

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 214/2014

Никола З. Јанковић

**Примена ласера за резање папира
завршни рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да изврши прикупљање и анализу информација о примени ласера у технологији обраде материјала са посебним акцентом на могућност сечења и гравирања папира. Потребно је описати папир са својим својствима. У посебном делу рада извршити експериментална испитивања сечења различитих папирних материјала са циљем одређивања области могуће обраде.

Препоручена литература:

1. В. Nedić, М. Lazić, Производне технологије, скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2007,
2. М. Lazić, Конвенционални поступци обраде, књига, Машински факултет, Крагујевац, 2002,
3. Stevica Todorović, Историјат развоја ласера, дипломски рад, ПМФ- одсек за физику, Нови Сад, 2004,
4. М. Radovanović, Аутоматизовано пројектовање технологије обраде ласером, Машински факултет, Ниш, 1995,

Крагујевац, август 2017.

Ментор:

Проф. др Богдан Недић

Резиме: У овом раду су приказана испитивања резања папирних материјала ласером и анализа обрађених елемената са аспекта просечености и квалитета резне ивице. Циљ испитивања је да се пронађу оптимални режими обраде, а то су минимална снага и максимална брзина резања при којој се добија просечен комад без трагова оштећења са што мањим траговима паљења. Притисци који су коришћени у току испитивања су били 1 bar и 3 bara. Резултати ових испитивања се могу користити пре свега код примене ласера у папирној индустрији за добијање жељеног производа.

Кључне речи: ласер, резање папирних материјала, оптимални режими обраде

Abstract: *This paper presents the tests of laser cutting of paper materials and analyzes of processed elements from the aspect of the average and the quality of the cutting edge. The aim of the test is to find optimum processing modes, which are the minimum power and maximum cutting speed at which an average piece without the trace of damage is obtained, with fewer traces of ignition. The pressures used during the test were 1 bar and 3 bar. The results of these tests can be used primarily in the application of lasers in the paper industry to obtain the desired product.*

Key words: *laser, cutting paper materials, optimal cutting regimes*

Садржај

1. УВОД	6
2. ЛАСЕР	7
2.1 РАЗВОЈ ЛАСЕРА.....	7
2.2 ВРСТЕ ЛАСЕРА	8
2.2.1 Гасни ласер.....	11
2.2.2 Течни ласери.....	13
2.2.3 Чврсти ласери	14
3. ТЕХНОЛОШКЕ ОПЕРАЦИЈЕ ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ	18
3.1 ПРИНЦИП ЛАСЕРСКЕ ОБРАДЕ	18
3.2 ЛАСЕРСКО БУШЕЊЕ.....	19
3.3 ЛАСЕРСКО СЕЧЕЊЕ	20
3.4 ЛАСЕРСКО ЗАВАРИВАЊЕ	23
3.5 ЛАСЕРСКА ТЕРМИЧКА ОБРАДА	23
3.6 ЛАСЕРСКО ГРАВИРАЊЕ.....	24
4. СПЕЦИФИЧНОСТИ РЕЗАЊА ПАПИРА ЛАСЕРОМ	25
4.1 ПАПИРНИ МАТЕРИЈАЛ	26
4.2 ЛАСЕРСКИ МЕХАНИЗАМ ЗА СЕЧЕЊЕ И ОПРЕМА.....	30
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	34
5.1 ПЛАН ЕКСПЕРИМЕНТА.....	34
5.2 МАТЕРИЈАЛИ И ОПРЕМА ЗА РЕЗАЊЕ У ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	34
5.3 РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТА.....	35
6. ЗАКЉУЧАК	76
7. ЛИТЕРАТУРА.....	77

1. Увод

Због све веће потражње на светском и домаћем тржишту потребно је одговорити захтевима што се тиче квалитета, смањењем времена потребног за израду, смањењем цена и могућношћу испуњавања све сложенијих захтева купаца. Да би се испунили захтеви тежи се ка увођењу нових технологија обраде. Ласерска обрада је у том смислу једна савремена технологија која је убрзо постала доминантна у скоро свим индустријама. У многим областима поступак ласерске обраде је најпрецизнији и најекономичнији поступак који је доступан. Од свих поступака најраспрострањеније је ласерско сечење. Ласером је могуће сећи готово све материјале.

Проблеми у вези примене ласерског сечења папира леже у недовољном познавању примене ласерске технике. Веома мали број истраживача је објавио своје радове на тему квалитета обраде ласерског сечења папира.

Циљ овог завршног рада је упознавање са технологијом ласерске обраде, са посебном назнаком на ласерском резању папирних материјала; утврђивању оптималних режима обраде за различите материјале.

У другом поглављу дат је историјат развоја ласера и основне врсте ласера.

У трећем поглављу приказан је принцип рада ласера као и основне технолошке операције ласерске обраде. Дате су основне информације о обрадама ласером као што су: бушење, заваривање, сечење, термичка обрада и гравирање.

У четвртном поглављу приказане су специфичности резања папира ласером као и основне информације које се тичу структуре, термичког распадања, промени боје под дејством топлоте и проводљивости. У овом поглављу такође је приказан механизам ласерског резања папира, примери резања и гравирања на папиру, као и поређење са основним методама сечења папира.

У петом поглављу приказани су резултати, дијаграми и поређења добијених резултата експерименталних истраживања.

На крају завршног рада дат је закључак и преглед коришћене литературе.

2. Ласер

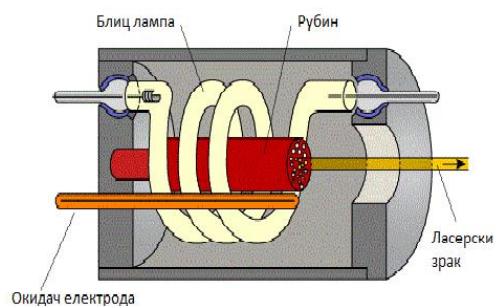
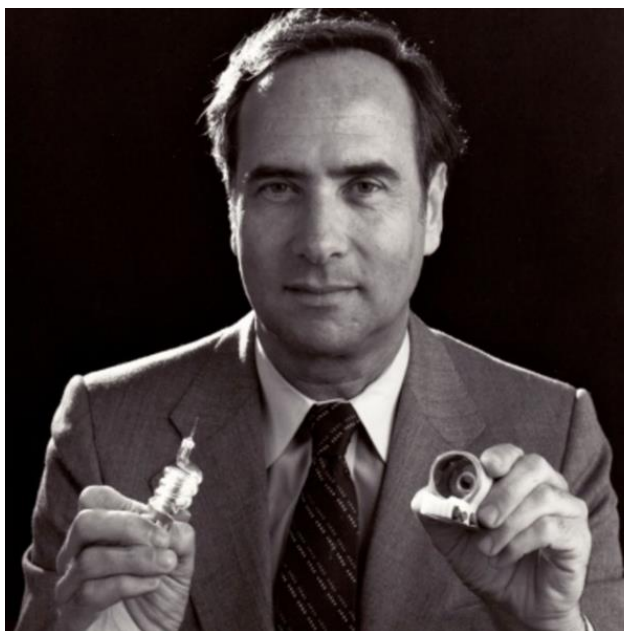
2.1 Развој ласера

Још је 1917. године у свом раду „On the Quantum Theory of Radiation“ *Алберт Ајнштајн* дао теоријски концепт и описао теоријске основе симулације емисије светлости те је предвидео изум ласера и његове претече масера. Масер је уређај који функционише на исти начин као ласер само у другом фреквенциском подручју.

Масер представља извор микроталаса, док ласер представља извор електромагнетних таласа у инфрацрвеном и видљивом спектру.

Емисију светла у видљивом подручју теоријски су одрадили *H.J.Zeiger*, *J.P.Gordon*, *C.H.Townes* 1958. године. *C.H.Townes*, *N.Basov* и *A.Prokhorov* су 1964 добили Нобелову Награду за физику. У *табели 1.* приказани су важни догађаји кроз историју настанка ласера.

Први ласер направио је 1960. године *T.H.Maiman* запослен на Hughes Research Laboratories Malibu, California (*слика 1.*). Овај ласер је емитовао светлост таласне дужине 694 nm у пулсном режиму, а емисију је постигао стимулисаном емисијом из рубиновог кристала побуђеног светлосном лампом.



Слика 1. Мaимaн са првим ласером [5]

Табела 1. Значајни догађаји кроз историју настанка ласера [5]

Година	Проналазач	Проналазак
1960	Peter P.Sorokin, Mirek Stevenson	Уранијумски ласер
1961	A.G.Fox, T.Li	Теоријска анализа оптичких кондензатора
1961	Ali Javan, William Bennet, Donald Herriot	Конструисан Хелијум-Неонски ласер
1962	Robert Hall	Осмишљен први полупроводнички ласер
1964	J.E.Geusic, H.M.Markos, L.G.Van Uiteit	Конструисан први оперативни Nd:YAG ласер
1964	Kumar N. Patel	Изумео CO ₂ ласер
1964	William Bridges	Направио Аргон-јонски ласер
1965	George Pimentel, J.V.V.Kasper	Први хемијски ласер
1966	William Silfvast, Grant Fowles, Hopkins	Први ласер који користи паре метала- Zn/Cd
1966	Peter Sorokin John Lankard	Конструисан први ласер са органским бојама
1970	Nikolai Basov	Први ексимер ласер који ради на чист племенит гас (Ксенон)
1974	J.J.Ewing, Charles Brau	Први екцимер са племенитим гасом +халогенид
1977	John M.J.Madey i saradnici	Први фрее-електронски ласер
1980	Geoffrey Pert i saradnici	Теорија за први ласер који ради на подручју X-зрака
1981	Arthur Schawlow	Добитници Нобелове Награде за радове на спектроскопији и нелинеарној оптици
1984	Dennis Matthew i saradnici	Прва демонстрација рада ласера у опсегу X-зрака

2.2 Врсте ласера

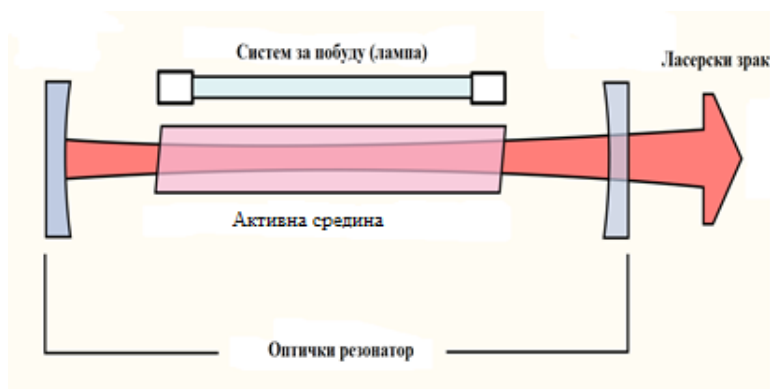
Конструкција ласера зависи од самог типа ласера, међутим сви ласери се састоје из готово истих делова (слика 2.). Делови који чине ласер се могу поделити на:

- Систем за побуђивање ласера,
- Радна или активна супстанца и
- Резонатор.

Систем за побуду је систем помоћу ког се активна супстанца преводи у побуђено стање. Систем за побуну може бити изведен на више начина и то: помоћу флеш лампе, помоћу система за електрично пражњење кроз гас или помоћу неког другог ласера. На основу радне супстанце бира се који тип побуде је најпогоднији за примену.

Радна или активна средина представља средину која испуњава простор у коме се одиграва умножавање броја фотона. Сама активна средина може бити у различитим агрегатним стањима. Као активна средина данас се користи велики број једињења док у ранијем периоду се користило неколико материјала који су били испитани. Ради добијања боље ефикасности активна супстанца се ставља у оптички кондензатор. У зависности која се супстанца изабере може се добити ласер који ради на једној фреквенцији или ласер који ради на више фреквенција које се могу подешавати према потреби.

Резонатор је део уређаја који је у почетку настанка ласера задавао највише проблема око конструкције. Данас постоји неколико основних типова резонатора који се користе. Основна улога је продужење пута зрачења кроз активну супстанцу. Да се не бих користили ласери великих димензија користе се резонатори, који омогућавају довољно дуг пут зрачења без потребе за повећавањем димензија ласера. Резонатор представља простор у коме је смештена активна супстанца, а на крајевима се налазе огледала.



Слика 2. Основни делови ласера [10]

Типови ласера:

Сви ласери се могу поделити на више начина и то:

- Према режиму рада деле се на:
 - Пулсне ласере
 - Континуалне ласере
- Према агрегатном стању радне супстанце деле се на:
 - Гасне ласере
 - Течне ласере
 - Чврсте ласере
- Према стању у коме се налази радна супстанца деле се на:
 - Атомске ласере
 - Молекулске ласере
 - Јонске ласере
 - Слободне - електрон ласере

Разврставање ласера по групама је веома тешко пошто се групе међусобно преклапају а и поред ових наведених група постоји још много подгрупа за поделу ласера.

Пулсни ласери су ласери који не дају континуалан ласерски сноп, већ је сноп издељен на импулсе. У ову врсту спада први ласер то јест рубински ласер. Карактеристика ових ласера је веома велика енергија у кратком временском интервалу. Време инпулса је много краће од једне секунде. Ова група ласера се може поделити на:

- ласере чији импулс траје дуже од једне наносекунде, то је примењено код несто старијих ласера великих снага;
- ласере са веома кратким импулсима око једне пикосекунде, ови ласери имају огромну изражену снагу по јединици површине.

Континуални ласери су ласери који емитују континуални ласерски сноп у трајању дужем од једне секунде. Ови ласери имају велику средњу снагу и називају се

још и војни ласери, јер се користе за уништавање пројектила у војне сврхе. Ови ласери су у употреби од 1966. године.

Гасни ласери су ласери чија је радна средина у гасовитом стању. Ова група има своју подгрупу и то:

- Атомске гасне ласере (He – Ne, Cs,...)
- Молекулске гасне ласере (Ar, Kr,...)
- Јонске гасне ласере (CO₂, N₂, XeBr,)
- Хемијске ласере

Течни ласери имају радну средину у течном стању, могу се поделити на:

- ласере са неорганским једињењима;
- ласере са органским бојама.

Чврсти ласери су ласери чија радна супстанца има чврсто стање, могу се поделити на:

- кристалне ласере (рубински, YAG,..);
- аморфне ласере (стаклени, пластични,...).

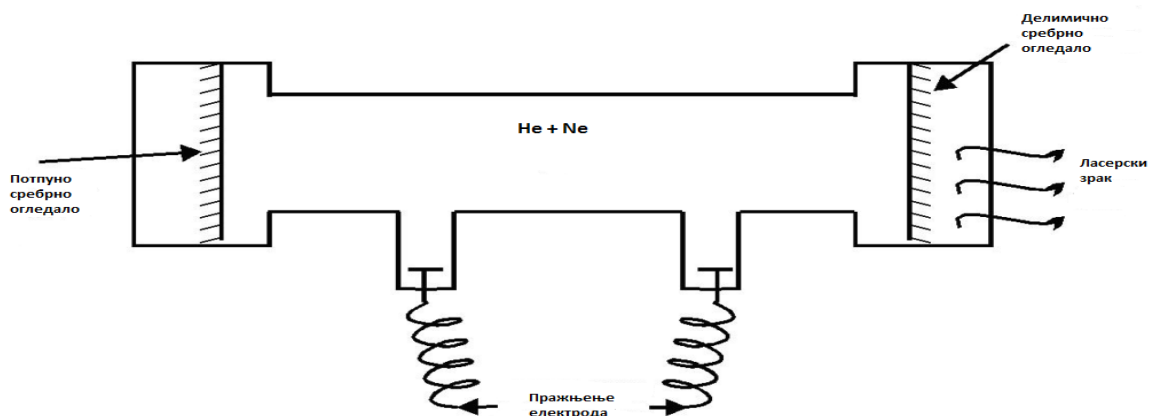
2.2.1 Гасни ласер

Гасни ласери представљају све ласере код којих је активна средина у гасовитом агрегатном стању, без обзира да ли је гас јонски, атомски или молекуларни. Ови типови ласера су веома често примењиви јер су лаки за коришћење и такође су једноставне конструкције. Представници овог типа се најчешће састоје од стаклене или керамичке цеви у којој је смештен гас. Ови ласери могу радити у два режима: пулсном или континуалном, у зависности од конструкције. Гасови у односу на остала тела имају тачно одређене енергетске нивое атома, па постоји могућност прелаза атома са једног на други енергетски ниво. Густина гаса је релативно мала, па због тога не долази до дисперзије светлости и изобличавања светлосног зрака. Самим тим што је густина мала могу се поставити огледала и резонатор на већу удаљеност и добити боље усмеравање зрака. Али поред својих предности и гасови имају одређене недостатке и то: густина гасова је знатно нижа од густине чврстих тела, па се не могу добити велике количине побуђених атома као што је случај код чврстих тела. Притисак гаса код гасних ласера најчешће се креће у опсегу од 10^{-3} до 10^{-2} Pa. [3]

Хелијум- неонски ласер

Хелијум - неонски ласер је први континуални ласер. Хелијум - неонски ласер је приближно двадесет година од свог настанка био доминантан тип ласера. Конструисао га је *A. Jovan* са својим сарадницима 1961. године. Шематски приказ овог типа ласера приказан је на *слици 3*. Овај ласер се производио као ласер мале снаге, па ретко који ласер овог типа прелази снагу од 100 mW у континуалном режиму. Због тога што је најчешће ласер мале снаге, његова примена се своди на примену као што је: скенирање бар кодова и мерења. Као активна супстанца овог ласера користи се смеша неона и хелијума у односу 1:10. Побуда гаса се врши електричним пражњењем кроз смешу гасова, на притиску од 100 Pa и напону између 2-4 kV. Ови ласери данас користе разне прелазе како би се добили зраци различитих боја.

Постојали су покушаји да се направи чист неонски ласер јер у хелијум - неонском ласеру хелијум служи само за побуђивање. Неуспех се огледа у томе што се јављају изузетно велики губици, чак 99% уложене енергије се изгуби на загревање цеви у којој се налази гас.

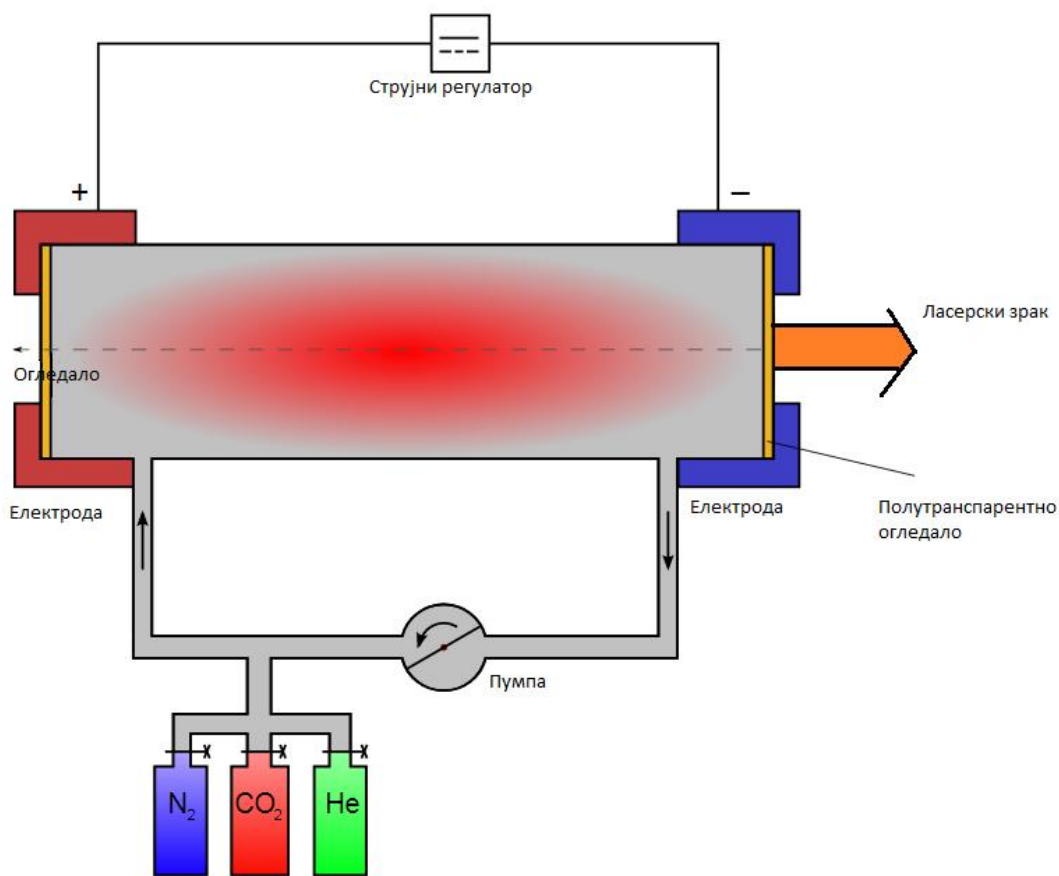


Слика 3. Шематски приказ хелијум-неонског ласера [5]

CO₂ ласер

Овај ласер је изумео *K. Patel* 1964. године када је кроз стаклену цев која је испуњена CO₂ пропустио струју. Шематски приказ CO₂ ласера је дат на *слици 4*. Том приликом је увидео да је помоћу CO₂ могуће добити ласерски сноп који је веома слаб. Да би поправио карактеристике ласерског снопа он је покушавао да комбинује различите гасове. Као комбинација која је давала најбоље резултате испоставила се комбинација CO₂, N₂, He и то у размери 1:1:8. У оваквој смеси хелијум има улогу да помаже при пражњењу нижих енергетских нивоа док N₂ помаже при побуђивању CO₂.

Ови ласери се одликују високим коефицијентом корисног дејства. Ласерски сноп има таласну дужину која је десет пута већа од стаклених и YAG- ласера. Пошто ови ласери поседују велику снагу своју примену су нашли у металној индустрији, и то за: бушења, сечења, заваривања, термичка обрада, наношење тврдих превлака, итд. Ласери могу да раде у импулсном и континуалном режиму. Уколико је ласер у континуалном режиму снаге од 15 kW тај исти ласер у импулсном режиму би био снаге између 20-50 kW. Овакав вид прелаза са једног режима на други је могуће веома лако извести уколико се замени једно фиксно огледало са ротирајућим огледалом.



Слика 4. Шематски приказ CO₂ ласера [11]

2.2.2 Течни ласери

Течни ласери су ласери код којих је радна средина у течном агрегатном стању. Течности које се користе су раствори органских боја и раствори неорганских једињења.

У ласерима на бази течности постиже се иста концентрација активних честица као и код ласера на бази чврстих тела. Течност је оптички хомогенија од чврстог тела па су губици у течностима мањи него код чврстих тела. Хлађење течности се спроводи циркулацијом што представља веома ефикасну методу хлађења. Недостатак ових ласера

је нестабилност раствора током времена, већ после 1-2 месеца стварају се талози што утиче на смањење зрачења.

Ласери на бази неорганских раствора могу радити само у импулсном режиму, док ласери на бази органских раствора могу радити и у импулсни и у континуалном режиму. Побуђивање ласера се врши оптичким пумпањем.

Ласери на бази неорганских течности

Углавном се развијају ласери на бази соли неодијума и неорганских течности. Као растварачи користе се течности као што су: SeOCl_2 и SnCl_4 , у облику: $\text{Nd}^{3+}:\text{SeOCl}_2:\text{SnCl}_4$. Такође постоји и раствор: $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{SnCl}_4$. Као емисиони прелази на овим једињењима користе се исти прелази као и у Nd ласерима на бази стакла.

Емисиони и апсорпциони спектри Nd ласера на бази течности и Nd ласера на бази стакла веома су слични, тако да се ови ласери могу третирати као YAG ласер.

Ласери на бази органских боја

Ласери на бази органских боја представљају нову врсту ласера који поседују добре и специфичне особине. Код ових ласера је могуће континуално мерење таласне дужине у широком интервалу. Као органска једињења која се користе као активна средина употребљавају се: радомин 6G, радомин 6, кумарин 2, кумарин 6, итд.

Органске боје су сложена органска једињења која јако апсорбују видљиву светлост. Обично се састоје од бензенских (C_6H_6), пиридинских ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}$), азотних ($\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2$) и других прстенова. Велика већина боја има јонски карактер. Активна средина, у случају органских боја, растворена је у погодном растварачу. Као растварачи користе се: алкохол, бензин, етанол, пластика са диспергованом бојом.

2.2.3 Чврсти ласери

Чврсти ласери су ласери код којих је радна средина у чврстом стању на собној температури. Први ласер чврстог стања је био *Maimann-ov* рубински ласер који је био импулсног типа. Данашњи ласери користе системе са три или четири енергетска нивоа, имају велику снагу а могу бити континуалног и импулсног типа. Ови ласери нашли су велику примену у многим областима од којих су неке: метална индустрија, медицина-хирургија, разна мерења, научна истраживања. Најснажнији ласери данас су ласери чврстог стања и то импулсног типа. Данас постоји много различитих једињења које се користе као активна средина. Најчешће се користи неодијум (Nd) који се јавља као

примеса разним сложеним једињењима. Најпознатији је Nd:YAG ласер, где YAG представља: Итријев алумијев гранат ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) који има много нижи праг обраде ласером од рубинског, много већу снагу и ради у блиској инфрацрвеној области. Код континуалних ласера за побуду се користи ксенонска или криптонска блиц лампа. Код импулсних ласера користи се ксенонска флеш лампа код које се помоћу прекидачног кола стабилише рад. У новије време веома снажни YAG ласер се експериментално користи као мотор код ракета, али за сада само код екстра лаких малих пројектила.

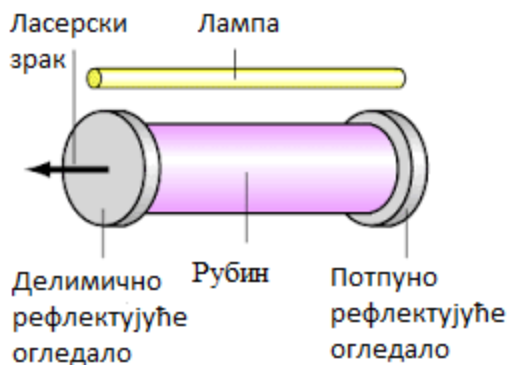
Полупроводнички ласер

Полупроводнички ласер је ласер који је предложио R. Hall 1962. године. Ови ласери раде на принципу рп-споја код којих се при рекомбинацији електрона и шупљине јавља емисија електромагнетног зрачења. Први полупроводнички ласер је имао једну ману, и то да се веома брзо прегревао па је могао да ради само у импулсном режиму. Касније се проблем са загревањем решио 1967. године.

Основна предност полупроводничких ласера у односу на друге ласере је: мале димензије, мала маса, висока ефикасност и ниска ефикасност побуде. Ови ласери могу се помоћу спољне оптике побољшати фокусирањем снопа, тако да се добије већа снага, што доводи до могућности примене у микрохирушким захватима и специфичним истраживањима. Данас ови ласери имају кључну улогу у информационим системима, оптичкој комуникацији као и у електроиндустрији.

Рубински ласер

Од ласера са чврстим телом најпознатији је рубински ласер. Он се састоји на бази ласерског тела од кристалног синтетичког рубина (Al_2O_3) у виду цилиндра, са додатком 0,5 % тровалентног хрома (Cr^{+++}). Шематски приказ овог ласера је дат на слици 5. Рубин је минерал бледо ружичасте боје до јарко црвене боје, при чему се јавља црвена боја таласне дужине. Рубински ласер може да ради у два режима и то: импулсном и континуалном режиму. Због великог загревања и малог степена искоришћења од 1 % у континуалном режиму рубински ласери се најчешће користе у импулсном режиму. Ласери који се користе у континуалном режиму имају посебан систем за хлађење. Овај ласер се користи за бушење малих отвора у различитим материјалима и за тачкаста заваривања. Рубински ласер је први ласер који је почео да се користи у бушењу дијаманата и алата за извлачење танке жице.



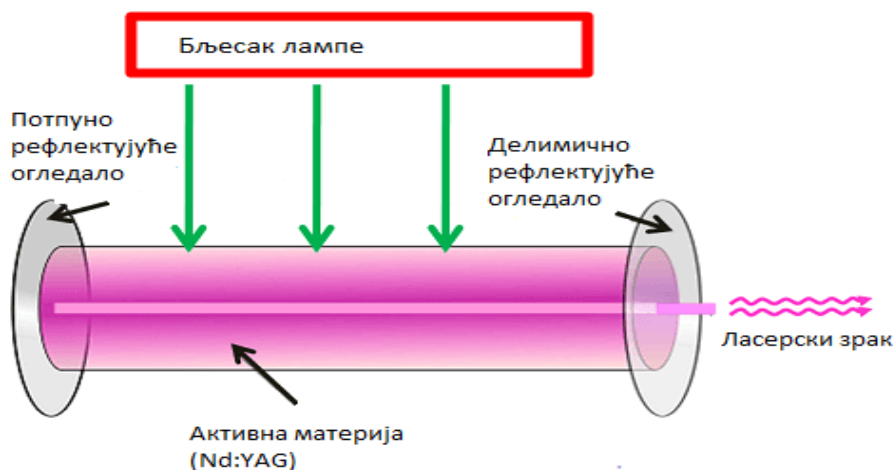
Слика 5. Шема рубинског ласера [12]

Nd:YAG ласер

Један од најважнијих ласера који има доста научних и индустријских примена је неодијумски ласер (Nd:YAG). YAG је скраћеница од итријев алуминијев гранат ($Y_3Al_5O_{12}$). YAG спада у групу врло тврдых материјала. Захваљујући својој тврдоћи обрада YAG-а је веома тешка јер захтева коришћење дијаматских средстава.

Значајна предност овог ласера у односу на рубинов ласер и стаклени ласер је висока топлотна проводљивост и отпорност, чиме је омогућено његово интензивно хлађење. Захваљујући овој предности овај ласер може да ради како у континуалном тако и у импулсном режиму.

Nd: YAG ласер је карактеристичан по свом облику, јер се израђује у облику штапова са полираним крајевима. Шематски приказ овог ласера дат је на слици 6. Због саме израде штапова са полираним крајевима мора се применити посебан технолошки поступак за њихово добијање.



Слика 6. Шематски приказ Nd:YAG ласера [13]

Стаклени ласер

Као активна средина код стаклених ласера користи се високопрозирно стаклено тело у коме су дисперзно распоређени јони нодијума Nd^{+++} .

Постоје две врсте стаклених ласера:

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

Израда тела ласера је једноставна, при чему могу да се израде велика ласерска тела како би се повећала снага ласера. Али стаклени ласер има слабу топлотну проводљивост и отпорност, због тога се не може радити са високим фреквенцијама.

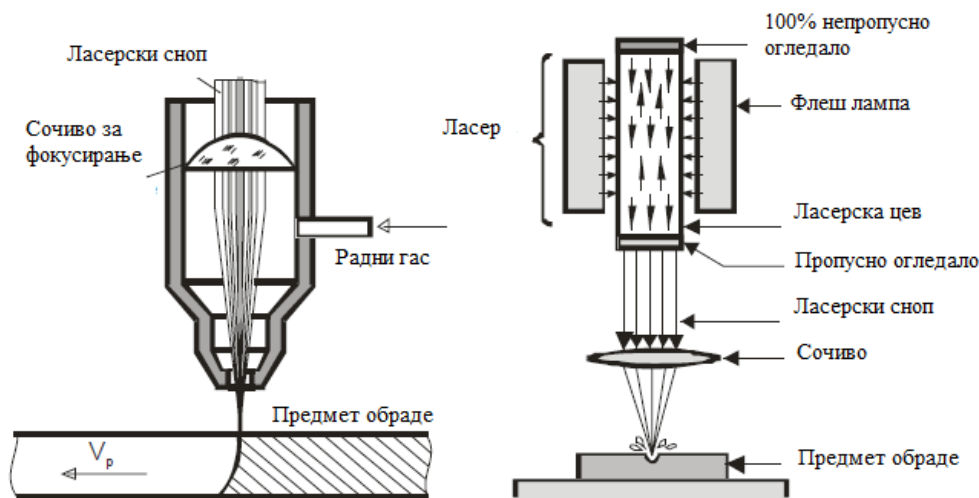
Због ниже цене од рубинских ласера стаклени ласери су више заступљени.

3. Технолошке операције обраде ласером

Ласерски зрак фокусиран на радни пречник $0,15 \div 0,2 \text{ mm}$ постао је универзални алат који може практично да сече готово све познате материјале (самим тим и папир). За разлику од конвенционалних алата он је без облика, па се не мора специјално израђивати за производњу и не намеће трошкове везане за складиштење, оштрење и подешавање.

3.1 Принцип ласерске обраде

Развојем ласера створени су услови за развој различитих поступака обраде ласером. Усмеравањем ласерског снопа на предмет обраде могуће је извести велики број операција (слика 7), као што су бушење, сечење, термичка обрада, заваривање, гравирање и др. Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа (10^{-6} mm^2), високој густини енергије (10^8 kW/mm^2), могућности једноставног управљања ласерским снопом, обрада ласером добија све већи значај.



При додиру ласерског снопа са предметом обраде на његовој површини и у слојевима на одређеној дубини се одвијају различити физички процеси. Под утицајем ласерског зрачења долази до интензивног површинског загревања материјала, топљења и испаравања материјала предмета обраде. Самим тим, дејство ласерског снопа на површински слој материјала предмета обраде се може поделити на:

- рефлексија (одбијање) ласерског снопа од површине,
- апсорпција ласерског зрачења по површинским слојевима предмета обраде и трансформација фотонске у топлотну енергију,

- загревање означене површине, растапање и испаравање површинских слојева,
- уклањање продуката разарања и
- хлађење површине материјала предмета обраде по престанку деловања ласера.

Количина ласерског снопа који се одбије, зависи од таласне дужине, снаге ласерског зрачења, топлотне проводљивости предмета обраде, специфичне енергије.

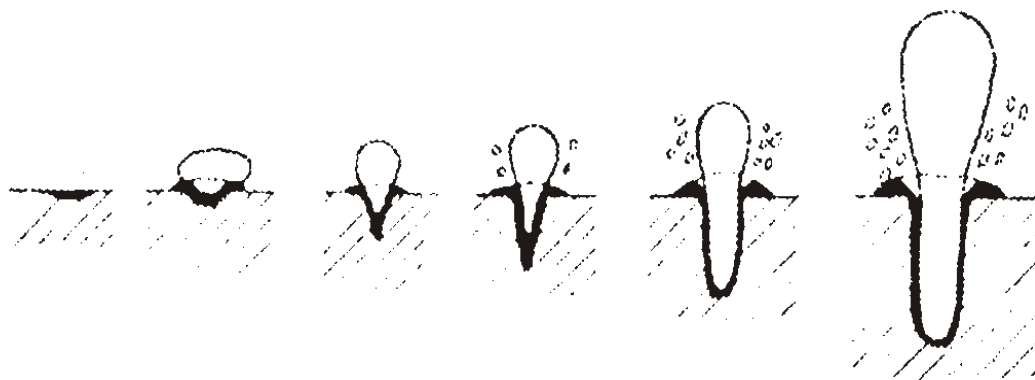
Апсорпција зависи од стања површине предмета обраде: параметара храпавости, претходне обраде, нечистоћа, превлака и сл, као и од режима обраде: брзина померања снопа ласерског зрака, димензија светлосне мрље. Повећањем брзине и пречника светлосне мрље, може се битно повећати апсорпциона способност. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снизити рефлексiona способност повећавањем храпавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака. [2]

3.2 Ласерско бушење

Ласерско бушење је операција ласерске обраде која представља основу за остале операције обраде ласером. Процес обраде се заснива на стварању рупе или отвора на материјалу и то деловањем фокусираног ласерског снопа при чему се материјал уклања испаравањем. При импулсу ласерског зрачења наступа снажно избацивање продуката испаравања материјала при чему се добија рупа и отвор кружног облика.

Примена ласерског бушења

Ласерско бушење се користи за бушење отвора малих пречника и бушење отвора у тврдим материјалима, који се не могу извести класичним технологијама обраде. Ласерима се буше отвори на ситима, дијафрагмама, филтерима за израду синтетичких влакана, иглама за инјекције и др. Поред бушења тврдых материјала може се вршити и бушење у мекшим материјалима као што су папир, картон, фолије и сл. Али бушење ласером код папира није толико примењено поред класичних технологија којима се могу добити жељене рупе или отвори, али генерално ласером можемо извршити бушења у недостатку класичних технологија обраде. Процес ласерског бушења приказани су на *слици 8*.



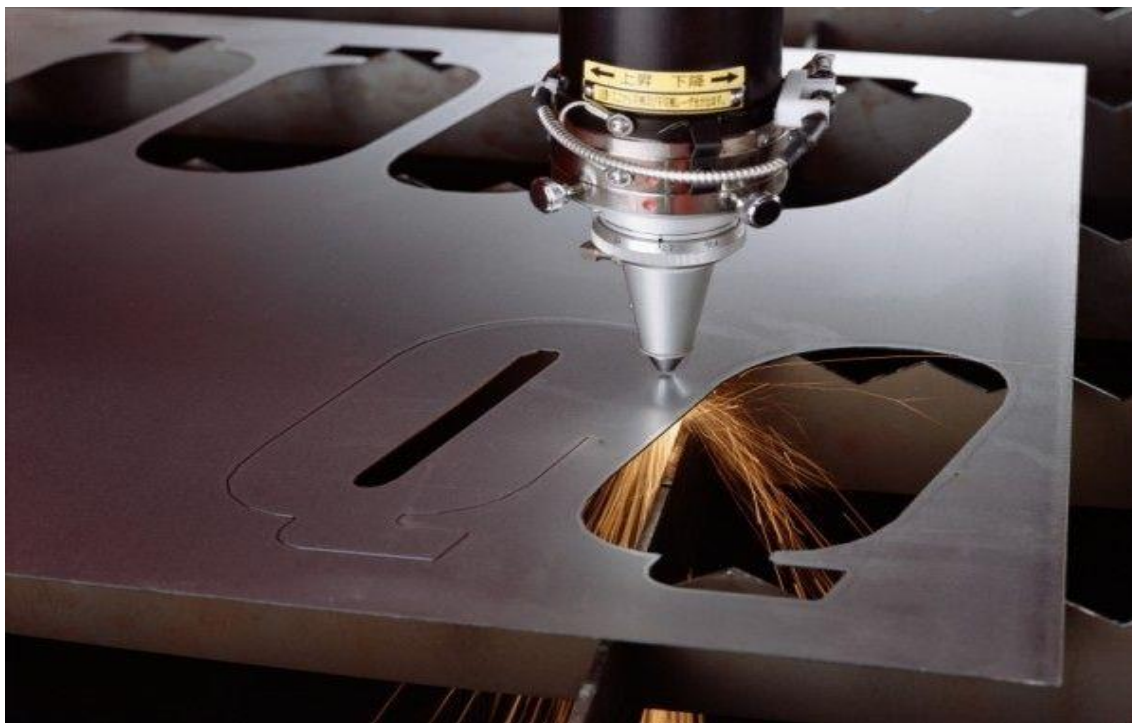
Слика 8. Процес ласерског бушења [8]

3.3 Ласерско сечење

Карактеристике сечења ласером од којих зависе: продуктивност, тачност обраде, квалитет обраде, 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 резања V , mm/s ,
- тачност померања ласерског снопа по предвиђеној контури и др.

Ласер производи кохерентан сноп светлости сноп велике снаге кога карактерише правост и мале димензије. У контакту са предметом обраде ако је енергија већа од способности материјала да рефлектује, пренесе или распе енергију, долази до апсорпције светлосне енергије која се претвара у топлотну енергију. При великом порасту температуре долази до локаног испаравања материјала, што зависи од интензитета генерисане топлоте и доводи до стварања рупе или отвора у предмету обраде. Уколико се врши померање ласерског зрака или померање предмета обраде настаје процес ласерског сечења. На слици 9. је приказан процес ласерског сечења на лиму.



Слика 9. Процес ласерског сечења [14]

У многим случајевима нефокусирани сноп ласерског зрака индустријских ласера велике снаге, нема адекватну енергију да учини нешто више сем да загреје озрачену површину материјала. Уколико се сноп усмери кроз одговарајуће сочиво за фокусирање, енергија је концентрисана на површину пречника мањег од 0,25 mm, што производи снагу већу од 10^6W , која је довољна да истопи многе материјале, самим тим папир и картон који не спадају у тврде материјале.

Поред топлотне енергије ласери користе и помоћни гас који има задатак да одстрани продукте сагоревања, помогне у процесу сагоревања, да заштити сочива од продирања испаравања.

За сечење неметала тј у овом случају папира најчешће се користи неутралан гас N_2 или инертни гас Ar , а може и ваздух.

Фактори који утичу на процес сечења ласером

На процес ласерског сечења утичу:

- ласер (тип, снага, величина, режим рада, поларизација),
- сноп ласерског зрачења (таласна дужина, кохерентност, монохроматичност, дивергенција),
- обрадна глава (систем за фокусирање, млазница, сензор за позиционирање),

- координатни радни сто (тип, величина, тачност, померање, систем управљања),
- радни предмет (облик, димензије, материјал, толеранције, квалитет обраде),
- прибор за стезање,
- режими обраде (снага, брзина резања, положај жиже, притисак помоћног гаса и
- околина (чистоћа, вибрације).

Режими обраде

Снага ласера

Снага ласера је најважнија карактеристика којом се врши избор ласерске машине. За одређене врсте материјала (папир, картон и сл.) је потребна много мања снага за постизање резања него код других врста материјала (челик, дијамант, бакар и сл.).

Брзина резања

Искоришћеност обраде директно зависи од брзине резања. Брзина резања је други по значају параметар за резање ласером и зависи од фактора: снаге ласера, мод, величина светлосне мрље, врсте и дебљине материјала који представља предмет обраде.

Помоћни гас

Функција помоћног гаса код ласерског сечења је да заштити сочива и помогне у одстрањивању продуката који настају деловањем ласера. За већину метала користи се као гас кисеоник, јер помаже егзотермалну реакцију. Док код других материјала који нису на бази метала препоручено је користити N_2 и Ar . Употребом кисеоника као помоћног гаса повећава се укупна енергија па је самим тим могуће остваривање већих брзина резања. Поред саме врсте гаса који се може користити веома је битна и чистоћа гаса како бих се остварио квалитетан рез.

Примена ласерског сечења

Производи који се могу обрађивати обрадом ласерског сечења су: привесци, резање 3D слова, поклон кутије, зупчаници, шаблони, кованице, разна сита, серијски бројеви, декоративни елементи и др. На *слици 10.* дати су примери резања ласером материјала на бази метала. Ласерско сечење преставља замену за конвекционалне поступке као што су: тестерисање, бушење, пробијање, ручно резање и др. Ласерским

сечењем се смањује време производње и спречава складиштење материјала у међуфазама као код конвекционалних поступака.



Слика 10. Примери резања ласером металних материјала

3.4 Ласерско заваривање

Заваривање уз помоћ ласера представља технолошки процес који карактерише локално топљење метала на месту спајања. Општи захтев код заваривања ласером је да ласер даје релативно дугачке импулсе у времену од 1-10 ms, са максималном снагом од 10-100 kW. Међутим снага која одговара укупном интезитету, мора бити довољно мала да се спречи испаравање материјала. Трајање импулса мора бити довољно дуго како бих се омогућило топљење нижих делова метала од површинских делова. CO₂ ласери се не коридте код заваривања због великог коефицијента рефлексије, који се креће око 96 %. Индустијски CO₂ ласери снаге неколико вати могу се користити за заваривање танких метала дебљине 1 mm (Al и Cu легуре). Међутим доста је економичније такве материјале заваривати класичним методама. Ласерско заваривање је операција која се изводи код метала.

3.5 Ласерска термичка обрада

Ласерска термичка обрада или отврдњавање се заснива на загревању, топљењу и ударном оптерећењу уз помоћ ласерског зрака. Термичка обрада се може изводити на елементима у целини или на појединим зонама у којима је то потребно. Карактеристике отврднутог слоја зависе од карактеристика ласерског снопа и низа других параметара који се мењају са дубином отврднутог слоја. Основни параметри отврдњавања

ласерског снопа у односу на индустријско каљење су повећање тврдоће површинских слојева и то до чак пет пута, отпорност на хабање и повећање производности до чак 90 %. Уз помоћ термичке обраде ласером могу се обрађивати и локална неприступачна места на предметима обраде док уз помоћ других метода то је теже извести.

3.6 Ласерско гравирање

Гравирање представља поступак урезивања (украса, линија, ликова, знакова) у тврду површину. Гравирање ласером омогућава да се на материјалу по избору исцртају сложени облици и текст уз максималну финоћу линија. У поређењу са ласерским резањем за ласерско гравирање се користи знатно мања брзина због употребе мање снаге.

Материјали који се могу обрађивати су: челик, стакло, пластика, акрил, дрво, керамика, платно, кожа, мермер, **папир**, алуминијум, гума, **картон**, обојени материјали и др. На *слици 11.* дати су примери гравирања на металу.



Слика 11. Примери гравирања на металу

4. Специфичности резања папира ласером

Ласерско сечење папирних материјала по први пут је приказано средином 70-их година. Међутим трошкови ласерске опреме су дуго били скупи у поређењу са конвенционалним методама сечења папира и плоча, као што су механично сечење помоћу алатне оштрице и резање помоћу воденог млаза. Ласерско сечење материјала заснованих на дрвеним влакнима постало је популарније током 90-их година због ниже цене трошкова ласерске опреме. Једна од првих успешних примена ласерске технологије на папирни материјал била је сечење филтер папира код цигарета. Данас, смањивањем трошкова опреме и развојем ласерске технологије, ласерско сечење папира постало је више прихваћено и ефикасније.

Употреба ласерске технологије у индустрији папира може омогућити неколико предности у односу на конвенционалне методе сечења. Индустрији за производњу папира обично требају машине великог капацитета који омогућавају брзо сечење папира. Операције сечења папира до појаве ласера су извођене помоћу механичких метода сечења и резање помоћу воде, што на неки начин доводи до ограничења брзине. Ласерско сечење има већи капацитет у повећању брзине резања. Ласерско сечење је безконтактна метода, јер нема контакта са алатом за резање и такође нема хабања што обезбеђује константан квалитет сечења. Осим тога, ласерско сечење може обезбедити бољи квалитет резне ивице што је нарочито важно у случају опсецања ивице у току израде папира. Проблем прашине, који се јавља када се папирни материјал сече резним алатом или другим алатима оштрице, такође може бити елиминисан. Поред ових предности ласерско сечење налази велику примену у машинама за израду папира.

Примена сечења ласером при изради папира обухвата:

- сечење ивица на крају израде папира (ширина реза од око 150-200 mm),
- сечење ивица може се применити и пре краја израде папира,
- сечење ивица папира на ролни,
- сечење папира у попречном правцу,
- сечење папира по мери купца и
- сечење папира у плочама.

На основу тога, могу се дефинисати најобичније области у којима се може применити ласерско сечење. То су опсецање ивица на мокром крају, опсецање ивица на сувом крају и резање по ширини коју захтева купац.

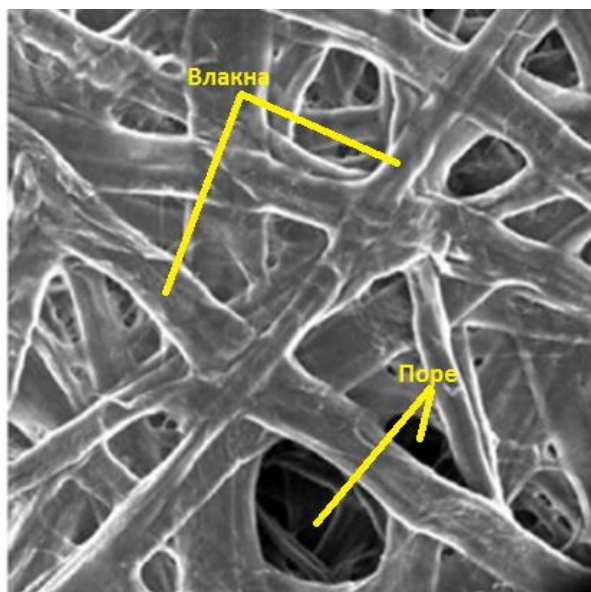
Истраживања о примени ласерског сечења код машина за израду папира може бити интересантно за индустрију папира. Због потражње тржишта мора доћи до повећања брзине и перформанси машина за израду папира и нових технолошких решења, што може бити ласерско сечење у овом случају. Произвођачи ласера су веома заинтересовани за тржишта великог обима, као што је папирна индустрије.

4.1 Папирни материјал

Структура папира

Папири се обично описују као материјали са глатком и равном површином која има равну структуру. Међутим, микроскопски приказ открива да структура папирних материјала није хомогена. Заправо, папир има сложену структуру која се састоји од мреже формиране влакнима пореклом из дрвета или сличним изворима дрвету. Осим тога, честице пунила (обично коалин, калцијум карбонат или друге минералне компоненте), различите хемијске материје за производњу папира и компоненте сировина, као што су лигнин, су присутне у структури папира. Поре испуњене ваздухом заузимају слободан простор између влакана. Неки папирни материјали, нарочито папири за штампање, обложени су једним или више танких слојева минералних пигмената (обично каолин, калцијум карбонат, други минерали). У зависности од крајње сврхе или уштеде у цени производ се може производити и заменом високо квалитетне хемијске пулпе са јефтином механичком пулпом или рециклиране пулпе у средњем слоју катрона. Због тога се разни папирни материјали могу сматрати врло хетерогеним производима. [1]

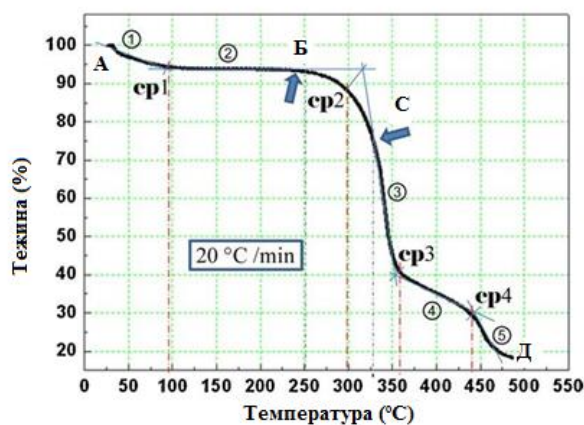
Папирни лист је обично танак и на микроскопском нивоу мрежа влакана подсећа на равну 2D мрежу. Међутим, када се узму поре између влакана, мрежа влакана се може разумети као 3D мрежа, где је мрежна структура испуњена са порама и ваздушним празнинама као што је приказано на *слици 12*. Ова посебна структура папирних материјала снажно утиче на оптичке особине папирних материјала и самим тим и на интеракције између ласерског зрака и папира.



Слика 12. Типична мрежа 3D влакана [1]

Термичко распадање

Пренос топлоте у папирном материјалу пролази кроз провођење, конвекцију и зрачење. Понашање папирног материјала под утицајем топлоте може се поделити на пет фаза пре него што ниво температуре достигне 500°C када се деси потпуна деградација. Ове фазе су показане на слици 13.



Слика 13. Степен деградације папира [1]

На слици 13. могу се уочити критичне тачке (сп) којима одговарају фазе. Различите концентрације којима одговарају приближно 100, 300, 360, 440 $^{\circ}\text{C}$. Прва фаза одговара губитку тежине папира који је изазван испаравањем. Губитак тежине значајно се повећава у другој фази. Трећа фаза разградње резултира највећим губитком тежине. Губитак масе у четвртој и петој фази је знатно мањи.

Производи термичког распада

Главне компоненте термичке деградације целулозе у температурном опсегу од 155-380 ° С, су водена пара и CO₂ гас. Фурани и карбонилни деривати пронађени су као главни производи разградње у гасовитом стању. Алкохол, киселине, ароматични угљоводоници могу се сматрати као мањи производи термичког распада. У табели 2. приказани су продукти из целулозе када је она изложена сталној температури од 155-900 ° С.

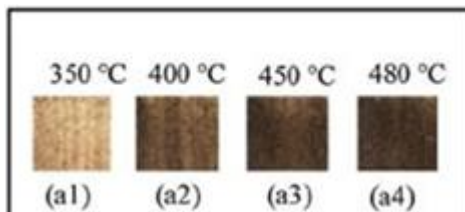
Табела 2. Гасни продукти разградње целулозе (HCs-угљоводоници) [1]

Процес пастављања	Температура, ° С	H ₂ , mol %	CO, mol%	CO ₂ , mol %	HCs, mol %
Елиминација воде	155-200	0	30,5	68	2
Еволуција угљеничних оксида	200-280	0,2	30,5	66,5	3,3
Поцетак развоја угљоводоника	280-380	5,5	20,5	35,5	36,6
Еволуција угљоводоника	380-500	7,5	12,3	31,5	48,7
Дисоцијација	500-700	48,7	24,5	12,2	20,4
Настанак водоника	700-900	80,7	9,6	0,4	8,7

Промена боје изазвана топлотом

Промена боје папира током или након ласерског третмана је примећена, нарочито у случају таквих материјала као што су материјали за штампу, папир за копирање и тањи картон. Ови материјали могу садржати различите врсте пулпе са значајним садржајем лигнина и нечистоће. Бојење папира је један од најосновнијих проблема који мора да се реши како би се омогућила примена ласера у процесу

производње папирних материјала. Примери промене боје због термичког утицаја на папиру приказани су на *слици 14*.



Слика 14. Примери промене боје због термичког утицаја на папир [1]

Слика 14. представља промену боје када је папир био изложен утицају топлоте у опсегу од 350-480 ° С. Положај (a1) показује нам када температура достигне 350 ° С на папиру се примећује жућење папира. Критична температура је 400 ° С, када дође до тешке промене боје, што представља позиције (a2, a3, a4). Утврђено је да промена боје не указује на погоршање чврстоће.

Термичка проводљивост

Пренос топлоте се може постићи провођењем, конвекцијом или зрачењем. При ласерском сечењу папира, енергија која је потребна за деградацију папира се преноси помоћу зрачења. Треба напоменути и то да је топлотна проводљивост у правцу дебљине папирног материјала важнија него у правцу равни.

Термичка проводљивост папира варира у зависности од квалитета и врсте сировина. Топлотна проводљивост најчешће примењиваног папира је 0,064 W/(K m). Међутим топлотна проводљивост папир штампе износи 0,456 W/(K m), код финих листова папира (папир за копирање) је 0,456 W/(K m). Термичка проводљивост чисте целулозе износи 0,057 W/(K m).

Унос топлоте

Унос топлоте описује количину топлоте која се распореди на горњој површини папира како бих се добило квалитетно ласерско сечење. Унос топлоте се може изразити као унос топлоте по дужини реза (J/m) или унос топлоте по маси испареног папира (J/g). Унос топлоте се може рачунати помоћу обрасца:

$$Q = \Psi \frac{P}{v}$$

Где су:

Q - унос топлоте [J],

P - снага ласера [W],

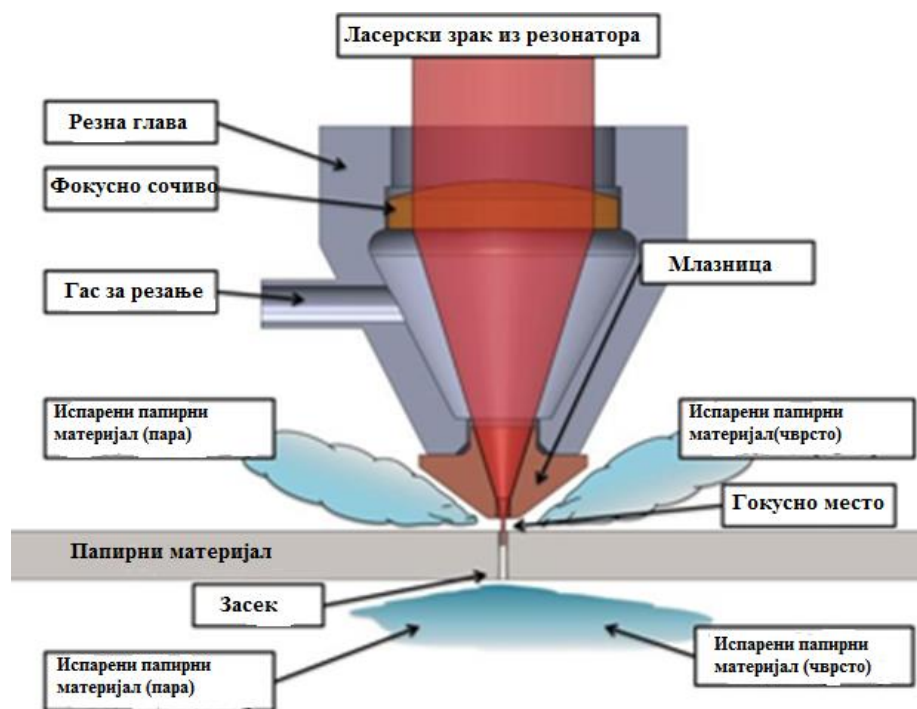
v - брзина резања [mm/s],

Ψ - апсорпција.

Ова вредност се изражава у [J] (цул).

4.2 Ласерски механизам за сечење и опрема

Два основна типа ласера која се користе, то су CO₂ и Nd:YAG ласер. Процес ласерског резања папира, као и код већине материјала, представља процес термохемиског разлагања. Принцип ласерског резања који се примењује на папирни материјал приказан је на *слици 15*.



Слика 15. Принцип ласерског резања који се примењује на резању папира [1]

На *слици 15*. се види да када ласерски зрак додирне површину радног комада, загрева место деловања дотле док не додје до испаравања материјала. Енергија из ласерског зрака реагује са папирним материјалом и разбија хемиске везе, што доводи до деградације папирног материјала.

Ласерски зрак се значајно разликује од обичне светлости захваљујући својим јединственим карактеристикама. У поређењу са обичним светлом, ласерски зрак је зрак велике густине фотона исте фреквенције, таласне дужине и фазе по јединици површине

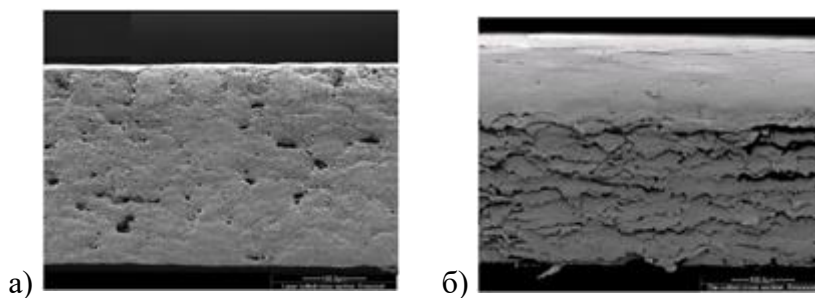
који је фокусиран на малој површини. Ово омогућава да се ласер користи за обраду различитих типова материјала укључујући и папир.

Два најпримењенија ласера за резање папира су CO_2 и Nd:YAG ласери с тим што се CO_2 ласери више користе од Nd:YAG ласера.

Главна предност CO_2 ласера, у резању папирног материјала, је да CO_2 ласер емитује таласну дужину од $10,6 \mu\text{m}$ коју много лакше апсорбује папирни материјал од таласне дужине других врста ласера. Што се тиче Nd:YAG ласера хлађење је један од основних разлога за ограничавање када излазна снага прелази 2 kW , јер се око 50% потрошње електричне енергије претвара у топлотну енергију унутар ласерског штапа. Nd:YAG ласери имају нижу снагу и мањи квалитет ласерског снопа у поређењу са CO_2 ласерима. Предност Nd:YAG ласера је већа флексибилност у поређењу са CO_2 ласерима.

Поређење ласерских резова и механички сечених ивица

Квалитет папирног материјала је веома важан у многим применама у индустрији. Завршеци влакана могу изазвати проблеме у преради папира и смањити квалитет финалног производа. Као пример амбалажа у коју се смештају течности има строге захтеве за квалитет ивица због особине апсорпције течности у резну ивицу. *Слика 16.* представља упоређивање ласерске и механичке резне ивице под електронским микроскопом.



Слика 16. Резне ивице: а) ласерска резна ивица, б) механичка резна ивица [1]

На *слици 16.* можемо видети предности ласерског резања у односу на механичко резање. Количина прашине (чврсте честице), која је ослобођена током ласерског резања је мања него код механичког резања папира. Ласерско сечење омогућава бољи квалитет резне ивице, док је квалитет резне ивице код механичког резања знатно мањи због примене механичке силе.

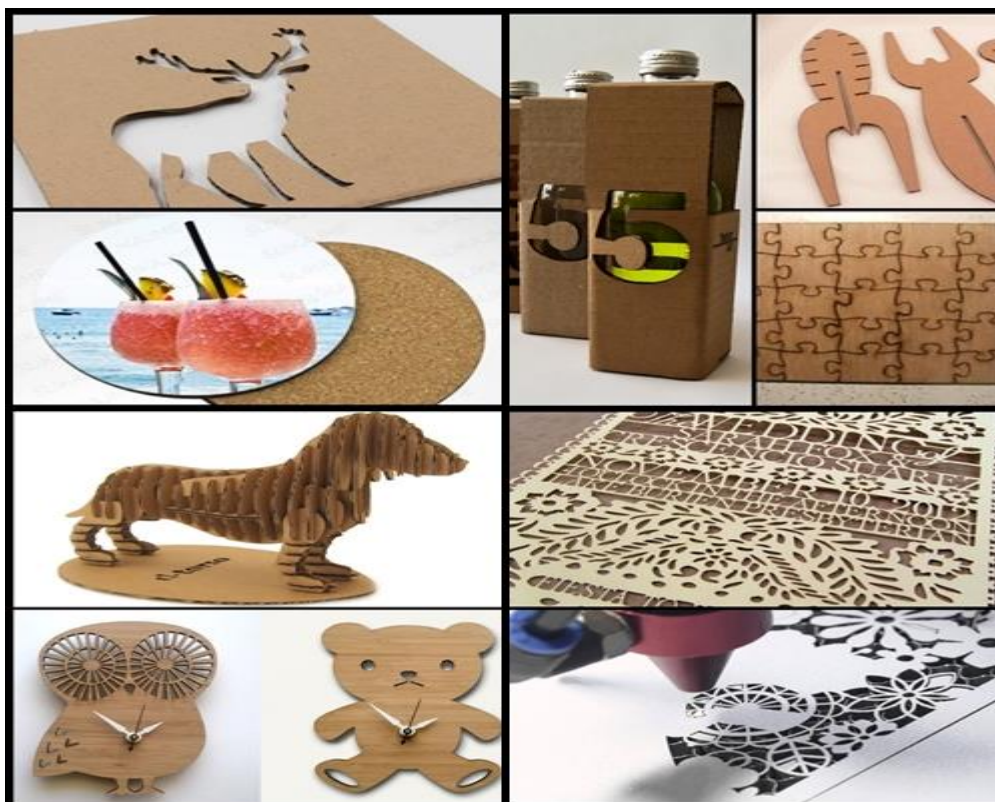
Примери примене ласерског сечења папирних материјала

Користи се за сечење свих врста метала (све врсте челика, алуминијум, бакар, титан и др.), неметала (пластика, гума, кожа, дрво, **папир, картон** и др.) и неорганских материјала (керамика, графит и др.)

Ласерско сечење је данас широко примењено како за сечење једноставних контура тако и за сечење сложених контура. Код неких машина ласерски сном има дебљину од 0,01 mm што омогућава врло прецизна сечења. Прецизни радови и сложени облици сада се лако одрађују уз помоћ ласера најновије технологије. Све што је потребно је да се достави цртеж у одговарајућем дигиталном формату који ласер подржава.

Ласер представља најбоље средство за сечење које користи безконтактну методу.

Производи који се могу добити ласерским сечењем на бази папирног материјала могу бити за различите намене: декоративни елементи, израда модела за архитекте, резање разних 3D украса и слова, разне нумерације, картонске кутије, идр. На *слици 17*. приказани су неки примери ласерског сечења папирних материјала.



Слика 17. Примери ласерског сечења папирног материјала

Примери примене ласерског гравирања папирних материјала

Гравирање ласером код папира и картона се користи у виду маркирања, гравирања бројева којима се утврђује наука идентификација, израда логаритамских скала и слично.

За гравирање најчешће се користи YAG-ласер са акустичним оптичким модулатором. Режим рада код овог ласера је пулсирајући. За гравирање довољни су ласери снаге до 50W.

Гравирање најчешће користе маркетиншке агенције како бих својим клијентима понудили разне поклоне и сл. На *слици 18.* приказани су примери ласерског гравирања на папирном материјалу.



Слика 18. Примери ласерског гравирања на папирном материјалу

5. Експериментални део

5.1 План експеримента

Експериментална испитивања су вршена резањем различитих материјала на бази папира са циљем одређивања минималне снаге а максималне могуће брзине. Извршена је анализа добијених узорак са аспекта оштећена ивица и трагова палења. Циљ овог експеримента је добити што квалитетнију резну ивицу а достићи максималну могућу брзину резања. При резању користио се притисак од 1 баг, а затим је извршено резање истих материјала са 3 баг и извршено поређење добијених резултата. Брзина ласера је изражена кроз [%] од максималне (85 W), док брзина у [mm/s]. Ласер на коме је рађен експеримент може остварити минималну брзину од 11 mm/s.

5.2 Материјали и опрема за резање у експерименту

Експериментални део се обављао на CNC ласеру „LaserCut 1209“ на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу који је приказан на *слици 19*.



Слика 19. CNC ласер „LaserCut 1209“

Карактеристике ласера приказане су у *табели 3*.

Табела 3. Карактеристике ласера на коме је рађен експеримент [9]

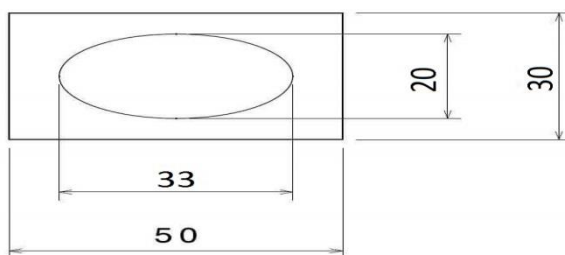
Модел:	LaserCut 1209
Мах. ход алата по X оси:	1000 mm
Мах. ход алата по Y оси:	700 mm
Мах. ход алата по Z оси:	250 mm
Спољашње димензије (Д x Ш x В):	1500 x 1150 x 800 mm
Тежина:	400 kg

Напајање:	230V
Погон оса (X, Y):	Зупчасти ремен
Погон Z осе:	Навојно вретено
Тип управљања:	Trofazni Hybrid MicroStep, opciono AC Servo
Тачност позиционирања:	0,1 mm
Мах. брзина кретања алата:	70000 mm/min
Тип и снага цеви:	CO₂ ласер 80 W /10000 сати / хлађење фреоном
Одвођење гасова:	Да

Материјали који су коришћени у експерименту су:

- Лепенка, дебљине 2 mm,
- Лепенка, дебљине 1 mm,
- Хромо картон 0,4 mm
- PVC налепница - црвена
- PVC налепница - плава
- PVC налепница - жута

Облик и димензије узорка су дати на *слици 20*.



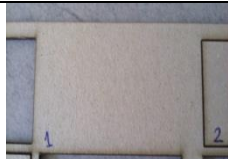
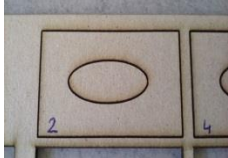
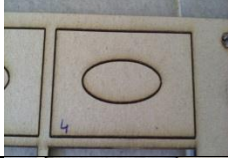
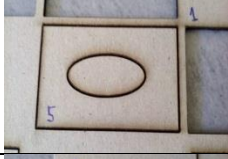
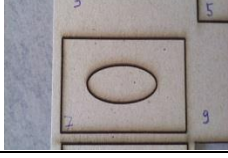
Слика 20. Облик и димензије узорка

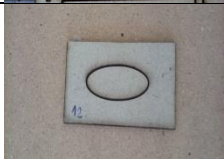
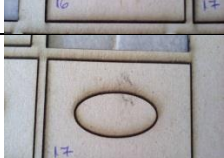
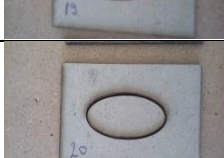
3.3 Резултати експеримента

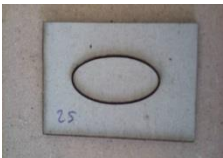
Лепенка – 2 mm

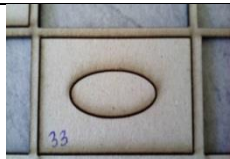
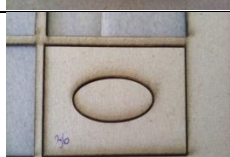
Табелом 4 приказани су добијени резултати резања лепенке – 2 mm са притиском од 1 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 4. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = 0							
1.	10	15	1	16			Нема трагова сечења
2.	20	15	1	16			Није просечено
3.	20	10	1	/			Нема трагова сечења
4.	20	11	1	23			Није просечено
5.	30	11	1	23			Није просечено
7.	40	11	1	23			Није просечено
Висина = -2,5							
6.	40	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
8.	30	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
9.	20	11	1	23			Нема трагова сечења
10.	25	11	1	23			Није просечено

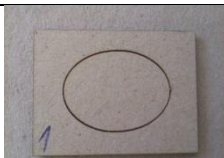
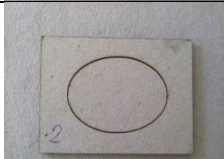
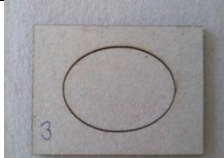
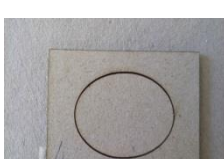
11.	28	11	1	23			Није просечено
12.	29	11	1	23			Није просечено
13.	30	13	1	19			Није просечено
14.	30	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
15.	31	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
16.	30	15	1	16			Није просечено
17.	30	17	1	15			Није просечено
18.	33	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
19.	33	13	1	19		Просечено са малим траговима паљења	
20.	33	15	1	16		Просечено са малим траговима паљења	
21.	33	17	1	17			Није просечено

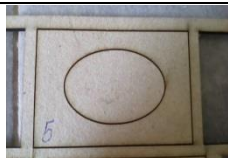
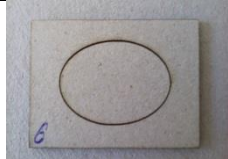
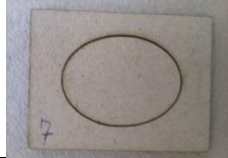
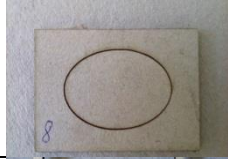
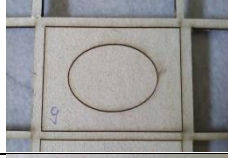
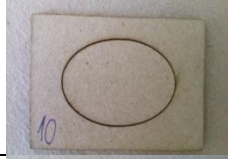
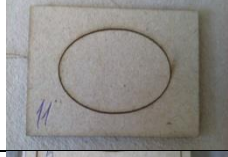
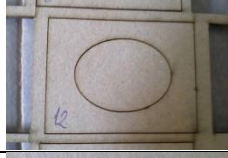
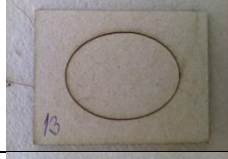
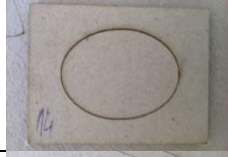
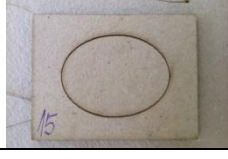
22.	36	11	1	23		Просечен о са малим траговима паљења	
23.	36	13	1	19		Просечен о са малим траговима паљења	
24.	36	15	1	16		Просечен о са малим траговима паљења	
25.	36	17	1	15		Просечен о са малим траговима паљења	
26.	36	19	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
27.	36	21	1	12			Није просечен о
28.	39	11	1	21		Просечен о са малим траговима паљења	
29.	39	13	1	19		Просечен о са малим траговима паљења	
30.	39	15	1	16		Просечен о са малим траговима паљења	
31.	39	17	1	15		Просечен о са малим траговима паљења	
32.	39	19	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	

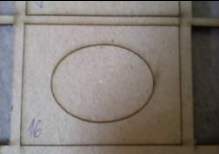
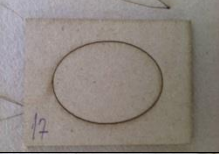
33.	39	21	1	12			Није просечен о
34.	42	19	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
35.	42	21	1	12		Просечен о са малим траговима паљења	
36.	42	23	1	11			Није просечен о

У табели 5 приказани су добијени резултати резања лепенке – 2 mm са притиском од 3 бар, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 5. Добијени резултати са сликама уз коментаре

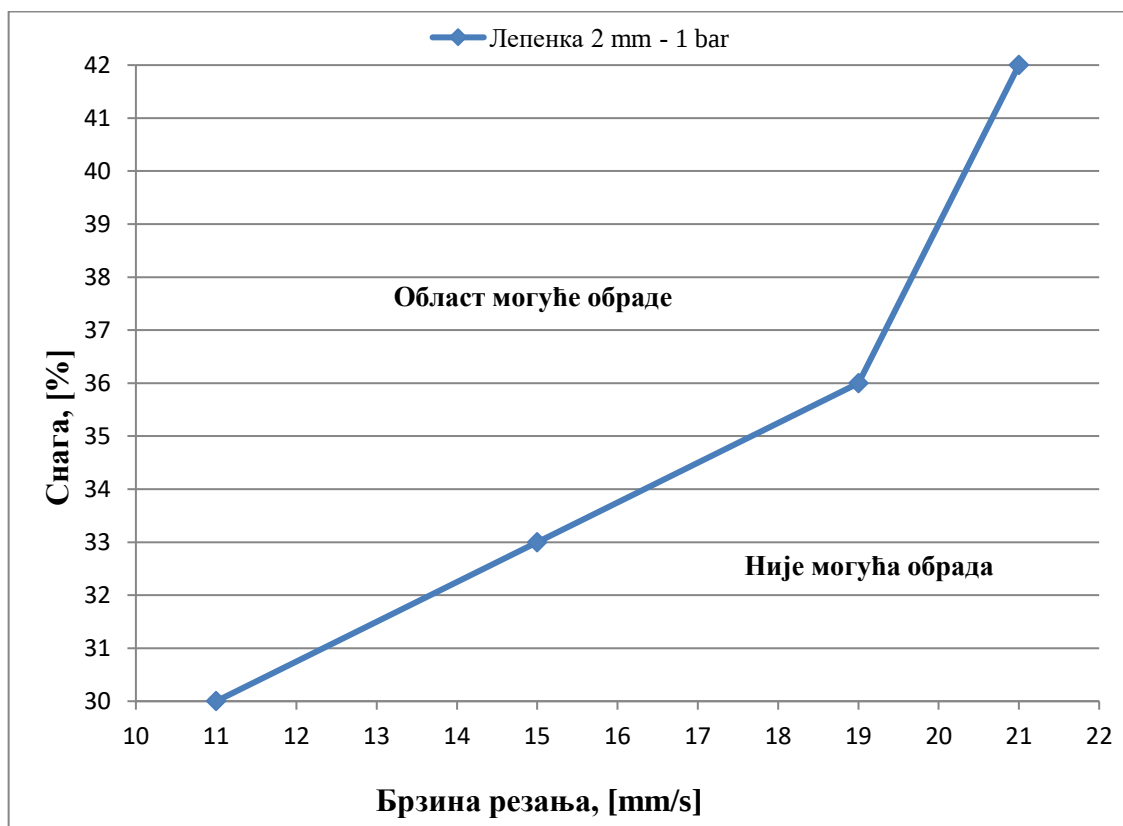
Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време , [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	30	13	3	23		Просечен о без трагова паљења	
2.	30	13	3	20		Просечен о без трагова паљења	
3.	30	15	3	17		Просечен о без трагова паљења	
4.	30	17	3	16		Просечен о са малим цепањем без паљења	

5.	30	19	3	13			Није просечен о
6.	33	23	3	11		Просечен о без трагова паљења	
7.	33	25	3	11		Просечен о без трагова паљења	
8.	33	27	3	10		Просечен о без трагова паљења	
9.	33	29	3	10			Није просечен о
10.	36	35	3	8		Просечен о без трагова паљења	
11.	36	37	3	8		Просечен о без трагова паљења	
12.	36	39	3	8			Није просечен о
13.	39	45	3	7		Просечен о без трагова паљења	
14.	39	47	3	7		Просечен о без трагова паљења	
15.	39	49	3	6		Просечен о без трагова паљења	

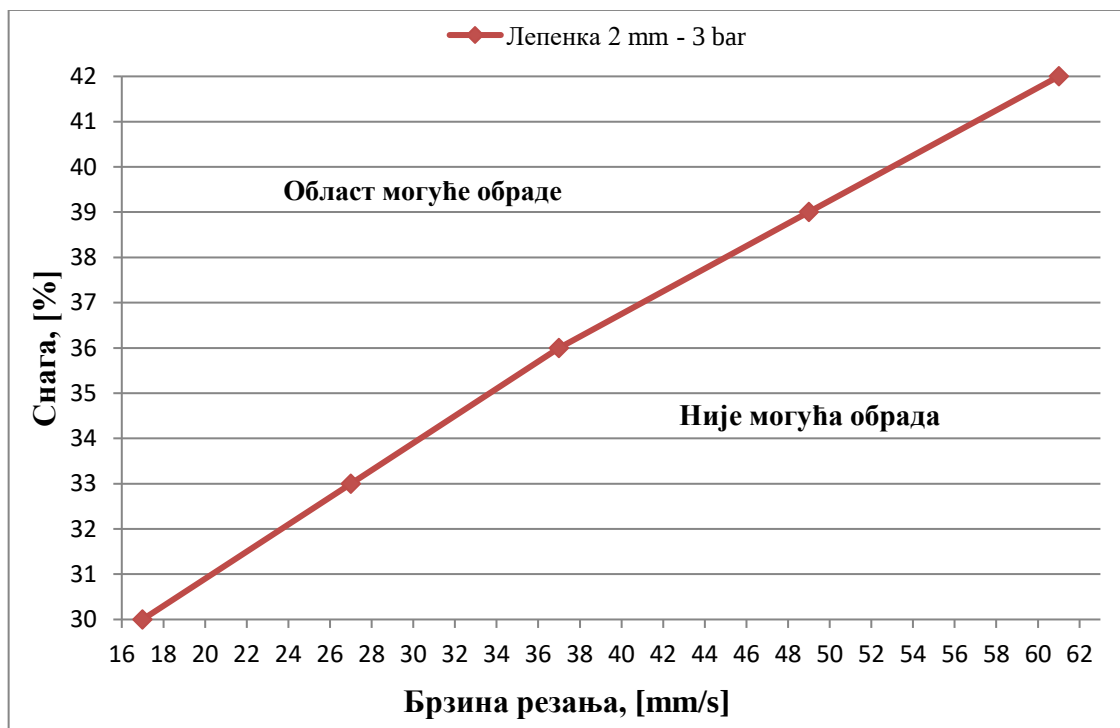
16.	39	51	3	6			Није просечен о
17.	42	59	3	6		Просечен о без трагова паљења	
18.	42	61	3	6		Просечен о без трагова паљења	
19.	42	63	3	6			Није просечен о

На основу добијених резултата на *дијаграму 1.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 2.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 3.* је дато поређење резултата.

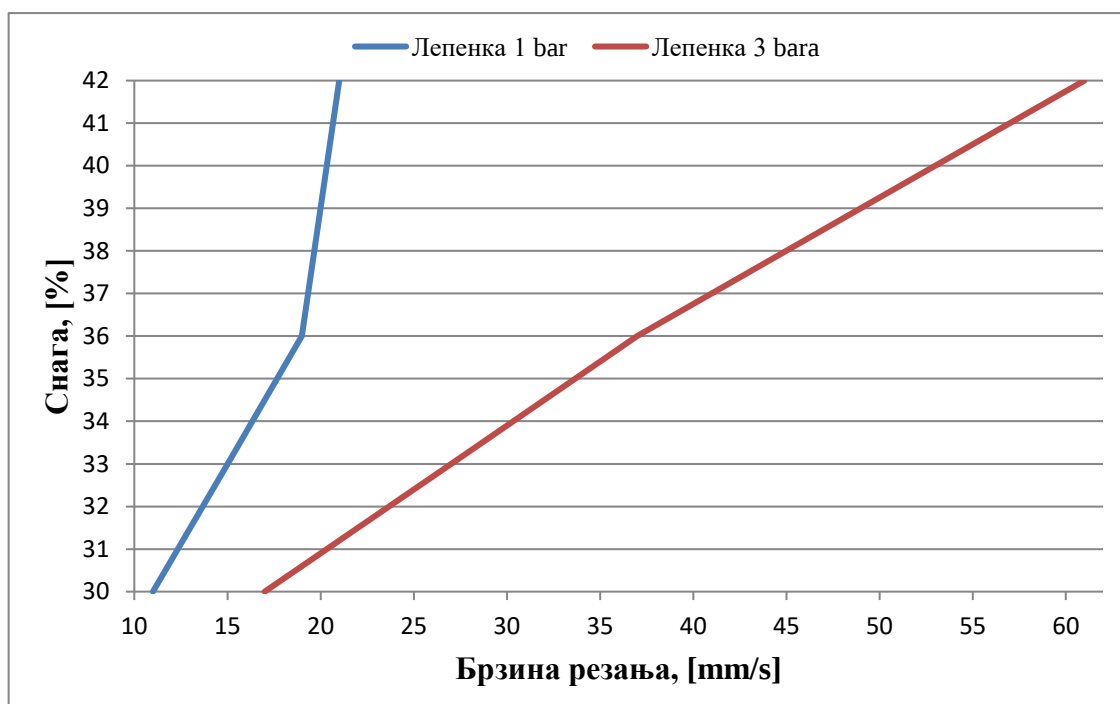
Дијаграм 1. Графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar



Дијаграм 2. Графички приказ сечења папира за притисак од 3 bara



Дијаграм 2. Графички приказ поређења резултата

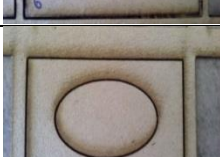
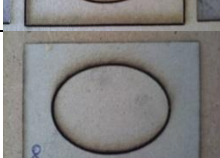
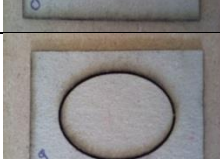


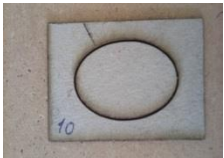
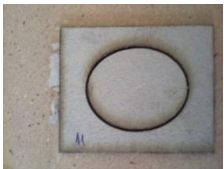
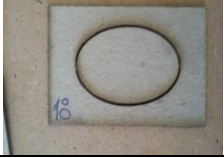
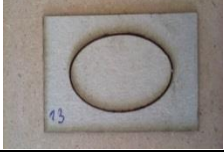
Поређењем добијених резултата може се закључити да се при притиску од 3 bara могу остварити веће брзине резања при коришћењу исте снаге као за притисак од 1 bar, такође виде се и мањи трагови паљења код притиска од 3 bara. Може се закључити да се коришћење притиска од 3 bara за резање лепенке - 2 mm добија бољи квалитет уз примену мање снаге, веће брзине резања.

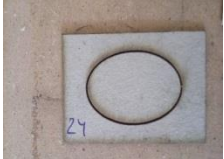
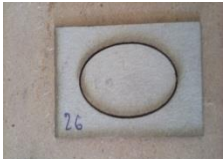
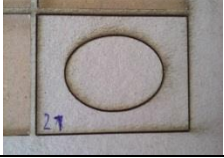
Лепенка - 1 mm

Табелом 6 приказани су добијени резултати резања лепенке – 1 mm са притиском од 1 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 6. Добијени резултати са сликама уз коментаре

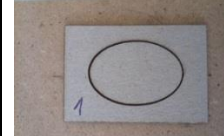
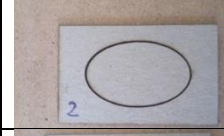
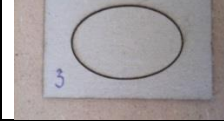
Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	30	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
2.	20	11	1	23			Није просечено
3.	25	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
4.	23	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
5.	21	11	1	23			Није просечено
6.	22	11	1	23			Није просечено
7.	23	13	1	20			Није просечено
8.	26	11	1	23		Просечено са малим траговима паљења	
9.	26	13	1	20		Просечено са малим траговима паљења	

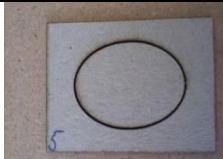
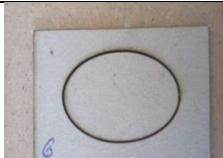
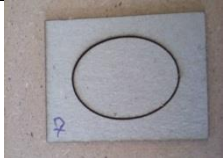
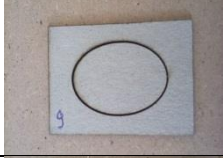
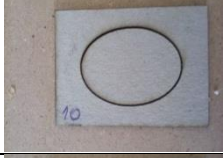
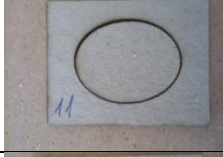
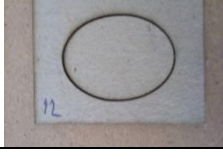
10.	26	15	1	17		Просечен о са малим траговима паљења	
11.	26	17	1	16		Просечен о са малим цепањем са малим паљењем	
18.	26	19	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
19.	26	21	1	12		Просечен о са малим траговима паљења	
20.	26	23	1	11			Није просечен о
12.	29	15	1	17		Просечен о са малим траговима паљења	
13.	29	17	1	16		Просечен о са малим траговима паљења	
14.	29	19	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
15.	29	21	1	12		Просечен о са малим траговима паљења	
16.	29	23	1	11		Просечен о са малим траговима паљења	
17.	29	25	1	11		Просечен о са малим траговима паљења	

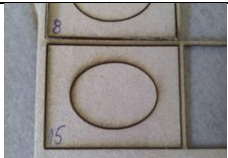
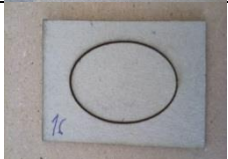
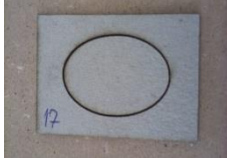
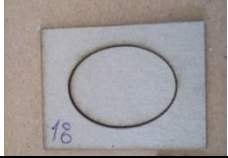
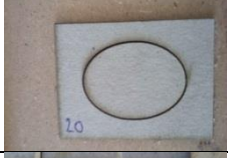
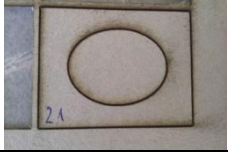
22.	29	25	1	11		Просечен о са малим траговима паљења	
21.	29	27	1	10			Није просечен о
23.	32	21	1	12		Просечен о са малим траговима паљења	
24.	32	23	1	11		Просечен о са малим траговима паљења	
25.	32	25	1	11		Просечен о са малим траговима паљења	
26.	32	27	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
27.	32	29	1	10			Није просечен о

У табели 7 приказани су добијени резултати резања лепенке – 1 mm са притиском од 3 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 7. Добијени резултати са сликама уз коментаре

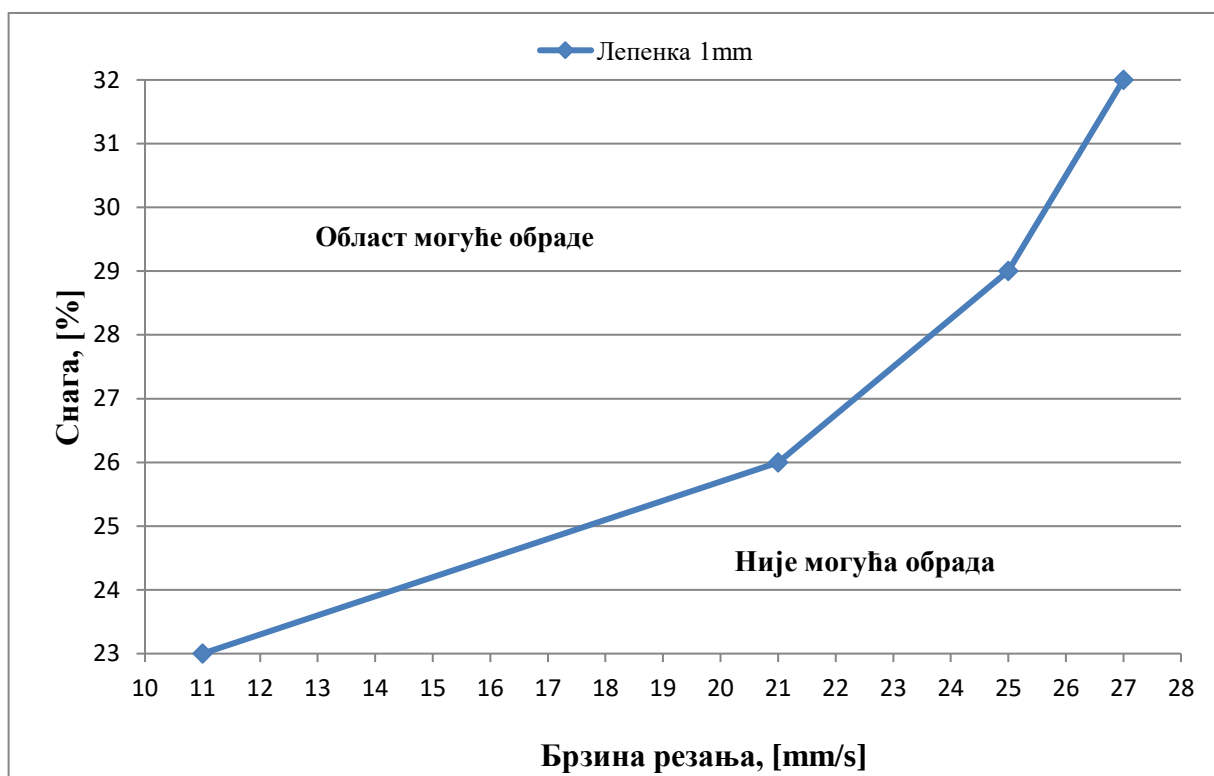
Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време , [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	23	11	3	23		Просечен о без трагова паљења	
2.	23	13	3	20		Просечен о без трагова паљења	
3.	23	15	3	17		Просечен о без трагова паљења	

4.	23	17	3	16			Није просечен о
5.	26	15	3	17		Просечен о без трагова паљења	
6.	26	19	3	13		Просечен о без трагова паљења	
7.	26	21	3	12		Просечен о без трагова паљења	
8.	26	23	3	11			Није просечен о
9.	29	19	3	13		Просечен о без трагова паљења	
10.	29	21	3	12		Просечен о без трагова паљења	
11.	29	23	3	11		Просечен о без трагова паљења	
12.	29	25	3	11		Просечен о без трагова паљења	
13.	29	27	3	10		Просечен о са малим цепањем без паљења	
14.	29	29	3	10		Просечен о са малим цепањем без паљења	

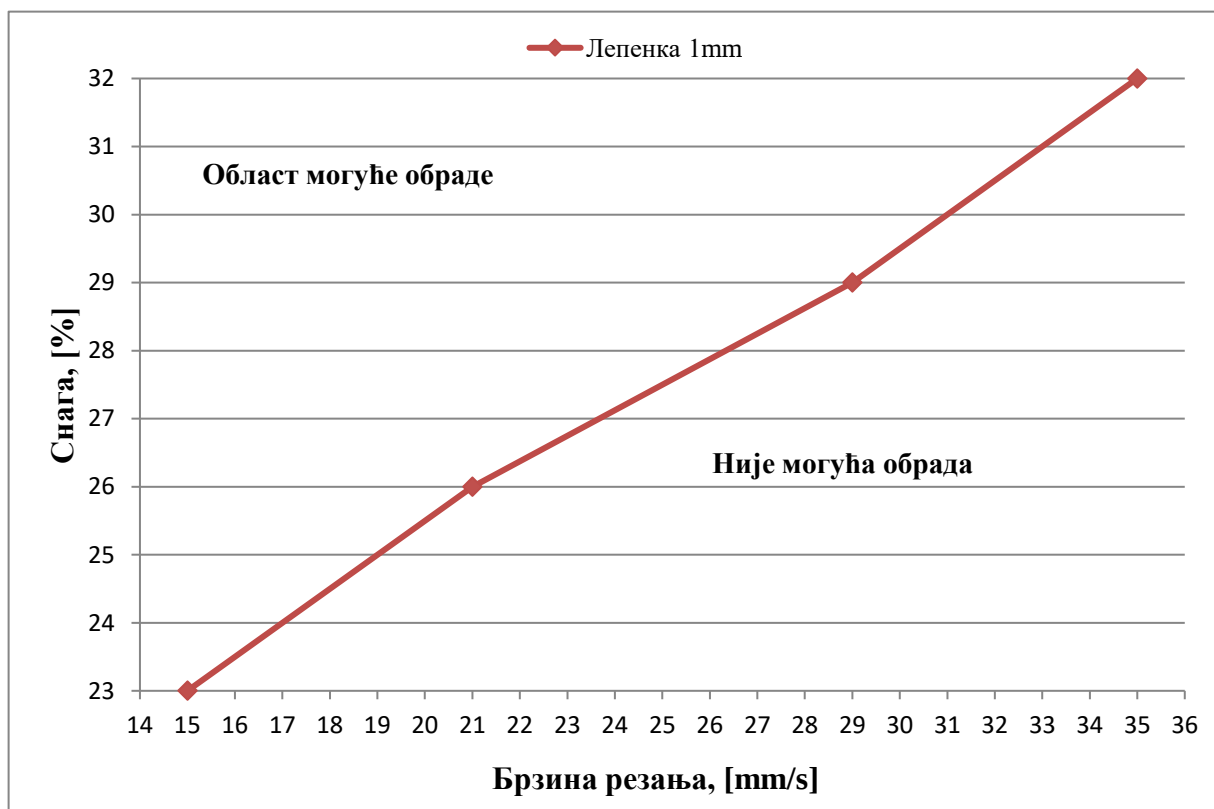
15.	29	31	3	9			Није просечен о
16.	32	27	3	10		Просечен о без трагова паљења	
17.	32	29	3	10		Просечен о без трагова паљења	
18.	32	31	3	9		Просечен о без трагова паљења	
19.	32	33	3	9		Просечен о без трагова паљења	
20.	32	35	3	8		Просечен о без трагова паљења	
21.	32	37	3	8			Није просечен о

На основу добијених резултата на *дијаграму 4.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 5.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 6.* је дато поређење резултата.

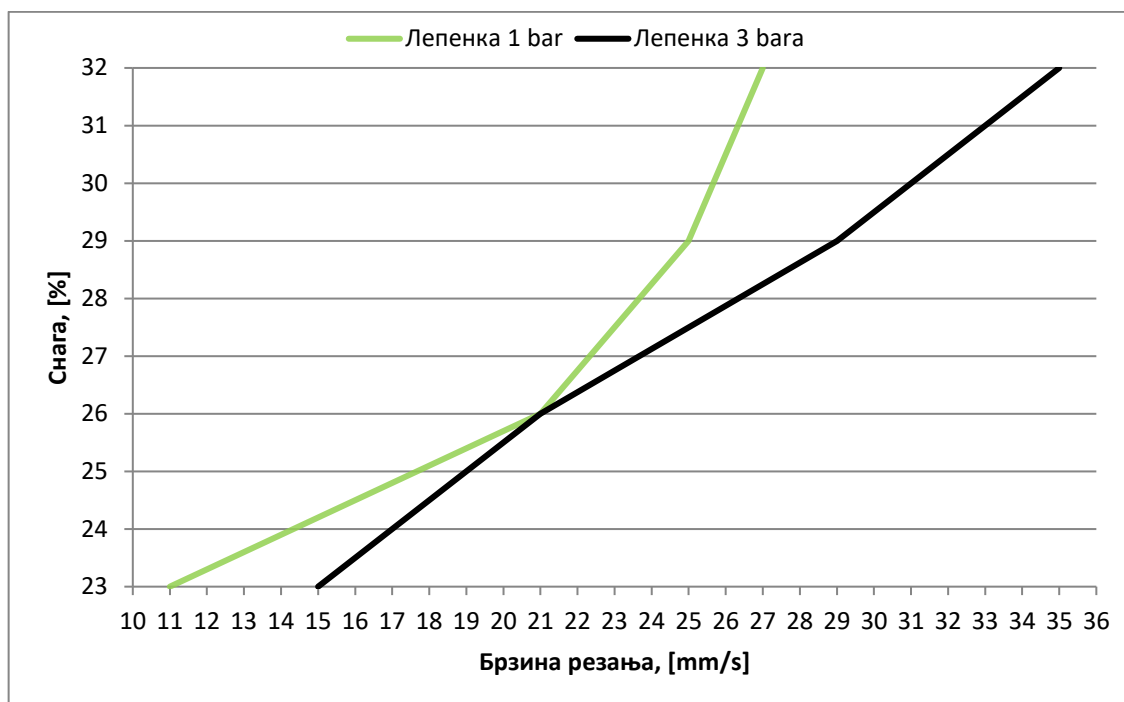
Дијаграм 4. Графички приказ добијених резултата за притисак од 1 bar



Дијаграм 5. Графички приказ добијених резултата за притисак од 3 bara



Дијаграм 6. Графички приказ поређења резултата

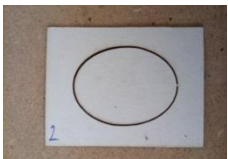


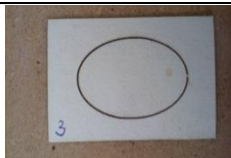
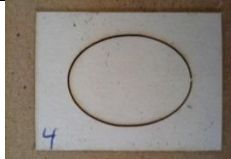
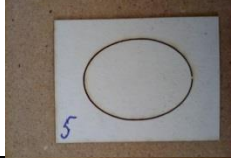
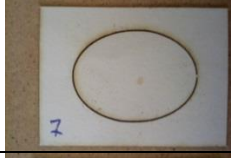
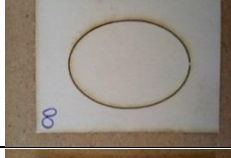
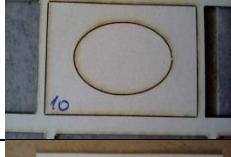
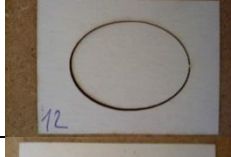
Поређењем добијених резултата може се закључити да се при притиску од 3 bara могу остварити веће брзине резања при коришћењу исте снаге као за притисак од 1 bar, такође виде се и мањи трагови паљења код притиска од 3 bara. Може се закључити да се коришћење притиска од 3 бара за резање лепенке - 1 mm добија бољи квалитет уз примену мање снаге, веће брзине резања.

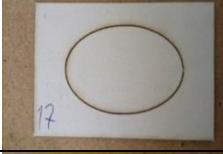
Хромо картон – 0,4 mm

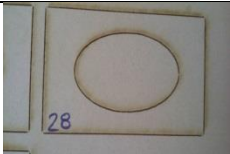
Табелом 8 приказани су добијени резултати резања хромо картона – 0,4 mm са притиском од 1 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 8. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време , [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	11	1	23			Није просечен о
2.	18	11	1	23		Просечен о са малим траговима паљења	

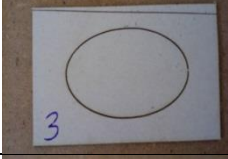
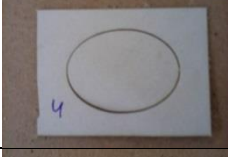
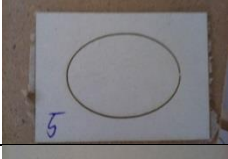
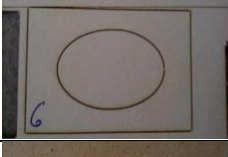
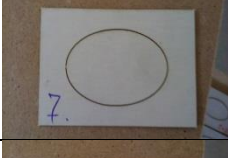
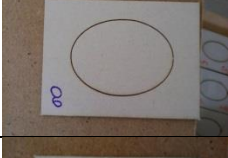
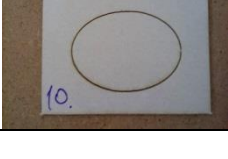
3.	18	13	1	20		Просечено са малим траговима паљења	
4.	18	15	1	17		Просечено са малим траговима паљења	
5.	18	17	1	16		Просечено са малим траговима паљења	
6.	18	19	1	13		Просечено са малим траговима паљења	
7.	18	21	1	12		Просечено са малим траговима паљења	
8.	18	23	1	11		Просечено са малим траговима паљења	
9.	18	25	1	11		Просечено са малим траговима паљења	
10.	18	27	1	10			Није просече но
11.	21	21	1	12		Просечено са малим траговима паљења	
12.	21	23	1	11		Просечено са малим траговима паљења	
13.	21	25	1	11		Просечено са малим траговима паљења	

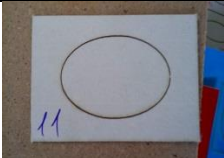
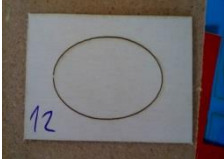
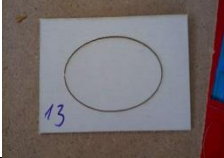
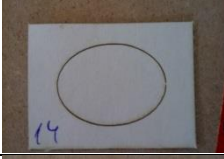
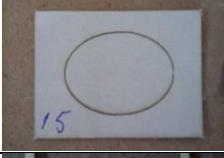
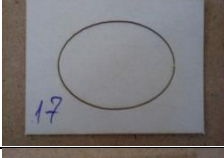
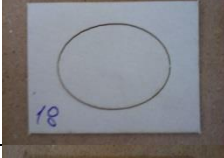
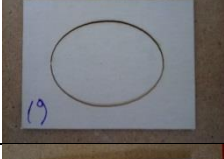
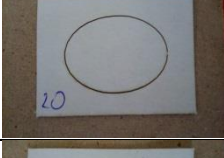
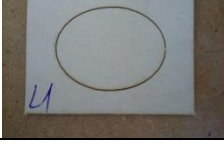
14.	21	29	1	10		Просечено са малим траговима паљења	
15.	21	31	1	9		Просечено са малим траговима паљења	
16.	21	33	1	9		Просечено са малим траговима паљења	
17.	21	35	1	8		Просечено са малим траговима паљења	
18.	21	37	1	8		Просечено са малим траговима паљења	
19.	21	39	1	8		Просечено са малим траговима паљења	
20.	21	41	1	8		Просечено са малим траговима паљења	
21.	21	43	1	7		Просечено са малим траговима паљења	
22.	21	45	1	7		Просечено са малим траговима паљења	
23.	21	47	1	7		Просечено са малим траговима паљења	
24.	21	49	1	6		Просечено са малим траговима паљења	

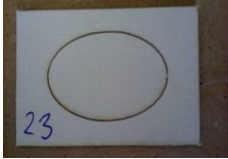
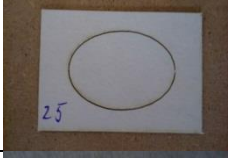
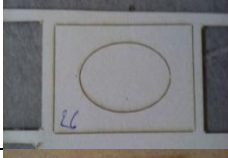
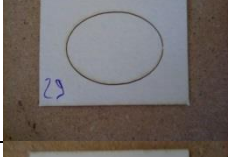
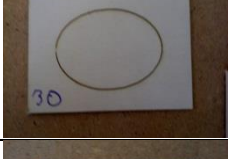
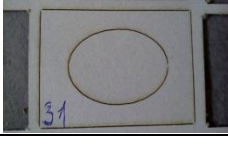
25.	21	51	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
26.	21	53	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
27.	21	55	1	6			Није просечено
28.	24	70	1	5			Није просечено
29.	24	64	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
30.	24	66	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
31.	24	68	1	5			Није просечено
32.	27	84	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
33.	27	86	1	5			Није просечено

Табелом 9 приказани су добијени резултати резања хромо картона – 0,4 mm са притиском од 3 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 9. Добијени резултати са сликама уз коментаре

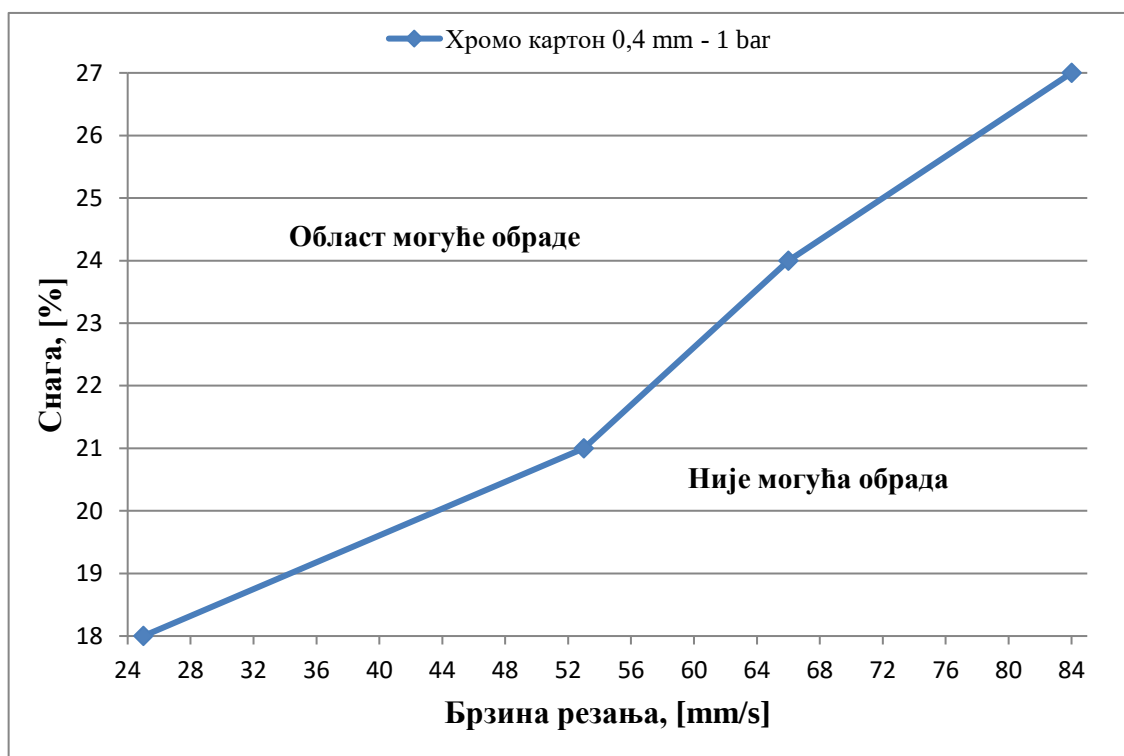
Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време , [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	18	21	3	12		Просечен о без трагова паљења	
2.	18	23	3	11		Просечен о без трагова паљења	
3.	18	25	3	11		Просечен о без трагова паљења	
4.	18	27	3	10		Просечен о без трагова паљења	
5.	18	29	3	10		Просечен о без трагова паљења	
6.	18	31	3	9			Није просечен о
7.	21	47	3	7		Просечен о без трагова паљења	
8.	21	49	3	6		Просечен о без трагова паљења	
9.	21	51	3	6		Просечен о без трагова паљења	
10.	21	53	3	6		Просечен о без трагова паљења	

11.	21	55	3	6		Просечен о без трагова паљења	
12.	21	57	3	6		Просечен о без трагова паљења	
13.	21	59	3	6		Просечен о без трагова паљења	
14.	21	61	3	6		Просечен о без трагова паљења	
15.	21	63	3	6		Просечен о без трагова паљења	
16.	21	65	3	6			Није просечен о
17.	24	66	3	6		Просечен о без трагова паљења	
18.	24	68	3	6		Просечен о без трагова паљења	
19.	24	70	3	5		Просечен о без трагова паљења	
20.	24	72	3	5		Просечен о без трагова паљења	
21.	24	74	3	5		Просечен о без трагова паљења	

22.	24	76	3	5		Просечен о без трагова паљења	
23.	24	78	3	5		Просечен о без трагова паљења	
24.	24	80	3	5		Просечен о без трагова паљења	
25.	24	84	3	5		Просечен о без трагова паљења	
26.	24	86	3	4			Није просечен о
27.	27	84	3	5		Просечен о без трагова паљења	
28.	27	90	3	4		Просечен о без трагова паљења	
29.	27	96	3	4		Просечен о без трагова паљења	
30.	27	100	3	3		Просечен о без трагова паљења	
32.	27	102	3	3		Просечен о без трагова паљења	
31.	27	104	3	3			Није просечен о

На основу добијених резултата на *дијаграму 7.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 8.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 9.* је дато поређење резултата.

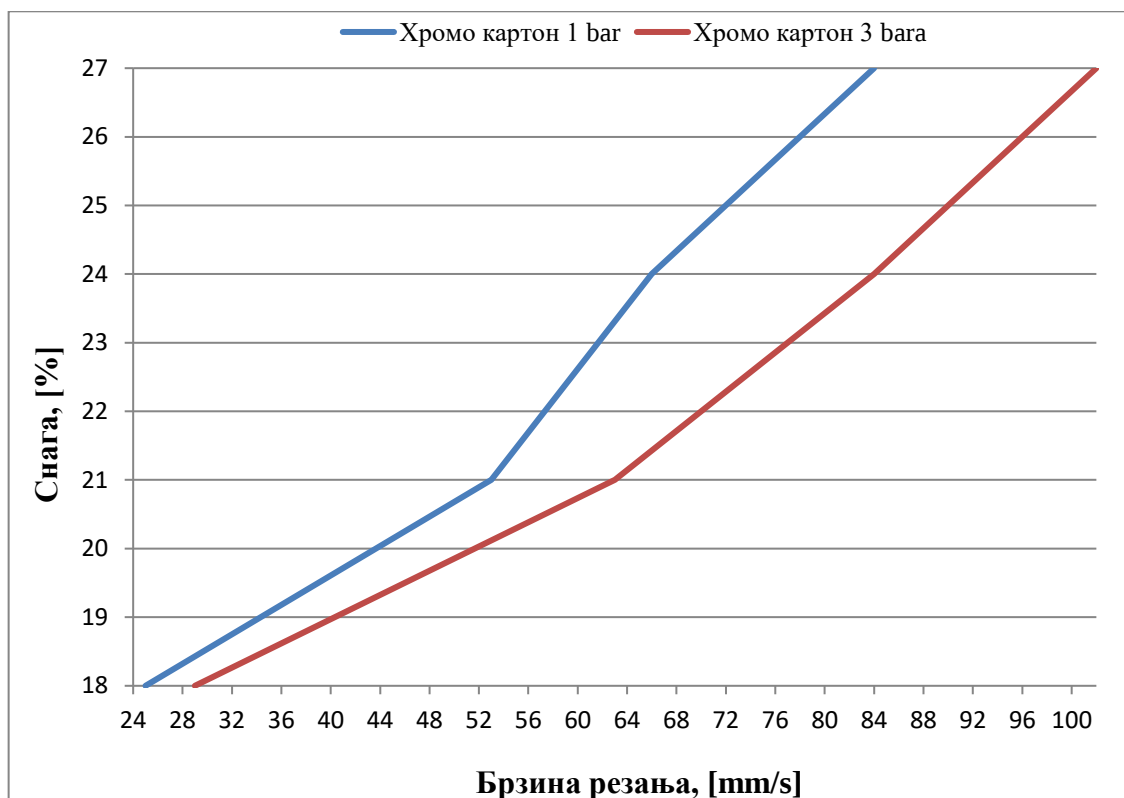
Дијаграм 7. Графички приказ добијених резултата за притисак од 1 bar



Дијаграм 8. Графички приказ добијених резултата за притисак од 3 bara



Дијаграм 9. Графички приказ поређења резултата



Поређењем добијених резултата може се закључити да се при притиску од 3 bara могу остварити веће брзине резања при коришћењу исте снаге као за притисак од 1 bar, такође виде се и мањи трагови паљења код притиска од 3 bara. Може се закључити да се коришћење притиска од 3 bara за резање хромо картона – 0,4 mm добија бољи квалитет уз примену мање снаге, веће брзине резања.

PVC налепница – црвена

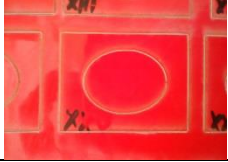
Табелом 10 приказани су добијени резултати резања црвене PVC налепнице са притиском од 1 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 10. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага, [%]	Брзина, [mm/s]	Притисак, [bar]	Време, [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	50	1	6			Није просечен о

2.	15	40	1	8			Није просечен о
3.	15	30	1	10		Просечен о без трагова паљења	
4.	15	20	1	13		Просечен о без трагова паљења	
5.	15	11	1	23		Просечен о без трагова паљења	
6.	18	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
7.	18	40	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	18	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
9.	18	20	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
10.	18	11	1	23		Просечен о са малим траговима паљења	
24.	18	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
25.	18	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	

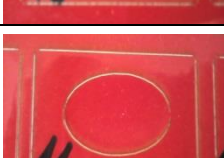
26.	18	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
27.	18	90	1	4			Има сечења али углове не сече
11.	21	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	21	40	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	
13.	21	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
14.	21	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
15.	21	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
16.	21	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
17.	21	90	1	4		Просечен о са малим траговима паљења	
28.	21	100	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	
29.	21	110	1	3			Има сечења али углове не сече

18.	24	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
19.	24	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
20.	24	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
21.	24	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
22.	24	90	1	4		Просечен о са малим траговима паљења	
23.	24	100	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	
30.	24	110	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	
31.	24	120	1	3			Има сечења али углове не сече

Табелом 11 приказани су добијени резултати резања црвене PVC налепнице са притиском од 3 бара, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

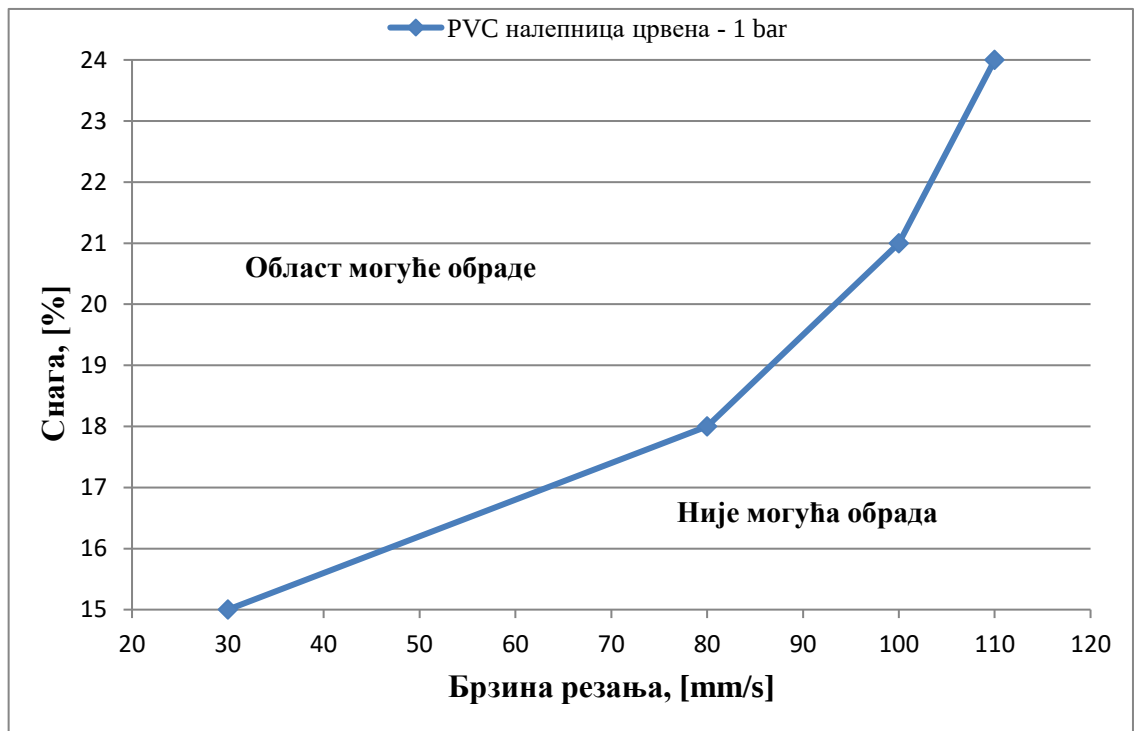
Табела 11. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	30	3	10		Просечен о без трагова паљења	

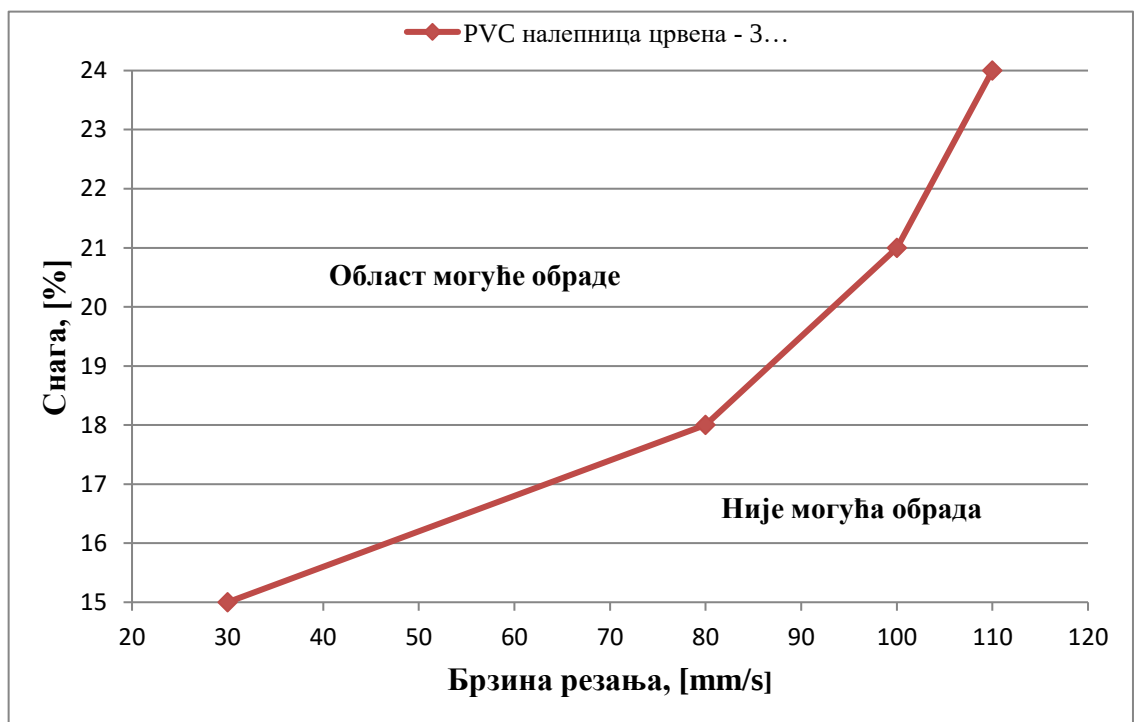
2.	15	20	3	13		Просечен о без трагова паљења	
3.	15	40	3	8			Није просечен о
4.	18	80	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
5.	18	70	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
6.	18	90	3	4			Има сечења али углове не сече
7.	21	100	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	21	90	3	4		Просечен о са малим траговима паљења	
9.	21	110	3	3			Има сечења али углове не сече
10.	24	110	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
11.	24	100	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	24	120	3	3			Има сечења али углове не сече

На основу добијених резултата на *дијаграму 10.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 11.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 12.* је дато поређење резултата.

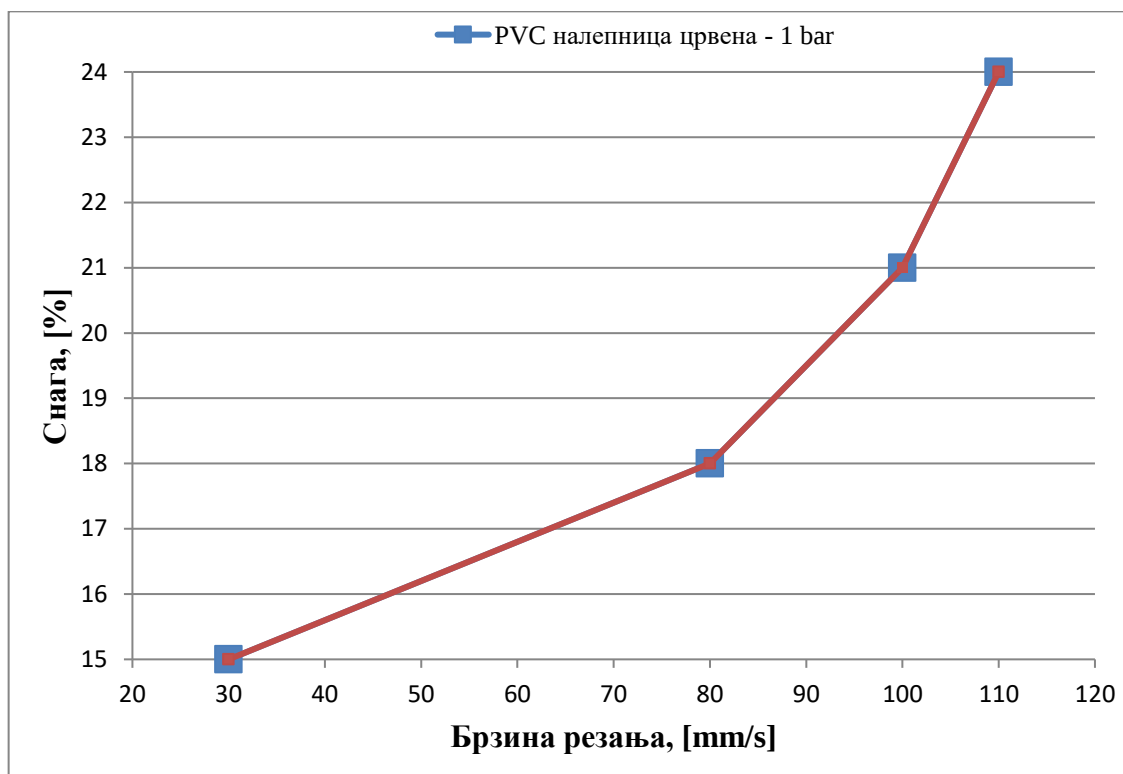
Дијаграм 10. Графички приказ добијених резултата за притисак од 1 bar



Дијаграм 11. Графички приказ добијених резултата за притисак од 3 bara



Дијаграм 12. Графички приказ поређења резултата

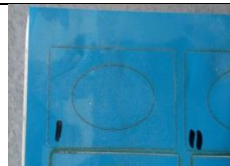


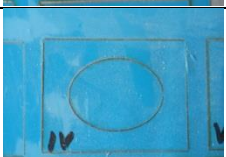
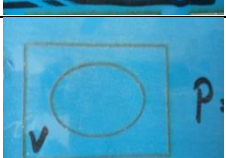
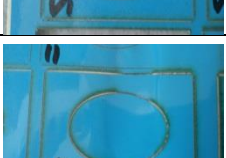
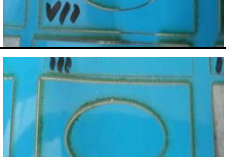
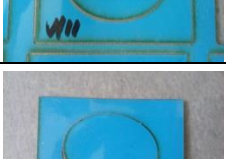
Поређењем добијених резултата може се закључити да се брзине резања при 1 bar и 3 bara не разликују, такође паљења су готово идентична при оба притиска. Приликом резања црвене PVC налепнице примећује се како при тритиску од 1 bar тако и при притиску од 3 bara приликом достизања брзине од 90 mm/s при снази од 18 % ласер не постиже да изреже углове који су у овом случају под 90°. На основу резултата закључујемо да приликом примене оба притиска резултати су идентични, самим тим избор притиска нема велики значај за резање PVC налепнице.

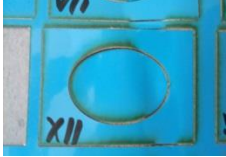
PVC налепница – плава

Табелом 12 приказани су добијени резултати резања плаве PVC налепнице са притиском од 1 bar, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 12. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага, [%]	Брзина, [mm/s]	Притисак, [bar]	Време, [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	50	1	6			Није просечен о

2.	15	40	1	8			Није просечен о
3.	15	30	1	10		Просечен о без трагова паљења	
4.	15	20	1	13		Просечен о без трагова паљења	
32.	15	15	1	17		Просечен о без трагова паљења	
5.	15	11	1	23		Просечен о без трагова паљења	
6.	18	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
7.	18	40	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	18	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
9.	18	20	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
10.	18	11	1	23		Просечен о са малим траговима паљења	
24.	18	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	

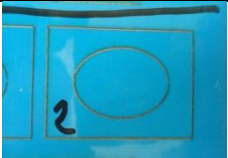
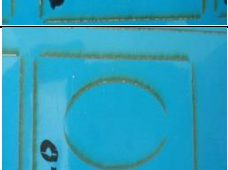
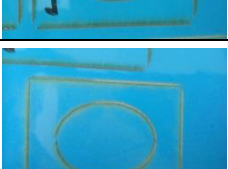
25.	18	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
26.	18	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
27.	18	90	1	4			Има сечења али углове не сече
11.	21	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	21	40	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	
13.	21	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
14.	21	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
15.	21	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
16.	21	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
17.	21	90	1	4		Просечен о са малим траговима паљења	
28.	21	100	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	

29.	21	110	1	3			Сече али углове не сече
18.	24	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
19.	24	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
20.	24	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
21.	24	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
22.	24	90	1	4		Просечен о са малим траговима паљења	
23.	24	100	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	
30.	24	110	1	3		Просечен о са малим траговима паљења	
31.	24	120	1	3			Сече али углове не сече

Табелом 13 приказани су добијени резултати резања плаве PVC налепнице са притиском од 3 бара, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

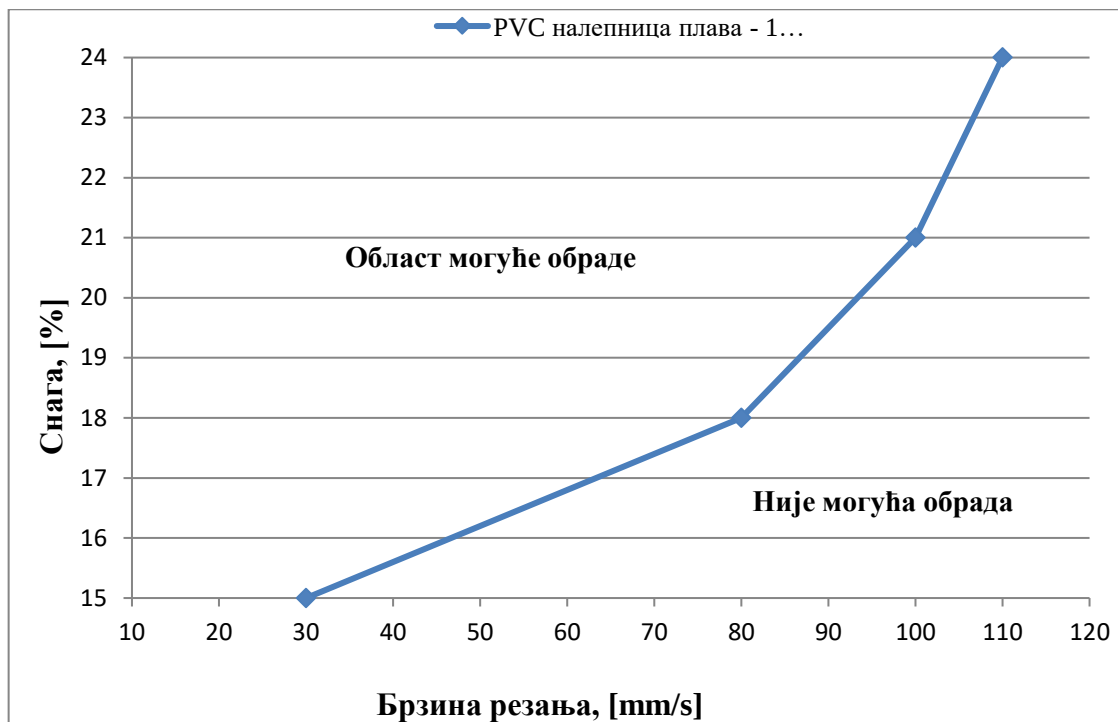
Табела 13. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	20	3	13		Просечен без паљења	

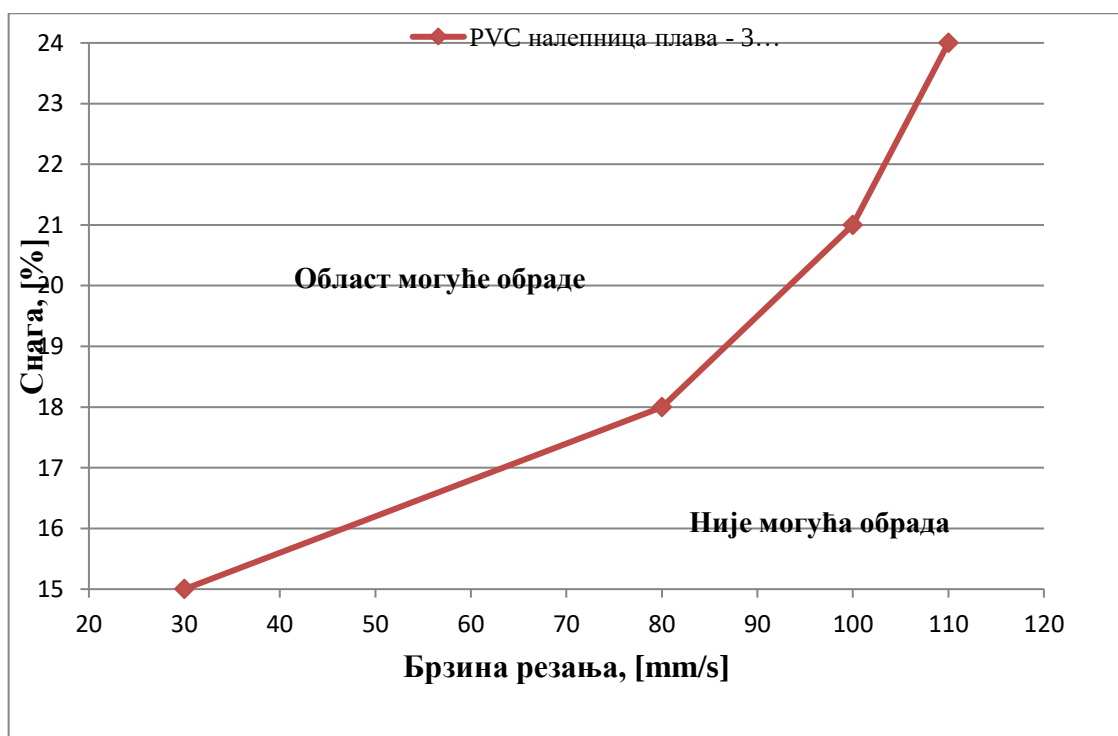
2.	15	30	3	10		Просечен о без трагова паљења	
3.	15	40	3	8			Није просечен о
4.	18	70	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
5.	18	80	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
6.	18	90	3	4			Има сечења али углове не сече
7.	21	100	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	21	90	3	4		Просечен о са малим траговима паљења	
9.	21	110	3	3			Има сечења али углове не сече
10.	24	110	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
11.	24	100	3	3		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	24	120	3	3			Има сечења али углове не сече

На основу добијених резултата на *дијаграму 13.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 14.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 15.* је дато поређење резултата.

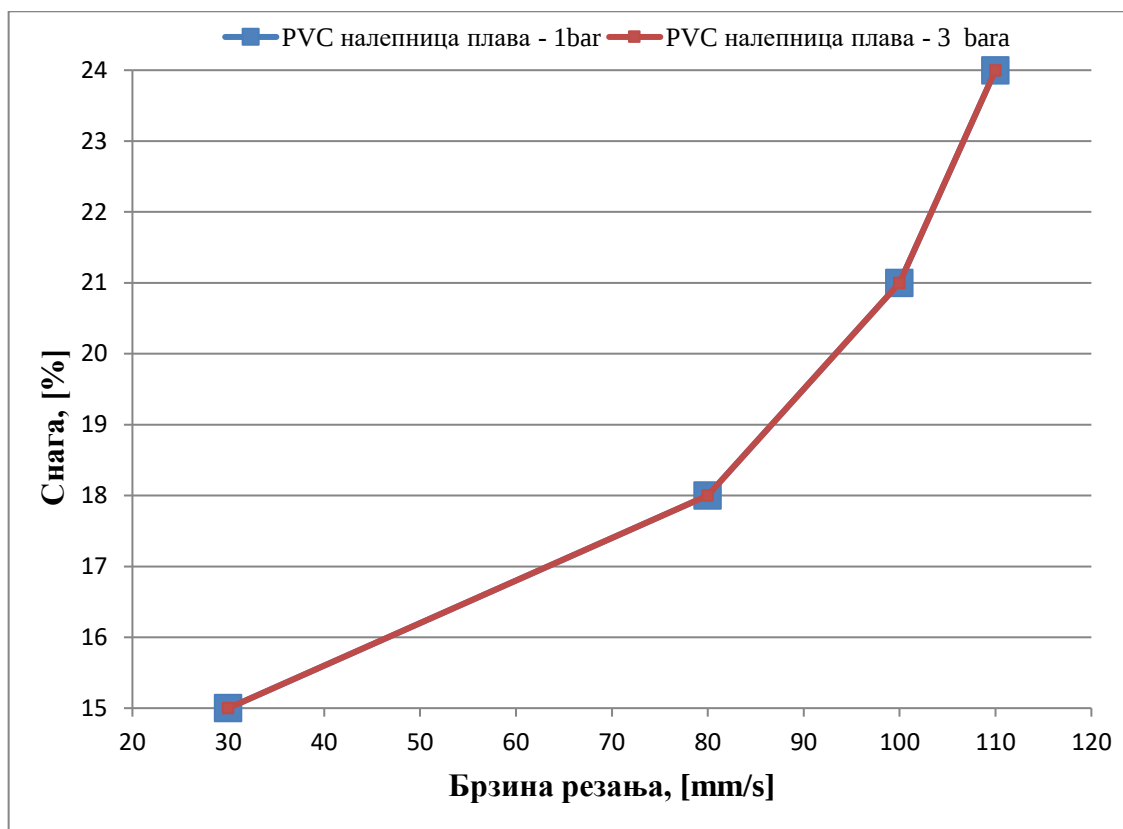
Дијаграм 13. Графички приказ добијених резултата за притисак од 1 bar



Дијаграм 14. Графички приказ добијених резултата за притисак од 3 bar



Дијаграм 15. Графички приказ поређења резултата



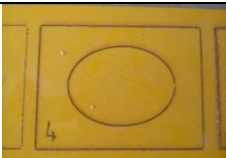
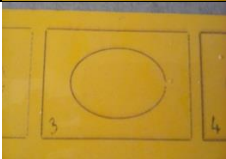
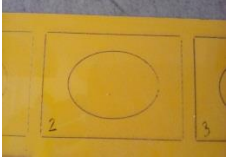
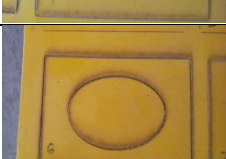
Поређењем добијених резултата може се закључити да се брзине резања при 1 бар и 3 бара не разликују, такође паљења су готово идентична при оба притиска. Приликом резања плаве PVC налепнице примећује се како при тритиску од 1 бар тако и при притиску од 3 бара приликом достизања брзине од 90 mm/s при снази од 18 % ласер не постиже да изреже углове који су у овом случају под 90°. На основу резултата закључујемо да приликом примене оба притиска резултати су идентични, самим тим избор притиска нема велики значај за резање PVC налепнице.

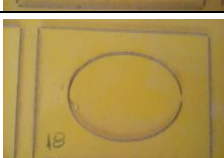
PVC налепница – жута

Табелом 14 приказани су добијени резултати резања жуте PVC налепнице са притиском од 1 бар, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

Табела 14. Добијени резултати са сликама уз коментаре

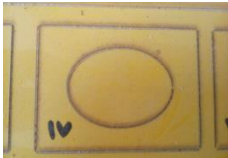
Број	Снага, [%]	Брзина, [mm/s]	Притисак, [bar]	Време, [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
5.	15	11	1	23		Просечен о без трагова паљења	

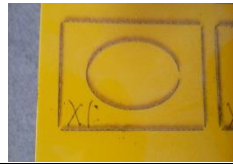
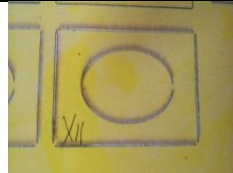
4.	15	20	1	13		Просечен о без трагова паљења	
3.	15	30	1	10		Просечен о без трагова паљења	
2.	15	40	1	8		Просечен о без трагова паљења	
1.	15	50	1	6			Није просечен о
10.	18	11	1	23		Просечен о без трагова паљења	
9.	18	20	1	13		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	18	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
7.	18	50	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	
6.	18	60	1	6			Није просечен о
13.	21	30	1	10		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	21	40	1	8		Просечен о са малим траговима паљења	

11.	21	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
20.	21	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
21.	21	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
22.	21	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
23.	21	90	1	4			Има сечења али углове не сече
14.	24	50	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
15.	24	60	1	6		Просечен о са малим траговима паљења	
16.	24	70	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
17.	24	80	1	5		Просечен о са малим траговима паљења	
18.	24	90	1	4		Просечен о са малим траговима паљења	
19.	24	100	1	3			Има сечења али углове не сече

Табелом 15 приказани су добијени резултати резања жуте PVC налепнице са притиском од 3 бара, такође и слика за сваку промену параметара ласера уз коментар.

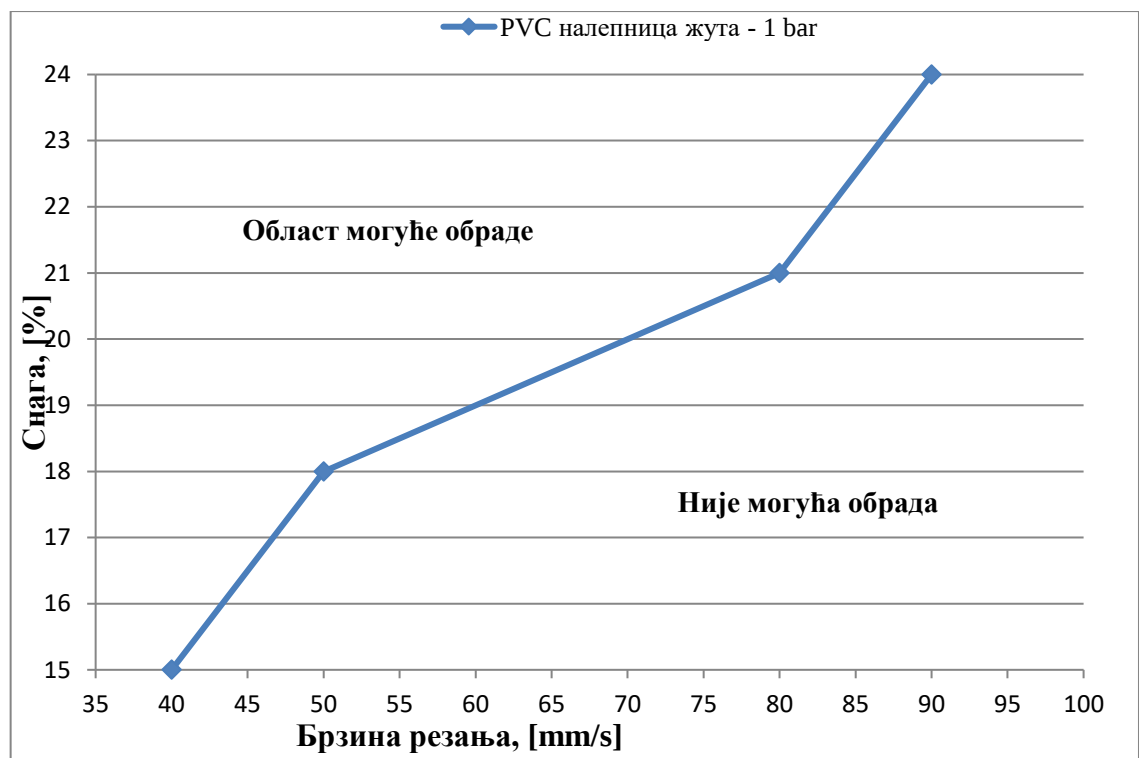
Табела 15. Добијени резултати са сликама уз коментаре

Број	Снага , [%]	Брзина , [mm/s]	Притисак , [bar]	Време , [s]	Слика	Добар	Лош
Висина = -2.5							
1.	15	40	3	8		Просечен о без трагова паљења	
2.	15	30	3	10		Просечен о без трагова паљења	
3.	15	50	3	6			Није просечен о
4.	18	50	3	8		Просечен о са малим траговима паљења	
5.	18	40	3	10		Просечен о са малим траговима паљења	
6.	18	60	3	6			Није просечен о
7.	21	80	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
8.	21	70	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
9.	21	90	3	4			Има сечења али углове не сече
10.	24	90	3	4		Просечен о са малим паљењем	

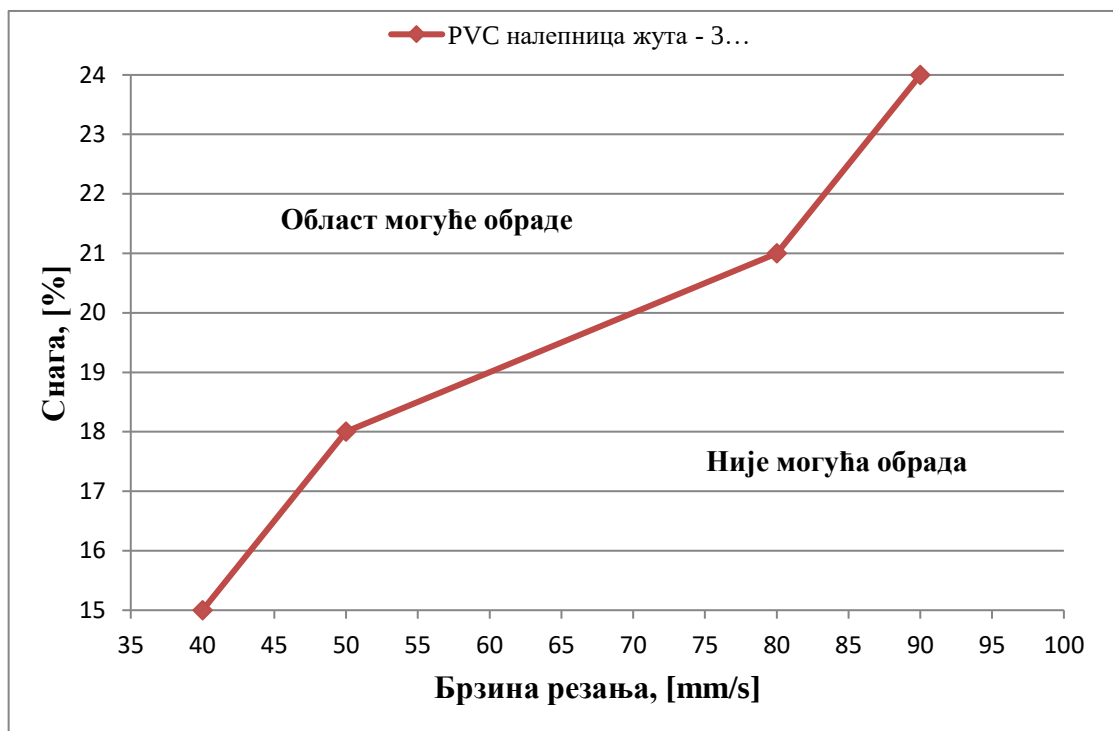
11.	24	80	3	5		Просечен о са малим траговима паљења	
12.	24	100	3	3			Има сечења али углове не сече

На основу добијених резултата на *дијаграму 16.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 1 bar, на *дијаграму 17.* је дат графички приказ сечења папира за притисак од 3 bar и на *дијаграму 18.* је дато поређење резултата.

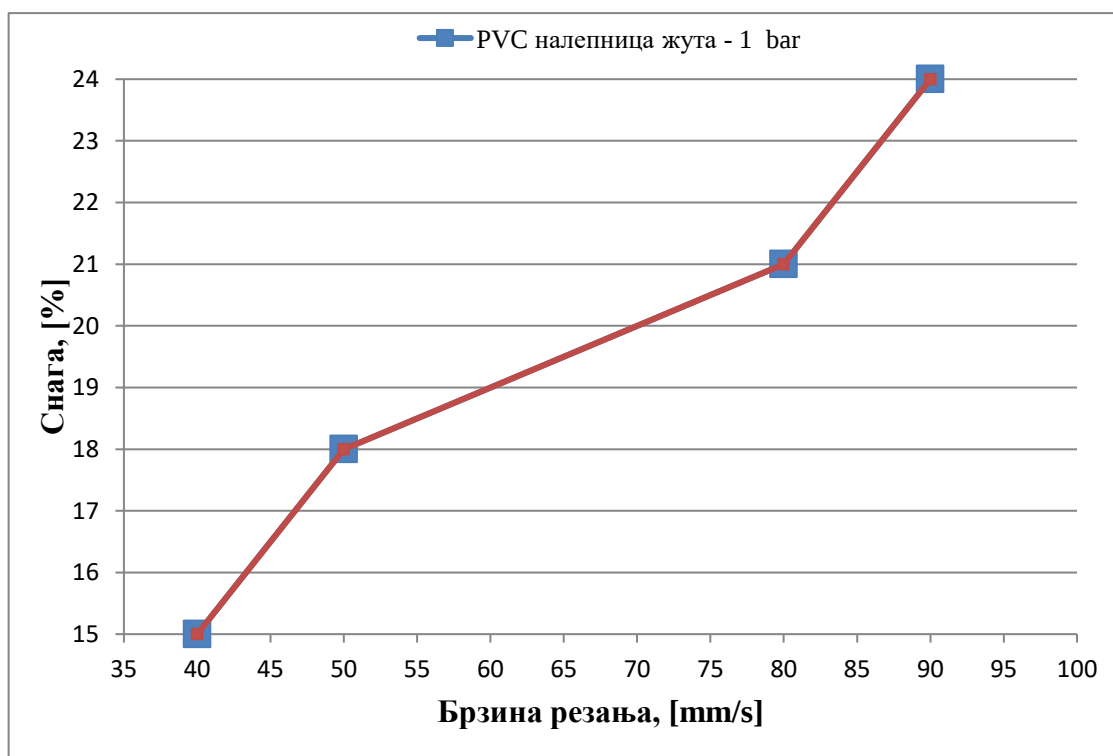
Дијаграм 16. Графички приказ добијених резултата за притисак од 1 bar



Дијаграм 17. Графички приказ добијених резултата за притисак од 3 bara



Дијаграм 18. Графички приказ поређења резултата

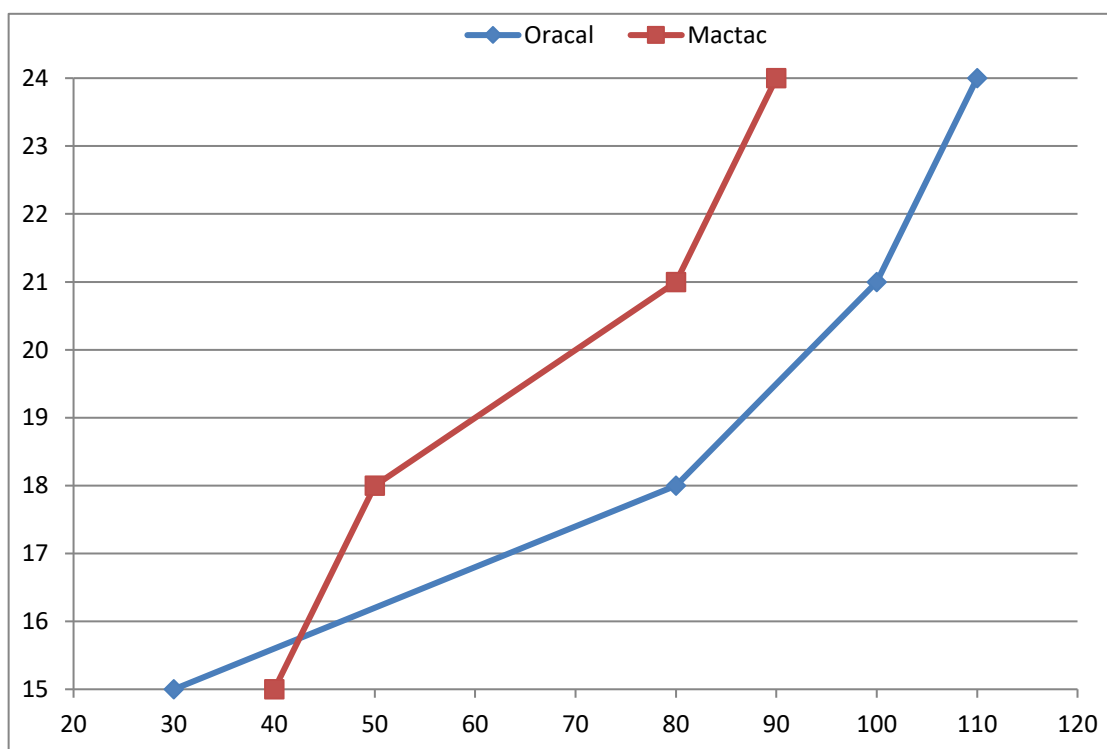


Поређењем добијених резултата може се закључити да се брзине резања при 1 bar и 3 bara не разликују, такође пађења су готово идентична при оба притиска. Приликом резања жуте PVC налепнице примећује се како при тритиску од 1 bar тако и

при притиску од 3 бага приликом достизања брзине од 90 mm/s при снази од 18 % ласер не постиже да изреже углове који су у овом случају под 90°. На основу резултата закључујемо да приликом примене оба притиска резултати су идентични, самим тим избор притиска нема велики значај за резање PVC налепнице.

Када упоредимо резултате добијене за црвену PVC налепницу и плаву PVC налепницу примећујемо да не постоји разлика у добијеним резултатима. То нам говори да су њихове карактеристике исте само се разликује боја. Док када упоредимо резултате жуте PVC налепнице са црвеном или плавом примећујемо разлику у брзинама резања. На изглед све три налепнице делују идентично али постоји разлика у произвођачу. Жуту налепницу производи фирма „Mactac“ док плаву и црвену налепницу производи фирма „Oracal“. Овим се дошло до закључка да брзина резања зависи од произвођања PVC налепнице, што се види на *дијаграму 19*.

Дијаграм 19. Поређење добијених резултата за различита произвођача



6. Закључак

Откриће и сама примена ласера у технологијама обраде убрзава развој технологија, како у садашњости тако вероватно и у будућности. Примена ласера омогућава бржу, лакшу и ефикаснију обраду готово свих материјала па тако и папира.

Обада ласером се одликује високом прецизношћу и тачношћу обраде, великом брзином обраде, високим квалитетом обрађене површине, и широким спектром материјала који се могу обрађивати.

Под дејством ласерског зрака на предмету обраде не долази до структурних и хемијских промена.

Што се тиче резања папирних материјала, ласерско сечење има предност над основним начинима сечења папира због веће прецизности и знатно ужег реза, као и веће продуктивности. Прецизност резања ласера је боља самим тим што се ласерски зрак не троши са временом. Ласерско резање папирних материјала смањује могућност појаве деформација. Не појављују се велика концентрација топлоте око самог реза што је веома битно код папирних материјала јер су подложни сагоревању.

Експерименталним испитивањем је утврђено како режими обраде имају утицај на квалитет резања папирних материјала. Одређивање оптималних режима обраде је веома битно са аспекта квалитета обрађених делова али такође и са аспекта економичности.

Експеримент је показао да на папирном и картонском материјалу велики утицај има радни притисак. У овом случају се види знатна разлика између притисака од 1 bar и 3 bara. Притисак од 3 bara ствара много мања паљења него притисак од 1 bar, такође код притиска од 3 bara могу се остварити веће брзине резања за исту снагу него код притиска од 1 bar. Код материјала као што су налепнице и фолије притисак не утиче на повећање брзине резања и паљења око реза.

7. Литература

- [1] Alexandar Stepanov, Feasibility of industrial implementation of laser cutting into paper making machines, скрипта, Lappeenranta University of Technology, Финска 2015
- [2] B. Nedić, M. Lazić, Производне технологије, скрипта, Машински факултет, Крагујевац, 2007
- [3] M. Lazić, Конвенционални поступци обраде, књига, Машински факултет, Крагујевац, 2002,
- [4] Milan Brandt, Erol Harvey, Laser cutting: from first principles to the state of the art, скрипта, Велика Британија, 2004,
- [5] Stevica Todorović, Историјат развоја ласера, дипломски рад, ПМФ-одсек за физику, Нови Сад, 2004,
- [6] Tisijana Ban, Ласери у знаности и технологији, семинар за ученике и наставнике, Институт за физику, Загреб, 2008,
- [7] M. Radovanović, Аутоматизовано пројектовање технологије обраде ласером, Машински факултет, Ниш, 1995,
- [8] Roman Balinović, Обрада ласером, завршни рад, Стројарки одсек, Карловац, 2016,
- [9] <https://www.arpel.rs/rs/index.html>, приступљено 08. 09. 2017.
- [10] <https://documents.tips/documents/seminarski-laseri.html>, приступљено 20. 09. 2017.
- [11] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Co2_laser_funktionsprinzip.svg, приступљено 09. 09. 2017.
- [12] <http://www.imgrum.org/tag/rubycrystal>, приступљено 09. 09. 2017.
- [13] <http://www.physics-and-radio-electronics.com/physics/laser/ndyaglaser.html>, приступљено 11. 09. 2017.
- [14] <http://www.synertek.ca/en/knowledge/cutting-laser/>, приступљено 12. 09. 2017.