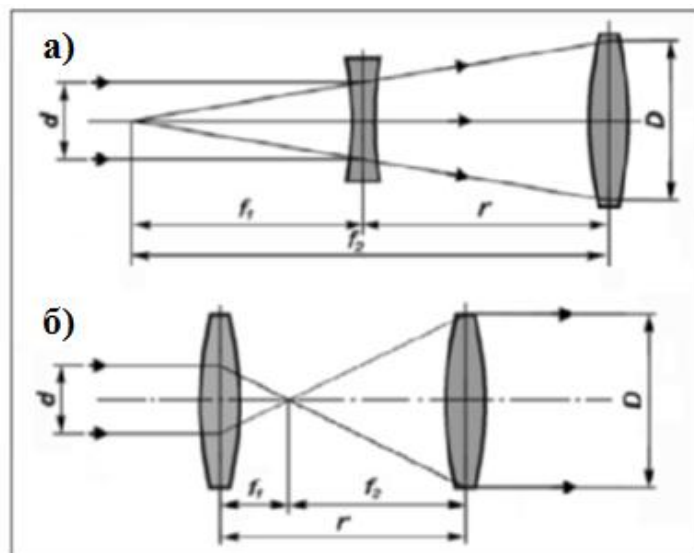
Ласерски зрак, који излази из резонатора, води се оптички помоћу призми и огледала према површини обраде или у новије време кроз оптичке проводнике. Непосредно пре усмеравања на саму површину, ласерски зрак се фокусира да би се на тај начин добила што мања површина попречног пресека зрака, а што већи интензитет. То се постиже помоћу параболичних огледала уграђених у ласерску главу (слика 2.15) [3].



Слика 2.15 Карактеристичне величине фокусираног ласерског зрака а) фокусирање помоћу параболичних огледала, б) фокусирање помоћу сабирних сочива [1]

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

На слици 2.16 је шема два типа ових телескопа, са којима се може видети да се промена пречника ласерског зрака врши променом растојања r између сочива телескопа. Вредност пречника ласерског зрака утиче на пречник фокусираног зрака, па се исти може користити за регулисање интензитета зрака у фокусу [1].



Слика 2.16 Повећање пречника ласерског зрака помоћу телескопа а) Галилејов телескоп; б) Кеплеров телескоп [1]

Жижна даљина f (слика 2.16) представља одстојање између карактеристичне равни фокусног елемента (огледала и сочива) и фокусне равни у којој је пречник зрака минималан. Жижна даљина такође утиче на пречник фокусираног зрака.

Однос отвора A се дефинише као:

$$A = \frac{f}{D}$$

где је: D - пречник ласерског зрака на фокусном сочиву

Фокусни угао зрака:

$$\theta = 2 \arctg \frac{D}{2f} = \frac{1}{2A}$$

Са ова два параметра фокусна оптика ласерске главе је у потпуности одређена.

Пречник ласерског зрака у фокусу d_f је најмањи пречник фокусираног ласерског зрака. Између карактеристика ласерског зрака и фокусне оптике, са једне стране, и пречника зрака у фокусу са друге стране постоји зависност:

$$\frac{d_f}{2} = \frac{\lambda \cdot f}{D} = \lambda \cdot A$$

Најчешће коришћена вредност односа отвора фокусне оптике ласера је $A=1$, па пречник зрака у фокусу је:

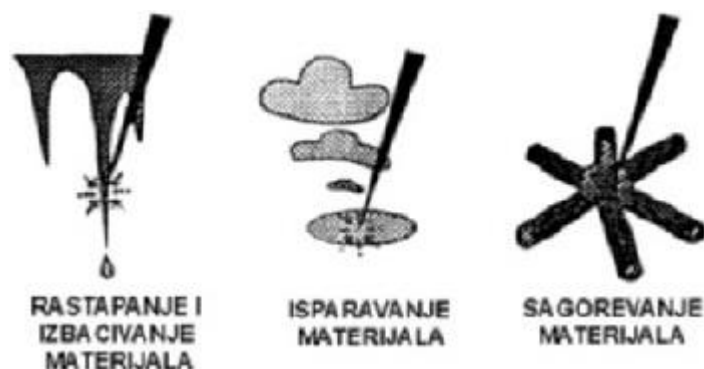
$$d_f = 2\lambda$$

Практично оствариве вредности су веће од израчунатих, пре свега због несавршености фокусне оптике, тако да оне износе отприлике код Nd:YAG је 0,01 mm а код CO₂ ласера око 0.1 mm.

На пречник зрака у фокусу, осим таласне дужине λ , утиче и жижна даљина f , и пречник зрака D на фокусном елементу. Тако се мање вредности пречника зрака у фокусу могу остварити при мањој жижној даљини f и већем пречнику зрака D . Међутим, сувише мала жижна даљина се не може практично остварити, јер би избачене честице истопљеног и испареног материјала из кратера у том случају оштетиле објектив ласерске главе [1].

2.6 Принцип обраде ласером

Скидање материјала при обради ласером остварује се путем апсорпције светлосне енергије ласерског зрака у површински слој материјала обратка, који се загрева на температуре од 4000 до 6000 K. Тако високе температуре доводе до тренутног растапања, испаривања или сагоревања било ког материјала, и стварања малог удубљења- кратера. Основни механизми скидања материјала су приказани на слици 2.17.



Слика 2.17 Основни механизми скидања материјала при обради на ласеру [1]

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

При судару ласерског снопа са непрозирним чврстим телом, на његовој површини и у подповршинским слојевима (на одређеној дубини) се одигравају различити физички процеси. Под његовим утицајем долази до интензивног површинског

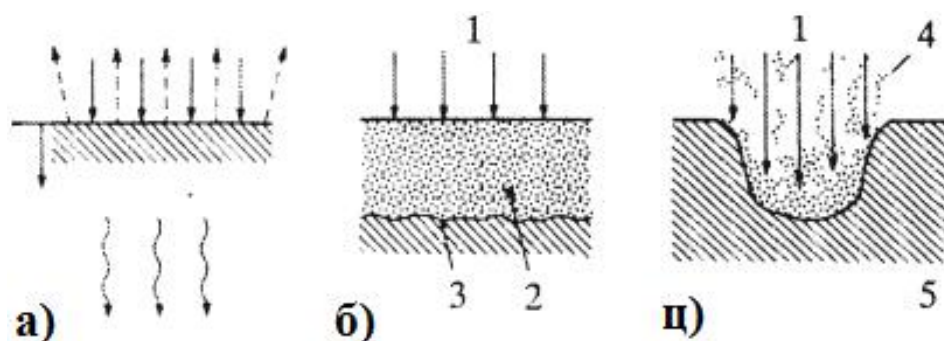
загревања материјала предмета обраде, топљења и испаравања материјала предмета обраде.

Стога се, дејство ласерског снопа на материјал предмета обраде, може поделити у неколико карактеристичних фаза:

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

Поред наведеног, истовремено се одвијају и други процеси (хемијски процеси и фазна трансформација), који битно утичу на карактер дејства ласерског зрачења [5].

Део ласерског снопа што пада на површину предмета обраде, апсорбује се у унутрашњост материјала на одређеној дубини, а део се одбија (рефлектује) од површине (слика 2.18).



Слика 2.18 Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом а) рефлексија и апсорпција, б) топљење, ц) испаравање 1 - ласерски зраци, 2 - истопљени материјал, 3 - гранична зона између чврстог и истопљеног материјала, 4 - одношење материјала, 5 - предмет обраде [3]

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

У одређеним случајевима, висока рефлексија на многе материјале при одређеној таласној дужини ласерског зрачења, доводи до тога да је материјал непогодан за обраду ласером. У табели 2.1 дате су вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења.

Табела 2.1 Вредност коефицијента рефлексије за различите материјале и таласне дужине [3]

Таласна дужина ласерског зрака, λ	Коефицијент рефлексије, R						
	Au	Cu	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0,415	0,415	0,437	0,952	0,85	-	-	0,597
0,930	0,930	0,831	0,961	0,82	0,555	0,575	0,676
1,06	0,981	0,901	0,964	0,73	0,57	0,65	0,741
10,6	0,975	0,948	0,989	0,97	0,97	-	0,941

Према табели 2.1, за CO₂ ласере ($\lambda=10.6 \mu m$) коефицијент рефлексије R је много велики за све наведене метале, тако да се за обраду метала користи само мали део енергије ласерског млаза. Зато су ови ласери непогодни за обраду метала. Међутим, повећањем густине ласерског млаза изнад $10^{10} W/cm^2$ доводи до смањења коефицијента рефлексије [5].

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

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

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

- Гаусова и
- равномерна.

За нормалну расподелу густине снаге важи израз:

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

где је:

q_0 - максимална густина снаге,

k - коефицијент који одређује степен оштрине просторне расподеле и

r - радијална компонента.

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

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

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

где је:

λ_θ - коефицијент топлотне проводљивости материјала предмета обраде и

T_t - температура топљења материјала предмета обраде.

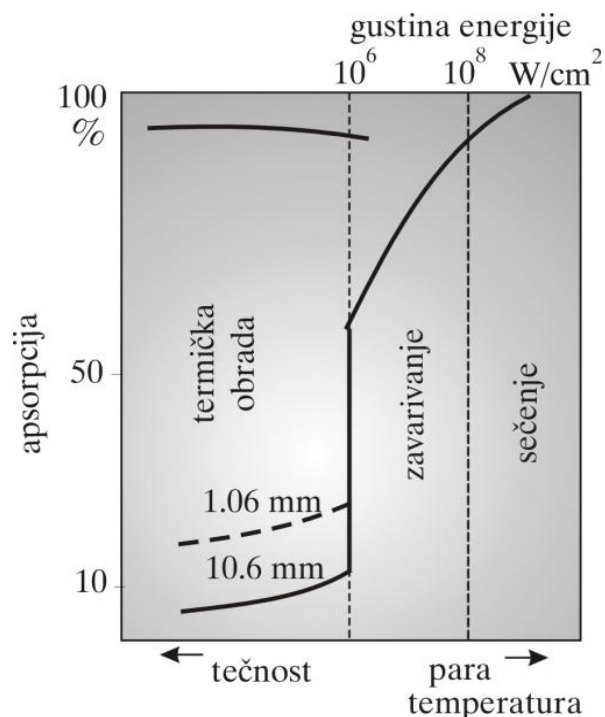
Падајући на материјал, светлосни сноп ласерских зрака се у мањој или већој мери апсорбује у његовој површини. Апсорпција снопа фотона у материјалу врши се у правцу снопа нормално на површину. Густина снаге ласерског зрачења слаби са дубином продирања, по закону:

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

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

За већи број метала, поред пораста температуре површинских слојева, поспешује се стварање оксидног слоја, који има значајно мали коефицијент рефлексије, односно велики коефицијент апсорпције и при $\lambda=10.6\mu m$ [3].

На слици 2.19 приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 2.19 Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала [3]

Битан утицај на коефицијент рефлексије има и густина ласерског млаза. Са повећањем густине од $10^7 \div 10^8 \text{ W/cm}^2$ за већи број метала коефицијент рефлексије се значајно повећава. Повећање густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm^2 , доводи до знатног смањења коефицијента рефлексије, у поређењу са вредностима датим у табели 2.1.

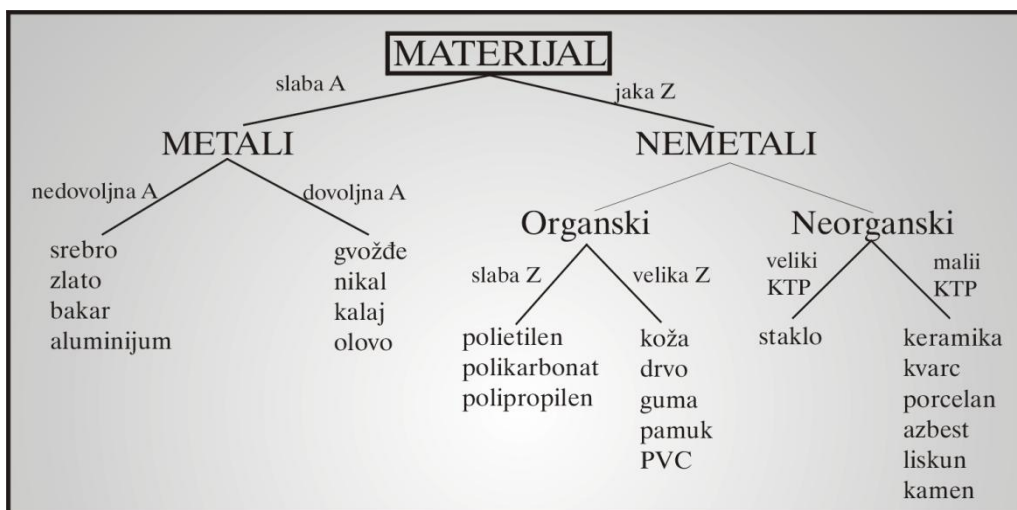
Са повећањем храпавости обрађене површине исто тако се смањује коефицијент рефлексије, тј. расте коефицијент апсорпције. Веза између њих дата је изразом:

$$\alpha = 1 - R$$

Карактеристично је да коефицијент апсорпције и рефлексије, са једне стране, зависе од карактеристика извора ласерског зрачења и оптичког система, а са друге, од особина обрађиваног материјала. Апсорпција зависи и од стања површине предмета обраде параметра 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. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снижити рефлекциона способност повећањем храпавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака [5].

На слици 2.20 приказан је утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост.



Слика 2.20 Утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост [3]

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

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

где је:

k - термичка проводност материјала предмета обраде,

T_t - температура топљења материјала предмета обраде,

λ - температура топљења материјала предмета обраде,

α - коефицијент апсорпције и

C - константа блиска јединици која узима у обзир апроксимације.

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

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

или време топлотне дифузије за материјале дебљине X :

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

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

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

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

2.6.1 Утицај положаја фокуса у односу на површину обратка

Положај фокуса драстично утиче како на облик тако и на дубину рупе, што је приказано на слици 2.21.



Слика 2.21 Утицај положаја фокуса на облик и дубину рупе [1]

При високо подигнутој фокусној равни у односу на површину обратка долази до наглог слабљења интензитета зрака дуж осе рупе због његове дивергенције (ширења). Резултат тога је равна рупа облика удубљења.

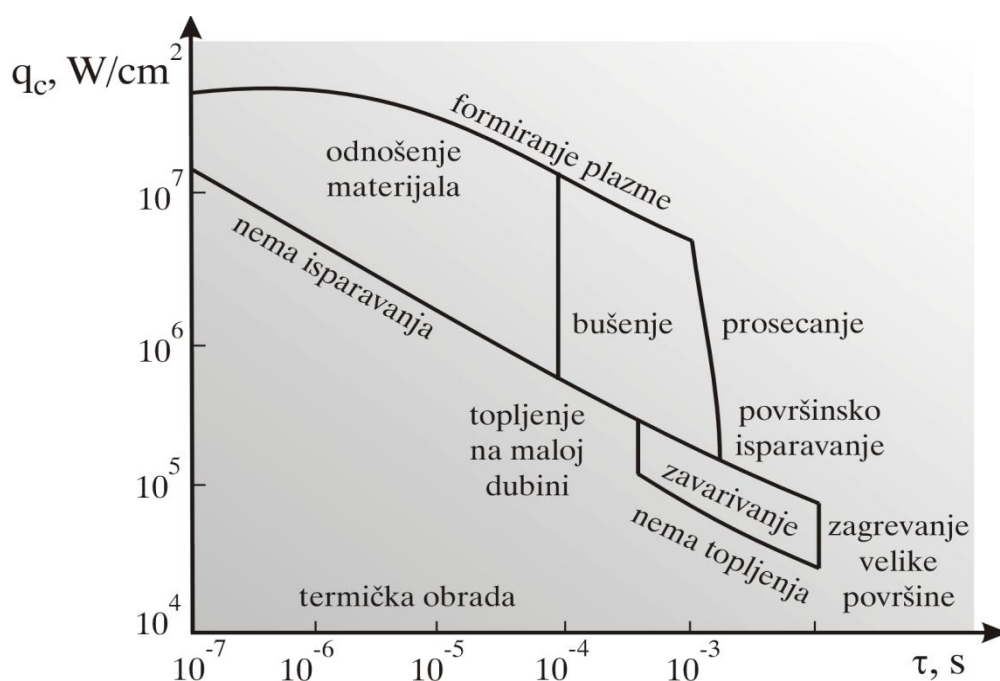
Ако је пак фокусна раван сувише спуштена, тад настаје конично удубљење условљено контракцијом (скупљањем) ласерског зрака. Најдубље, а при том и најцилиндричније рупе добијају се када фокус пада тачно на површину обратка или је незнатно изнад њега. Савремене ласерске машине су опремљене аутоматиком којом се фокус зрака доводи тачно на површину обратка, чак и онда кад је та површина рељефна [1].

2.7 Технолошки поступци обраде ласером

И ако је до данас развијен велики број различитих врста ласера, за обраду металних и неметалних материјала углавном се користе CO₂, Nd:YAG и у новије време фибер ласери.

На слици 2.22 приказан је дијаграм примене обраде ласером на бази енергетских карактеристика ласерског снопа, дијаграм је формиран на основу параметара густине снаге ласерског снопа- q_c и трајања дејства ласерског снопа- τ . Постоје четири карактеристичне зоне:

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



Слика 2.22 Дијаграм примене ласерске обраде са енергетског аспекта [3]

При $q_c = 10^4 \div 10^5$, W/cm² и $\tau = 10^{-4} \div 10^{-3}$, s јавља се само површинско загревање материјала, при чему могу да наступе различите структурне измене површинских слојева. У оваквим условима могу да се изводе различити видови површинске термичке обраде.

При $q_c = 10^5 \div 10^6$, W/cm² и $\tau = 10^{-5} \div 10^{-4}$, s могу да се врше технолошки процеси везани за површинско топљење материјала, као на пример: заваривање, сечење и сл.

При $q_c = 10^7 \div 10^8$, W/cm² и $\tau = 10^{-5} \div 10^{-4}$, s могу да се врше технолошке операције везане за одношење материјала: побољшање отвора, сечење, гравирање, итд.

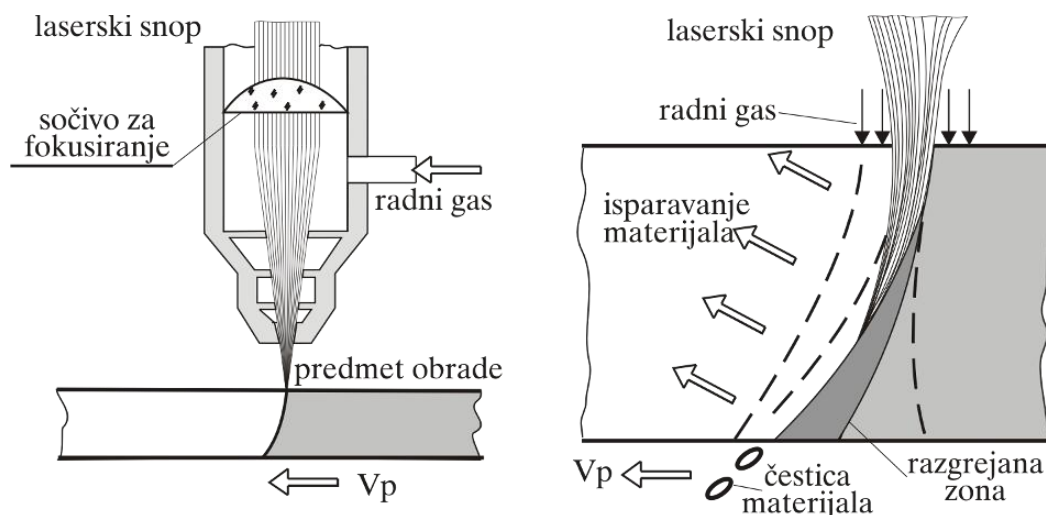
При $q_c > 10^8$, W/cm^2 и $\tau < 10^{-3}$, s не могу да се врше технолошке операције јер формирана плазма, испод површине материјала, практично потпуно апсорбује ласерске зраке и спречава њихово дејство на материјал [3].

Примена обраде ласером у машинској индустрији је бројна и разноврсна и углавном је оријентисана на:

- Сечење материјала танким резovima;
- Бушење малих отвора (пречника 0,01-0,1 mm) на матрицама за извлачење жице или вештачких влакана, у часовничарској и јувелирској индустрији итд.;
- Обрада просторних површина, тзв. "ласерско глодање";
- Израда делова специфичних захтева у електронској индустрији;
- Гравирање натписа, мерних скала, нонијуса, ознака итд.;
- Заваривање;
- Лемљење електронских микроелемената;
- Површинска термичка обрада;
- Локално наношење превлака [1].

2.7.1 Ласерско сечење

Сечење помоћу ласерског зрака (слика 2.23), и то скоро свих врста материјала је најраспрострањенија примена ласера у подручју обраде материјала. Ласерско сечење се данас широко примењује при сечењу сложених контура од тврдых и кртих материјала. Има примену и при обради сложених делова који се израђују на преси за просецање и пробијање, ако се ради у малим серијама и при честој промени облика и димензија, за шта је израда алата скупа и дуготрајна [1].

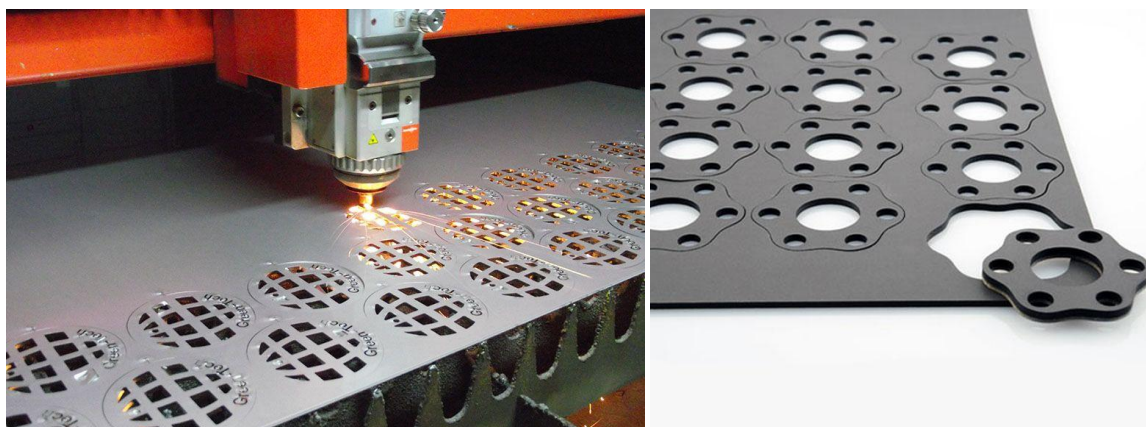


Слика 2.23 Шематски приказ сечења ласером

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

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

Ласер производи кохерентан светлосни сноп ласерских зрака великог интензитета енергије кога карактерише правост и мала дисперзија. У интеракцији са предметом обраде, ако је енергија већа од способности материјала предмета обраде да рефлектује, пренесе или распе ову енергију, долази до апсорпције светлосне енергије и њеног претварања у топлотну енергију, односно до пораста температуре на озраченом месту. При знатном порасту температуре долази до појаве локалног топљења или испаравања материјала, што зависи од интензитета генерисане топлоте и доводи до стварања рупе или отвора у предмету обраде. Померањем ласерског зрака или предмета обраде настаје процес ласерског сечења. На слици 2.24 приказано је сечење ласером и део добијен сечењем на ласеру.



Слика 2.24 Сечење ласером(лево) и део добијен сечењем (десно)[12,13]

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

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

Овај поступак омогућава одржавање врло уских толеранција, често до 0,025 mm. Ову врсту сечења одликује велика брзина, изузетно квалитетан и узан рез са оштрим прелазима на угловима и ниска топлотна дисипација.

Методe сечења ласером

Постоје три методе сечења ласером:

1. Са потпуним одстрањивање материјала дуж линије раздвајања (испаривањем и што је чешћи случај, топљењем и ограниченим испаривањем);
2. Са делимичним одстрањивањем материјала дуж линије раздвајања (испаривањем материјала до одређене дубине и накнадним одвајањем материјала механичким дејством);
3. Без одстрањивања материјала дуж линије раздвајања (контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством и у току озрачења ласером или контролисаним ломљењем у чврстом стању, под дејством механичке силе, примењене по озрачењу ласером). Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. На слици дат је шематски приказ процеса сечења ласером [3].

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

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

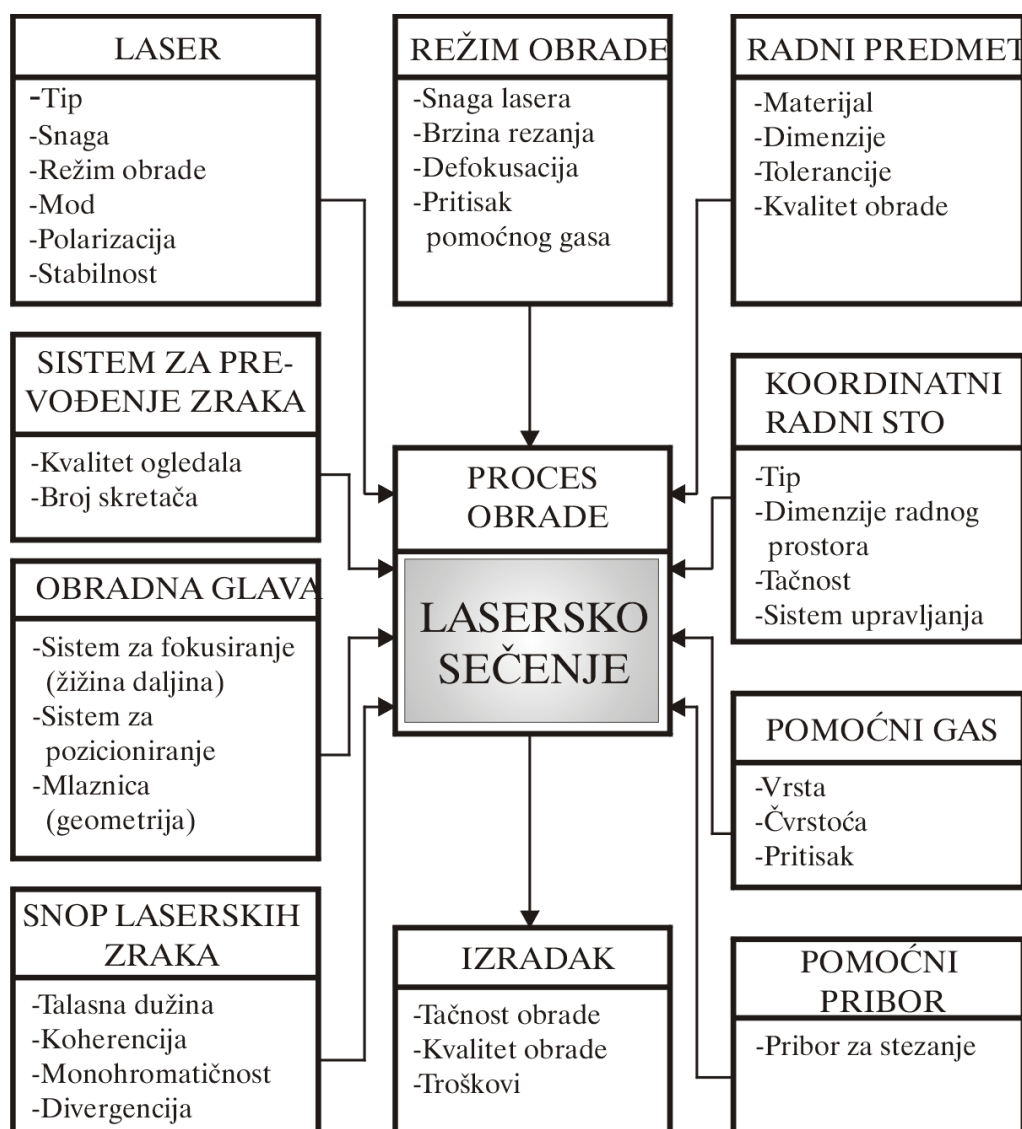
Поступак сечења ласером уз коришћење помоћног гаса врши се по правилу, континуалним зрачењем и потпомогнут је топлотом која се развија у хемијској реакцији између O_2 и материјала предмета обраде (у случају реактивног гаса), односно ерозионим деловањем млаза гаса у зони сечења (у случају неутралног и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

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

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

Фактори процеса сечења ласером

На слици 2.25 приказани су фактори који утичу на процес сечења ласером.



Слика 2.25 Фактори који утичу на процес ласерског сечења [3]

На процес ласерског сечења утичу:

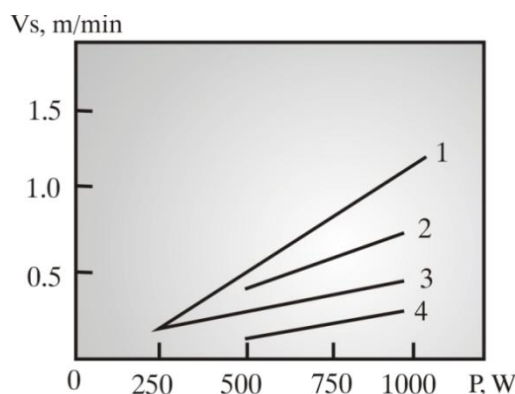
- ласер (тип, величина, снага, режим рада, мод, поларизација), који је извор зрачења;
- сноп ласерских зрака (таласна дужина, кохеренција, монохроматичност, дивергенција), који представља алат у процесу обраде;
- обрадна глава (систем за фокусирање, млазница, сензор за позиционирање);
- координатни радни сто (тип, величина, тачност, систем управљања);
- радни предмет (материјал, облик, димензије, толеранције, квалитет обраде);

- режими обраде (снага ласера, брзина резања, положај жиже у односу на површину предмета обраде, притисак помоћног гаса) и
- околина (радни услови: чистоћа, вибрације) [3].

Снага ласера

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

На слици 2.26 приказана је зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале.

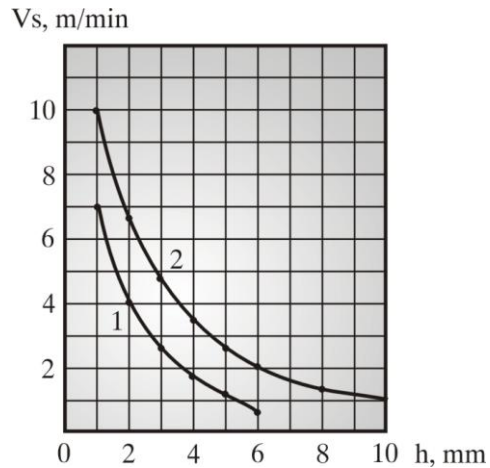


Слика 2.26 Зависност брзине сечења од снаге ласерског снопа за различите метале: 1. Нерђајући челик ($h=3.2\text{ mm}$), 2. Алуминијум ($h=0.8\text{ mm}$), 3. Нискоугљенични челик ($h=2.3\text{ mm}$), 4. Титан ($h=1.5\text{ mm}$) [3]

Брзина сечења

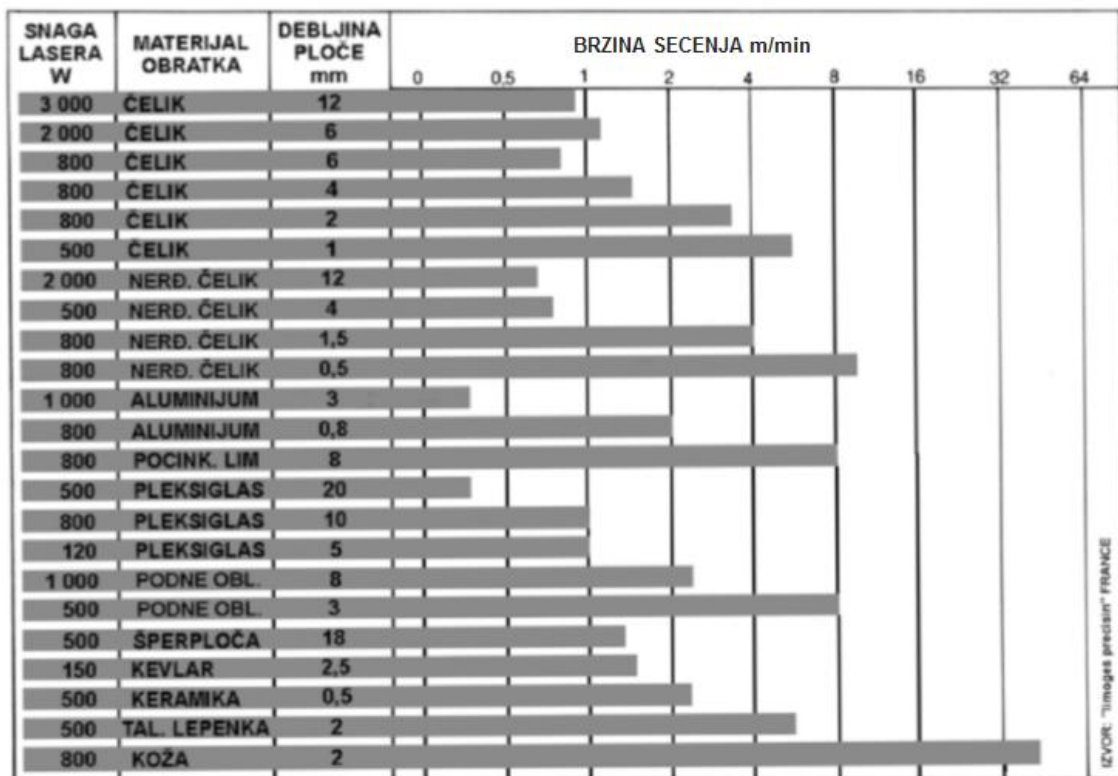
Продуктивност обраде, зависи директно од брзине сечења. Брзина сечења је други по значају битан параметар за сечење ласером и зависи од низа фактора: снага ласера, величина светлосне мрље, врста и дебљина материјала радног предмета итд. Узимајући у обзир квалитет реза и посматрајући брзину резања у функцији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

При одређеној дебљини материјала, са повећањем снаге ласерског млаза, брзина сечења се повећава (слика 2.27). Уколико је дебљина материјала мала и при истој густини снаге, може се применити висока брзина сечења. На слици 2.27 приказан је утицај дебљине лима на максималну дебљину сечења [3].



Слика 2.27 Зависност максималне брзине сечења од дебљине лима за нискоугљеничне челике: 1: $P=625\text{ W}$, 2: $P=1250\text{ W}$ [3]

Ефикасност примене ласера при сечењу може се уочити из прегледа брзина сечења у зависности од снаге ласера, материјала обратка и дебљине плоче које су приказане на слици 2.28.



Слика 2.28 Преглед брзине сечења помоћу ласерског зрака [1]

Види се да материјал обратка битно утиче на брзину сечења, што је у вези са његовим својствима апсорције и рефлексије ласерског зрака. Тако нпр. сечење алуминијума, при скоро истим условима, се врши за око 6 пута спорије него код

челика, код кога се ласером снаге 3000 W и дебљине плоче од 12 mm постиже брзина до скоро 1 m/min. [1]

Жижна даљина сочива

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

Помоћни гас

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

Кисеоник је изузетно високе чистоће, веће од 99,95%. Смањењем чистоће кисеоника рапидно опадају брзина сечења и квалитет реза. Азот се употребљава за сечење високолегираних челика. Захтева се висока чистоћа, без трагова кисеоника. Остали гасови за сечење аргон и његове мешавине са кисеоником и азотом. Мешавине се користе за резање Al и Al легура. Мешавина аргона и кисеоника се користи за сечење Ti. [14]

Квалитет и тачност обраде

Квалитет обраде код сечења ласером је одређен квалитетом реза и тачношћу облика и димензија. Квалитет реза се обично дефинише геометријским карактеристикама (ширина реза, храпавост обрађене површине) и физичко - хемијским карактеристикама на израженој површини материјала предмета обраде. Квалитет и тачност обраде сечења ласером, у највећем степену зависе од: брзине сечења, снаге ласерског млаза, врсте и притиска гаса, пречника и положаја млазнице у односу на површину предмета обраде, као и од квалитета управљачке јединице CNC ласерске машине за сечење лима. Тачност облика и димензија радног предмета одређени су карактеристикама радног стола.

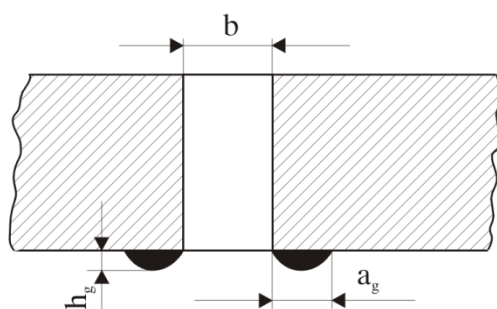
Ширина реза је битна карактеристика сечења ласером. Вредност ширине реза код метала је мала, креће се од 0.1 – 0.3 mm, при сечењу челичних лимова. Ширина реза се повећава са повећањем дебљине лима.

Сечење материјала фокусираним снопом ласерских зрака карактерише појава сужења реза. Величина сужења зависи од више фактора, првенствено од жијне

даљине сочива за фокусирање и дефокусације али и од особина материјала предмета обраде и поларизације ласерских зрака.

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

При обради метала, по дужини реза са доње стране, формира се гребен од отврднутог метала и металних оксида, чиме се погоршава квалитет обраде. На слици 2.29 приказана је појава гребена приликом сечења метала.



Слика 2.29 Појава гребена при сечењу метала ласером [3]

Величина гребена зависи од снаге ласерског снопа, врсте и дебљине метала и притиска гаса. У табели су дати су подаци за параметре гребена h_g/α_g у зависности од снаге ласерског снопа за различите дебљине лима при притиску гаса од 5 bar. Као што се види у табели 2.2 димензије гребена су веће уколико је снага ласерског снопа мања, а дебљина лима већа. Да би се смањила или да би се избегла појава гребена користе се разне технике: претходна оксидација, фосфатирање или хромирање површина. Међутим, наведени поступци нису лако изводљиви, а и сам процес сечења је знатно скупљи. Једна од техника може бити и сечење ласером у течној средини.

Табела 2.2 Димензије гребена при различитим снагама ласерског снопа [3]

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

Предности и недостаци сечења на ласеру

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Најважнији ограничавајући фактор за примену ласерске технологије је економски фактор. Ласерска машина за сечења материјала има велику набавну цену која се касније одражава на цену производа [3].

3. Преглед и карактеристике фибер ласера Salvagnini L3

Salvagnini L3 (слика 3.1) је фибер ласер, односно ласер чији се ласерски сноп добија у оптичком влакну (fiber) чије језгро је обogaћено итербијумом (Yb). Машина је намењена за операције сечења и налази се у компанији Металац Посуђе, у Горњем Милановцу. Основне техничке карактеристике ове машине, дате су у табели 3.1.

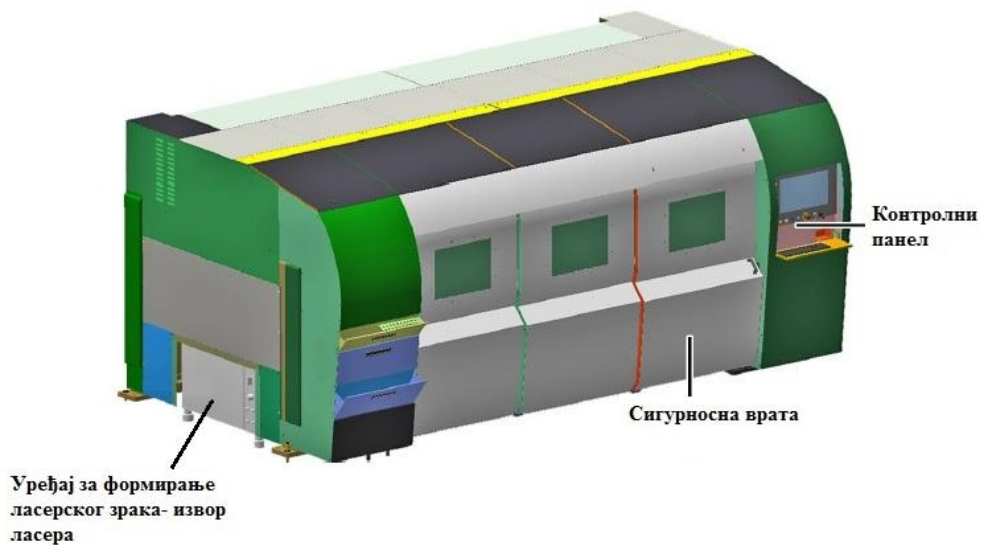


Слика 3.1 Salvagnini L3 у компанији Металац Посуђе, Горњи Милановац

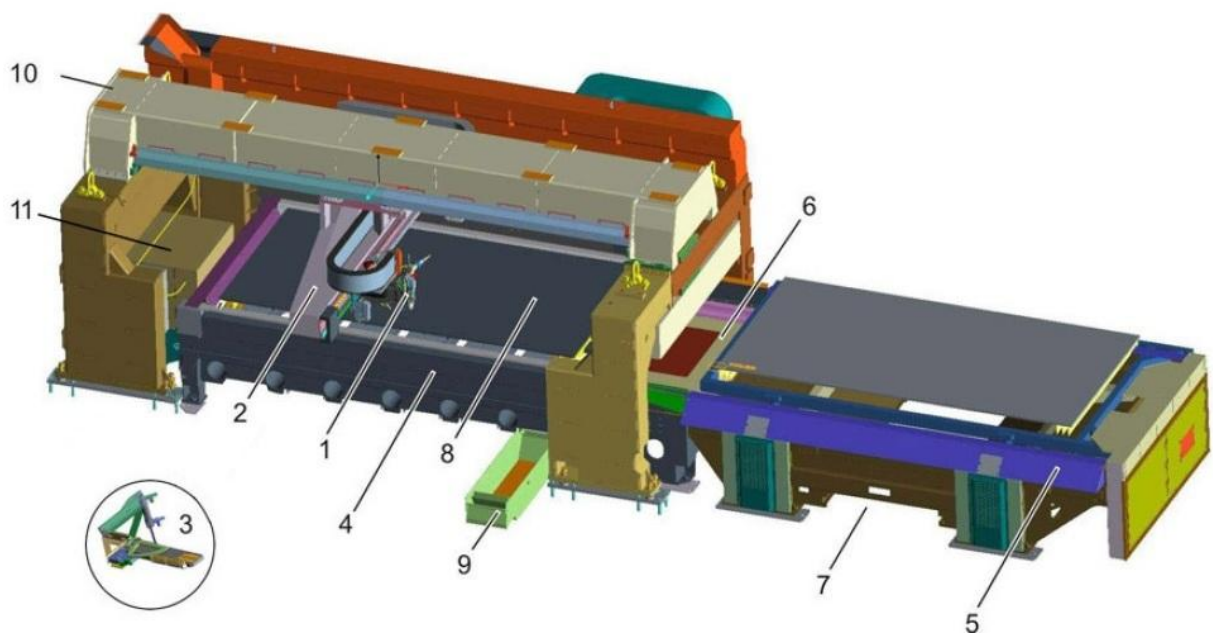
Табела 3.1 Техничке карактеристике машине [15]

Максимална снага ласера	2000 W
Максимална потрошња енергије	16 kW
Радни простор по X оси	3048 mm
Радни простор по Y оси	1524 mm
Кретање главе ласера по Z оси	100 mm
Максимална тежина плоче	730 kg
Максимална брзина сечења	140 m/min
Прецизност позиционирања	0,08 mm
Помоћни гасови	азот, кисеоник, компресован ваздух
Максималан притисак гаса на дизни	20 bar
Капацитет сечења	
Материјал	Дебљина
Челик (S185JR,S235JR)	0,5-15 mm
Нерђајући челик (AISI 304, X5CrNi18-10 1.4301)	0,5-10 mm
Алуминијум (Al99.5 EN AW 1050A)	0,5-8 mm
Бакар (Cu-ETP CW004A H040 EN1652)	0,5-5 mm
Месинг (CuZn37 CW508L H055 EN1652)	0,5-5 mm

На слици 3.2 и слици 3.3 су приказани основни делови ласера.

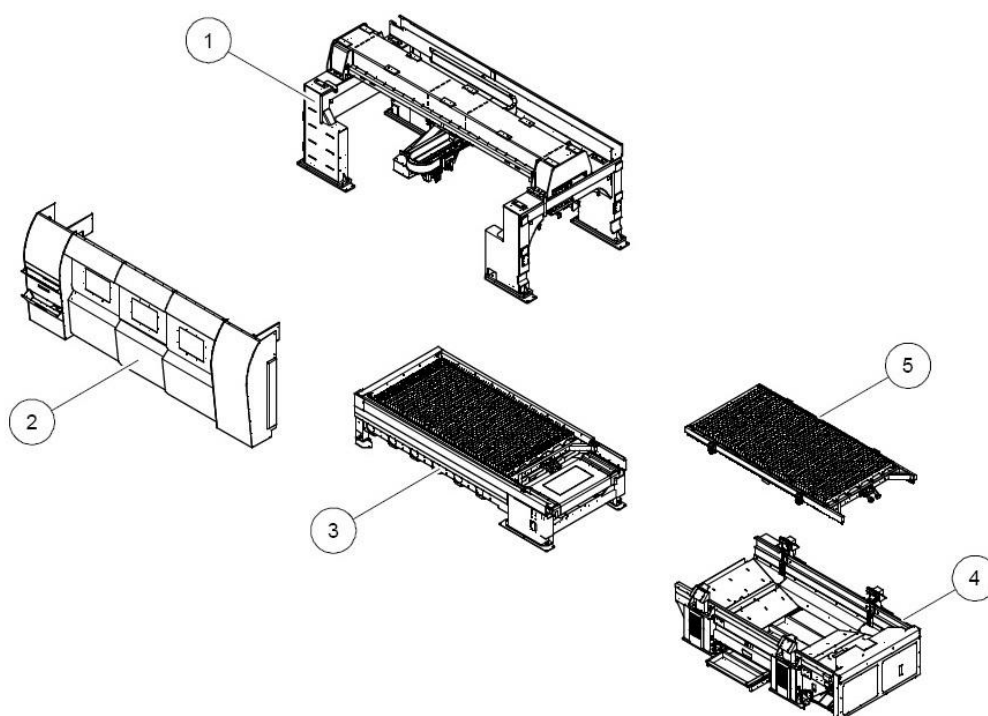


Слика 3.2 Основни делови ласера Salvagnini L3 [15]



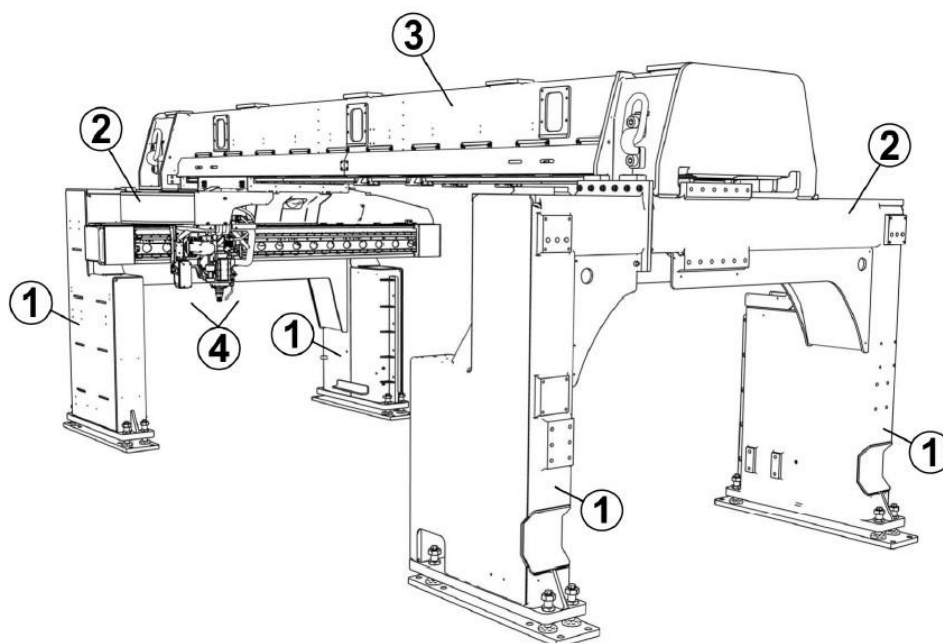
Слика 3.3 Основни делови ласера Salvagnini L3: 1- глава за сечење; 2- носач главе за сечење; 3- Уређај за тражење фокуса; 4- Изменљиви радни сто (унутрашњи); 5- Изменљиви радни сто (спољашњи); 6- Уређај за замену радног стола; 7- Спољашња кутија за отпад; 8- Обрадак; 9- Унутрашња кутија за отпад; 10- Централна греда- са вођицама за погон по X оси; 11- Уређај за формирање ласерског зрака- извор ласера [15]

На слици 3.4 су приказани основни делови конструкције ласера.



Слика 3.4 Основни делови конструкције ласера: 1- носећа конструкција ласера; 2- заштитна врата и оплата од лима; 3- Унутрашњи радни сто; 4- Носач спољашњег радног стола; 5- Радни сто (палета)[15]

На слици 3.5 је приказана носећа конструкција ласера.



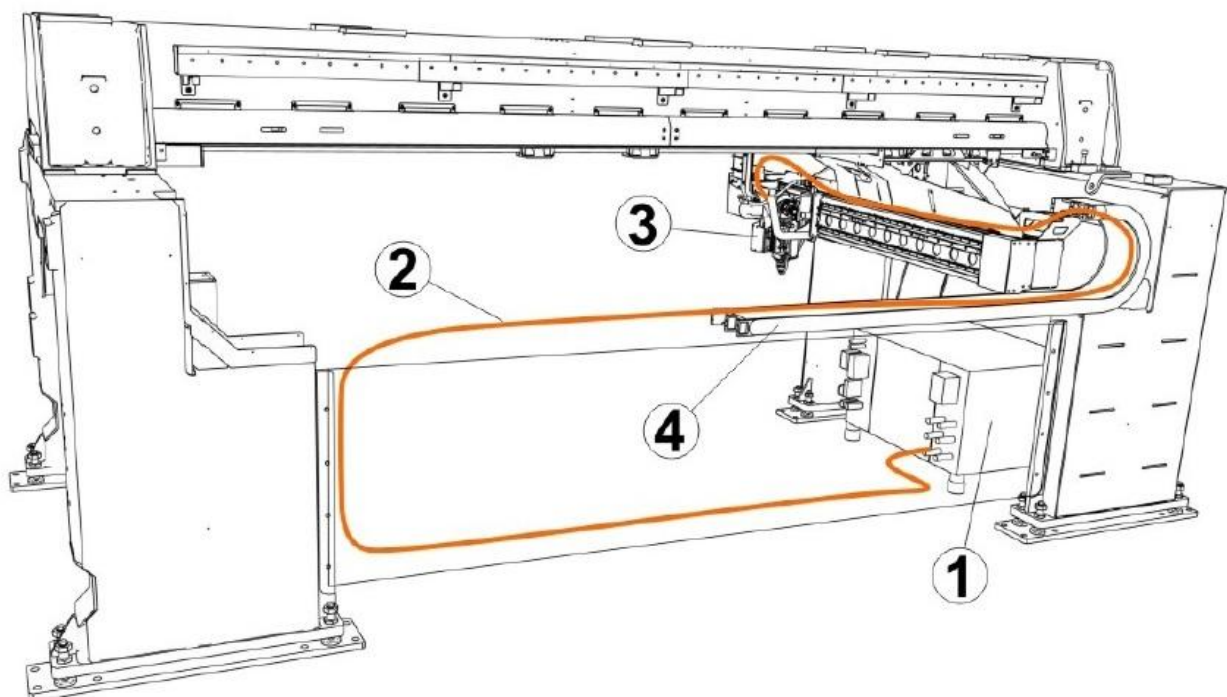
Слика 3.5 Основни делови носеће конструкције ласера: 1- Носеће греде; 2- Попречне греде; 3- Централна греда- носи вођице за X и Y осе носача главе за сечење; 4- Носач главе за сечење; [15]

На слици 3.6 је приказан уређај за формирање ласерског зрака, односно извор ласера.



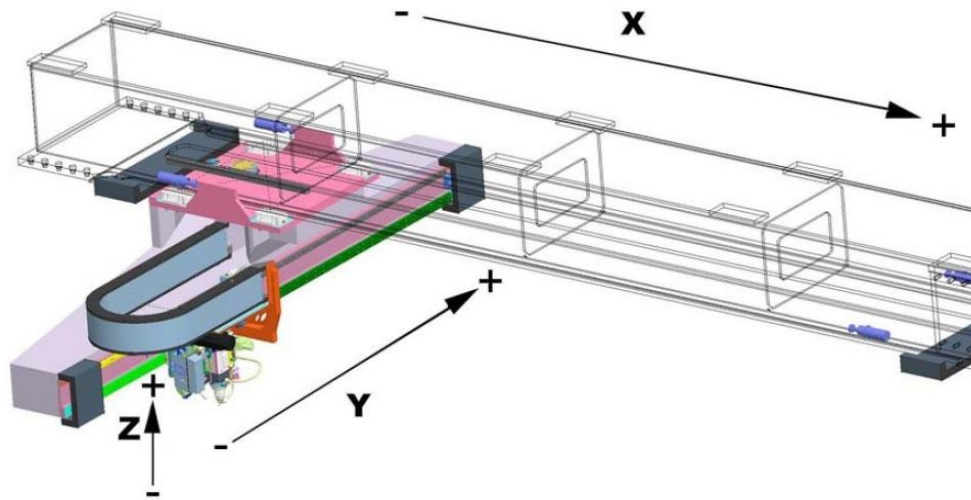
Слика 3.6 Извор ласера

Код фибер ласера, пренос зрака од извора до главе се врши оптичким каблом, као што је приказано на слици 3.7.



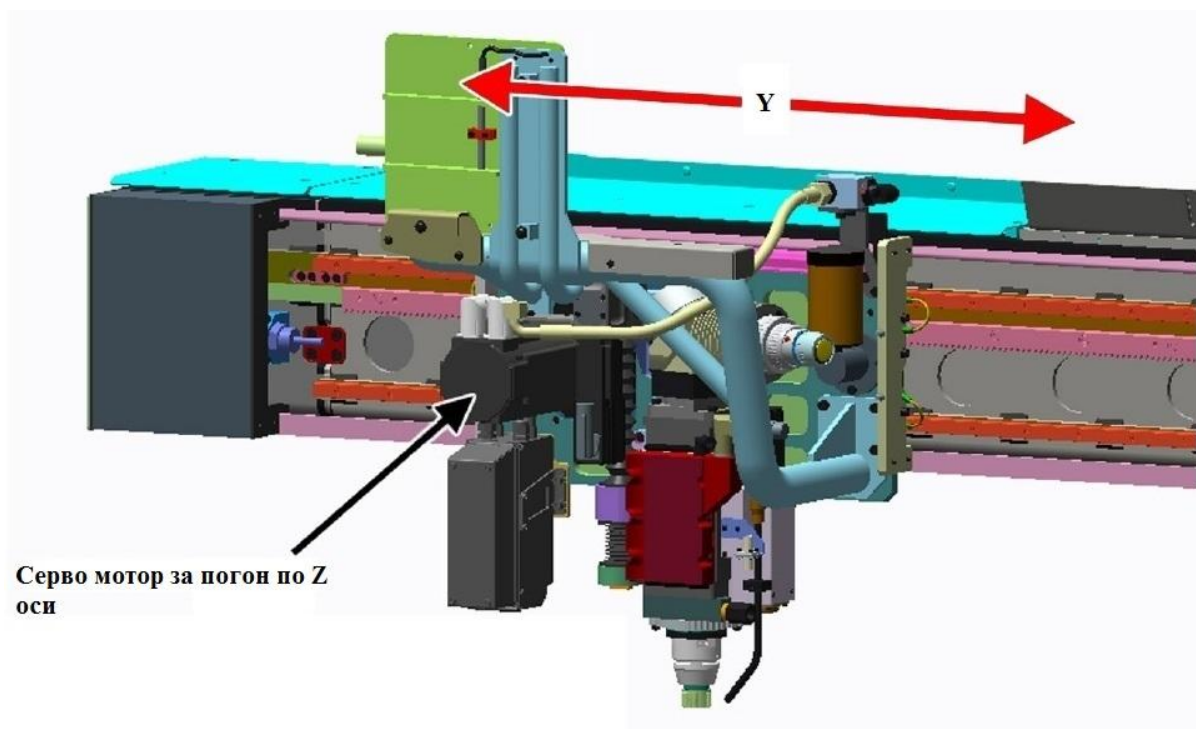
*Слика 3.7 Оптички кабал за пренос ласерског зрака од извора до главе за сечење:
1- Извор ласера; 2- Оптички кабал за пренос ласерског зрака; 3- Глава за сечење; 4- Носач (заштита) кабла [15]*

На слици 3.8 је приказана оријентација оса координатног система.



Слика 3.8 Положај оса [15]

Носач главе за сечење (слика 3.9) се помера по вођицама помоћу два одвојена система за X и Y осу. Погон обезбеђује серво мотор преко зупчаника и зупчасте летве. Погон по Z оси обезбеђује серво мотор преко рециркулационог преносника који се налазе директно на носачу [15].



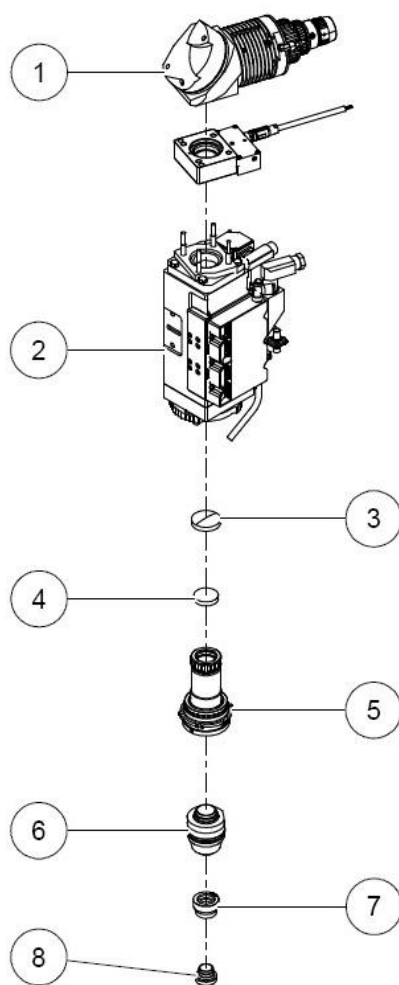
Слика 3.9 Носач главе за сечење [15]

Глава за сечење (слика 3.10) има функцију да фокусира ласерски сноп према предмету обраде.



Слика 3.10 Глава за сечење

На слици 3.11 су приказани основни делови главе за сечење.



Слика 3.11 Основни делови главе за сечење: 1- Колиматор; 2- Кућиште; 3- Сочиво; 4- Заштитно стакло; 5- Доњи део кућишта; 6- Капацитивни сензор; 7- Керамички уложак; 8- Млазница [15]

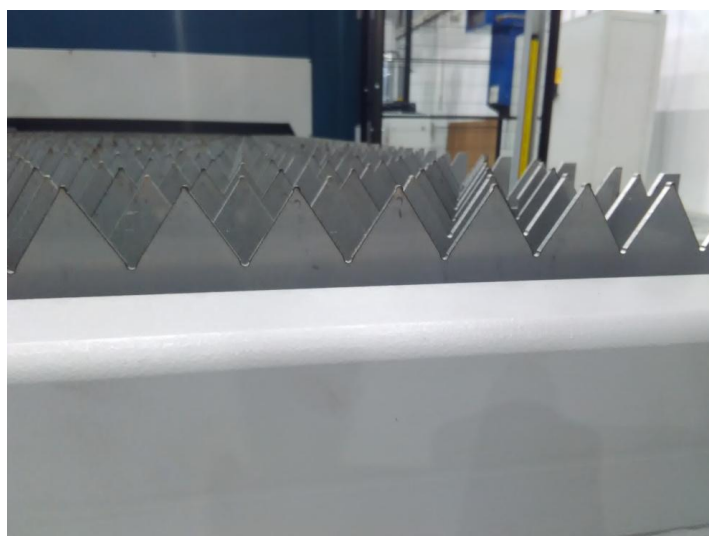
Колиматор (1) усмерава ласерски зрак из оптичког кабла ка сочиву (3) који усмерава зрак ка обрадку. Капацитивни сензор (6) задржава фокусну главу на одговарајућем растојању од плоче лима, односно врши аутоматско одржавање положаја жижне даљине, ради добијања оптималног реза.

Радни сто се састоји из две решетке унутрашње и спољашње (слика 3.12). На унутрашњој решетки се врши обрада, и она се налази у ласерској машини. За то време се на спољашњој решетки уклањају исечени делови и шкарт, и поставља се нова табла лима која ће следећа да се сече. При завршетку сечења, решетке замењују положаје, односно унутрашња решетка излази изван машине, а спољашња решетка са спремном таблом лима за обраду се уводи у машину. Замена решетки се врши аутоматски [15].



Слика 3.12 Радни сто са изменљивом решетком (спољашња)

На слици 3.13 је приказан профил решетки.



Слика 3.13 Профил решетки

Уређај за хлађење (слика 3.14) има улогу да одржава температуру извора ласера и главе за сечење у нормали. Одржавање температуре се врши преко расхладне течности, воде, која се хлади у овом уређају, а затим се помоћу пумпе која се такође налази у уређају, шаље до извора ласера и главе за сечење [15].



Слика 3.14 Уређај за расхлађивање извора ласера и фокусне главе [15]

Прашина која се ствара током процеса сечења усисава се помоћу одстрањивача прашине са улошцима за филтрирање, који је спојен са цевима ласера испод радног стола. Усисавање врши јединица за филтрирање (слика 3.15), која скупља прашину у контејнер [15].



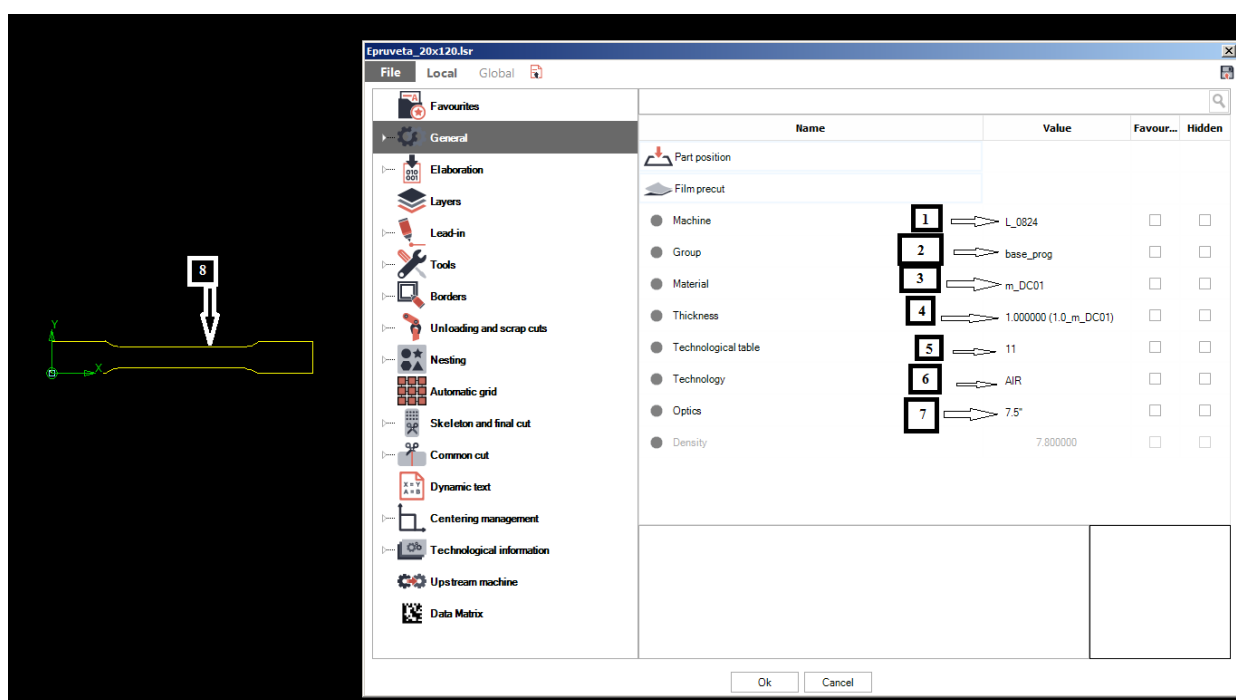
Слика 3.15 Уређај за филтрирање-скупљање прашине

4. Програмирање фибер ласера Salvagnini L3

Софтвер за управљање ласером се назива Streamlaser. Програмирање се започиње подешавањем “General” картице (слика 4.1). У њој се бира машина на којој се изводи обрада, ознаку материјала, дебљину материјала, помоћни гас, жижну даљину и број технолошке таблице.

Технолошка таблица је условљена материјалом који се обрађује. На основу технолошке таблице програм према својој препоруци одређује најоптималније параметре процеса.

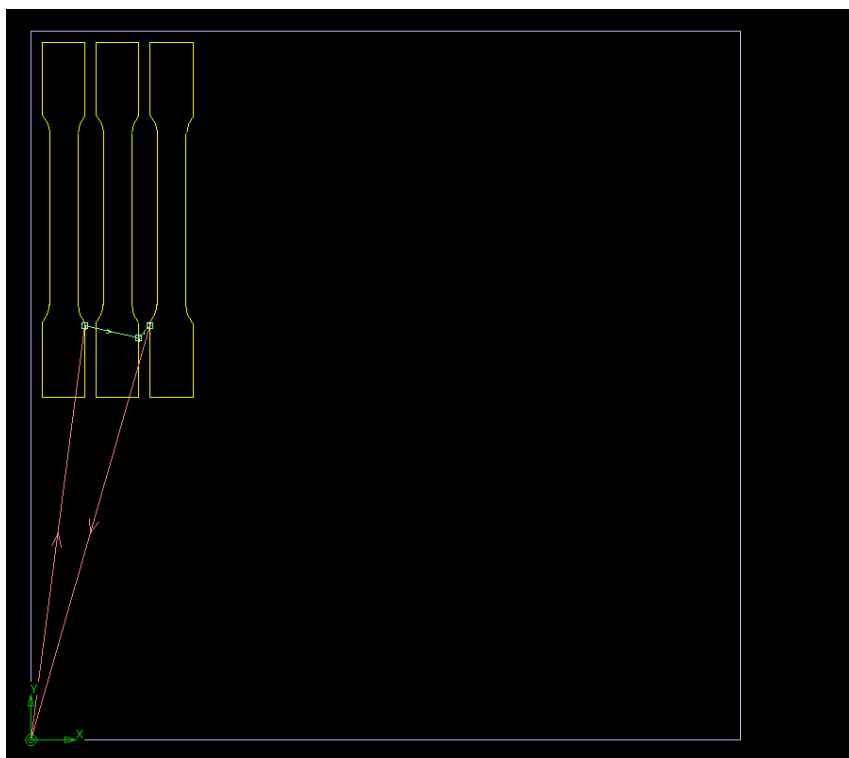
Затим се врши цртање дела који се сече, или се цртеж увози као готов помоћу формата dxf/dwg.



Слика 4.1 Почетак програмирања: 1. Машина; 2. Програмска група; 3- Материјал; 4- Дебљина материјала; 5- Технолошка таблица; 6- Помоћни гас; 7- Жижна даљина; 8- Цртеж дела који сечемо

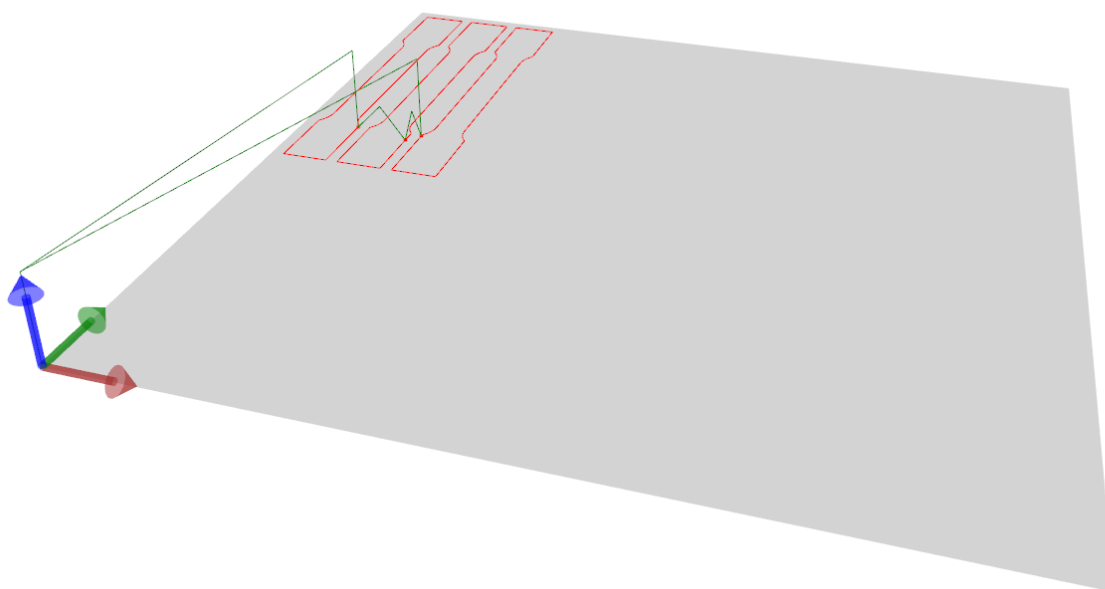
У следећем кораку се врши формирање гнезда, односно цртеж дела се поставља и позиционира на таблу лима. Овде постоји аутоматска могућност постављања цртежа, где корисник уноси само број умножака, а програм сам одређује положај цртежа како би се табла лима максимално искористила, односно како би се што мање шкарта направило. Након дефинисања гнезда, програм је комплетиран, и може се вршити сечење.

У опцији формирања гнезда, програм приказује и путањ у алата у X-Y равни, што је приказано на слици 4.2.



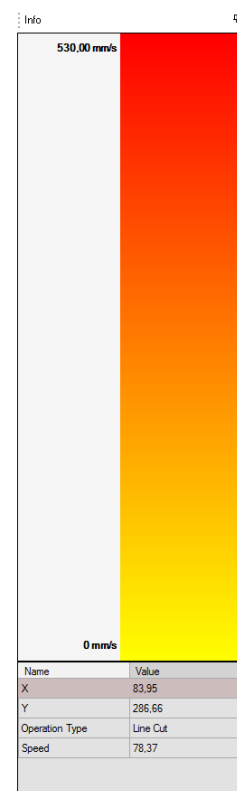
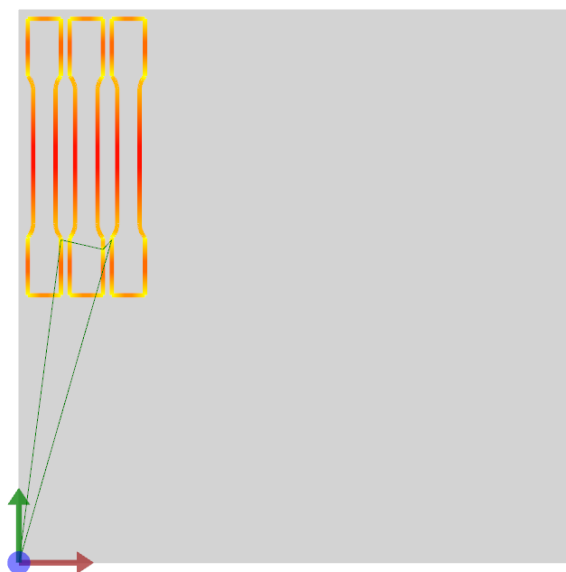
Слика 4.2 Гнездо и путања алата у X - Y равни

Програм поседује могућност приказа путање алата у 3D (слика 4.3).

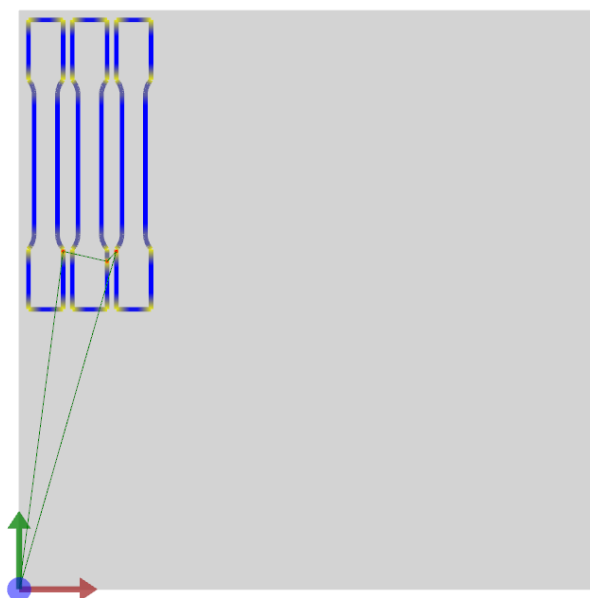


Слика 4.3 Путања алата у 3D

Такође, програм може дати и приказ расподеле брзине сечења (слика 4.4), и снаге сечења (слика 4.5) по контури обрадка.

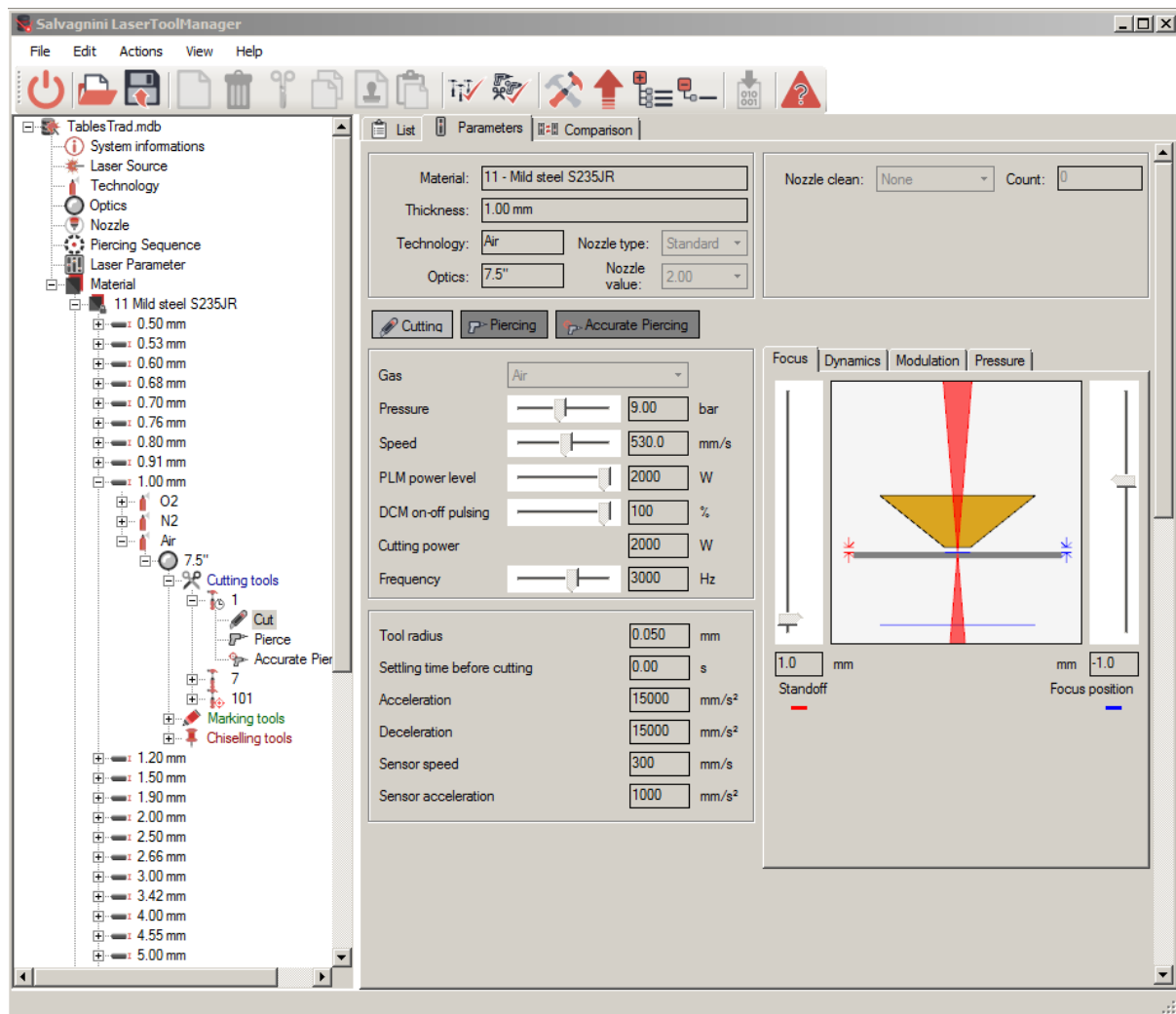


Слика 4.4 Расподела брзине сечења по контури обрадка



Слика 4.5 Расподела снаге по контури обрадка

Параметре обраде за дату операцију, у овом случају сечење епрувете за испитивање на кидалици, које је програм сам генерисао, могу се очитати у сваком тренутку (слика 4.6).



Слика 4.6 Параметри обраде за сечење епрувете

5. Експериментална испитивања

У оквиру експерименталних испитивања било је потребно утврдити да ли постоји утицај промене параметера обраде сечења ласером на квалитет обрађене (резане) површине и мерење затезне чврстоће исеченог дела. За такву врсту испитивања било је потребно исећи одређен број делова-епрувета на ласерској машини, са варирањем параметера обраде, а затим извршити мерења квалитета обрађене површине (храпавости) и на основу тога извести одређене закључке.

Материјал потребан за сечење је обезбедила компанија Металац Посуђе, Горњи Милановац. Сечење је обављено на ласерској машини Salvagnini L3, која је описана детаљно у поглављу 3.

У компанији Металац Посуђе постоји проблем са добављачима хладно ваљаног лима. Наиме, постоје три различита добављача са којима ова компанија сарађује, од којих купује исти челик по стандарду, али који се у пракси, у производњи другачије понашају. Главна производна технологија којом прерађују челични лим су поступци пластичног обликовања метала (дубоко извлачење, савијање, просецање, пробијање...). Проблеми са којим се срећу су да у истим алатима за дубоко извлачење лим од једног добављача се лепо обликује, а од другог има теже обликовање (долази до већег броја лоших комада). Због тога постоји потреба да се испитају механичке карактеристике лимова од сва три произвођача, и да се утврди који лим је најпогоднији за обраду пластичним деформисањем. Испитивање механичких карактеристика лима је вршено тестом једноосним затезањем епрувете на кидалици. Како је епрувету могуће исећи на ласеру, поставља се питање при којим параметрима треба вршити сечење, и да ли промена препоручених параметера од произвођача ласера, утиче на резултате испитивања на кидалици.

Због тога у овом раду је поред испитивања утицаја промене параметера обраде ласерским сечењем на квалитет резане површине, вршено и испитивање механичких карактеристика исечених епрувета, како би испитали утицај промене параметера сечења на механичке карактеристике епрувета.

За потребе обе врсте испитивања извршено је сечење епрувета за испитивање на ласеру, па је извршено мерење квалитета обрађене површине на епрувети, и на крају епрувете су подвргнуте механичким затезању на кидалици.

Како постоје три произвођача лимова које је потребно испитати, епрувете су разврстане у три групе означене словним ознака : А,В,С. Групи А је додељен лим произвођача из Смедерева, HBIS Group. Група В означава лим произвођача из Мађарске, ISD DUNAFERR, а група С означава лим произвођача из Италије, ILVA S.p.A.

Материјал епрувета је St13 (Ћ 0147, DC 01EK), исти је за све три групе односно сва три произвођача, а дебелина епрувете је $S = 1 \text{ mm}$.

Сечење је вршено варирањем одређених параметера обраде: брзине сечења $V, \text{mm/s}$ и снаге сечења P, W .

Параметри сечења су означени бројним ознакама које се придружују словним ознакама епрувета. Па тако:

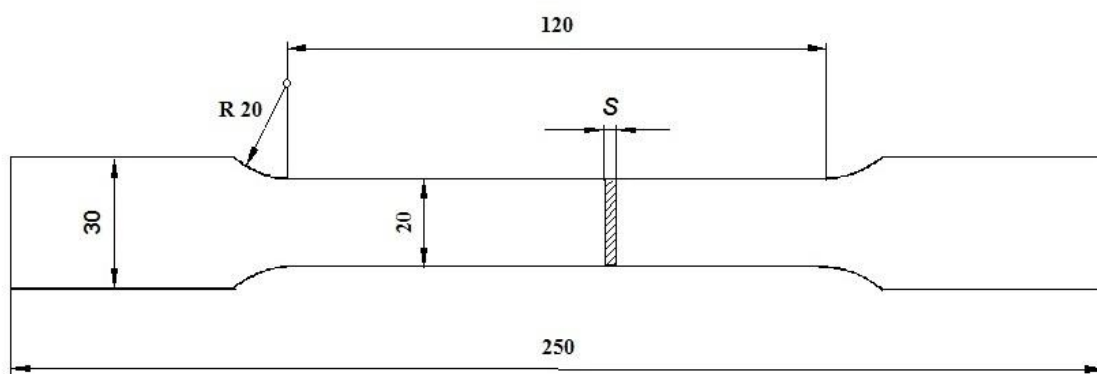
- 1- значи да је епрувета сечена по параметрима које препоручује произвођач ласера, односно : $P= 2000 W$, $V= 530 \text{ mm/s}$;
- 2- је за епрувете које су сечене са истом снагом сечења $P= 2000 W$ као по препоруци, а мањом брзином сечења- $V= 200 \text{ mm/s}$;
- 3- је за епрувете које су сечене при мањој снази $P= 1800 W$, а истој брзини сечења као по препоруци $V= 530 \text{ mm/s}$.

Како су 3 групе епрувета разврстане по произвођачу лима, и по три групе параметара сечења, то значи да је укупно 9 различитих епрувета, које су означене према већ наведеном принципу. У табели 5.1 су приказане ознаке епрувета и параметри обраде при којима су исечени.

Табела 5.1 Ознаке епрувета према произвођачу лима и параметрима обраде

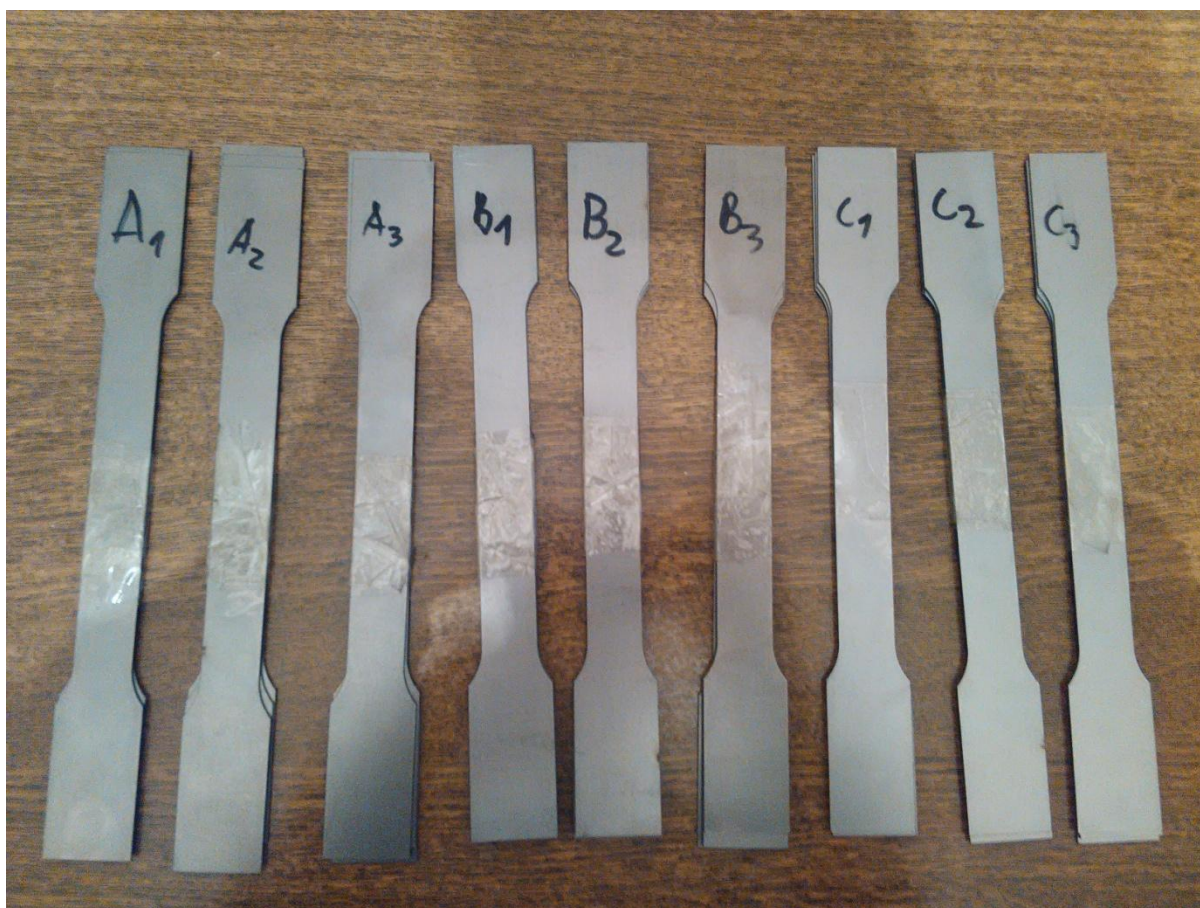
Лим А- St13 (Č0147, DC01EK)- HBIS Group S= 1mm			
Епрувета	Снага P, W	Брзина сечења V, mm/s	Притисак ваздуха, bar
A1- по програму	2000	530	9
A2	2000	200	9
A3	1800	530	9
Лим В- St13 (Č0147, DC01EK)- ISD DUNAFERR S= 1mm			
Епрувета	Снага P, W	Брзина сечења V, mm/s	Притисак ваздуха, bar
B1- по програму	2000	530	9
B2	2000	200	9
B3	1800	530	9
Лим С- St13 (Č0147, DC01EK)- ILVA S.p.A. S= 1 mm			
Епрувета	Снага P, W	Брзина сечења V, mm/s	Притисак ваздуха, bar
C1- по програму	2000	530	9
C2	2000	200	9
C3	1800	530	9

На слици 5.1 је приказан цртеж епрувете чије димензије одговарају стандардним димензијама за испитивање затезањем на кидалици.



Слика 5.1 Димензије стандардне епрувете за испитивање затезањем на кидалици

На слици 5.2 су приказане исечене епрувете коју се спремно за даље испитивање.



Слика 5.2 Епрувете добијене сечењем на ласеру Salvagnini L3 у компанији Металац Посуђе

5.1 Утицај параметара обраде сечењем на квалитет обрађене површине

Мерење храпавости вршено је на мерном систему Talysurf 6, који се налази на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, у лабораторији за обраду метала резањем и трибологију. Мерни систем служи за мерење карактеристика микрогеометрије контактних површина. 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.

На слици 5.3 је приказан мерни систем Talysurf-6 на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.



Слика 5.3 Уређај за мерење храпавости Talysurf-6, на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу

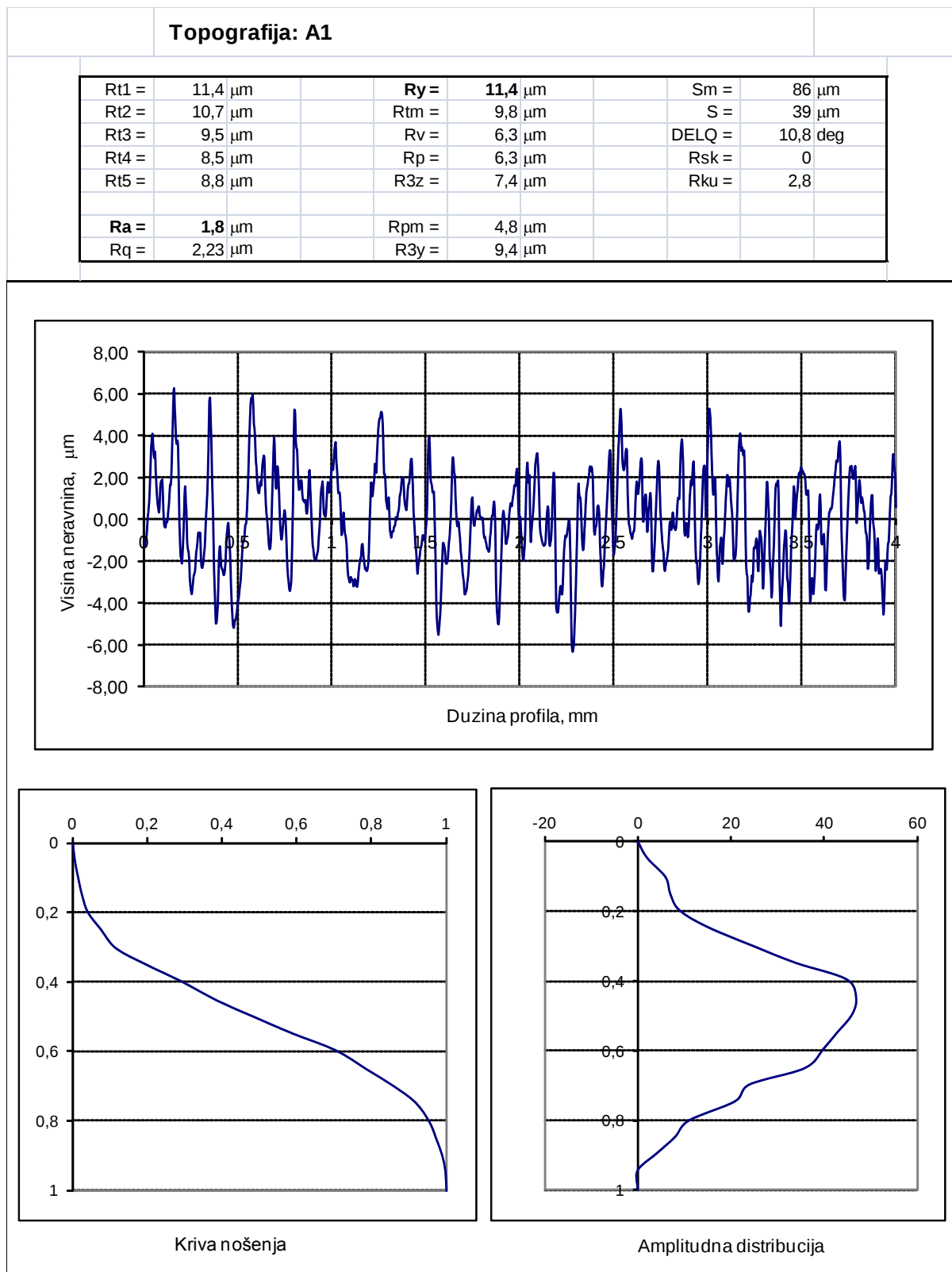
У табели 5.2 су приказани параметри топографије површине који се мере коришћењем овог мерног система.

Табела 5.2 Параметри топографије површине које Talysurf-6 може да измери

Ra, μm	Средње аритметичко одступање профила на дужини мерења
Ry, Rmax μm	Максимална висина профила, максимална Rti вредност
Rq, μm	Средње квадратно одступање профила на дужини оцењивања
Rt1-Rt5, μm	Максималне висине профила на референтним дужинама
Rtm, μm	Средња Rti вредност
Rv, μm	Највећа дубина удубљења профила
Rp, μm	Највећа висина испупчења профила
Sm, μm	Средњи корак испупчења профила
Δq , °	Средњи квадратни угао нагиба профила
Rsk	Коефицијент асиметрије профила, мера симетрије криве расподеле амплитуде
Rku	Куртосис, мера заострености криве расподеле амплитуда
S, μm	Средњи корак локалних испупчења профила
R3z, μm	Средња вредност растојања трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини профила
Rpm, μm	Средња вредност Rpi одређених на референтним дужинама
R3y, μm	Највеће растојање трећег по висини испупчења и трећег по дубини удубљења на референтној дужини

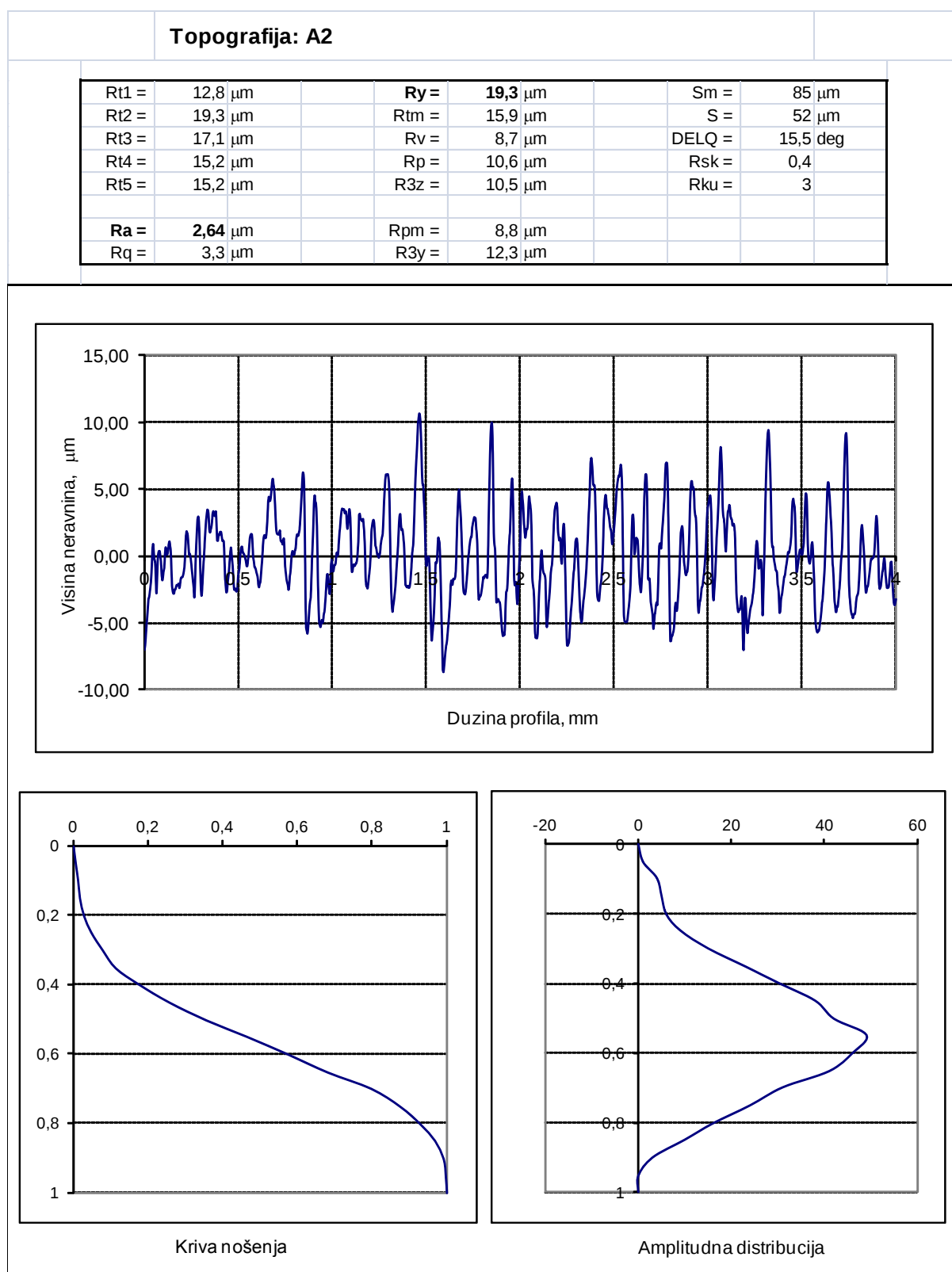
5.1.1 Резултати испитивања квалитета обрађене површине

На слици 5.4 је приказана топографија епрувете A1.



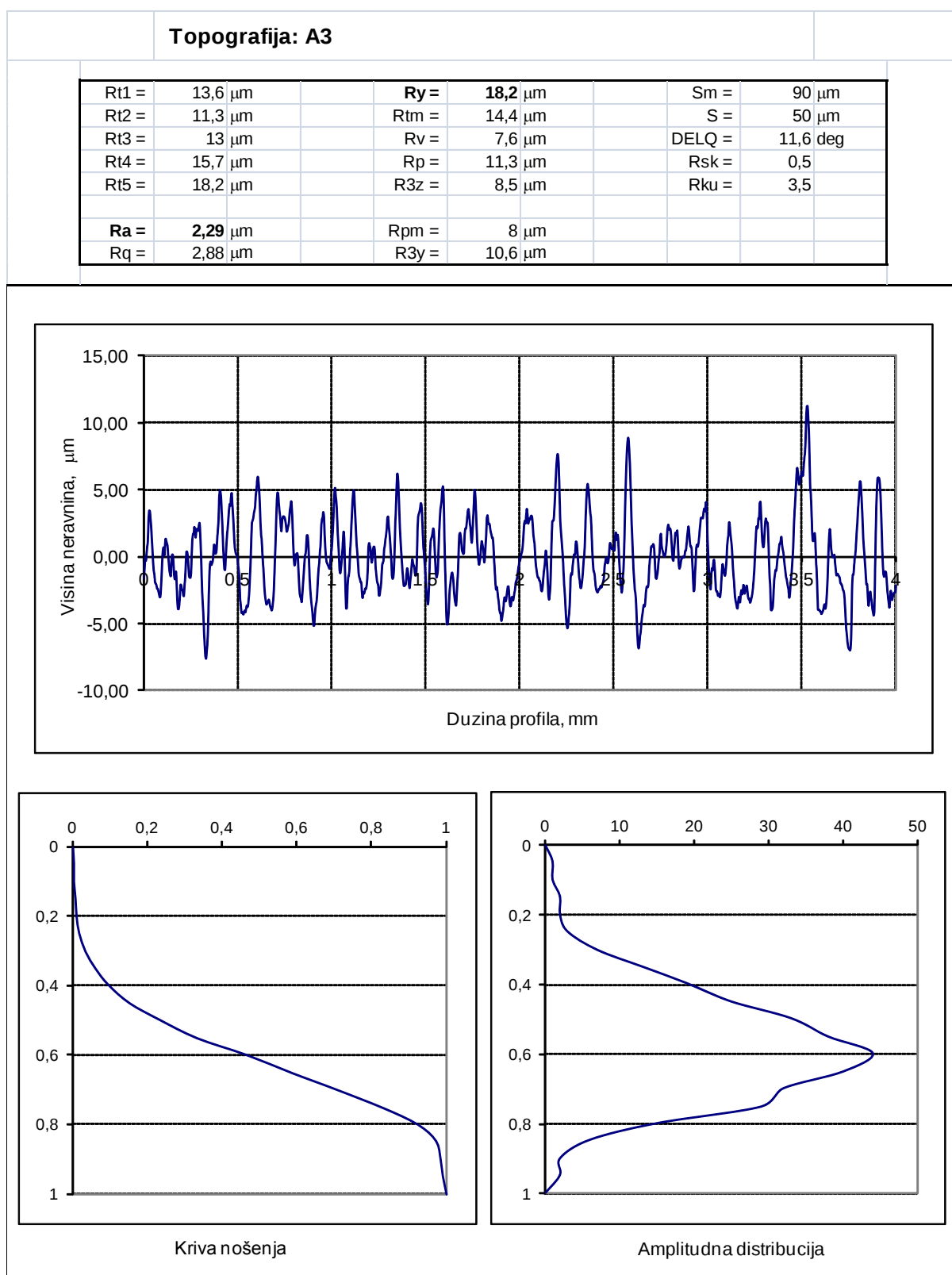
Слика 5.4 Топографија епрувете A1

На слици 5.5 је приказана топографија епрувете А2.



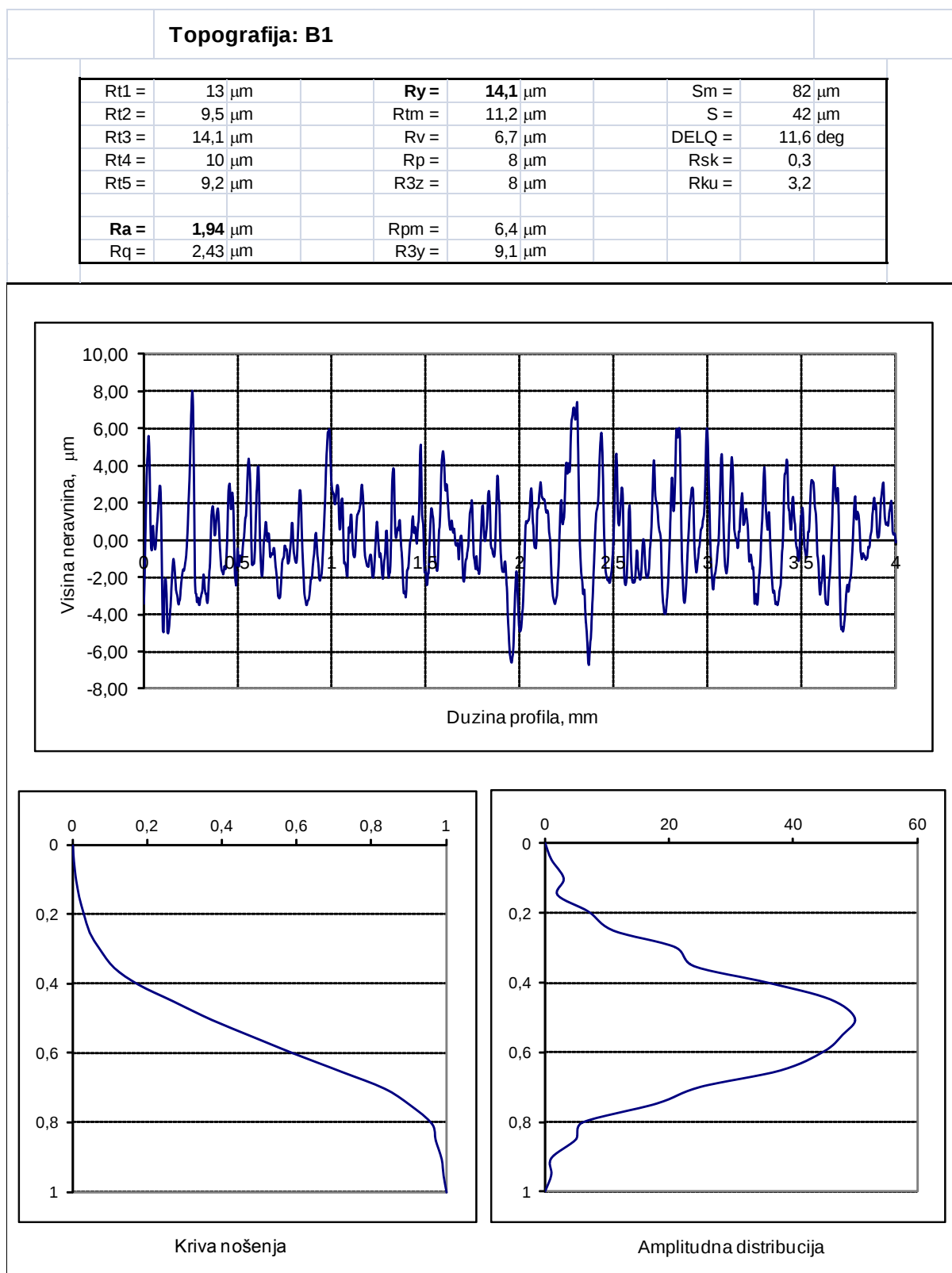
Слика 5.5 Топографија епрувете А2

На слици 5.6 је приказана топографија епрувете А3.



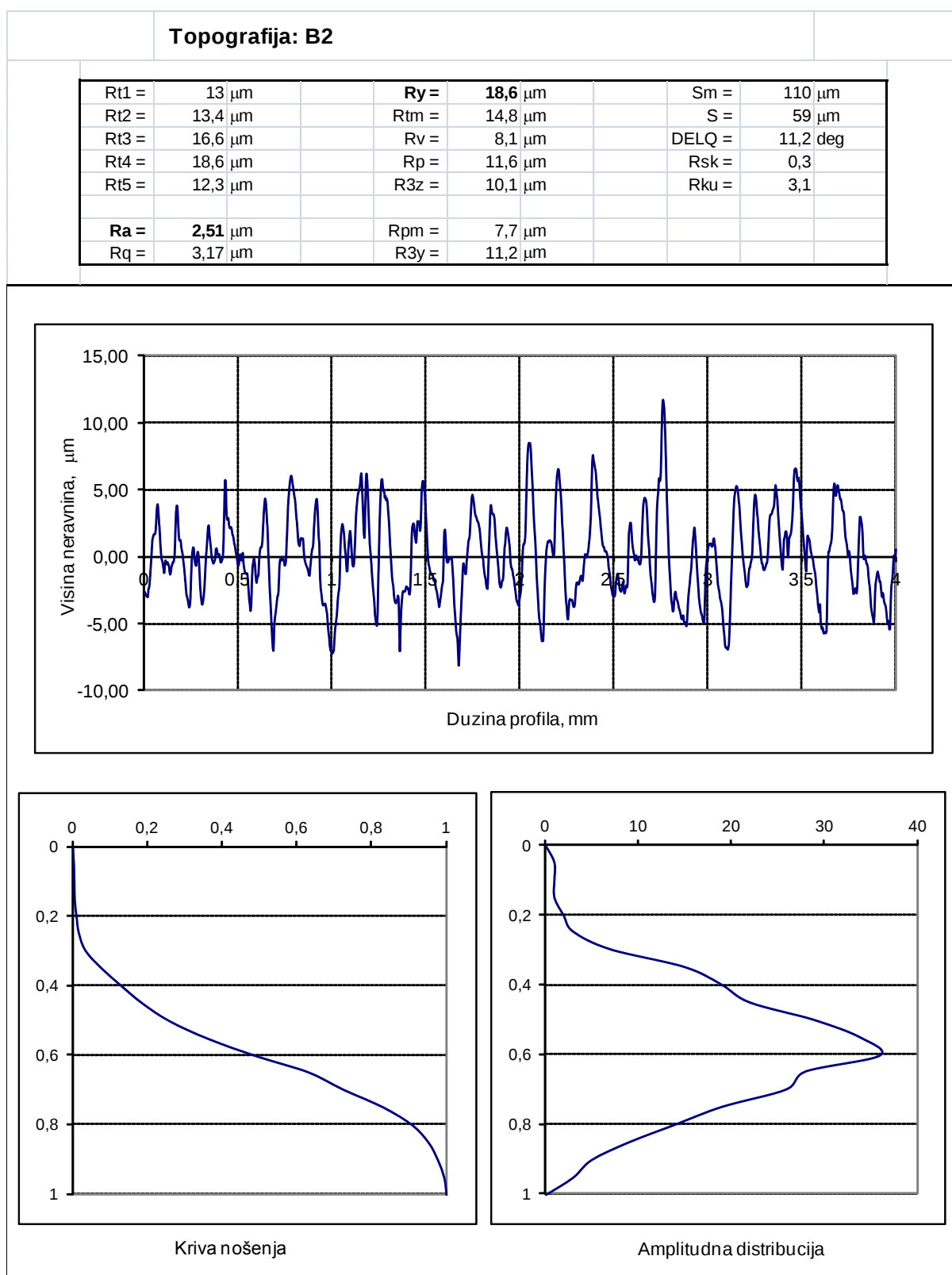
Слика 5.6 Топографија епрувете А3

На слици 5.7 је приказана топографија епрувете В1.



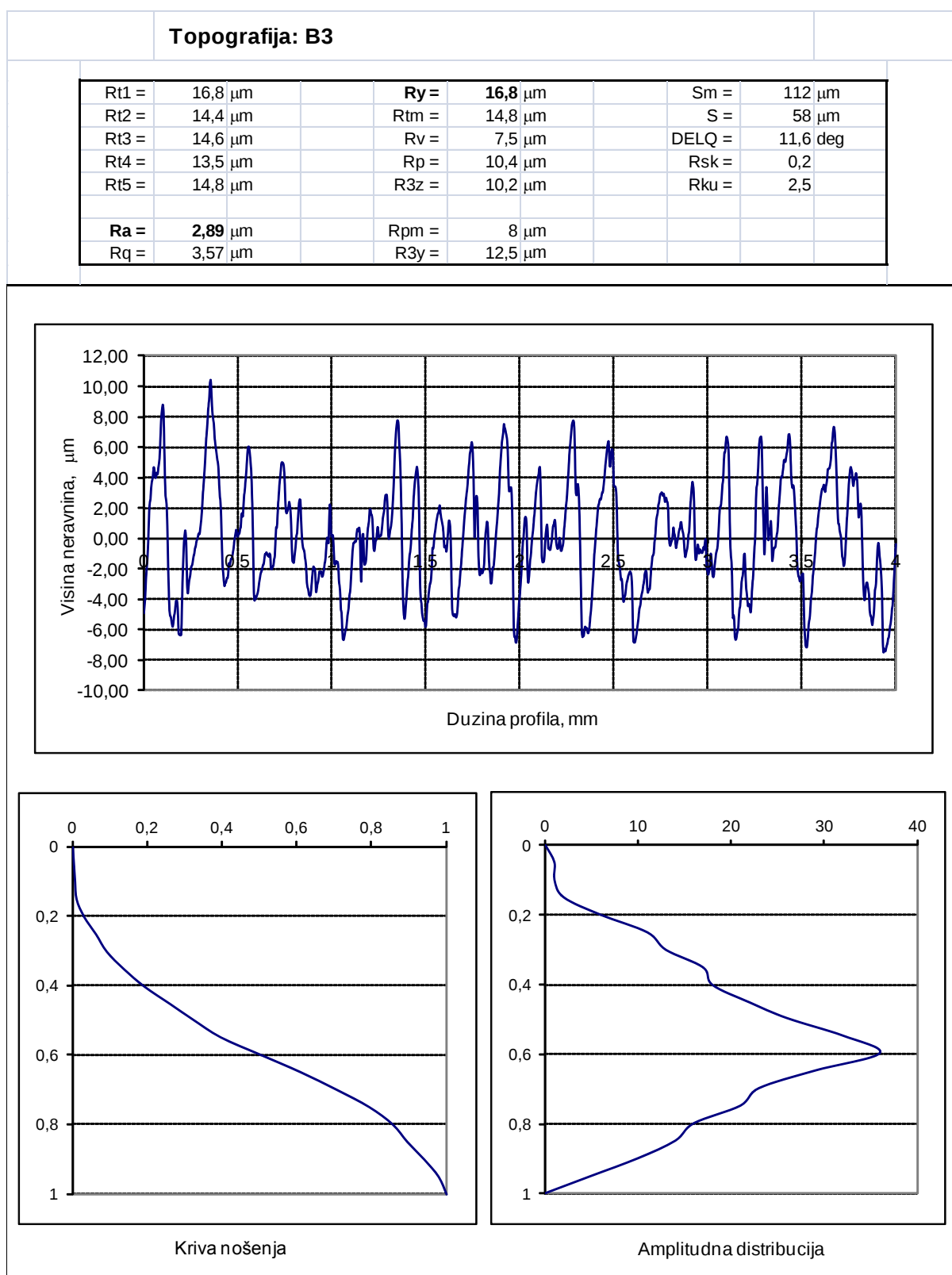
Слика 5.7 Топографија епрувете В1

На слици 5.8 је приказана топографија епрувете В2.



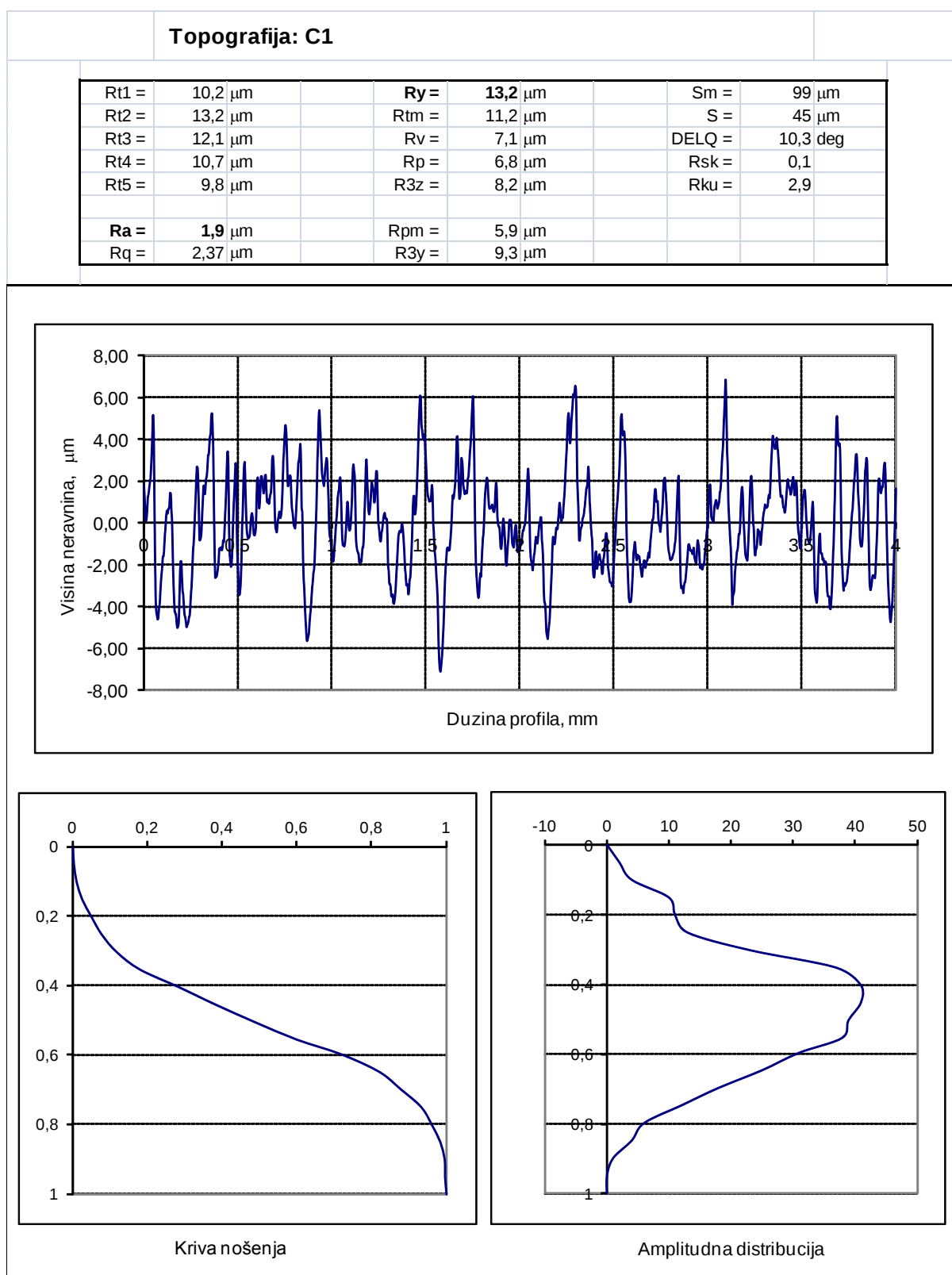
Слика 5.8 Топографија епрувете В2

На слици 5.9 је приказана топографија епрувете В3.



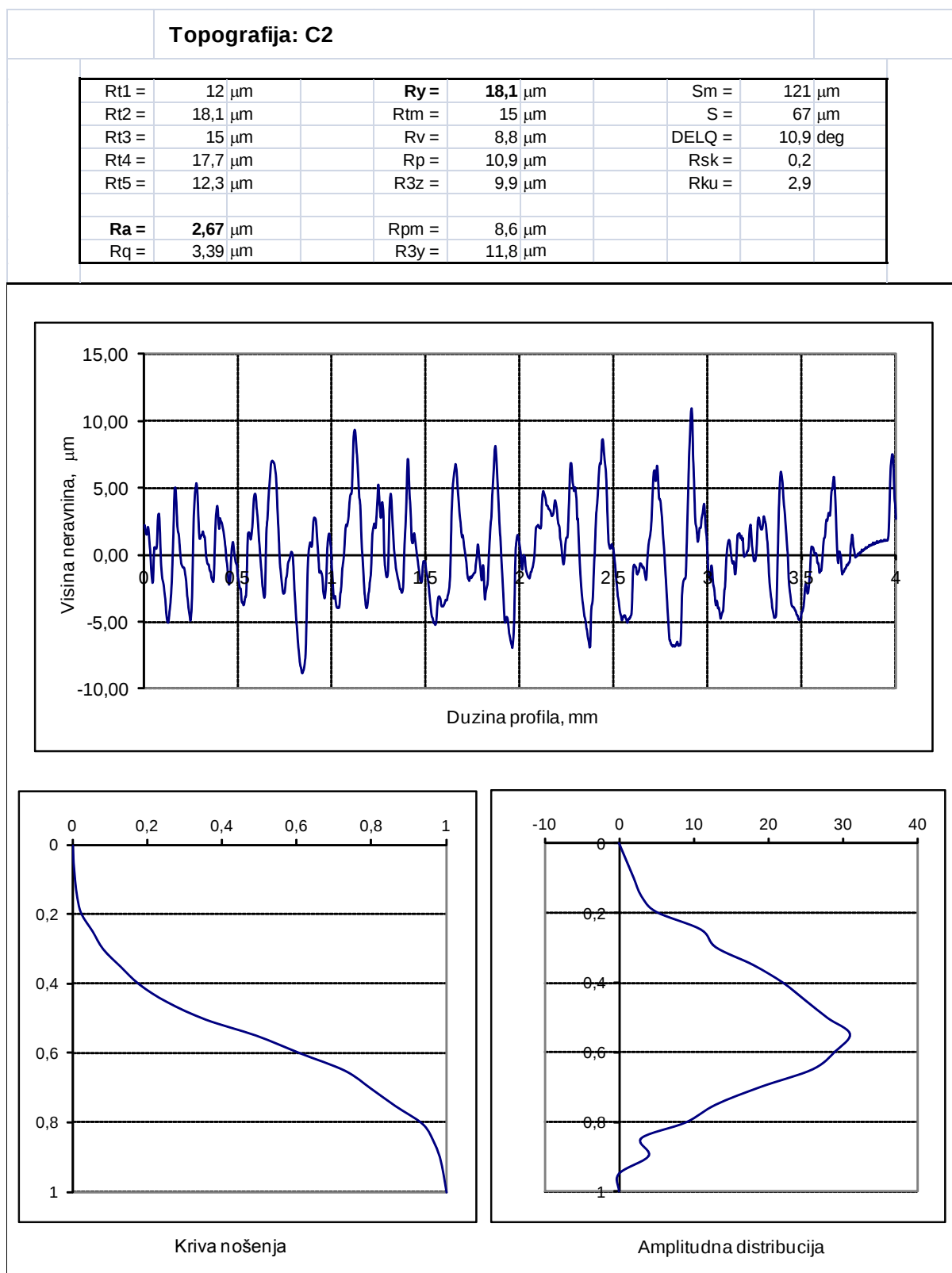
Слика 5.9 Топографија епрувете В3

На слици 5.10 је приказана топографија епрувете C1.



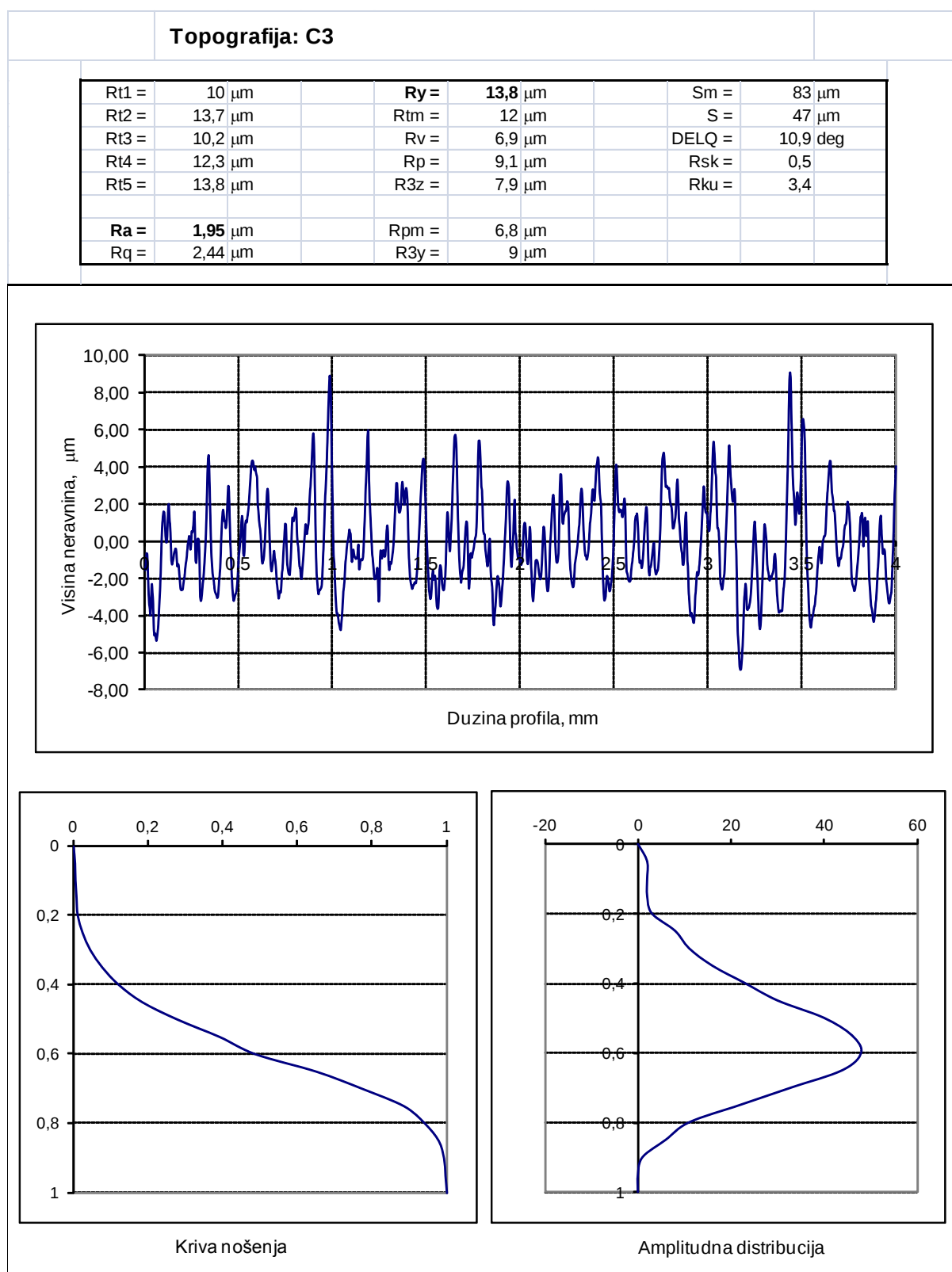
Слика 5.10 Топографија епрувете C1

На слици 5.11 је приказана топографија епрувете C2.



Слика 5.11 Топографија епрувете C2

На слици 5.12 је приказана топографија епрувете C3.



Слика 5.12 Топографија епрувете C3

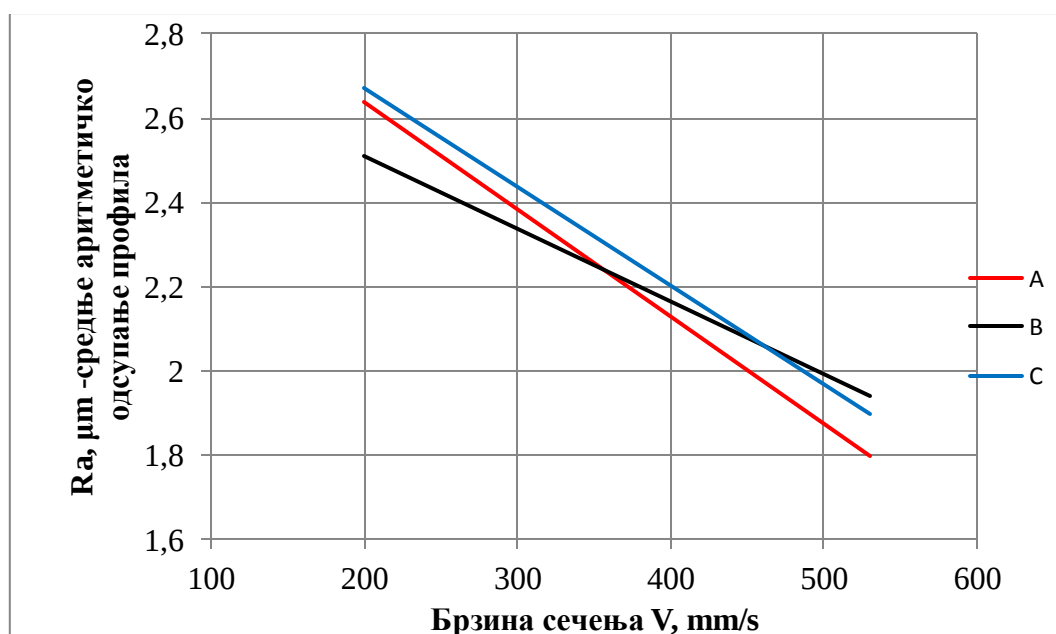
На основу измерених параметара храпавости формирана је табела у којој се налазе епрувете које су сечене при снази $P = 2000 \text{ W}$, а при различитим брзинама сечења V ,

mm/s. Епруветама су придружене одговарајуће вредности храпавости, односно средњег аритметичког одступања профила R_a , и максимална висина неравнина R_y (R_{max}), које су добијене мерењем.

Табела 5.3 Резултати испитивања храпавости за одговарајуће епрувете које су сечене при $P = 2000 \text{ W}$

Епрувета	$R_a, \mu\text{m}$	$R_y, R_{max}, \mu\text{m}$	$V, \text{mm/s}$	P, W
A1	1,8	11,4	530	2000
A2	2,64	19,3	200	2000
B1	1,94	14,1	530	2000
B2	2,51	18,6	200	2000
C1	1,9	13,2	530	2000
C2	2,67	18,1	200	2000

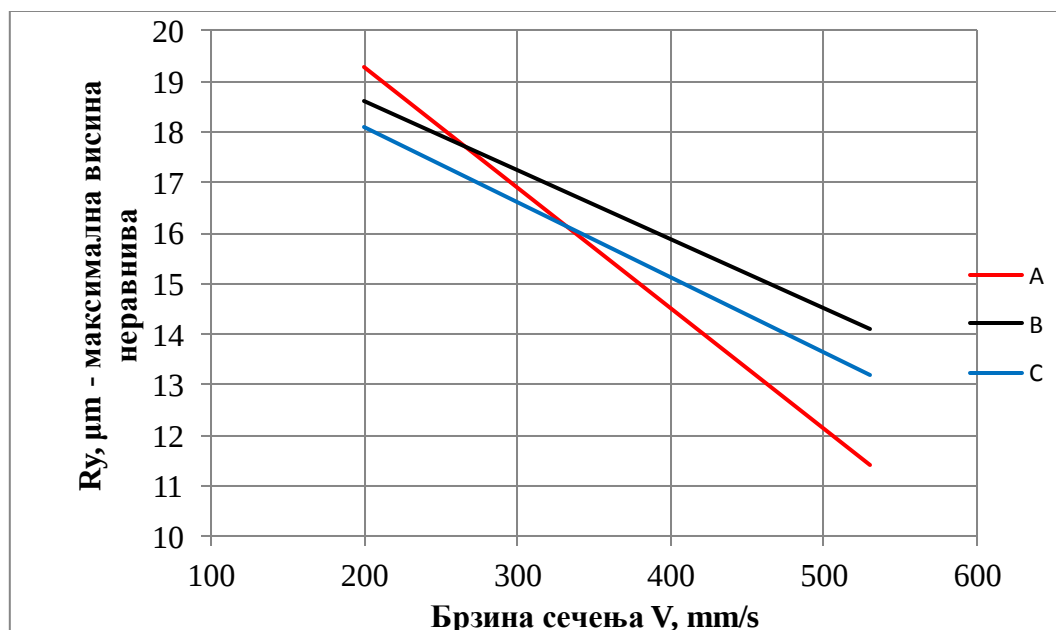
На основу табеле 5.3 је извршено формирање дијаграма утицаја промене брзине сечења на вредности средњег аритметичког одступања профила R_a (слика 5.13).



Слика 5.13 Утицај брзине сечења на средње аритметичко одступање профила

Са дијаграма на слици се може приметити да повећањем брзине сечења, при истој снази ласера од 2000 W , смањује се вредност средњег аритметичког одступања профила R_a , односно смањује се храпавост.

Поред тога извршено је и формирање дијаграма ради процене утицаја брзине сечења на максималну висину неравнина, што је приказано на дијаграму на слици 5.14.



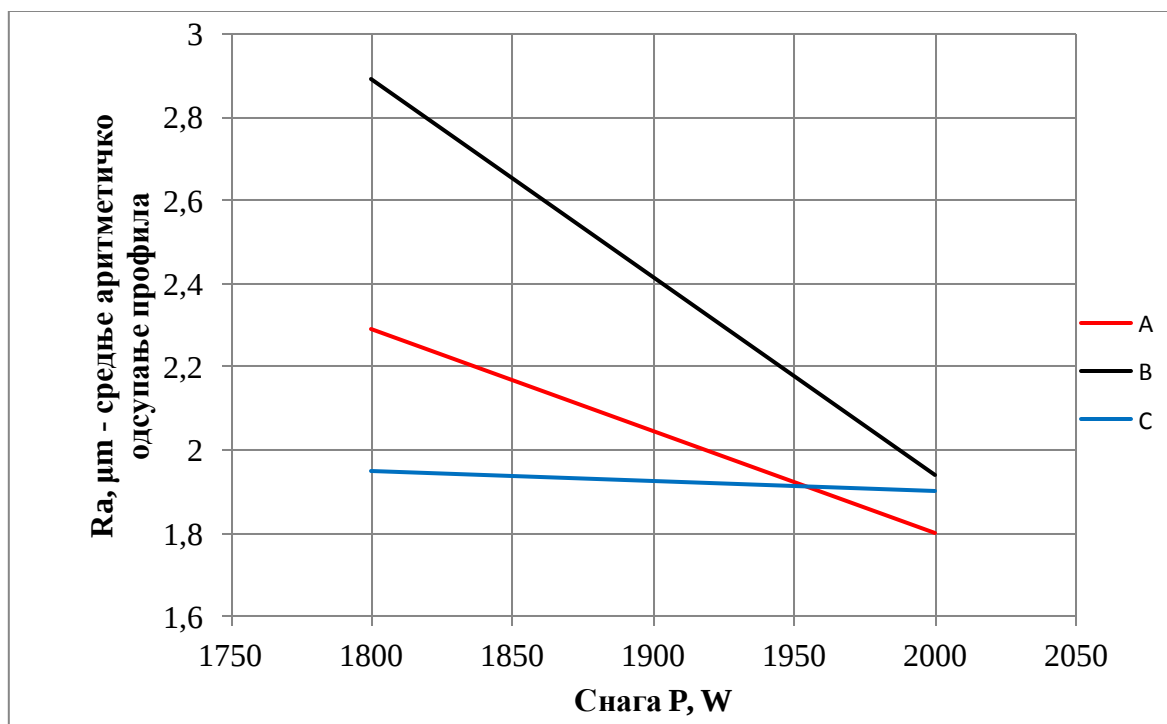
Слика 5.14 Утицај брзине сечења на максималну висину неравнина

Осим процене утицаја брзине сечења на квалитет обрађене површине, извршена је и процена утицаја снаге ласера на квалитет обрађене површине. Формирана је табела у којој су епрувете које су сечене при брзини сечења $V = 530 \text{ mm/s}$, а при различитим снагама. Епруветама су придружене одговарајуће вредности храпавости, односно средњег аритметичког одступања профила R_a , и максимална висина неравнина R_y ($R_{\max}$) које су добијене мерењем.

Табела 5.4 Резултати испитивања храпавости за епрувете које су сечене при брзини $V = 530 \text{ mm/s}$

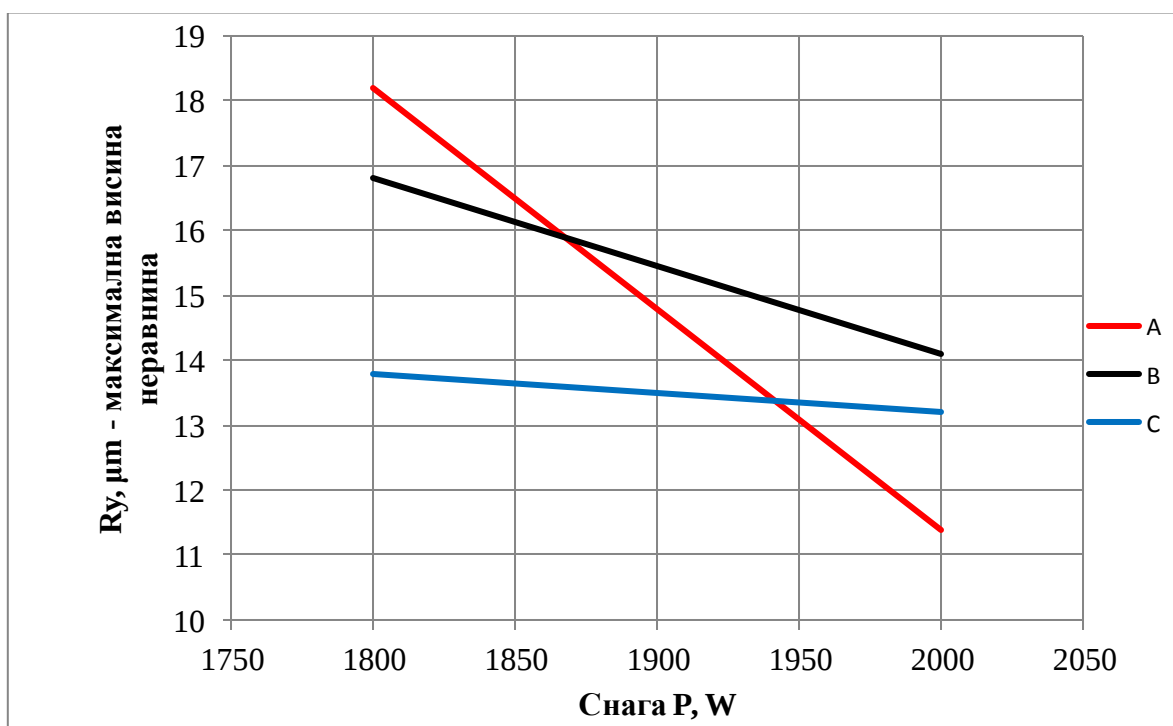
Епрувета	$R_a, \mu\text{m}$	$R_y, R_{\max}, \mu\text{m}$	P, W	V, mm/s
A1	1,8	11,4	2000	530
A3	2,29	18,2	1800	530
B1	1,94	14,1	2000	530
B3	2,89	16,8	1800	530
C1	1,9	13,2	2000	530
C3	1,95	13,8	1800	530

На основу табеле 5.4 извршено је формирање дијаграма утицаја промене снаге ласера, при брзини сечења $V = 530 \text{ mm/s}$, на средње аритметичко одступање профила R_a , што је приказано на слици 5.15.



Слика 5.15 Утицај снаге на средње аритметичко одступање профила

Такође, на основу табеле 5.4 извршено је формирање дијаграма утицаја снаге ласера на максималну висину неравнина, што је приказано на слици 5.16.



Слика 5.16 Утицај снаге на максималну висину неравнина

Пратећи дијаграме на слици 5.15 и слици 5.16 може се закључити да са повећањем снаге опадају R_a и R_y (R_{max}), односно храпавост се смањује.

5.2 Испитивање механичких карактеристика епрувете затезањем

Испитивање су извршена у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Испитивања су вршена на универзалној кидалици SHIMADZU Servopulser EHF-EV101K3-070-0A (слика 5.17) која је набављена у оквиру пројекта TR32036. Овом приликом се захваљујем проф. др. Мирославу Живковић и сараднику Владимиру Миловановић који су омогућили реализацију испитивања.



Слика 5.17 Кидалица SHIMADZU Servopulser EHF-EV101K3-070-0A на Факултету инжењерских наука

Номинална сила машине је 100kN. Машина користи хидраулични погон и управљана је рачунаром са којим је повезана, и на ком се похрањују и обрађују подаци. Излазни мерени подаци могу се пребацити у електронску форму Microsoft excel worksheet (.xls) одакле се лако обрађују и анализирају.

Испитивање затезањем епрувета се врши до кидања епрувета, на слици 5.18 је приказан изглед епрувета након кидања.



Слика 5.18 Епрувете након разарања-кидања

5.2.1 Резултати испитивања на кидалици

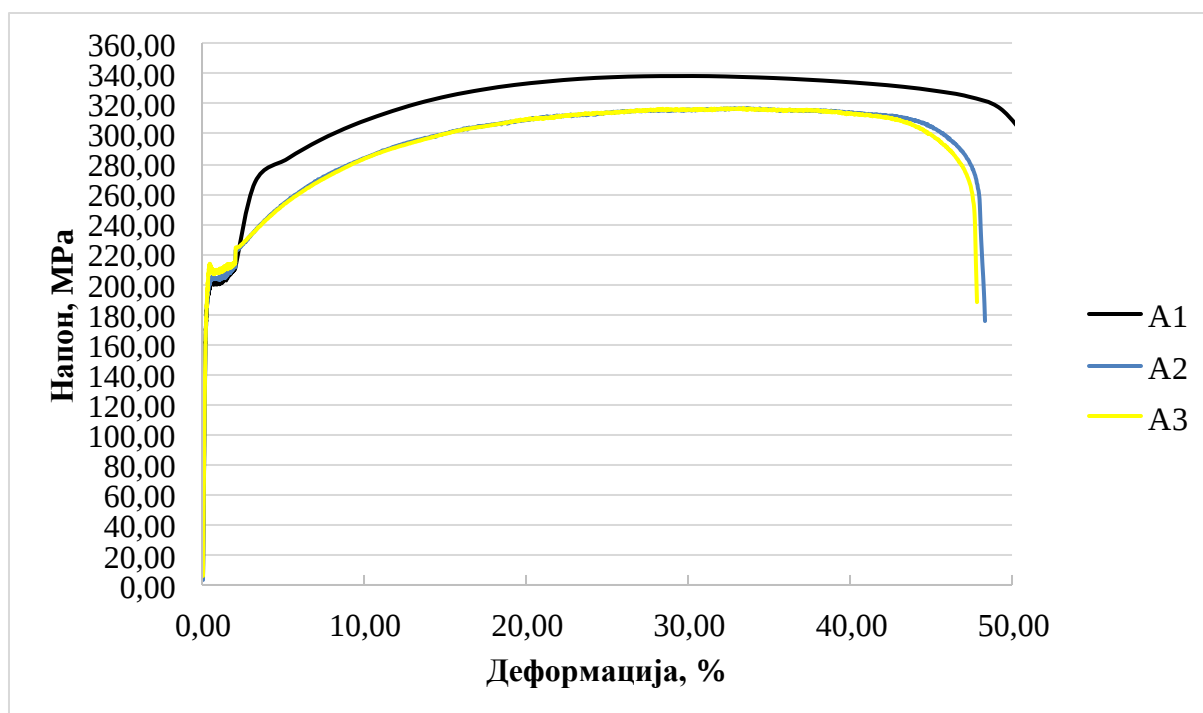
Након испитивања свих девет епрувета добијени су вредности напона течења и затезне чврстоће, у табели су приказани те вредности за одговарајуће епрувете.

Табела 5.5 Вредности напона течења, и затезне чврстоће за измерене епрувете

Епрувета	Напон течења, МПа	Затезна чврстоћа, МПа
A1	197,87	338,2
A2	199,06	316,64
A3	212,18	316,72
B1	192,02	318,04
B2	192,59	318,27
B3	192,02	317,31
C1	201,81	333,5
C2	206,96	334,18
C3	204,3	335,56

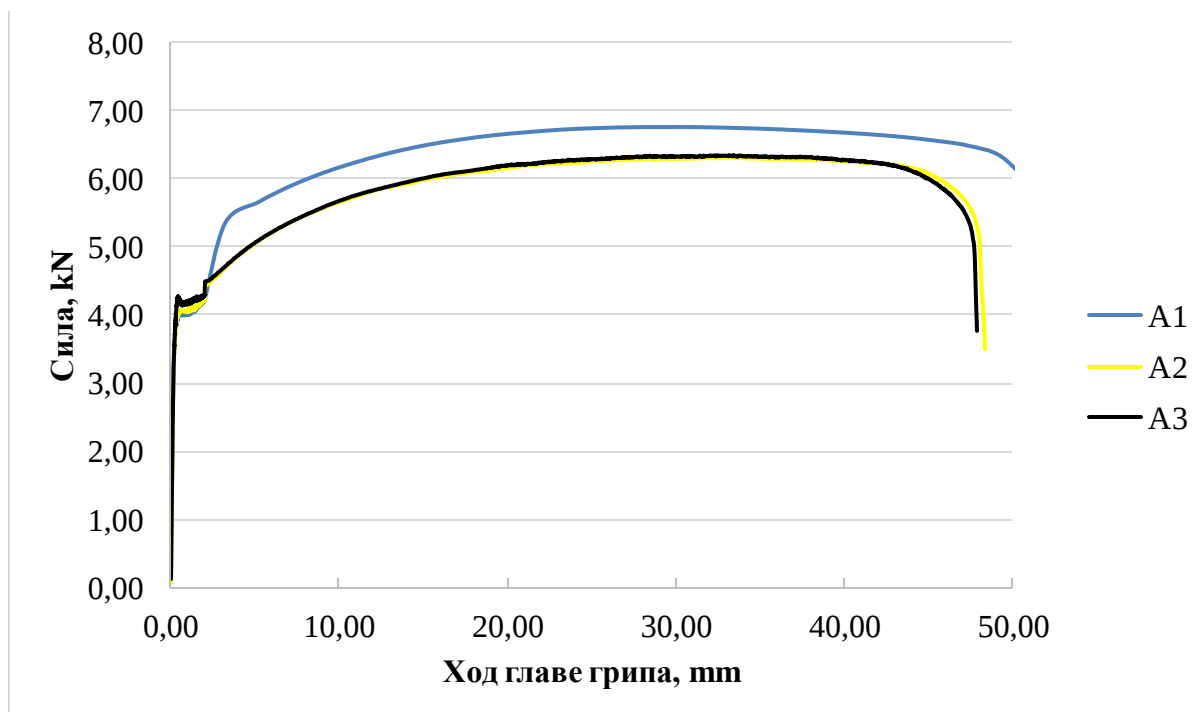
Епрувета A1 је испитивана различитом брзином деформације у области пластичности у односу на остале испитиване епрувете, па из тог разлога резултати испитивања епрувета A1 нису упоредиви са осталим епруветама.

На слици 5.19 је приказан дијаграм напон-деформација за лим А.



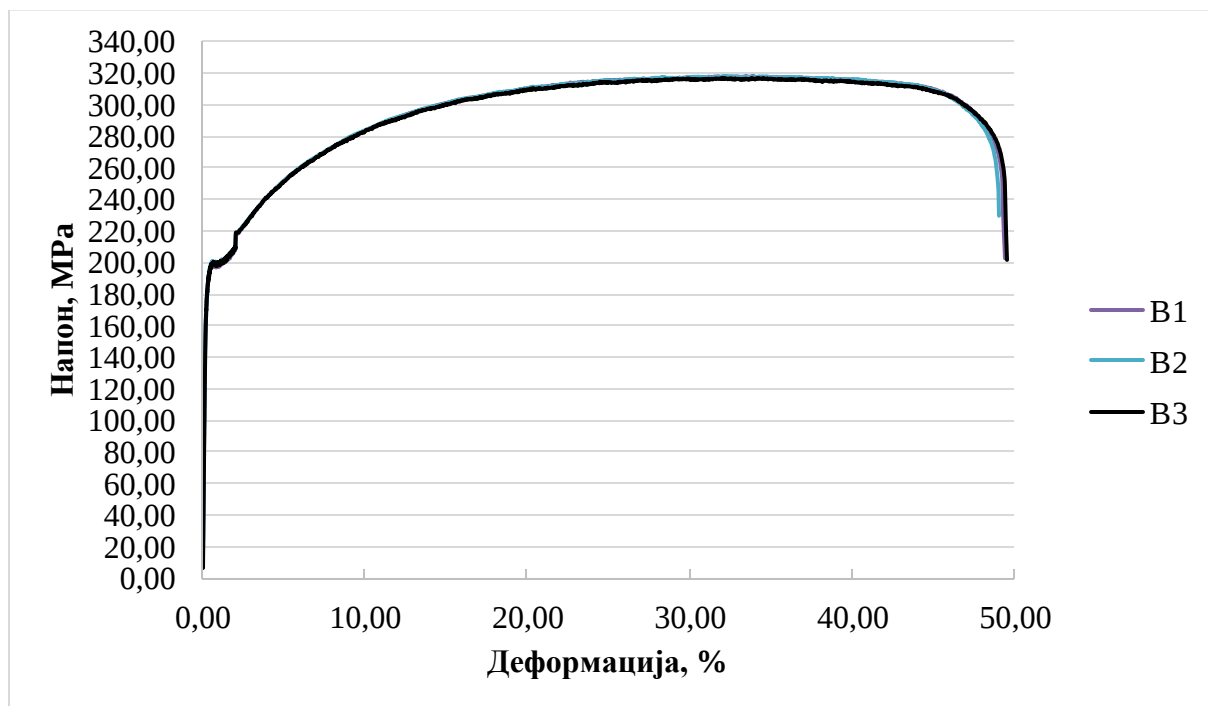
Слика 5.19 Зависност напон-деформација за лим А

На слици 5.20 је приказан дијаграм зависност сила-ход за лим А.



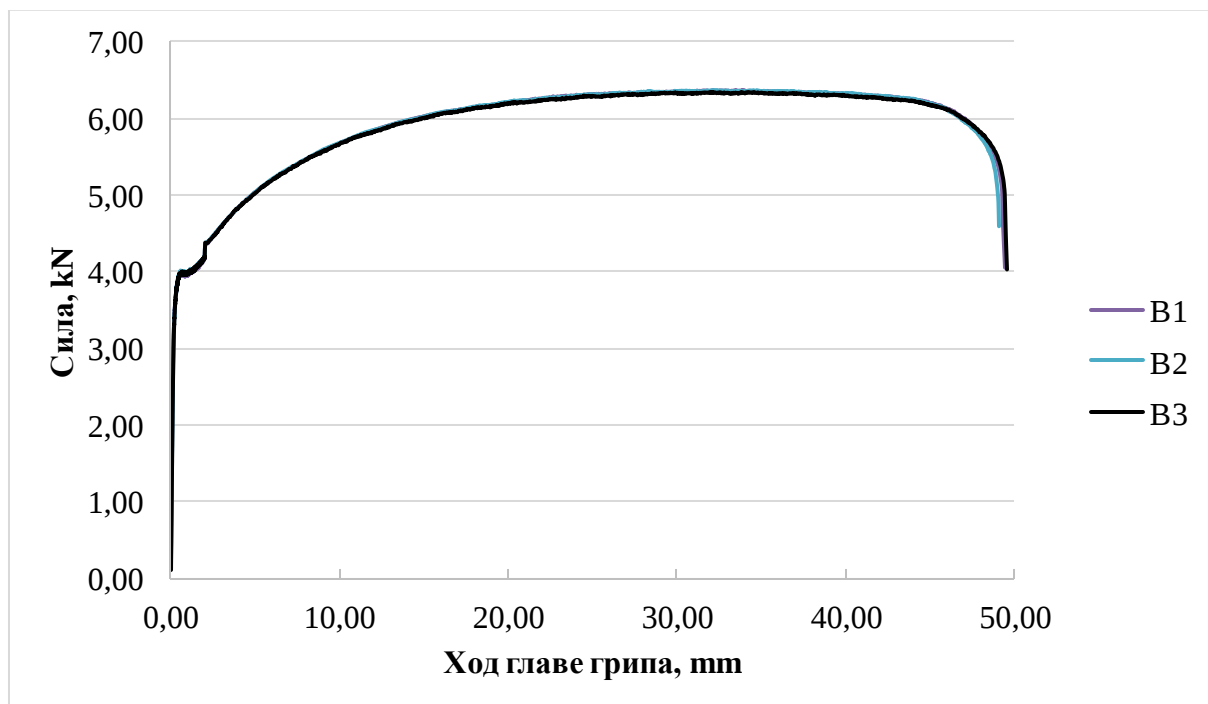
Слика 5.20 Зависност сила-ход за лим А

На слици 5.21 је приказан дијаграм напон-деформација за лим В, са којег се може приметити да промена параметара обраде сечења ласером не утиче на промену механичких карактеристика епрувета.



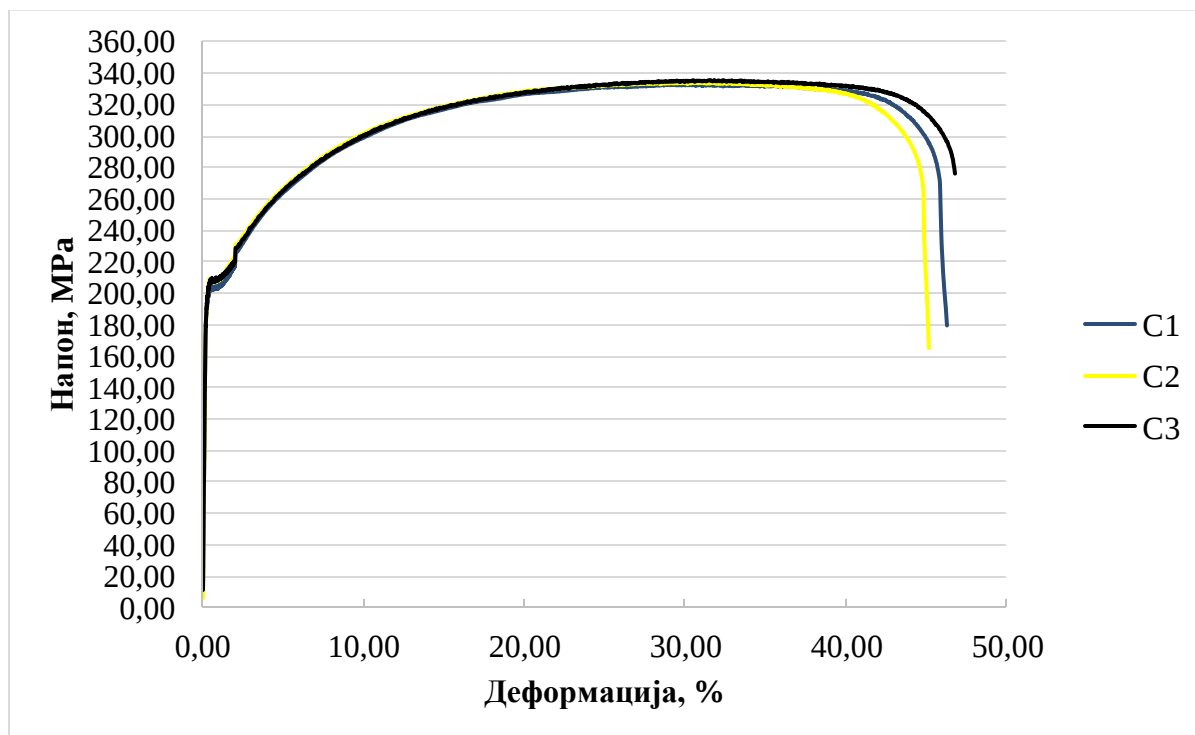
Слика 5.21 Зависност напон-деформација за лим В

На слици 5.22 је приказан дијаграм зависност сила-ход за лим В.



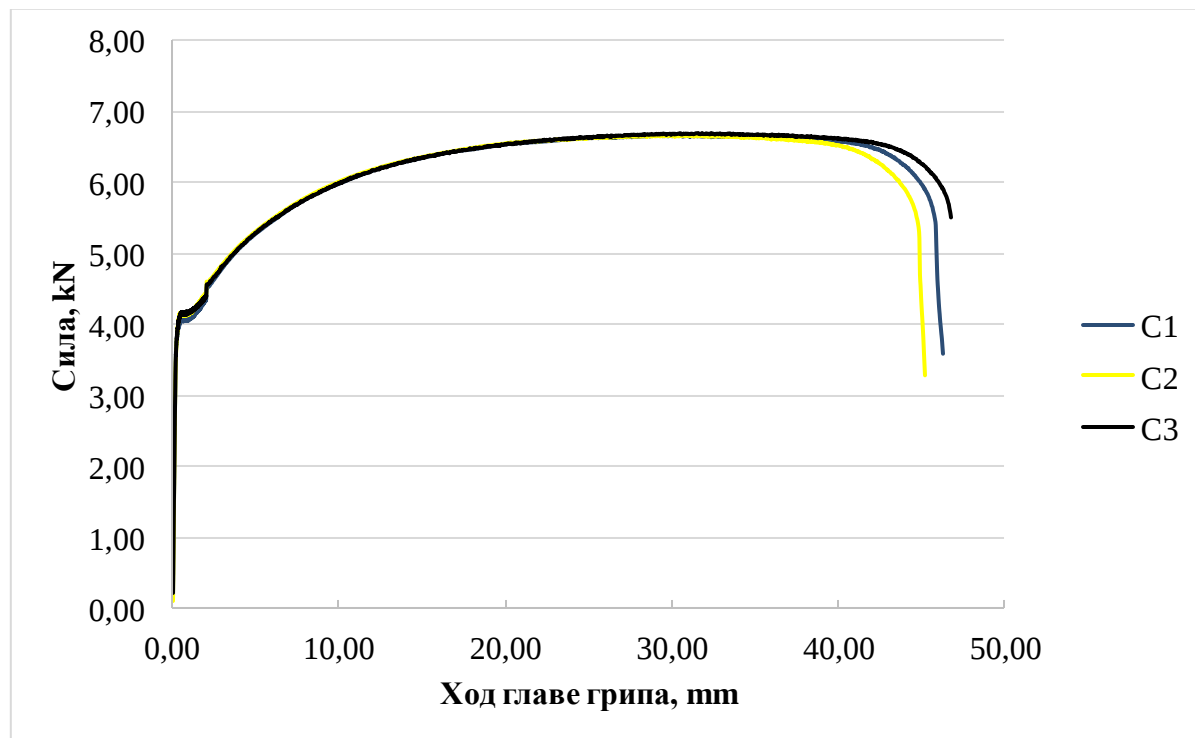
Слика 5.22 Зависност сила-ход за лим В

На слици 5.23 је приказан дијаграм напон-деформација за лим С, са којег се може приметити да промена параметара обраде сечења ласером не утиче на промену механичких карактеристика епрувета.



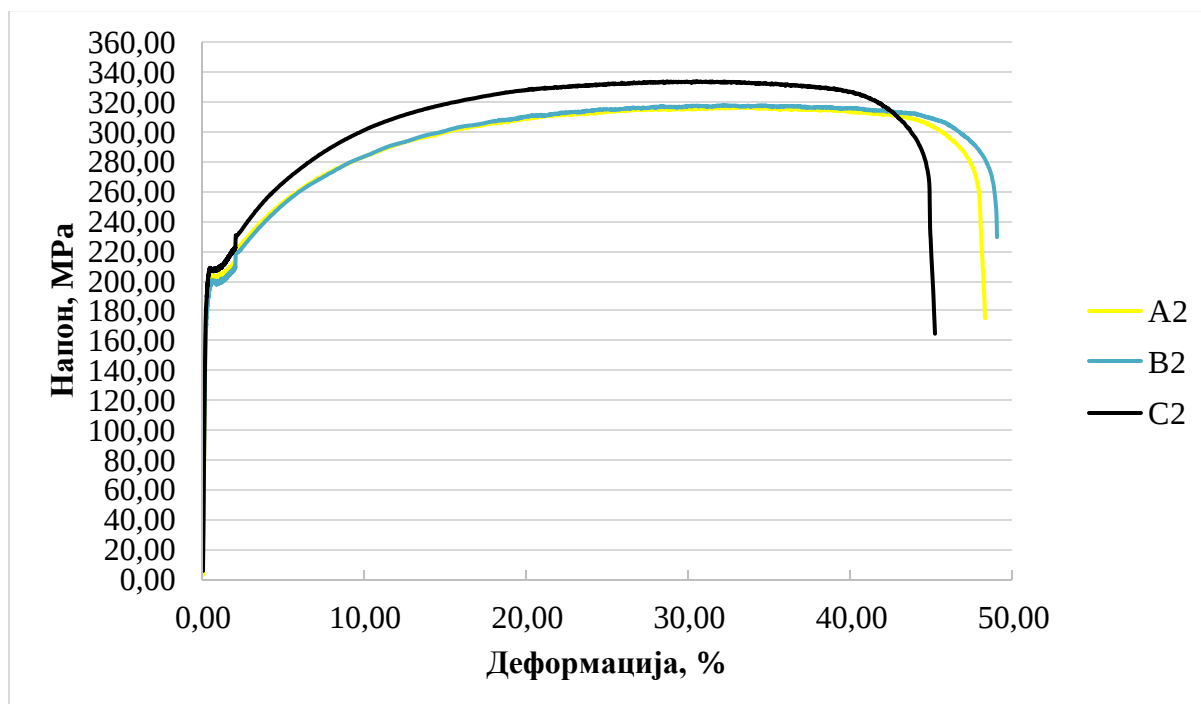
Слика 5.23 Зависност напон-деформација за лим С

На слици 5.24 је приказан дијаграм зависност сила-ход за лим С.



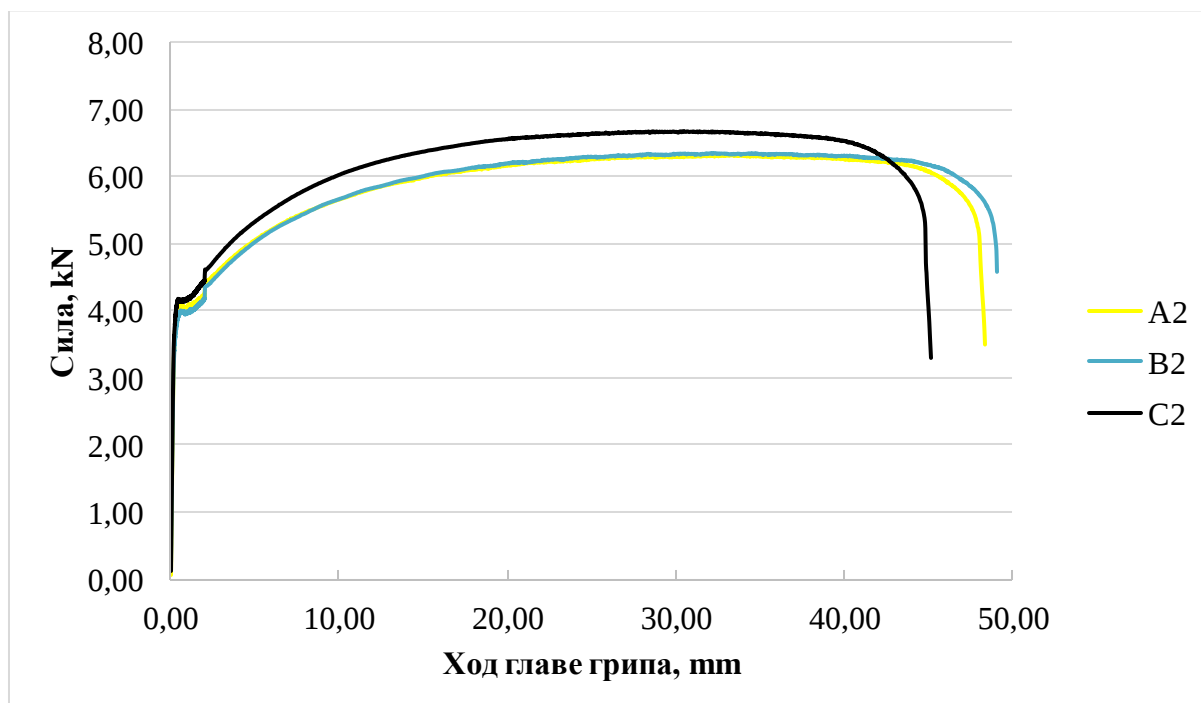
Слика 5.24 Зависност сила-ход за лим С

На слици 5.25 је приказано поређење дијаграмом напон-деформација за епрувете A2, B2, C2, при чему се примећује да најбоље карактеристике има епрувета C2.



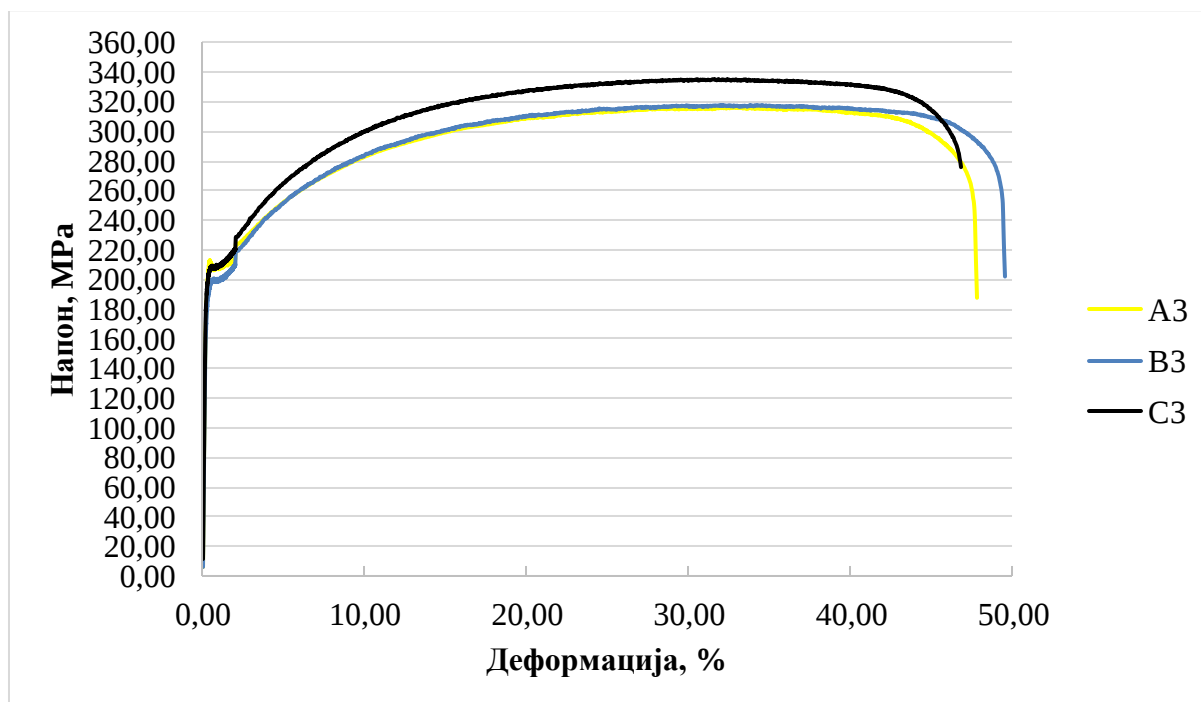
Слика 5.25 Поређење карактеристике напон-деформација између епрувета A2,B2,C2

На слици 5.26 је приказано поређење сила-ход за епрувете A2, B2, C2.



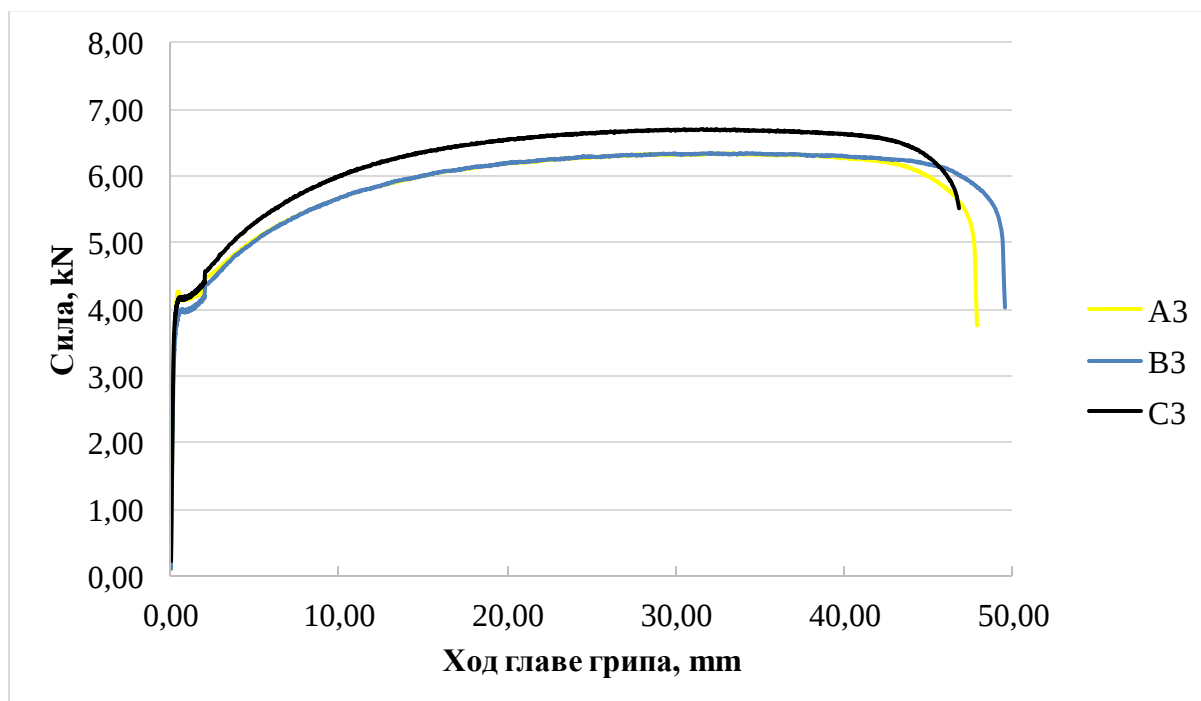
Слика 5.26 Поређење карактеристика сила-ход између епрувета A2,B2,C2

На слици 5.27 је приказано поређење напон-деформација за епрувете А3, В3, С3, при чему се примећује да најбоље карактеристике има епрувета С3.



Слика 5.27 Поређење карактеристика напон-деформација између епрувета А3, В3, С3

На слици 5.28 је приказано поређење сила-ход за епрувете А3, В3, С3.



Слика 5.28 Поређење карактеристика сила-ход између епрувета А3, В3, С3

6. Закључак

Ласери су квантни генератори у којима се светлосни сноп формира индукованим (принудним или стимулираним) зрачењем атома и молекула. Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитује у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије.

Принцип формирања ласера заснива се на појави да атоми и молекули неког кристала или друге активне средине-материје, озрачени одговарајућом светлосном, прелазе у више енергетско стање (из основног у побуђено). При повратку из побуђеног стања, атоми и молекули, у кратком временском периоду од 1-2 наносекунде, емитују интензивну светлост. Ако је повратак атома и молекула из нестабилног у стабилно стање строго контролисан, уз кратко задржавање на различитим енергетским нивоима између метастабилног и стабилног стања, долази до вишеструке ланчане реакције и формирања веома снажног светлосног снопа.

Скидање материјала при обради ласером остварује се путем апсорпције светлосне енергије ласерског зрака у површински слој материјала обратка, који се загрева на температуре од 4000 до 6000 К. Тако високе температуре доводе до тренутног растапања, испаривања или сагоревања било ког материјала, и стварања малог удубљења- кратера. Најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине је снага ласера. Пошто је ласерско сечење термички процес, количина произведене топлоте је утицајни фактор од кога зависи способност ласера за сечење. Повећање снаге ласера омогућује сечење дебљих лимова и повећање брзине сечења.

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

Експериментална испитивања везана за квалитет обрађене површине показала су да се са повећањем снаге ласера и повећањем брзине сечења смањује храпавост површине реза, односно повећава се квалитет обрађене површине.

Испитивање механичким затезањем епрувета показало је да најбоље карактеристике има лим С, италијанског произвођача ILVA S.p.A. који је показао веће вредности и напона течења и затезне чврстоће у односу на друга два произвођача.

Анализом дијаграма затезања различитих епрувета примећено је да различити параметри сечења ласером не утичу на промену механичких карактеристика епрувета.

Примена сечења ласером за израду епрувета за испитивање механичких карактеристика је значајно јефтинији поступак у односу на конвенционалну израду епрувета у алатима за просецање, с обзиром да нема трошкова израде алата и одржавања алата. При изради епрувета у алатима за просецање, потребно је искључити

из производње одређену машину, потрошити време на замену и подешавање алата, што сноси одређене трошкове, док код ласерског сечења тих трошкова нема, односно знатно су мањи како је време припреме а и израде епрувета знатно брже. Такође сечењем на ласеру се и постиже боља искоришћеност материјала, односно мањи је одпад.

Како је сечење епрувета на ласеру знатно једноставније, брже а и јефтиније, могуће је чешће вршити испитивање механичких карактеристика лимова од добављача што доприноси унапређењу ефикасности производње.

7. Литература

- [1] Драгоје Миликић, Неконвекционални поступци обраде, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2002.
- [2] Милош Бугарић, Обрада ласерским сечењем, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [3] Иван Миликић, Квалитет обраде ласером, мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2010.
- [4] Миодраг Лазић, Неконвекционални поступци обраде, Научна књига, Београд 1990.
- [5] <https://repozitorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A488/datastream/PDF/view>, приступљено: 10.01.2018.
- [6] http://repozitorij.fsb.hr/5112/1/Antoli%C4%87_2016_Zavr%C5%A1ni_Preddiplomski.pdf, приступљено: 10.01.2018.
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_laser, приступљено: 10.01.2018.
- [8] <http://www.fiberlaser.fujikura.jp/eng/products/about-fiber-laser.html>, приступљено 10.01.2018.
- [9] <http://www.ipgphotonics.com/en>, приступљено: 10.01.2018.
- [10] <http://www.fanuc.eu/at/en/cnc/laser-systems/fiber-laser> приступљено: 10.01.2018.
- [11] <https://cdn-empiremachineryt.netdna-ssl.com/documents/brochures/l3-l5-lasers.pdf>, приступљено 10.01.2018.
- [12] <http://www.daysteel.co.uk/>, приступљено: 05.03.2018.
- [13] <http://www.innotech-laser.com/laser-services/laser-cutting/>, приступљено: 05.03.2018.
- [14] <https://www.steeltailor.com/blog/how-co2-and-fiber-laser-cutting-machine-work/>, приступљено: 05.03.2018.
- [15] Salvagnini, Operating Manual, Laser cutting machine.