

Универзитет у Крагујевцу
Факултет Инжењерских Наука у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 396/2015

Александар Ч. Радовић

ПОРЕЂЕЊЕ ПОСТУПАКА СЕЧЕЊА ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **др Богдан Недић, ред. проф.**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да размотри проблематику обраде ласером и плазмом, изврши теоријску анализу поступака обраде сечењем. Кандидат треба да опише производну опрему којом располаже предузеће „Унипромет“ Чачак и да изврши експериментална испитивања. У посебном делу рада потребно је извршити израду узорака у различитим условима и извршити мерење квалитета обраде.

Мастер рад треба да садржи:

1. Уводна разматрања,
2. Теоријска анализа процеса обраде ласером и плазмом
3. Преглед и анализа поступка обраде ласером и плазмом
4. Опрема за обраду ласером и плазмом
5. Експериментална испитивања,
6. Закључци,
7. Литература.

Крагујевац, новембар, 2017. године

Ментор:

Проф. др Богдан Недић

РЕЗИМЕ

Ласером и плазмом се могу сећи било који материјали, уз формирање реза различитих конфигурација, а све то прати висока производност која не зависи од механичких особина материјала.

Ласером се могу сећи материјали дебљине до 30мм, док плазма поступком постоји могућност сечења материјала дебљине 250÷300мм. Процес сечења се заснива на локалном топљењу метала у зони резања и уклањању растопљеног материјала. Међутим интеграцијом технологије сечења ласером и плазмом и CNC технологије добија се далеко софистициранији технички систем, потпуно контролисан информационим технологијама и стандардним CAD/CAM софтверима.

У раду је описан принцип рада сечења ласером и плазмом, као и сам поступак сечења. Извршен је и експеримент сечења различитим радним параметрима.

Кључне речи: ласер, плазма, сечење, CNC технологија, радни параметри

ABSTRACT

Laser and plasma can be cut any materials, with the formation of cuts of different configurations, all of which are accompanied by high productivity that does not depend on the mechanical properties of the material.

The laser can cut materials up to 30mm thick, while the plasma process has the possibility of cutting the material with a thickness of 250-300mm. The cutting process is based on the local melting of the metal in the cutting zone and removal of the melted material. However, the integration of laser and plasma cutting technology and CNC technology produces a much more sophisticated technical system, fully controlled by information technology and standard CAD / CAM software.

The paper describes the principle of cutting laser and plasma cutting, as well as the cutting process itself. A cutting experiment was performed with different operating parameters.

Key words: laser, plasma, cutting, CNC technology, operating parameters

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА.....	1
2. СУШТИНА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ	6
2.1 Суштина процеса обраде ласером.....	6
2.1.1 Чврсти ласери	7
2.1.2 Течни ласери.....	7
2.1.3 Гасни ласери	7
2.2 Суштина процеса обраде плазмом	9
3. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ПОСТУПКА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ.....	14
3.1 Преглед и анализа поступка обраде ласером	14
3.1.1 Отврдњавање ласером	14
3.1.2 Заваривање ласером.....	15
3.1.3 Бушење ласером	16
3.1.4 Сечење ласером	17
3.2 Преглед и анализа поступка обраде плазмом	20
3.2.1 Поступци резања плазмом	20
3.2.2 Плазма резање без додатног гаса.....	21
3.2.3 Плазма резање са додатним гасом.....	21
3.2.4 Плазма резање са убризганом водом	24
3.2.5 Поступак резања плазмом под заштитом воде.....	25
3.2.6 Поступак резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука	25
3.2.7 Заваривање плазмом	27
3.2.8 Уређаји за заваривање плазмом.....	27
3.2.9 Поступци заваривања плазмом.....	28
3.2.10 Додатни материјал за заваривање плазмом.....	29
3.2.11 Наношење превлака	29
4. ОПРЕМА ЗА ОБРАДУ ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ	31
4.1 Опрема за обраду ласером	31
4.1.1 Делови ласерске машине.....	31
4.1.2 Управљање машином	31
4.1.3 Глава ласера (глава засечење).....	32

4.1.4 Покретана јединица	33
4.1.5 Резонатор	34
4.2 Опрема за обраду плазмом	35
4.2.1 Спс машина за сечење плазмом.....	35
4.2.2 Опис техничког система.....	36
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	41
5.1 План испитивања	42
5.2 Испитивања на ласеру.....	44
5.3 Дијаграми средњег аритметичког одступања од средње линије профила код сечења ласером	50
5.4 Испитивања на плазми	51
5.5 Дијаграми средњег аритметичког одступања од средње линије профила код сечења плазмом.....	57
6. ЗАКЉУЧАК.....	58
7. ЛИТЕРАТУРА.....	59

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Техничко-технолошки напредак и константно развијање великог броја различитих техника као што су авионска, нуклеарна, рачунарска и друге технике, довео је до незауставног развоја производње и примене новијих материјала. То су материјали знатно бољих механичких и триболошких карактеристика, велике затезне чврстоће и тврдоће, високе отпорности на високим и ниским температурама, као и материјали знатно веће отпорности на хабање и сличне појаве.

Класичним поступцима обраде је знатно теже обрађивати новије материјале а често је то и немогуће, па се из тог разлога паралелно развијају, усавршавају и уводе нови прогресивни поступци обраде веће продуктивности и економичности обраде метала.

Константан развој нових и усавршавање постојећих поступака обраде условио је појаву великог броја различитих поступака разврстаних у две основне групе као што су поступци механичке обраде (обрада метала резањем и деформисањем) и неконвенционални поступци обраде (основни и комбиновани) са и без уклањања вишка материјала [1].

Што се поступака механичке обраде тиче, читава технологија се бави проучавањем проблематике израде и обликовања готових делова механичким путем односно деловањем алата на предмет обраде [1].

Поступци механичке обраде се деле на:

- Поступке са уклањањем вишка материјала (са скидањем струготине) и
- Без уклањања вишка материјала (без скидања струготине).

Обрада без скидања струготине обезбеђује обраду и обликовање без или са незнатним уклањањем вишка материјала.

То су поступци:

- Обраде ливењем;
- Обраде спајањем;
- Обраде деформисањем.

Обрада са скидањем струготине подразумева поступке обраде код којих се обликовање остварује уклањањем вишка материјала а то су следећи поступци:

- Браварски радови - ручна обрада (сечење, турпијање ...);
- Обрада метала резањем.

Обрада метала резањем је поступак обликовања уклањањем вишка материјала механичким путем алатима, најчешће знатно веће тврдоће од тврдоће материјала предмета обраде.

Основни поступци обраде метала резањем су: стругање, бушење, глодање, тестерисање (одсецање), рендисање, провлачење, брушење и глачање (леповање, суперфиниш, хоновање и полирање) [1].

Ови поступци се међусобно разликују по геометријском облику резних алата и кретањима при обради. Систем за обраду резањем чине радни предмет, резни алат, машина алатка и прибор. Главно кретање код ових поступака обраде може бити кружно или праволинијско и њиме се директно обезбеђује образовање струготине, док помоћно кретање такође може бити кружно и праволинијско и њиме се обезбеђује да се процес образовања струготине одвија континуално.

Негативни утицаји механичких поступака обраде на животну и радну средину огледају се у виду буке и вибрација, стварању струготине и честичне прашине односно продуката обраде као и примена средстава за хлађење и подмазивање и других испарљивих материја.

Као неке од заштитних мера за решавање ових недостатака могу се навести примена склоништа као заштита од буке, постављање машина на одговарајуће ослонце, измена конструкције машина, аутоматизација процеса, коришћење мање штетних средстава за подмазивање на бази биљака или водених раствора итд.

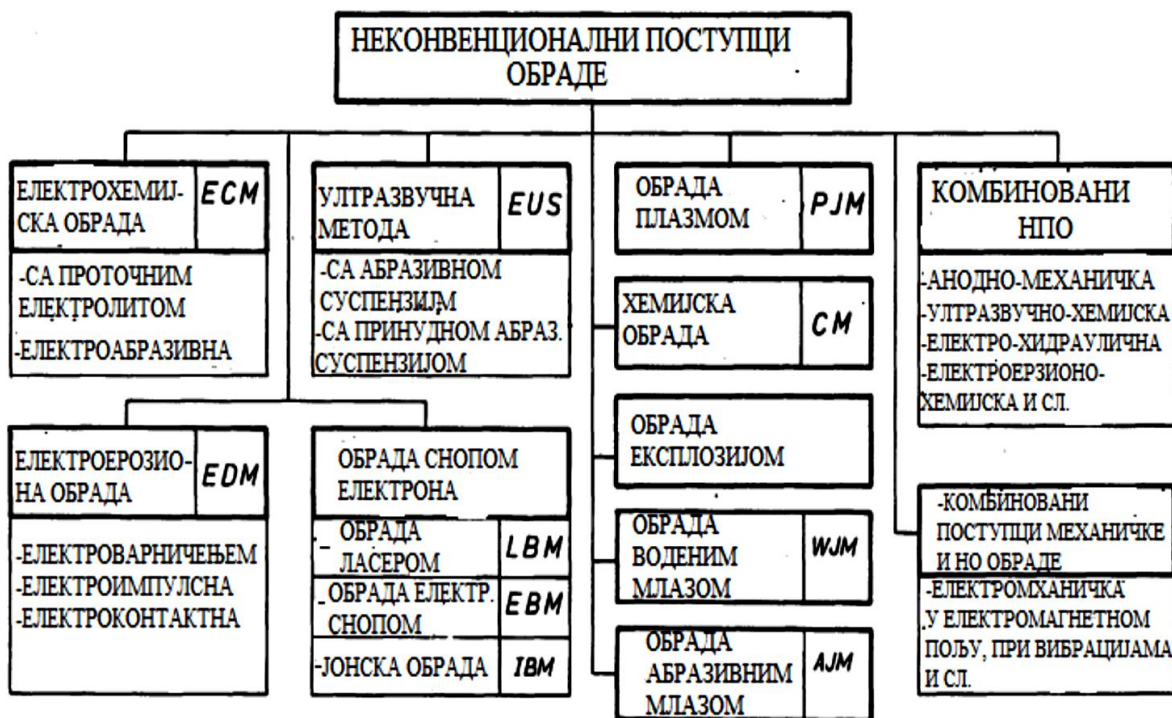
Неконвенционални поступци обраде - НПО су поступци обликовања уклањањем вишка материјала различитим физичко-хемијским механизмима, коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне и других видова енергије [2].

Најчешће се неконвенционални поступци разврставају према врсти енергије и типу уклањања вишка материјала па тако имамо поделу на следеће поступке:

- 1) Обрада ласером (LBM);
- 2) Обрада плазмом (PJM);
- 3) Обрада воденим млазом (WJM);
- 4) Обрада абразивним млазом (AJM);
- 5) Електрохемијска обрада (ECM);
- 6) Електроерозиона обрада (EDM);
- 7) Ултразвучна обрада (EUS);
- 8) Обрада електронским снопом (EBM);
- 9) Хемијска обрада (CM);
- 10) Обрада експлозијом;
- 11) Електромеханичка обрада;
- 12) Анодномеханичке обраде;

- 13) Электрогидрауличне обраде;
- 14) Обраде у електромагнетном пољу;
- 15) Комбиновани поступци обраде.

Доста сложенија и прецизнија подела неконвенционалних поступака обраде дата је на слици 1.1.



Слика 1.1 Једна од подела неконвенционалних поступака обраде [2]

Када бисмо направили паралелу између конвенционалних и неконвенционалних поступака обраде, могли бисмо да издвојимо велики број предности које неконвенционални поступци имају у односу на старије поступке обраде.

Неке од најважнијих предности су следеће:

- Одсуство потребе за постојањем алата веће тврдоће од тврдоће материјала обрадка;
- Могућност обраде изузетно сложених површина;
- Могућност обраде тешко обрадљивих материјала;
- Практично нема контакта и механичких сила између алата и обрадка;
- Независност квалитета обрађене површине и производности од механичких својстава материјала обрадка (тврдоћа, жилавост, ..);
- Значајно је смањење одстрањеног материјала у односу на конвенционалне поступке обраде итд. [2].

Такође, ови поступци обраде имају и своје мане а неке од најбитнијих су:

- Релативно мала производност у односу на конвенционалне поступке обраде;

- Висок утрошак енергије по јединици запремине;
- Висока цена машина на којима врши обрада [2].

Као и код конвенционалних поступака, и неконвенционални поступци обраде имају негативан утицај на животну и радну средину који се огледа у манипулацији са опасним материјама, опасном зрачењу углавном за очи, испарењима елемената материјала који се обрађује (појава паре и гасова), у појави буке и вибрација, појави металних честица и металне прашине, као и појави високих температура у процесу обраде.

Заштитне мере за смањење негативних утицаја код ових поступака су доследно придржавање сигурносних прописа, примена заштитних помоћних средстава, аутоматизација и роботизација процеса обраде итд.

За разлику од конвенционалних поступака обраде резањем, већина неконвенционалних поступака обраде је касније развијена и уведена у производну праксу. Данас многи неконвенционални поступци обраде су достигли висок степен развоја, који не заостаје ни за најразвијенијим конвенционалним поступцима обраде резањем, док у неким случајевима их и надмашују. Слободно се може рећи да неконвенционални поступци обраде све више потискују конвенционалне поступке обраде резањем, због тога што су економичнији и што дају много боље резултате саме обраде у погледу тачности и квалитета [2].

CNC машине за сечење ласером и плазмом представљају технички систем настао интеграцијом CNC технологије и технологије сечења плазмом. CNC машине за сечење ласером и плазмом су машина које раде у 2D координатном систему и са њима се могу сећи како обојени метали тако и разне врсте челика, прохромских лимова са великом прецизношћу, брзином и са минималном количином отпада. Сечење ласером и плазмом је веома заступљен поступак обраде у скоро сваком процесу производње где је потребно исећи материјал прецизно.

Машине одликује велика прецизност рада са минималним топлотним утицајем на материјал који се сече. Коришћењем ових машина постиже се уштеда у процесу производње, како квалитетом исеченог обрадка који је спреман за даљи процес производње, тако и смањењем шкарта код сечења.

CNC машине за сечење ласером и плазмом се у потпуности управљају компјутером, па самим тим је утицај људске грешке код сечења далеко мањи, а самим тим и појава шкарта у процесу производње. Употребом CNC машина остварује се технолошки најекономичнији процес сечења метала у погледу брзине, прецизности и цене реза.

Руковање овим машинама је веома једноставно захваљујући софистицираном софтверу и управљачкој јединици, а кројне листе се увозе из свих стандардних CAD програма. Савременији модели ових машина опремљени су ТНС уређајем који пружа могућност кретања по Z-оси, и на тај начин обезбеђује аутоматску калибрацију висине горионика приликом сечења чиме се елиминише проблем неравних табли.

У другом поглављу рада описана је анализа процеса обраде ласером и плазмом. Описан је принцип рада машина за сечење ласером и плазмом и описана је суштина процеса.

У трећем поглављу рада детаљно су описани процеси обраде ласером и плазмом.

У четвртном поглављу рада детаљно су приказани делови машина, приказано је испитивање утицаја снаге и брзине резања на квалитет обрађене површине код сечења ласером и плазмом. Испитивање је вршено на дванаест узорак. Сечење је изведено у три различите снаге и три различите брзине. За сваки узорак су дате фотографије из више углова као и дијаграми за утицај задатих параметара на средње аритметичко одступање од средње линије профила, као и табеле за добијене димензије комада са горње и доње стране и за максималну висину неравнина.

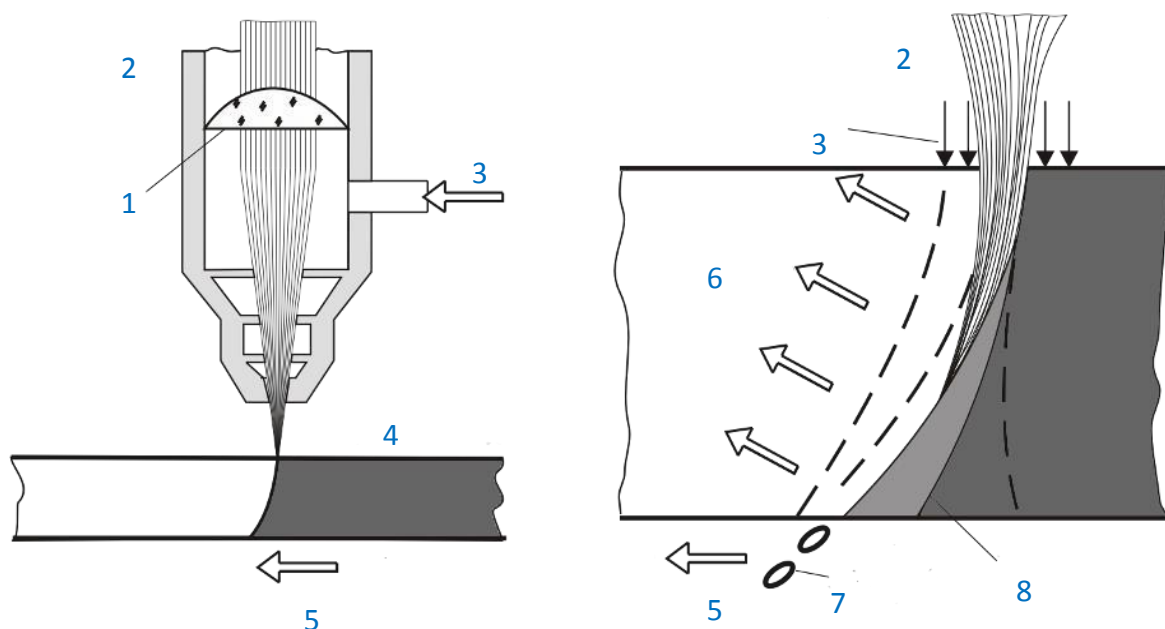
У петом поглављу су приказани закључци и резултати свих испитивања спроведених током овог рада.

2. СУШТИНА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ

2.1 Суштина процеса обраде ласером

Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. То је у суштини монохроматични, кохерентни и конвергентни сноп електромагнетног зрачења са таласним дужинама од ултраљубичасте до инфрацрвене.

Принцип рада ласера базира се на својству емитера-активне средине (чврсто тело, течност, гас) да у кратком временском интервалу, од неколико милисекунди емитије у облику светлосног зрачења део претходно уложене енергије. Уклањање материјала из жељене зоне при обради ласером се остварује апсорпцијом концентрисаног светлосног зрачења у предмет обраде који се при томе загрева до температуре од 5500°C. Услед високих температура долази до тренутног топљења и испаравања материјала (слика2.1).



Слика 2.1 Принципијелна шема: 1-Сочиво за фокусирање, 2-Ласерски сноп, 3-Радни гас, 4-Предмет обраде, 5-Вр, 6-Испаравање материјала, 7-Честица материјала, 8- Разгрејана зона [10]

Ласери се деле:

- Према агрегатном стању (чврсти, течни и гасни)
- Према режиму рада (импулсни и континуални)
- Према начину побуђивања (са оптичким побуђивањем, побуђивање електричним пражњењем, побуђени хемијском реакцијом, побуђени снопом честица велике енергије)
- Према спектру генерисања (инфрацрвеној светлости, видљивој светлости, ултра љубичастој светлости)

2.1.1 Чврсти ласери

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

Подела чврстих ласера:

- Рубински
- Стаклени
- Полупроводнички
- Nd:YAG

2.1.2 Течни ласери

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

- Ласери на бази неорганских једињења
- Ласери на бази органских једињења

2.1.3 Гасни ласери

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

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

Један од најпримењенијих ласера је CO₂ ласер, због своје ефикасности која је знатно већа него код других типова ласера.

Гасни ласери представљају све ласерске системе код којих је радна или активна супстанца у гасовитом агрегатном стању, без обзира да ли је гас атомски, молекулски или јонски. Ови типови ласера су веома често примењивани јер су лаки за коришћење и једноставне су конструкције. Могу да се користе за побуду пражњења кроз гас, радио таласе, оптичко побуђивање помоћу других ласера па чак и снопове електрона.

Најчешће се ласерски систем састоји од керамичке или стаклене цеви у коју је смештен гас. Ови ласери могу да раде у континуалном и пулсном режиму рада.

CO₂ ласери емитују светлост таласне дужине 10,6 μm те имају укупну ефикасност отприлике 10 до 13%. За стварање ласерског зрака CO₂ користе мешавину гасова. Мешавина се састоји од хелијума, азота, CO₂ и других додатака. Активни медиј ласера, гас CO₂ је стимулисан електричним пражњењем. Током тог процеса молекули азота предају енергију од судара електрона молекулима CO₂. Прелаз из вишег енергетског нивоа побуђених CO₂ молекула у нижи енергетски ниво се постиже отпуштањем фотона, што доводи до стварања ласерског зрака. Сударањем молекула CO₂ са атомима хелијума који чине већински део гасне смеше, молекули C се враћају у своје почетно енергетско стање и спремне су за понављање циклуса. Да би се ти процеси могли одвијати потребан је притисак од 10 до 25 kPa. Вишак енергије који не може бити употребљен за стварање ласерског зрака се претвара у топлоту која се одводи из система.

Код резања ласером обично је дебљина ласерског зрака мања од 0,3 mm, а могуће је остварити дебљину резања мању од 0,1 mm. Код резања треба напоменути да прво треба избушити отвор кроз материјал, а за то се користи велика снага ласера. Поступак бушења обично траје од 5 до 15 секунди за плоче од нерђајућег челика дебљине 14 mm. Ласерски зрак на излазу је паралелан и дебљине је од 1,5 до 12,5 mm. Након фокусирања помоћу сочива и огледала ласерски зрак се доводи на веома малу дебљину која је понекад 0,025 mm. На тај начин се добија ласерски зрак великог интензитета.

Ласер користи као активни медијум одговарајућу мешавину CO₂, N₂ и He. Осцилације се одвијају на два различита вибрирајућа нивоа молекула CO₂, док N₂ и He знатно побољшавају ефикасност ласера. CO₂ ласер је један од најмоћнијих ласера (излазна снага виша од 100 KW) и један од најефикаснијих (15-20%) [8].

Тело CO₂ ласера се састоји од стаклене цеви која је испуњена смешом гасова (угљен диоксида, хелијума, азота и евентуално још неких гасова), при чему активну средину чине молекули CO₂. На крајевима цеви се налазе два паралелна огледала која рефлектују снагу ласера и тако формирају резонатор. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон.

Висок напон производи велику количину брзих електрона у цеви, који својим сударима предају енергију молекулима гаса. Молекул азота у побуђеном стању не може предати своју енергију емисијом фотона јер нема диполни момент, а његове вибрације не показују временску промену диполног момента. Због тога су побуђена вибрацијска стања азота метастабилна. Сударима молекул азота предаје енергију молекулима CO₂. Енергија вибрације молекула азота је приближно једнака енергији антисиметричног истезања молекула угљен-диоксида.

Повећање температуре гаса на ласерско тело које доводи до електричног пражњења, води ка изразитом смањењу излазне снаге, због чега је потребно интензивно хлађење гасне смеше.

Према начину хлађења, CO₂ ласери се деле на [9]:

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

При дифузном хлађењу, гасна смеша се хлади хлађењем ласерског тела, а при конвенционалном хлађењу, изменом гасне смеше у ласерском телу а потом њеним хлађењем [9].

Према начину протока гасне смеше низ оптички резонатор и према правцу електричног пражњења низ гасни флуид, разликују се више врста CO₂ ласера [26]:

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

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

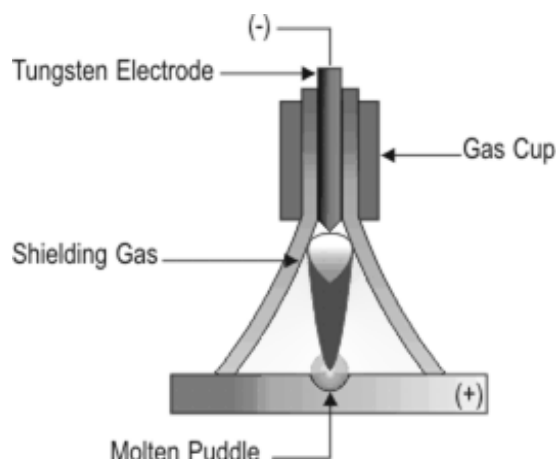
Ефикасност CO₂ ласера је знатно изнад оне која се креће код других типова ласера. Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина [9].

2.2 Суштина процеса обраде плазмом

Историјски развој:

У Сједињеним Америчким Државама 1941 год. Настаје нови поступак спајања лаких метала. Користи се у производњи авиона. Електрични лук обезбеђује топлетење метала, док инертни гас обезбеђује заштиту самог лука. Резервоар растопљеног метала спречава оксидацију растопљеног метала. Нови поступак је добија име ТИГ (Тунгстен Инертан Гас/Тунгстен-Волфрам)поступак.

Средином прошлог века ТИГ поступак се усталио као нови високо квалитетни метод заваривања. Међутим развојем ТИГ поступка у лабораторијама америчке компаније "Union Carbide's Linde Division" научници су приметили да се редуковањем млазнице, уз излагање предмета обраде (анодe) директном дејству инертног гаса из ТИГ горионика, својства лука битно мењају. Редукована млазница доводи до сужења и концентрације лука и гаса и повећања њихове брзине. Температура лука и напон расту драматично, што доводи до јонизације и померања металног праха ка области већих брзина. Уместо заваривања, метал је пресечен луком плазме.



Слика 2.5 Шема сечења плазмом

Резање плазмом је започело педесетих година прошлог века, да би се од 1957. почео примењивати такозвани суви поступак. Користио је врло скупе мешавине аргона и водоника, које су пролазиле поред волфрамове електроде, и кроз млазницу би се плин сабијао. Волфрамова електрода је била негативна катода, а радни комад је био позитивна анода. Пиштољ за резање се морао поставити што је могуће ближе радном предмету. Недостатак је била појава косих и заобљених ивица реза, због расипања топлотне енергије на врху лука. Обично су се резали лимови до 50 mm.

Од 1962. године се почело са применом лука плазме са дуалним током. Код овог типа резања, додат је секундарни гас око млазнице с плазмом. Секундарни плин је покривао зону резања и побољшавао квалитет и брзину резања, а такође је и хладио млазницу и керамичку заштиту. Обично се за резање користио азот, а секундарни плин је зависио од материјала који се реже, рецимо кисеоник за меке челике, угљен диоксид за нерђајуће челике, затим аргон/водоник за алуминијум итд. Брзина резања је била боља за меке челике, али не и за нерђајуће челике и алуминијум. Ни квалитет реза није био задовољавајући за све примене.

Од 1965. године се започело резање плазмом с воденом заштитом, која је слична техници с дуалним током, али се уместо заштитног плина користила вода. Изглед реза и век млазнице су побољшани због ефекта хлађења водом.

Од 1977. године се развило резање плазмом испод воде, које користи велике снаге са јачином струје изнад 100 A, које је постало врло популарно. Радни комад се потапао под воду на дубину од 50 до 75 mm, па се онда вршило резање. Предност је била у томе што је смањена бука, елиминисано је стварање дима и бљесак електричног лука је значајно смањен. Недостатак је био смањење брзине резања, немогућност оцене квалитета резања по звуку плазме, као и разлагање воде на водоник и кисеоник. Кисеоник тежи да се спаја с растављеним металом (осим код алуминија и лаких метала), па се стварају метални оксиди. Водоник остаје у води, па се вода мора стално мешати, да не дође до накупљања водоника и малих експлозија у додиру с плазмом.

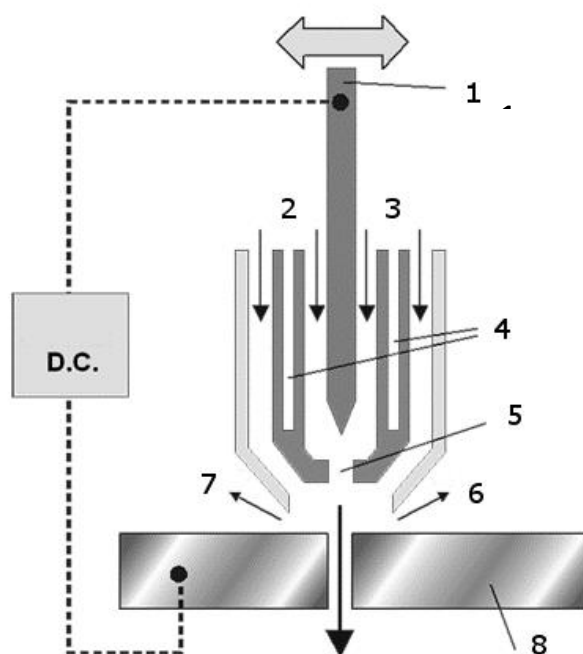
Од 1985. постоји и поступак резање плазмом с убризгавањем кисеоника. За резање се користи азот, а кисеоник се убризгава на излазу из млазнице. Искључиво се

користио за меке челике и нешто је повећао брзине резања. Недостатак је неправилан облик резања и ограничена примена.

Од деведесетих година па до почетка новог миленијума обрада метала плазмом и неконвенционалним поступцима уопште доживела је велики напредак. Данас, савремене производне услове карактерише све шира примена машина за обраду плазмом.

Ту су машине и најновији различити поступци који обезбеђују обраду најтеже обрадивих материјала уз изузетно подизање нивоа продуктивности и економичности као и знатно ширу примену нових материјала, што ће детаљно бити објашњено и обрађено у једном од наредних поглавља овог рада.

Обрада плазмом се у савременим производним условима користи за реализацију производних операција које захтевају високу концентрацију топлотне енергије. То су процеси топљења, заваривања, сечења метала и неметала, наношење превлака отпорних на хабање, како на металне тако и на неметалне површине, итд. Плазма је у суштини свака материја загрејана на високу температуру довољну да се претвори у јонизовано гасно стање (четврто агрегатно стање). У таквом стању материја се понаша по законима карактеристичним за нормалне гасове, а њене основне карактеристике су: веома висока температура појединих зона, енергетска нестабилност, електро-проводљивост, врло велика брзина кретања честица које сачињавају плазму итд. За обраду метала односно за наведене производне операције користе се тзв. „ниско-температурне“ плазме, са температуром појединих зона од 1000-100000 К, плазме које представљају делимично јонизовани гас [2].



Слика 2.2 Шема процеса формирања плазме: 1- електрода, 2 и 3- заштитни гас, 4- водено хлађење, 5- отвор за лук, 6 и 7- заштитни гас, 8- радни комад [3]

Плазма се састоји од позитивно и негативно наелектрисаних честица (јона и анјона). Пропуштањем плазма гасова (аргон, водоник, кисеоник и сл.) преко електричног лука, створеног између аноде и катоде, формира се плазма. Тако формирана материја садржи молекуле, атоме, јоне, електроне и квантне светлости. У 1 cm^3 плазме налази се око 10^9 - 10^{10} наелектрисаних честица. Јонизација је резултат губитка једног или више електрона из спољашње љуске атома плазма гасова. Губитак настаје као резултат дејства спољашњих сила изазваних високом температуром или јаким електричним пољем. То значи да плазма може бити лучна или високо-фреквентна. За процес прераде метала посебно је значајна лучна плазма [2].

Лучно пражњење односно формирање електрона плазме може бити зависно и независно. Код зависног пражњења електрични лук настаје између електроде и предмета обраде, а код независних унутар плазма уређаја, између аноде и катоде. У условима зависног пражњења предмету обраде се предаје знатно већа количина топлоте, што је посебно значајно код производних операција које захтевају одговарајуће загревање предмета обраде. Независни лук обезбеђује за 30% веће температуре лука плазме, али је интензитет топлотног флуksа нижи и до 70% [2].

Појава високих температура у плазма луку, уз велику брзину кретања честица у струји плазме, омогућује извођење низа производних операција као што су: стругање, сечење метала и неметала, израда делова различитих конфигурација од материјала у виду прага, топљење метала и сл. Под дејством високих температура плазме долази до топљења, а често и до испаравања материјала. Уклањањем растопљеног метала створени су услови за извођење одговарајућих операција.

Плазма лук са одговарајућим системом механизације и аутоматизације обезбеђује сечење материјала велике дебљине, формирање реза било које конфигурације, сечење било којих материјала, високу производност, која не зависи од механичких особина материјала итд. Плазма поступком је могуће сечење материјала дебљине и до 250-300 mm, а разликују се два основна поступка: раздвајање и површинско сечење. У основи процеса сечења је локално топљење метала и уклањање растопљеног материјала под дејством хидродинамичких сила формираних струјом плазме. Сам режим обраде одређен је јачином и напоном електричне струје, снагом лука плазме, врстом и потрошњом плазма гаса, дебљином материјала, пречником отвора млазнице и другим факторима.

Као плазма-радни гасови користе се: аргон, азот, хелијум, водоник, смеша водоника и аргона, азота и водоника, азота и кисеоника, азота и 10-30% водоника за сечење легираних челика, азота и до 50% водоника за сечење алуминијума и легура алуминијума, затим угљендиоксид, хелијум, аргон, смеша хелијума и 7% водоника, аргона и 7% водоника за заваривање и сл.

Плазмом се могу сећи било који материјал велике дебљине, уз формирање реза било које конфигурације и уз високу производност која не зависи од механичких особина материјала, могуће је сећи материјал дебљине 250 - 300 mm (слика 2.3).



Слика 2.3 Сечење плазмом [4]

Плазма се користи за извођење читавог низа производних операција од којих су најважније:

- Сечење плазмом,
- Заваривање плазмом,
- Наношење тврдих превлака,
- Ливење применом плазме,
- Обрада резањем уз помоћ плазме и
- Израда делова плазма технологијом.

На слици 2.4 приказана је машина за обраду плазмом.



Слика 2.4 Машина за обраду плазмом [5]

3. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ПОСТУПКА ОБРАДЕ ЛАСЕРОМ И ПЛАЗМОМ

3.1 Преглед и анализа поступака обраде ласером

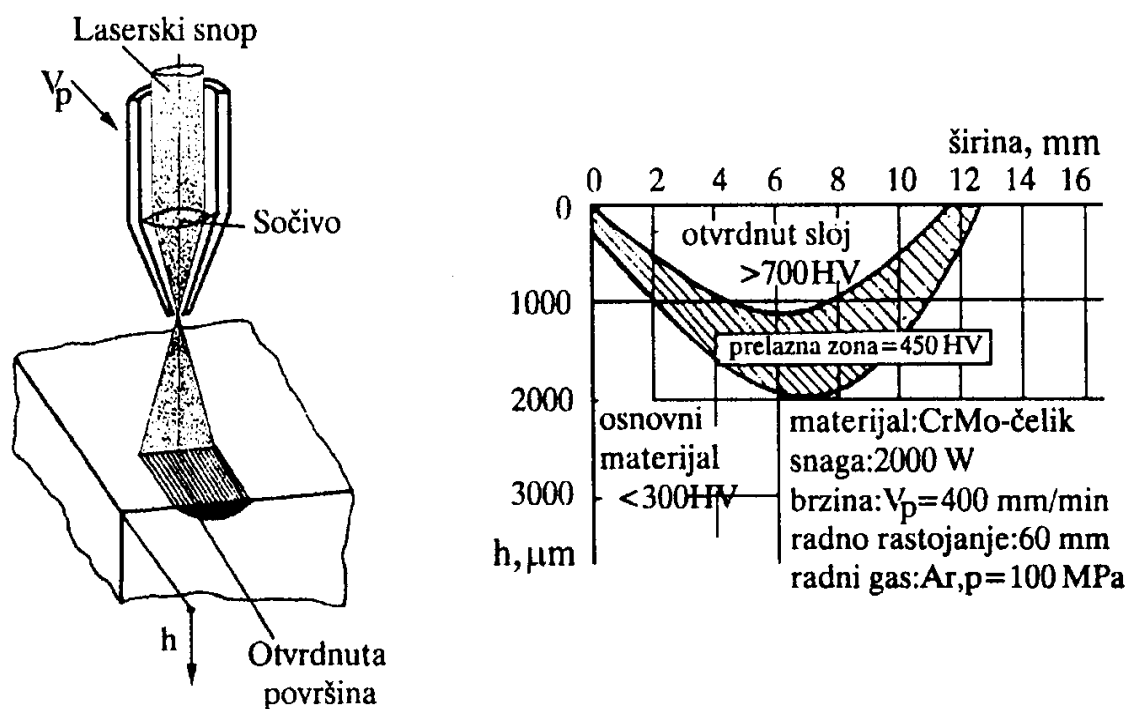
3.1.1 Отврдњавање ласером

Површинска термичка обрада или отврдњавање применом ласерског снопа (слика 3.1) је могуће како за поједине зоне (посебно изложене хабању) тако и за површине у целини, уз хлађење помоћу различитих средстава (вода, ваздух, емулазија, итд.). Карактеристике отврдног слоја (на пример, бочних површина зуба зупчаника и чеоних површина вратила) зависе од карактеристика ласерског снопа и низа других параметара, а мењају се са дужином и ширином отврдног слоја.

Основни карактеристични параметри отврдњавања ласерским снопом, у односу на индукционо каљење, су значајно повећање тврдоће површинских слојева (3-5 пута), отпорности на хабање и производности обраде за 70 –90%.

Отврдњавање површине метала ласером омогућује низ предности као што су:

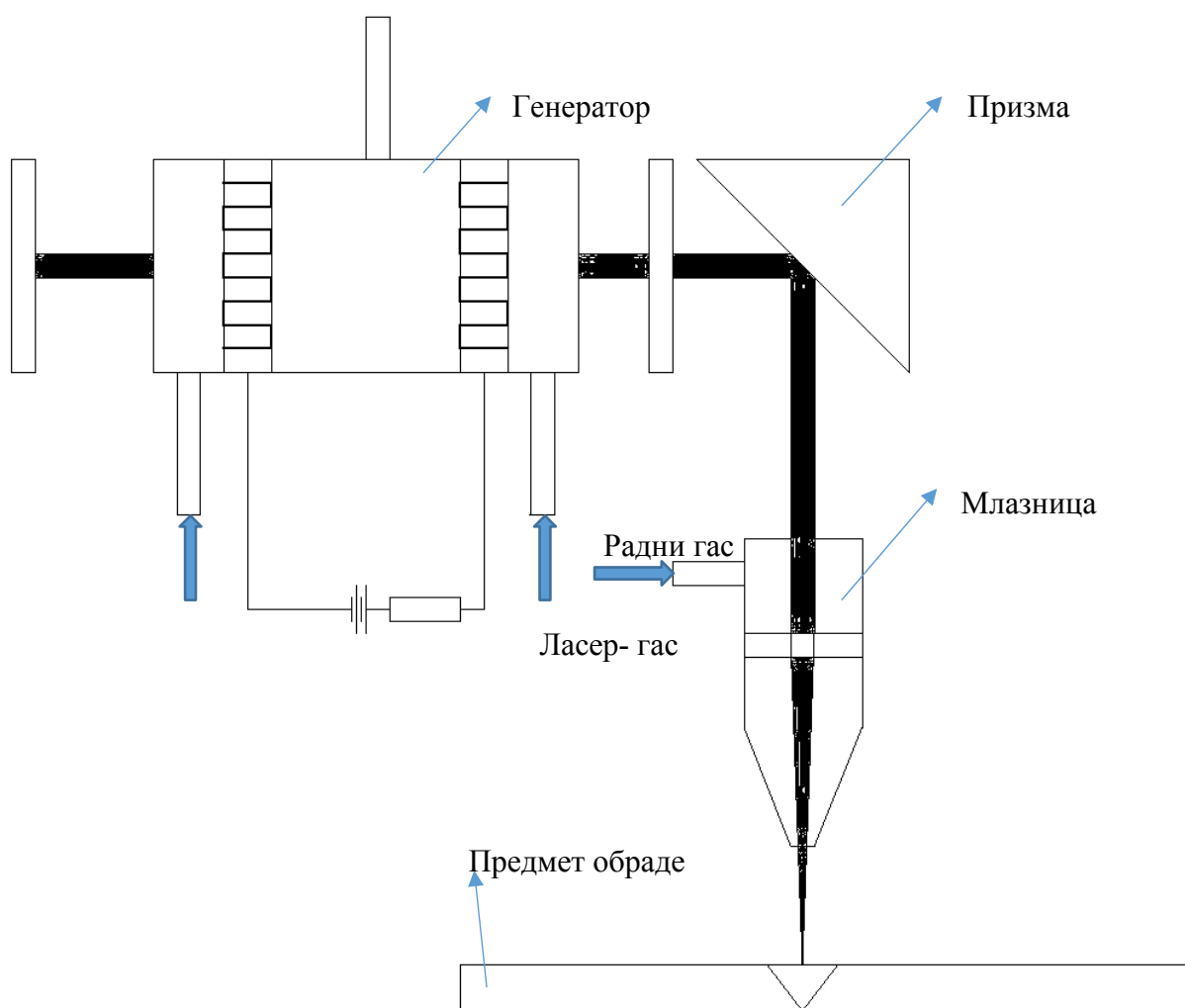
- отврдњавање површине радних предмета сложене конфигурације које су неприступачне за обраду класичним методама;
- примена за завршну обраду при чему се постиже висок квалитет обрађене површине;
- могућност аутоматизације процеса, итд.



Слика 3.1 Принцип отврдњавања ласером [9]

3.1.2 Заваривање ласером

Представља технолошки процес који карактерише локално топлеење метала на месту спајања (заваривања) елемената (слика 3.2). Ласерска техника и технологија се све шире примењује за извођење производних операција заваривања јер обезбеђује загревање веома уске зоне у околини шави (што је посебно значајно за заваривање лимова и других мало габаритних делова), непропустљивост спојева на резервоарима испуњеним различитим течностима, микрозаваривање код микрошема, интегралних микрошема и других елемената микроелектронике, заваривање неметала (стакла, керамике и сл.), итд.



Слика 3.2 Принципијелна шема заваривања ласером

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

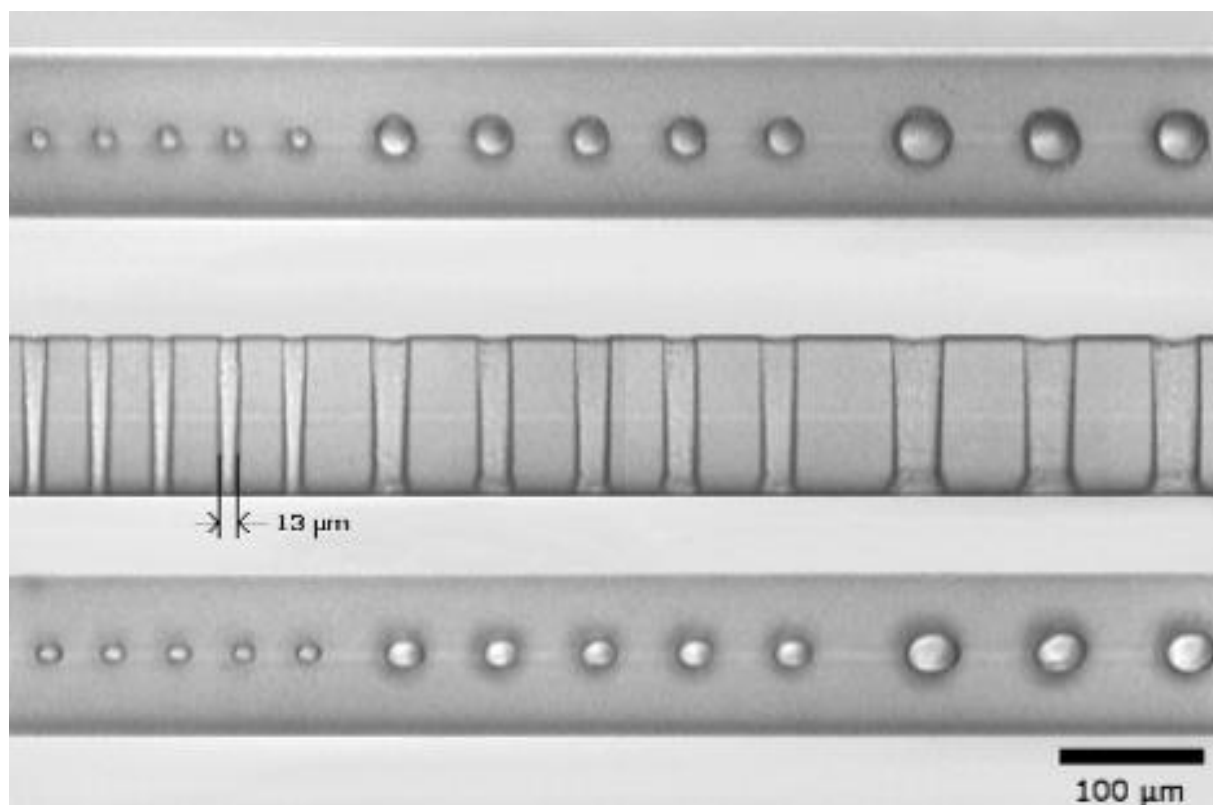
CO₂ ласери се не користе код заваривања због великог коефицијента рефлексије, који се за већину материјала креће од 94-98 % на собној температури, за таласну дужину ласера од 10.6 μm . Индустрijски CO₂ ласери снаге неколико вати, могу се користити за заваривање танких метала дебљине 1 mm (Al и Cu легуре).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

3.1.3 Бушење ласером

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

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

С обзиром да се ласери снап може компјутерски наводити, облици и положаји рупа и отвора, њихове димензије и густоћа у материјалу могу се унапред планирати, што доводи до невероватне прецизности, па је овом методом могуће бушење на микрометарској скали (слика 3.3).



Слика 3.3 Микрометарско бушење [9]

3.1.4 Сечење ласером

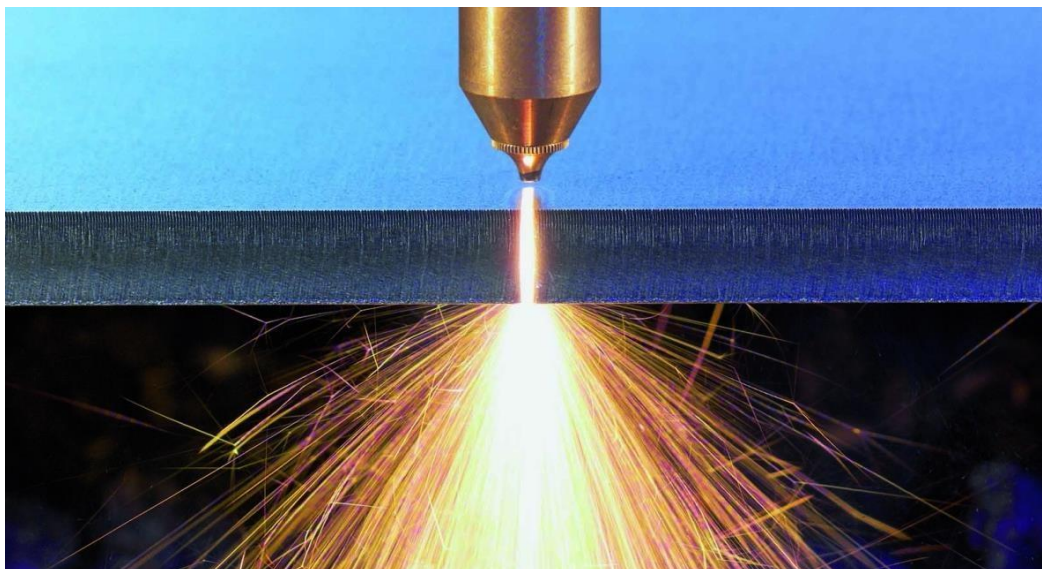
Сечење и димензионална обрада представља најчешће коришћене производне операције изведене применом ласера. Сам принцип обраде заснива се на локалном топљењу метала и одношењу продуката обраде под дејством силе теже, гасне струје радног гаса или струје снопа светлости ласера.

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

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

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

Ласер производи кохерентан светлосни сноп ласерских зрака великог интензитета енергије кога карактерише правост и мала дисперзија. У интеракцији са предметом обраде, ако је енергија већа од способности материјала предмета обраде да рефлектује, пренесе или распе ову енергију, долази до апсорпције светлосне енергије и њеног претварања у топлотну енергију, односно до пораста температуре на озраченом месту. При знатном порасту температуре долази до појаве локалног топљења или испаравања материјала, што зависи од интензитета генерисане топлоте и доводи до стварања рупе или отвора у предмету обраде. Померањем ласерског зрака или предмета обраде настаје процес ласерског сечења (слика 3.4) [9].

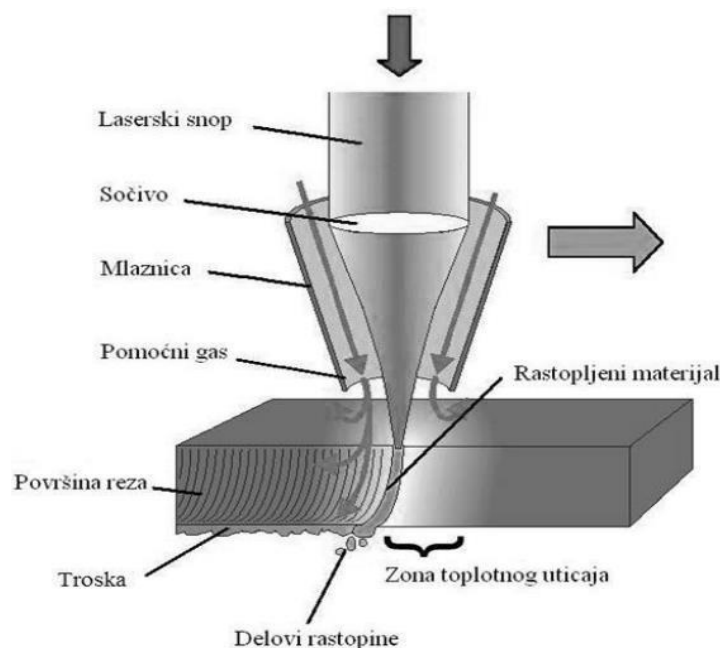


Слика 3.4 Сечење ласером [11]

У много случајева нефокусирани сноп ласерских зрака индустријских ласера веће снаге, нема адекватну енергију да учини нешто више сем да загреје озрачену површину материјала предмета обраде. Међутим, ако се сноп усмери кроз сочиво за фокусирање, енергија је концентрисана на површину пречника мањег од 0.25 mm , што производи снагу од преко 10^6 W , способну да истопи многе материјале. Ласерске машине поред топлоте добијене фокусирањем снопа ласерских зрака користе и помоћни гас који има задатак да одстрани истопљени материјал из зоне сечења, да заштити сочива од испарења и помогне у процесу сагоревања [9].

Са технолошке тачке гледишта, процеси сечења ласером (слика 3.5) доводе до пуног изражаја термичке ефекте (загревање, топљење, испаравање, термичко распадање и ерозија), који настају ласерским зрачењем.

Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. Феноменологија сечења ласером је знатно сложена. Поступак се заснива на озрачењу радног предмета покретним, континуалним или импулсним снопом ласерских зрака, са локалним развојем такве густине снаге $q_c, \text{ W/cm}^2$, која је у стању да произведе најповољније термофизичке, термохемијске, хидродинамичке, гасодинамичке и ерозивне процесе за одвајање материјала [9].



Слика 3.5 Шематски приказ сечења ласером [9]

Постоје три методе сечења ласером:

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

За сечење метала се најчешће користи реактиван помоћни гас O_2 , док се за сечење неметала користи неутрални гас N_2 или инертни гас Ar [9].

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

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

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

3.2 Преглед и анализа поступка обраде плазмом

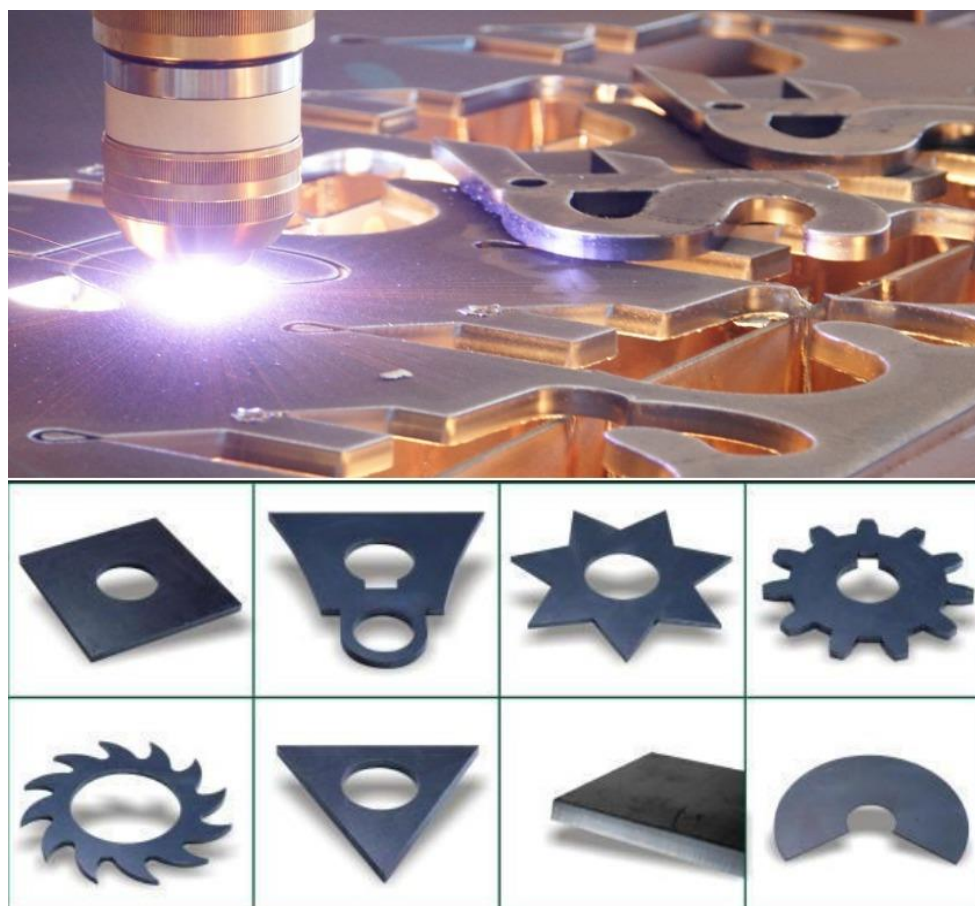
Обрада материјала плазмом може се вршити на више различитих начина у зависности од онога што желимо да добијемо као крајњи производ. У претходном поглављу овог рада поменуто је да се плазма најчешће користи за поступке обраде као што су обрада резањем уз помоћ плазме, заваривање плазмом и за наношење превлака.

3.2.1 Поступци резања плазмом

Данас су у свету на располагању следеће варијанте поступака за обраду резања плазмом:

- 1) Резање плазмом без додатног гаса у атмосферским условима која је другачије позната и као стандардна плазма;
- 2) Резање плазмом са додатним гасом у атмосферским условима или у води;
- 3) Резање плазмом са суженим плазменим луком.

На следећој слици 3.6 дат је приказ резања плазмом као и делови који се добијају овим поступком обраде.



Слика 3.6 Поступак обраде резања плазмом и производи добијени овим поступком

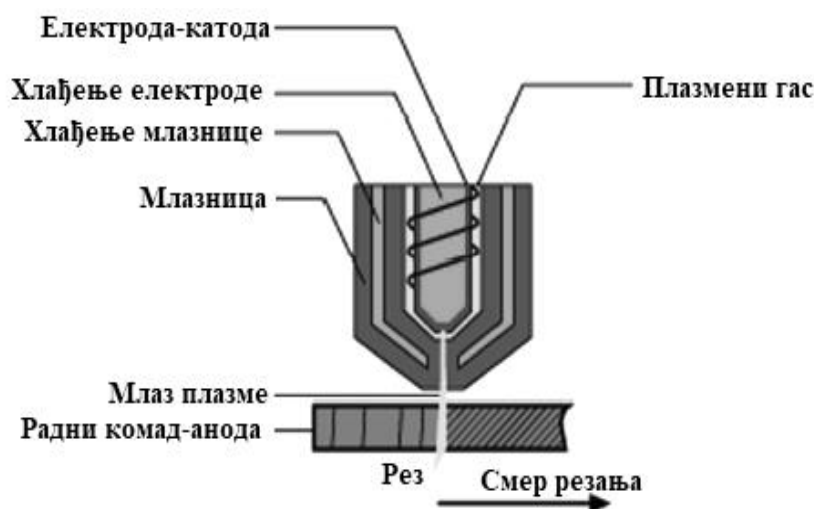
3.2.2 Плазма резање без додатног гаса

Резање плазмом без секундарног односно додатног гаса, или другим речима стандардна плазма, користи се код:

- 1) Ручног резања плазмом и жљебљења;
- 2) Мањег броја делова који се режу, односно мање дебљине лимова;
- 3) Не превисоких захтева на квалитет реза.

Слика број 3.7 приказује стандардни поступак плазма резања. За ову варијанту плазма резања постоје многобројни случајеви примене са CNC управљаним системима за вођење плазма пиштоља, нпр. код производње панела у бродоградњи, где је резање плазмом непосредна припрема за заваривање, затим код завршне обраде и паковања лимова у челичанама као и код роботизованог резања цеви, I – профила и пљоснатих профила са избочинама. [5]

Код плазма резања без секундарног гаса користи се само једну врсту гаса и то су најчешће гасови попут ваздуха, азота или кисеоника који уједно обавља функцију хлађења и развија лук плазме. Углавном се овај поступак користи код ручних поступака резања и то за материјале чија је дебљина мања од 16 mm и јачине струје до 100 A.



Слика 3.7 Поступак обраде плазмом без додатног гаса-стандардни поступак обраде [6]

3.2.3 Плазма резање са додатним гасом

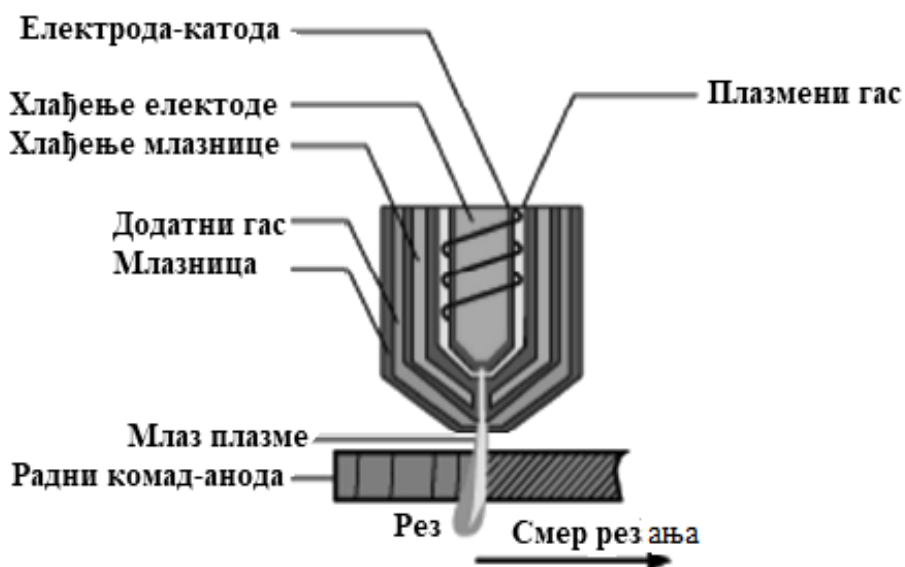
Употреба плазма пиштоља са секундарним гасом, има предност код:

- 1) Производње мањих делова;
- 2) Честог бушења, односно започињања резања;
- 3) Потребног високог квалитета реза, посебно код Cr-Ni челика и код алуминијума;
- 4) Резања решетака, односно резова с прекидима;
- 5) Подводног резања плазмом.

Коаксијално са млазницом плазма пиштоља налази се млазница за довод ротирајућег гаса, који „обмота“, односно штити плазмени гас од утицаја околине, односно атмосфере. Ротирајући гас и млазница ротирајућег гаса која је без потенцијала, штите млазницу од штрцања растопљеног метала, које се јавља приликом бушења лима.

Код одређених дебљина лима бушење се изводи док пиштољ стоји, па је тако могуће резање малих контура без почетног, односно улазног реза. [5]

Резање плазмом са секундарним односно додатним гасом приказано је на слици број 3.8.

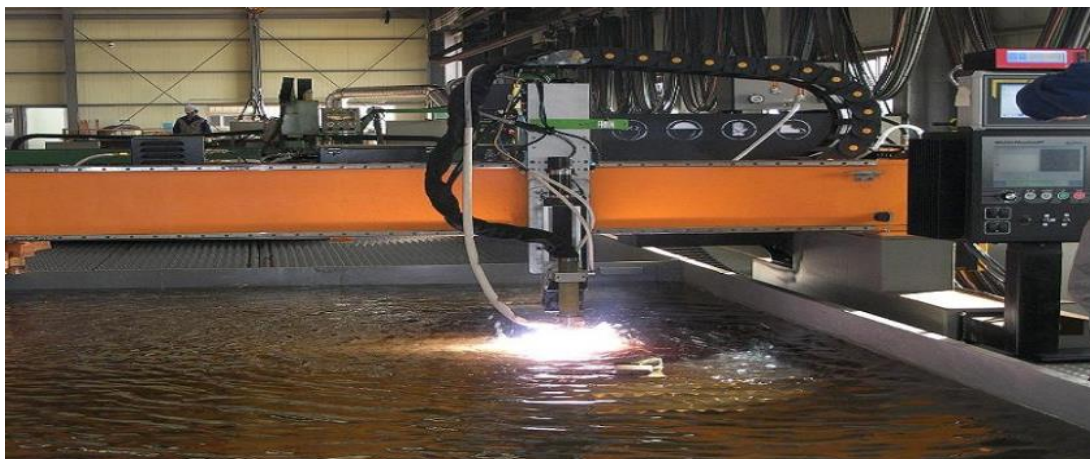


Слика 3.8 Плазма резање са секундарним гасом [6]

Ротирајући плин спречава учешће ваздуха из околине у реакцији плазменог млаза и растопљеног метала у зони реза. То је посебно важно код резања високо легираних челика, где иначе долази до реакције кисеоника садржаног у ваздуху са површином реза, који изазива њену оксидацију и у већини случајева накнадну обраду скидања насталих оксида. [5]

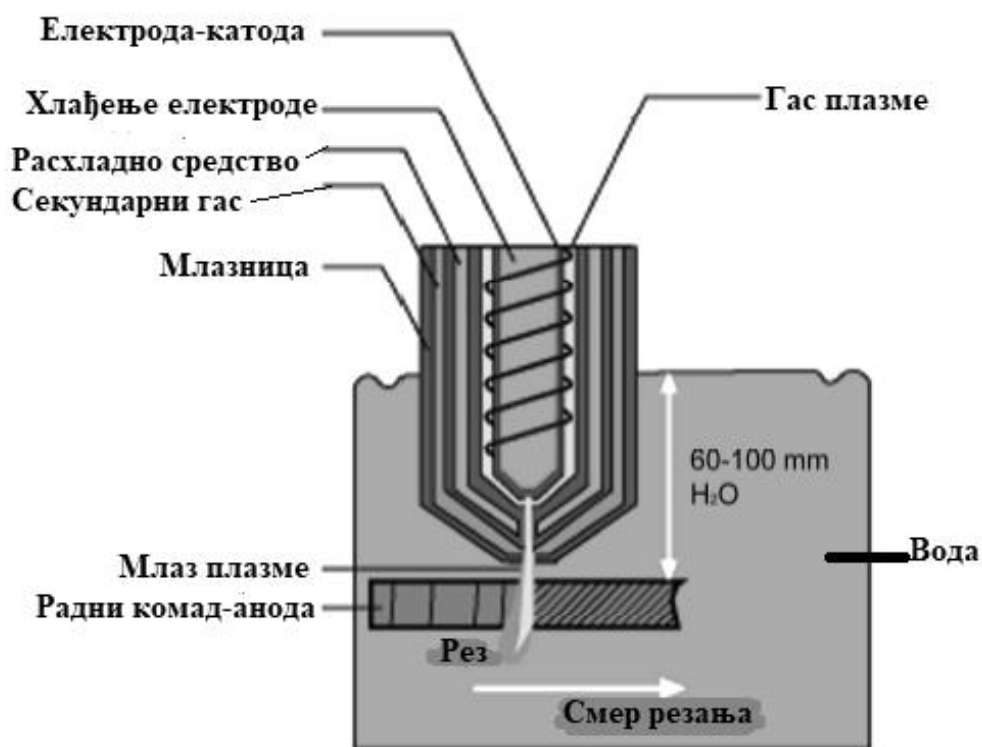
Употреба азота као ротирајућег гаса је нужна за резање без средстава троске код лимова од високо легираних челика дебљине до 20 mm. Због заштитног деловања ротирајућег гаса, такви плазма пиштољи могу се користити и за подводно резање плазмом.

Слика 3.10 приказује шему плазма резања са секундарним гасом у води. Насупрот сувом резању плазмом, код подводног резања је значајно редукована бука као и појава прашине, а ултра љубичасто зрачење лука се додатно филтрира у води. На слици 3.9 приказано је резање плазмом у води.



Слика 3.9 Плазма резање у води [6]

Деформација радних комада такође је врло мала, али је потрошња енергије већа у односу на суво резање плазмом. Максимална дебљина лима која се може резати сувим резањем плазмом износи 180 mm при јачини струје од 600 A, а код подводног резања износи 100 mm при 750 A струје резања. [5]



Слика 3.10 Плазма резање са додатним гасом у води [6]

Код плазма резања под водом радни комад је уроњен 60 – 100 mm у воду. Исто тако млазница је за време резања под водом. На тај начин су увелико смањени штетни утицаји поступка резања плазмом на околину, а и смањен је утицај развијене топлоте на квалитет реза. [5]

С друге стране, недостатак резања плазмом под водом је да радни комад није видљив за време резања и не може се видети да ли се остварује квалитетан и тражени рез, брзине резања су смањене за 10 – 20%, а и смањена је могућност резања већих дебљина радног комада.

Резање се изводи у кадама, односно столовима који имају могућност напловљавања водом које је потребно периодички чистити што резултује заустављањем производње на неколико сати, такође и додатним трошковима одржавања, а то је још један недостатак примене плазма резања под водом. [5]

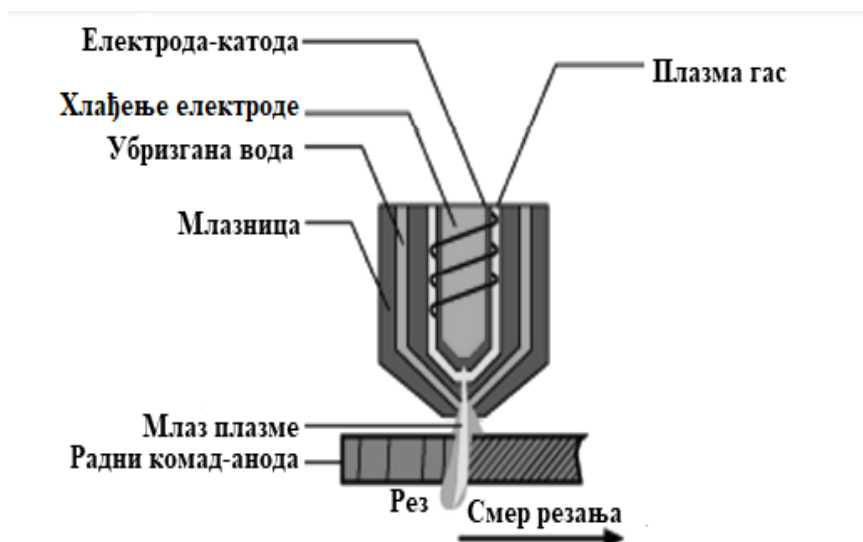
Како би се избегли додатни трошкови чишћења столова и заустављања производње, данас су развијени водени столови који имају могућност самочишћења што представља практично и економично решење за кориснике.

3.2.4 Плазма резање са убризганом водом

На слици 3.11 приказује се плазма резање са убризганом водом. Овај поступак резања користи само један гас за плазму, а воду убризгава радијално или вртложно директно у лук чиме се постиже сужавање лука и повећање густине плазменог лука.

Разлог за сужавање електричног лука било је стварање изолаторског граничног парног слоја између плазменог млаза и убризгаване воде.

Заштитна својства парног слоја омогућила су открићем овог поступка (1968. год.), увођење јединствене иновације: цели доњи део млазнице је могао бити израђен од керамике. Као последица тога, појава стварања двоструког електричног лука, највећег узрочника уништења млазнице је елиминисана. [5]



Слика 3.11 Поступак плазма резања са убризганом водом [6]

Поступак се користи код струја од 260 до 750 А за висококвалитетно резање разних материјала и дебљина. Примењује се само за машински механизовани поступак резања.

Поред азота, за плазмени гас може се користити и ваздух што чини поступак значајно јефтинијим. Физички, азот је најповољнији за коришћење због своје

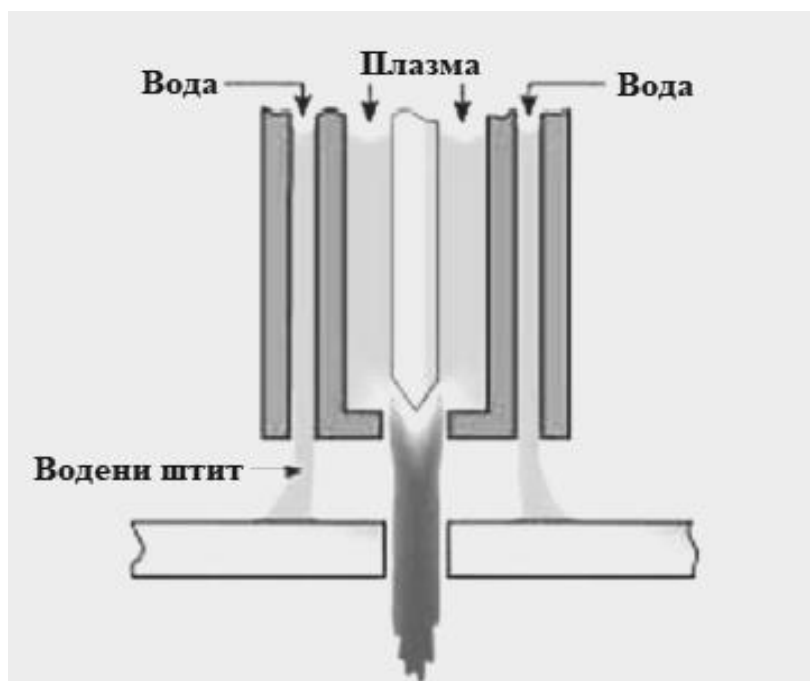
способности преноса топлоте из електричног лука на радни комад. Упркос високим температурама на месту где се вода убризгава у електрични лук, мање од 10 % воде испарава. [5]

Остатак воде, осим наведених побољшања, служи и за хлађење горње површине радног комада. Исто тако, ово додатно хлађење спречава настајање оксида на површини реза и доприноси у великој мери учинковитом хлађењу млазнице на месту највећег топлотног оптерећења.

3.2.5 Поступак резања плазмом под заштитом воде

Плазма резање под заштитом воде је врста плазма резања са секундарним гасом, где се уместо заштитног гаса користи вода која пружа боље хлађење млазнице и радног комада као и бољи квалитет реза код резања нерђајућих челика. Поступак се користи само код машинског механизованог резања. [5]

Слика 3.12 приказује плазма резање под заштитом воде.



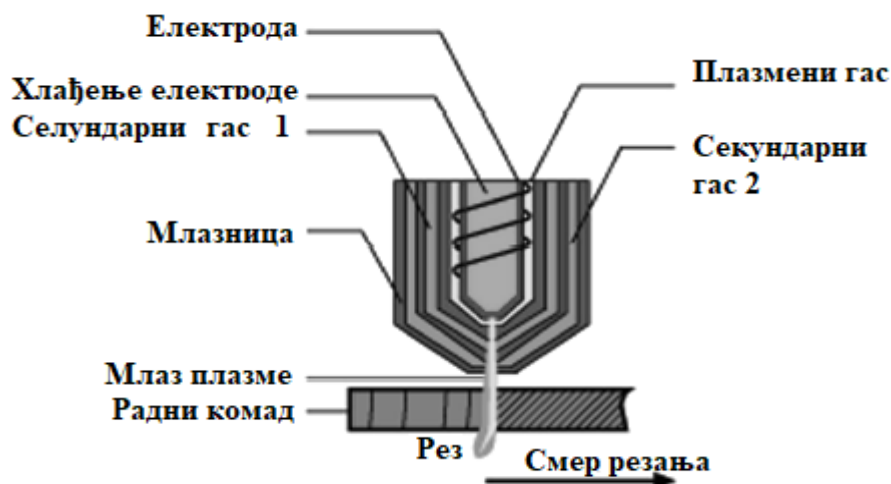
Слика 3.12 Поступак резања плазмом под заштитом воде [6]

3.2.6 Поступак резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука

Овим поступком добија се врло квалитетан рез код резања тањих материјала (лимова до 12 mm) при мањим брзинама.

Побољшан квалитет реза је резултат коришћења технологије повећаног сужавања лука, односно повећања густине енергије електричног лука, док су мање брзине резања потребне како би се остварили прецизнији помаци код резања.

Слика под бројем 3.13 приказује поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука.



Слика 3.13 Поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука-прецизно плазма резање [6]

Циљ резања плазмом је добијање две паралелне, равне површине реза које су прикладне за даљу употребу без потребне међу обраде односно накнадне обраде након резања. Али ипак, површина реза има одређено одступање од тог идеалног облика.

Посебно у подручју танких лимова – до приближно 5 mm дебљине, одступање може, зависно од материјала, размака пиштоља, јачине струје и брзине резања, износити до 10 степени. Коришћењем ново развијеног поступка прецизног резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука (тзв. HiFocus резање) одступање од правог угла значајно се редукује. HiFocus технологија омогућује добијање приближно вертикалних површина реза за дебљине лимова од 0,8 до 8 mm и тиме постизање значајно веће тачности. HiFocus технологија заснива се на принципу резања плазмом са суженим и стабилизованим плазменим млазом.

То се постиже применом млазница мањег пречника, повећаном ротацијом плазменог гаса и додатном применом ротирајућег гаса који до плазменог лука долази кроз коаксијалну млазницу без потенцијала. Млазница за ротирајући гас спречава и настајање тзв. двоструких електричних лукова и уништење млазнице капљицом растопљеног метала које настаје због штрцања приликом бушења рупа.

За многе примене, висок квалитет реза и прецизност, која се постиже HiFocus технологијом, представља што се трошкова тиче повољнију алтернативу у односу на резање ласером. Помоћу HiFocus уређаја и постројења за резање плазмом, може се одржавати толеранција радног комада $\pm 0,2$ mm. [5]

Подручје употребе HiFocus плазма уређаја је вишеструко:

- 1) Са технологијом „HiFocus – Quality“ постиже се квалитет реза упоредив са ласером, код резања конструкционих челика и алуминијумских легура дебљине од 1 до 8 mm; струја резања 20 до 50 A.
- 2) Са технологијом „HiFocus – Speed“ постиже се већа продуктивност код резања конструкционих челика дебљине 4 – 10 mm, али је тада одступање реза од правог угла минимално повећано; струја резања 50 – 100 A.

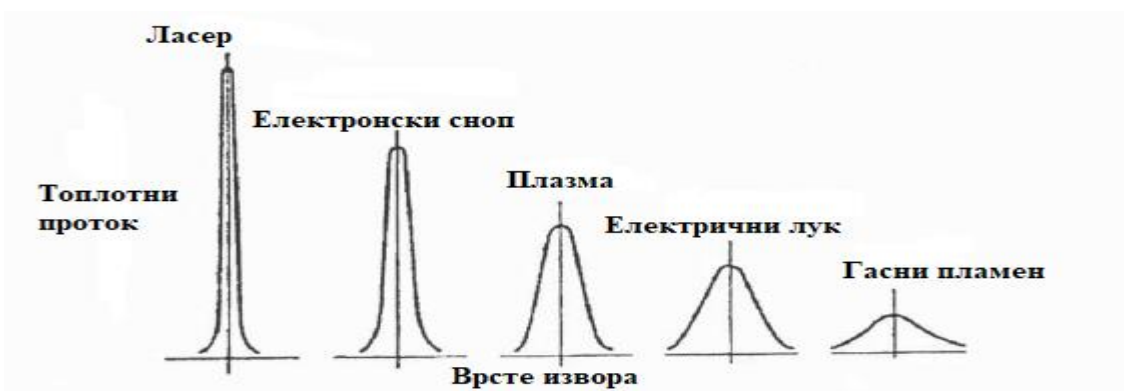
3) FineFocus технологија користи се са струјама 40 – 130 А, како за резање конструкционих челика тако и за резање Cr-Ni челика и алуминијумских легура, за лимове дебљине од 6 до 25 mm. [5]

3.2.7 Заваривање плазмом

Заваривање плазма луком се све више користи јер, у поређењу са осталим поступцима, обезбеђује већу дубину уваривања, мању ширину шава, мању зону термичког утицаја, већу брзину заваривања и побољшање квалитета шава.

Плазменим заваривањем могу се једним пролазом заварити елементи дебљине чак и до 20 mm. На тај начин се обезбеђује суштинско повећање производности, смањење деформација и повећање поузданости завареног споја. [4]

На слици 3.14 дат је приказ плазменог луку односу на друге изворе.



Слика 3.14 Концентрација заваривачких извора топлоте [4]

При заваривању је значајна термичка плазма која је у ствари јонизовани гас састављен од слободних електрона, позитивних јона и неутралних атома. Плазма постоји код свих поступака електролучног заваривања.

Уколико се заваривачки лук одржава волфрамском електродом у простору ограниченом телом млазнице, степен јонизације гаса се толико повећава да се цео поступак назива заваривање плазмом. Поступак је сличан ТИГ заваривању.

Плазмом се углавном заварују угљенични челици, легирани челици, нерђајући челици, ватроотпорне легуре, легуре бакра и никла итд.

Примера ради, заваривање плазмом је знатно продуктивније и јефтиније од ТИГ поступка, а брзина је 4 пута већа при заваривању без додатног материјала док је цена нижа за двадесет процената. Негативна страна заваривања плазмом у односу на ТИГ поступак је што је цена опреме већа, краћи век млазнице и већа потрошња аргона. [4]

3.2.8 Уређаји за заваривање плазмом

Уређаји за заваривање плазмом разликују се према начину одржавања лука који може бити независан и зависан.

Независан лук се успоставља између електроде и унутрашњости млазнице док се топлота основном материјалу предаје струјањем загрејане плазме. Плазма струји кроз конични отвор на дну млазнице. Овај лук се примењује у случајевима када се при заваривању тражи мала концентрација топлоте посебно код обраде материјала као што је керамика. (Слика 3.15) [4]

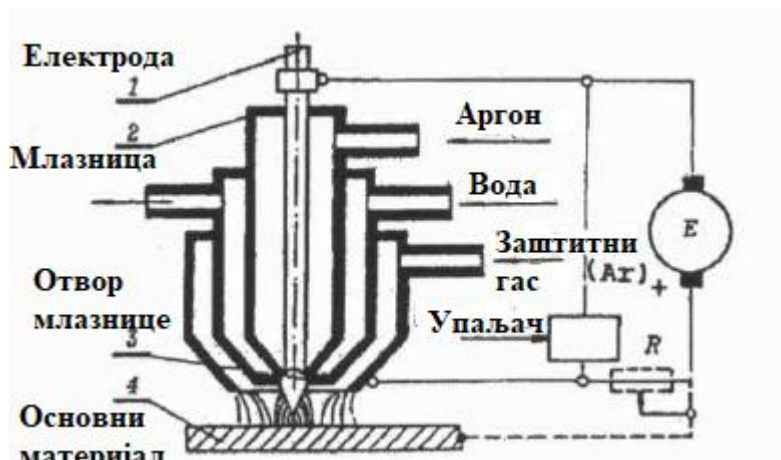
С друге стране зависан лук се успоставља између електроде и основног материјала. Он се успоставља између позитивног пола на основном материјалу и негативног пола на волфрамској електроди. (Слика 3.15) [4]

Иако се независним луком веома лако рукује, већу примену има зависни лук из разлога што се зависним луком на основном материјалу ослобађа знатно већа количина топлоте. За разлику од осталих поступака електролучног заваривања, код заваривања плазмом се лук не може успоставити додиром јер је врх електроде оклопљен млазницом.

3.2.9 Поступци заваривања плазмом

У зависности од јачине струје разликују се два поступка а то су заваривање плазмом и заваривање микроплазмом.

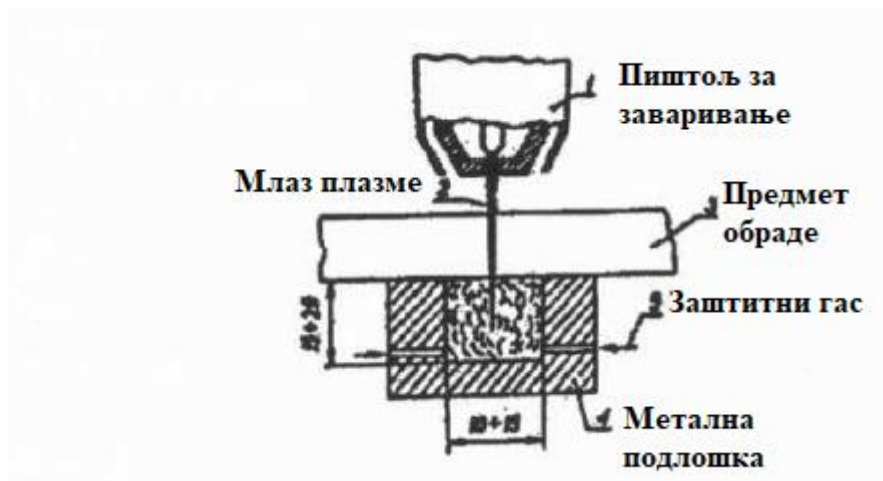
Плазма поступак заваривања се примењује за спајање лимова дебљине веће од 1,5 mm при чему јачина струје прелази 20 А. Шема овог поступка дата је на слици 3.15



Слика 3.15 Заваривање плазмом [4]

Микроплазмено заваривање се користи за спајање делова дебљине од 0,03 до 1,5 mm при чему јачина струје не прелази 20 А.

На слици 3.16 приказано је заваривање микроплазмом које даје узак шав и готово невидљивом зоном под утицајем топлоте и малим сопственим напонима и деформацијама.



Слика 3.16 Микроплазмено заваривање [4]

3.2.10 Додатни материјал за заваривање плазмом

Као додатни материјал за овај поступак користе се заштитни гасови у неким случајевима жица. За образовање плазме употребљавају се гасови који хемијски не реагују са волфрамском електродом и то су најчешће гасови попут аргона, хелијума, водоника, азота или њихових мешавина. [4]

Гас за образовање плазме не штити довољно течан метал од штетног деловања ваздуха па се посебно доводи заштитни гас, најчешће је то чист аргон. Овај гас може да се користи за образовање плазме при заваривању свих метала, али даје најбоље резултате на угљеничним челицима, затим на челицима повишене јачине, и легурама титана и цирконијума.

Потрошња аргона за образовање плазме креће се од 0,3 до 5,6 литара у минути и зависи од дебљине делова који се заварују, док је потрошња заштитног аргона знатно већа. Заваривање плазмом може се изводити са додатним материјалом али и без њега.

Додатни материјал је хемијског састава сличног основном, и примењује се за дебље делове. Додатна жица се уводи на ивицу заваривачког купатила слично као и код ТИГ поступка али у овом случају нема опасности да се врх додатне жице оштети хемијским деловањем остатака из ваздуха. [4]

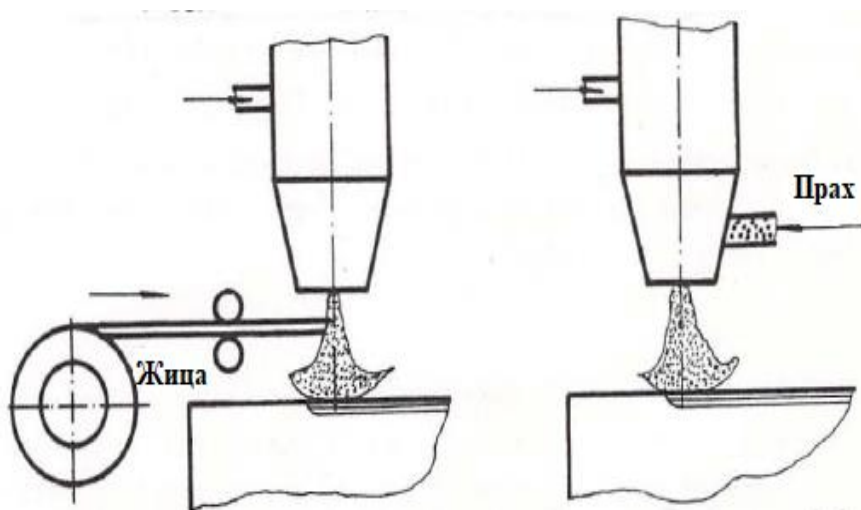
3.2.11 Наношење превлака

Плазма поступак је веома перспективан поступак повећања отпорности на хабање елемената машина и алата. То из разлога што обезбеђује наношење превлака ниске порозности, високе тврдоће и превлака чврсто везаних за основни материјал. При наношењу превлака додатни материјал се, у виду праха, доводи у специјално обликован плазма горионик или у облику жице односно шипке на врх млазнице горионика.

Прах односно материјал се, у струји плазме, претвара у течну стању и пада у виду капљице на основни материјал, разлива се по њему и формира превлаку одговарајућих карактеристика. Честице материјала превлаке се, у струји плазме, топе и не разлажу нити испаравају. Слика 3.17 приказује шему ову поступка [2].

Плазма превлаке се могу нанети на различите материјале као што су: графит, челик, сиви лив, тврди метал, обојени и лако топљиви метали, стакло, пластична маса и сл. Као материјал превлаке користе се различити оксидни материјали и тешко топљиви метали, као и интерметална једињења и слични материјали.

Адекватан састав и карактеристике плазма гасова, услови наношења превлаке, стабилност састава у процесу наношења, температура топљења, густина, коефицијент термичког ширења, структура, облик и димензије честица праха, и низа других параметара су основна претпоставка за повећање квалитета нанетих превлака. Самим тим обезбеђено је и повећање отпорности на хабање, поузданости рада и века трајања елемената машина и алата.



Слика 3.17 Шема наношења превлака плазма поступком [2]

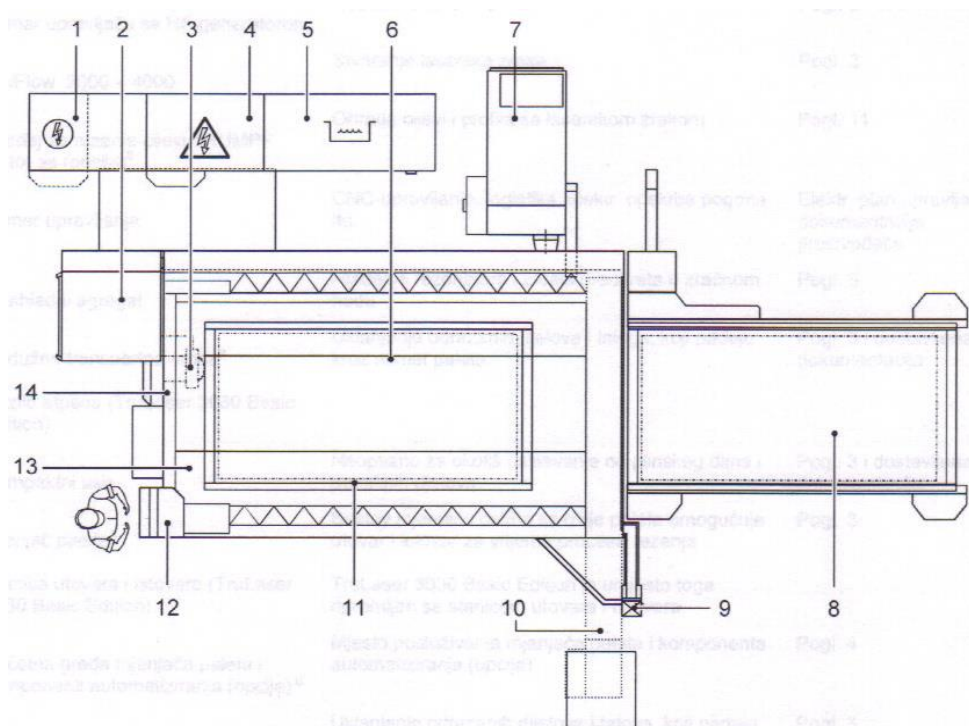
Неке карактеристике плазма поступка наношења превлака као што су: могућност наношења тешко топљивих материјала, могућност формирања вишеслојних превлака, врло висока отпорност превлака на смицање и висока чврстоћа превлака, ниска температура основе метала односно материјала на који се наноси превлака, могућност широког регулисања параметара наношења превлака, одстрањивање кисеоника и тиме спречавање појаве оксидације превлака и сл., јесу предности које чине плазма поступак веома значајним и перспективним поступком за наношење превлака. [2]

4. ОПРЕМА ЗА ОБРАДУ ЛЕСЕРОМ И ПЛАЗМОМ

4.1 Опрема за обраду ласером

4.1.1 Делови ласерске машине

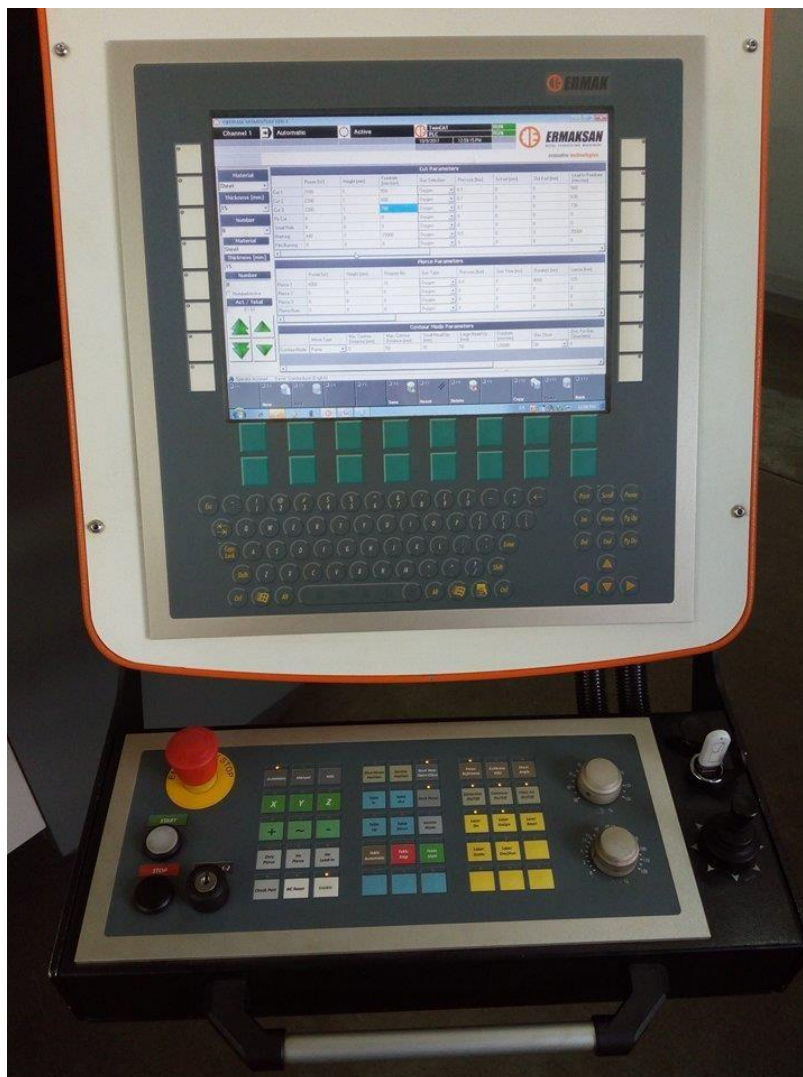
На слици 4.1 су приказани делови машине за сечење ласерским снопом за обраду равних и металних чврстих сировина. Као алат служи ласерски сноп (зрак), који се води преко огледала према глави ласера. Огледало и глава ласера су смештени на покретним деловима, што значи да машина ради са „летећом“ оптиком. Капацитивно подешавање висине држи константно размак између врха главе и предмета обраде. Машина може бити опремљена са системом за замену столова. Тај систем аутоматски мења сто са обрађеним деловима, са столом са необрађеним деловима.



Слика 4.1 Ласерска машина: 1-Ормар управљача са XF-генератором, 2- ласер, 3- Уређај за резање цеви, 4- Ормар управљања, 5- Расхладни агрегат, 6- Уздужна транспортна трака, 7- Компактни усис, 8- Мењач палета, 9- Почетна греда за мењач палета, 10- Попречна транспортна трака са отпадним контејнером, 11- Палета, 12- Панел послуживања, 13- Основна машина, 14- Заштитна кабина са вратима [9]

4.1.2 Управљање машином

Управљање машином се врши помоћу управљачког терминала који се састоји од екрана, елемената за управљање машином и нумеричке тастатуре (слика 4.2).



Слика 4.2 Управљачки терминал

4.1.3 Глава ласера (глава за сечење)

Ласерска глава (слика 4.3) је централни елемент уређаја. Битни саставни делови ласерске главе су цев за прихват сочива са оптичким деловима и кућиште главе ласера са дизном сечења, регулисањем размака и завртњима за подешавање.

Сочиво ZnSe (Цинк селенид) прекида паралелне ласерске зраке и спаја их у фокусу, тамо где зрачење достиже своју највећу енергетску вредност. Зависно о коришћењу типа сочива, жаришна ширина износи 3.75", 5" или 7.5". За оптималне резултате рада мора бити намештен фокус на дефинисану тачку за површину предмета обраде. Хлађење сочива следи кроз струје гасног сечења, коаксијално до ласерског снопа у шупљем простору испод сочива.

Изнад дизне сечења, која се додатно хлади са чистим компримираним ваздухом, води се зрачење и гас сечења за обраду на предмет обраде. Заштићено, кроз плочу покривања, налази се у глави ласера систем сензора за регулисање размака. Кроз капацитивно регулисање размака константно се држи размак дизне према лиму за

време поступка сечења. Цела глава ласера причвршћена је на Z-оси, која се покреће преко зупчастог ремена од Z-мотора осовине.



Слика 4.3 Глава ласера

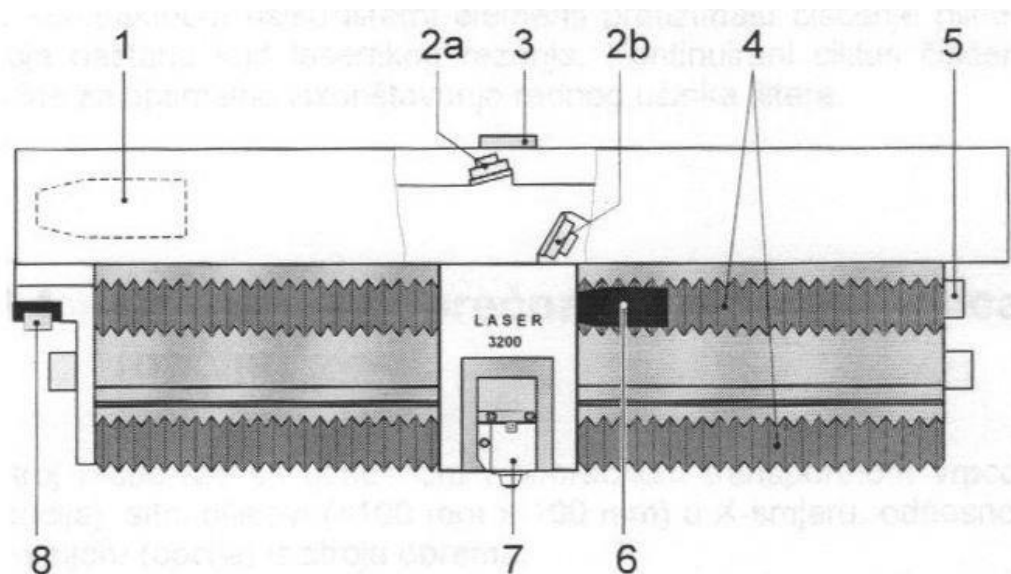
4.1.4 Покретана јединица

Покретна јединица (слика 4.4) се састоји од попречног носача (X-траке), Y-траке и унутра интегрисане Z-осе. На Y-оси причвршћена је глава ласера.

X и Y траке су изведене у линеарним верзијама и покрећу се преко обостраног зупчастог погона, преко серво мотора. Покрети главе ласера уздуж Z осе се такође изводе преко мотора. Он позиционира главу ласера у радни положај.

Fibermark ласер ради по принципу “летеће оптике” код утврђеног резонатора и предмета обраде. Уз то је могућа оптимална брзина обраде као и тачност обраде, јер се може покренут само тачно дефинисана мера.

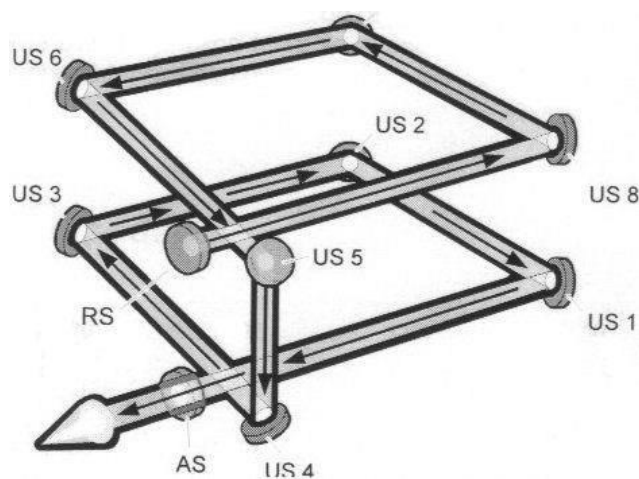
Радно подручје се ограничава кроз Software-крајњи прекидач. Изнад тога граничи се пут осовина кроз механички, сигурносни СТОП (NOT-HALT) прекидач, који лежи у подручју изван Software-крајњег прекидача.



Слика 4.4 Покретна јединица [9]

1- Мотор погона X-осе, 2a- покретно огледало и аутофокус, 2b- Огледало FocusLine, 3- Мотор погона Y-осе, 4- Вођење X-осе, 5- Вођење X-траке, 6- Мотор погона Z-осе, 7- Глава ласера, 8- Вођење Y-осе

4.1.5 Резонатор



Слика 4.5 Резонатор, пут снопа [9]

Резонатор (слика 4.5) је квадратно склопљен и подељен на две равни. Зрачење ласера заокреће се покретним огледалима (US1 до US 8). Резонатор (RS) рефлектује потпуно зрачење ласера. Излазно огледало (AS), делимично пропустљиво огледало, рефлектује само један део зрачења ласера. Други део зрачења ласера иде кроз излазно огледало и стоји на располагању за обраду материјала.

4.2 Опрема за обраду плазмом

4.2.1 Спс машина за сечење плазмом

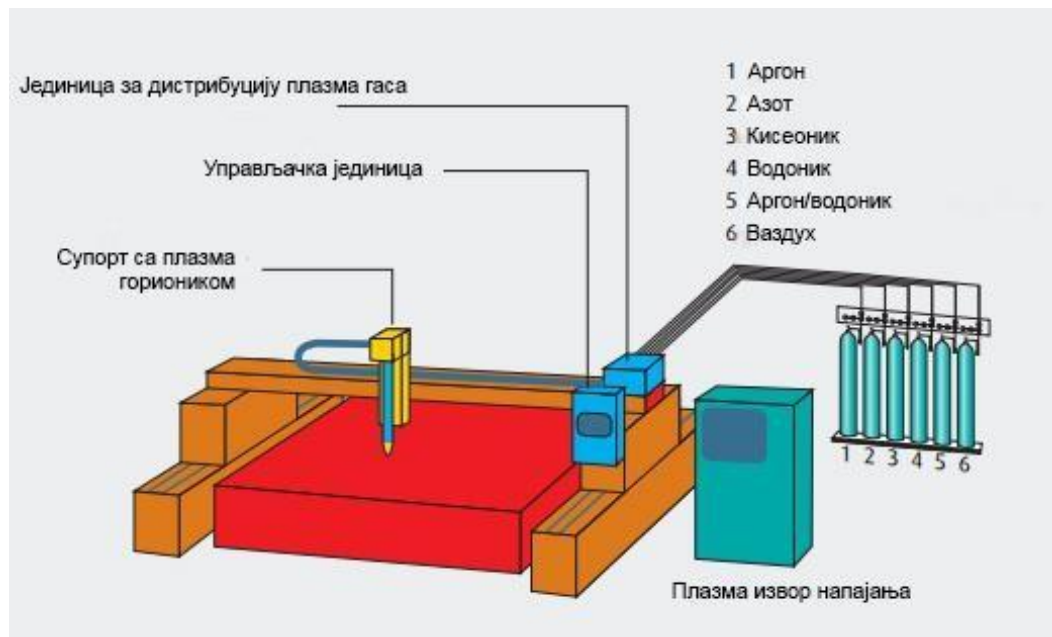
Машина за сечење плазмом у фирми "Унипромет" и Ћаџки (Слика 4.6).



Слика 4.6 CNC машина за сечење плазмом

Познатији произвођачи оваквих техничких система у свету су: Сименс, Варстрој, Раптор, Шопер Павер, Контакт, Вендо и др. Од свих ових произвођача по прецизности, брзини и квалитету као и поузданости и квалитету израде система , издвајају се Сименс и Варстрој као водећи.

4.2.2 Опис техничког система



Слика 4.7 Структура техничког система за плазма сечење [6]

Основни подсклопови приказане машине алатке (слика 4.7):

- радни сто (2000x6000 мм),
- двостране шине за кретање по Х оси,
- попречне шине за кретање по Y оси,
- Управљачка јединица са ТНС уређајем,
- Горионик,
- Напајање.

Радни сто машине (2000x6000мм) је лимено корито који се састоји од четири сегмента. Кроз радни сто пролази вентилациона цев, она има улогу да одведе гасове који настају као продукти сечења у облику троске, дима и прашине. На постољу су монтирана попречна ребра тзв. ростови који имају носећу улогу предмета обраде.

Носећу структуру машине представљају двострано постављена два "I" профила, на којима се налази зупчаста летва спрегнута са зупчаником погоњеним АС мотором. На тај начин се омогућује кретање по Х оси попречног моста заједно са коадном таблом и гориоником. На попречном мосту налази се зупчаста летва са зупчаником, и на тај начин омогућено је кретање горионика дуж Y осе (Слика 4.8).



Слика 4.8 Попречна шина за кретање по Y оси

Управљачка јединица -командна табла (Слика 4.9) садржи сигурносни прекидач, велики екран осетљив на додир, тастере за дефинисање одређених функција, прекидаче, потенциометар за промену брзине резања, као и USB-порт и прикључке каблова. Тастатура се састоји из дела сектора Старт-Стоп команде за покретање и заустављање програма, тастатуре за ручно позиционирање, дела тастатуре за укључивање-искључивање плазма лука, тастатуре за подешавање плазма гасова, и дела тастатуре за управљање опцијом маркирања.

Помоћу командне табле може се извршити читавање, верификација, визуелни приказ програма, подешавање параметара обраде, контрола програма, као и само програмирање једноставнијих облика за сечење.



Слика 4.9 Управљачка јединица

ТНС уређај служи за контролу Z-осе и свих параметара који зависе од ње. У литератури ова машина се дефинише као 2.5D машина. Међутим, њен ефективан рад се одвија само у XY равни. Машина је покретна и по Z оси, али то је само помоћно кретање, које служи за подизање горионика до сигурносне равни пре ступања у празан ход. ТНС садржи механизам за подизање и спуштање горионика и има ход од 110мм. Уређај садржи дисплеј и тастатуру који се налазе изнад командне табле, и служе за подешавање параметара који зависе од Z осе, као на пример висина горионика у току пробијања, висина горионика у току сечења и др.

На покретном делу машине попречном мосту, испод управљачке јединице налази се уређај тзв " Командна табла за подешавање гасова". На њој се врши избор плазма и инертног гаса. Такође се врши засебно подешавање гасова приликом пробијања и приликом процеса сечења. У десном углу врши се подешавање јачине струје-ампеража. Поред наведеног пре процеса сечења на овоме уређају врши се инспекција исправности и могуће појаве грешке у подешавању машине.

Горионик за сечење (Слика 4.10) налази се на крају вођица Z осе, на горњем крају је прикључак црева за плазму, док на доњем крају се налази глава за сечење (Слика 4.11), сачињена од следећих компоненти: електроде, керамичког прстена, дизне, капе дизне, штита и капе штита.



Слика 4.10 Горионик за плазма сечење



Слика 4.11 Глава и њене компоненте [4]

CNC машина за сечење плазмом користи у процесу сечења ваздушну плазму, док се за управљање путањом користи рачунарски систем. Од материјала је могуће сећи разне врсте метала, као што су челик, инокс, алуминијум, ватроотпорни челик. У зависности од врсте материјала и јачине плазме могуће је сећи материјале дебљине од 2 мм до 32 мм.

Уз рачунарску контролу, CNC плазма пружа велику тачност при сечењу уз минималну количину отпадног материјала. Припрема материјала врши се у AutoCad програму за 2D цртање, са жељеним димензијама и обликом.

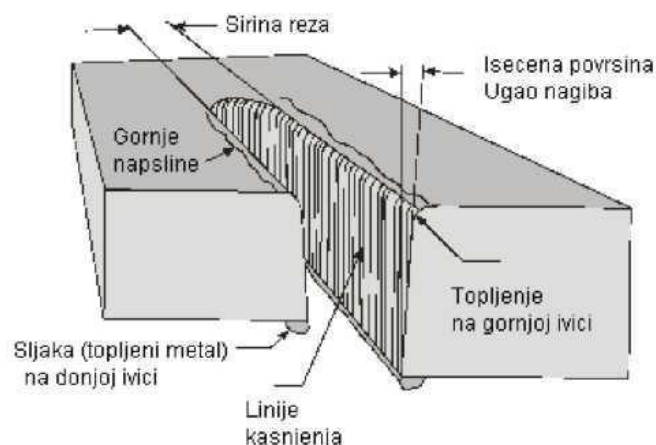
Сечење плазмом је процес који се користи за сечење челика, али и осталих метала користећи плазма пламеник. У овом процесу инертни гас (компресовани ваздух) се издувава кроз мали отвор, док истовремено електрична варница се пошаље кроз гас према површини која се сече, и тај ваздух прелази из гасног у пламено стање. Тако постаје довољно угрејан да топи материјал који се сече, а истовремено се креће великом брзином и на тај начин одувава истопљени део.

Плазма варнице су екстремно вруће и температура иде до 25 000 степени целзијуса. Некада су плазма апарати могли сећи само проводнике, мада су данас у употреби плазме које секу и материјале који не проводе струју. За CNC сечење користе се инвертоване плазме код којих се квалитет реза, већ данас може упоредити са ласерским сечењем.

Сечење плазмом је веома заступљен поступак обраде у скоро сваком процесу производње где је потребно исећи материјал прецизно. Операција сечења обрадка је далеко бржа и прецизнија него код других врста сечења. Како је сам процес сечења аутоматизован, постиже се већа продуктивност, а самим тим и појефтиније се производња због смањења људске радне снаге и појаве шкарта у процесу производње.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

Европски стандард "EN ISO 9013 - Термално сечење" дефинише терминологију и класификацију термалног сечења, садржи геометријску спецификацију производа и начин дефинисања квалитета. Стандард се примењује на материјалима погодним за гасно сечење (сечење кисеоником) од 3 до 300 mm, сечење плазмом од 1 до 150 mm и сечење ласером 0,5 до 40 mm (Слика 5.1).



Слика 5.1 Параметри квалитета код сечења плазмом [7]

Стандард "EN ISO 9013" дефинише квалитет површине преко следећих параметара:

- Одступање управности и угластости (ћошкастости),
- Средња висина неравнина-храпавост,
- Закошеност линија реза,
- Топљење на горњој ивици
- Могуће формирање неравнина или шљаке (растопљени метал у облику капљица) на дну површине реза.

Овај стандард дефинише термине као што су: ширина сечења (реза), угао нагиба површине реза итд., који се могу користити за дефинисање квалитета обраде.

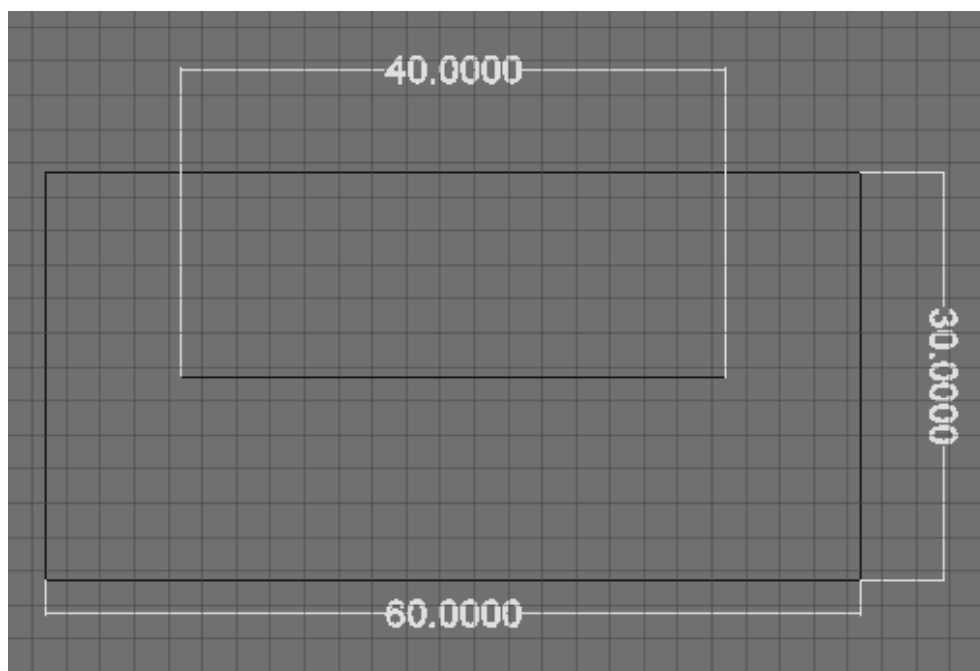
Основни параметри и фактори утицаја, који се дефинишу приликом припреме ЦНЦ машине за сечење :

- дебљина материјала
- јачина струје
- одабир цртежа
- мерне јединице цртежа
- одабир машине
- одабир алата
- ширина реза
- брзина сечења

- време предзагревања
- време задржавања горионика приликом пробијања
- висина горионика у току пробијања
- висина горионик у току сечења
- време задржавања горионика након искључивања лука
- лејер цртежа
- дефинисње комада и отпада
- дефинисање облика и дужине улаза (пробијање)
- дефинисање облика и дужине излаза
- начин програмирања (аутоматски -мануелни)
- смер сечења
- редослед сечења
- координатни почетак
- притисак ваздуха

5.1 План испитивања

У оквиру овог експерименталног испитивања приказани су резултати утицаја брзине сечења и јачине струје код сечења ласером и плазмом, на квалитет обрађене површине, дебљину реза, и одступање димензија обрађеног комада од задатих мера. За потребе експеримента је исечено дванаест комада од угљеничног челика S235JR (Č0361) димензија 10x30x60mm (слика 5.2).



Слика 5.2 Цртеж узорка

Испитивање храпавости реза је извршено на Факултету инжењерских наука на уређају Talysurf (слика 5.3 и слика 5.4). Испитивањем је добијено средње аритметичко одступање профила од средње линије профила (R_a) и максимална висина неравнина (R_{max} или R_y).



Слика 5.3 Talysurf



Слика 5.4 Увеличан приказ испитивања

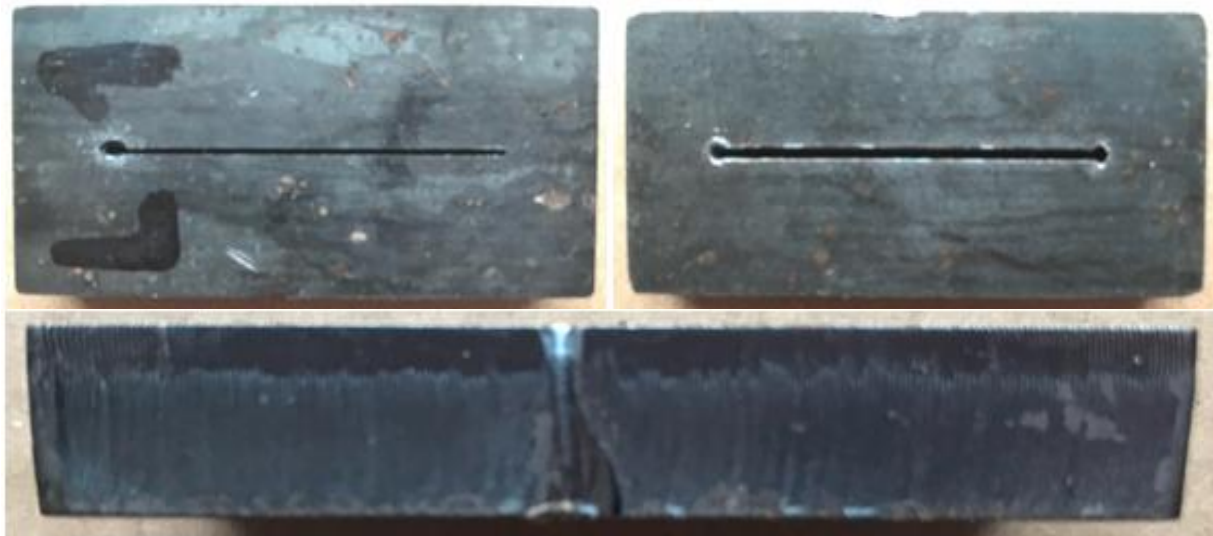
5.2 Испитивања на ласеру

Узорак 1

За сечење узорка 1 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.1 Параметри обраде за узорак 1

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 1	1500	1100	Кисеоник	0,6	150



Слика 5.5 Узорак 1

Табела бр.2 Вредности добијене мерењем узорка 1

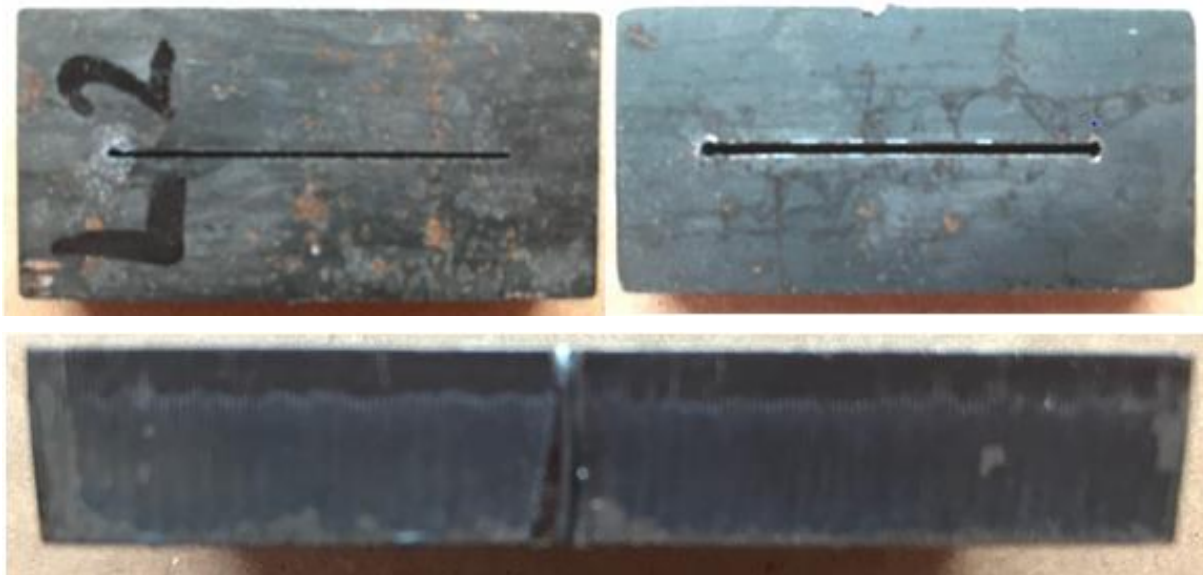
Узорак 1	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,5	58,8	29,4	28,9	0,8	1	5.0	28.4

Узорак 2

За сечење узорка 2 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.3 Параметри обраде за узорак 2

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 2	2200	1100	Kiseonik	0,6	150



Слика 5.6 Узорак 2

Табела бр.4 Вредности добијене мерењем узорка 2

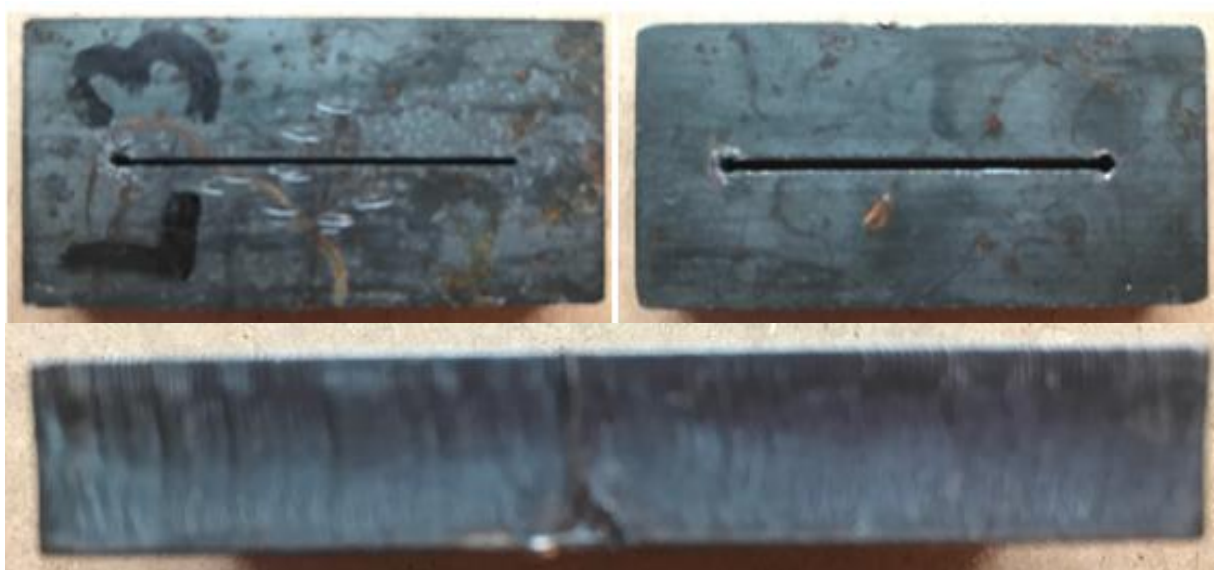
Узорак 2	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,4	58,8	29,4	28,8	0,7	1,1	9.26	69.2

Узорак 3

За сечење узорка 3 коришћени су параметри:

Табела бр.5 Параметри обраде за узорак 3

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 3	3000	1100	Kiseonik	0,6	150



Слика 5.7 Узорак 3

Табела бр.6 Вредности добијене мерењем узорка 3

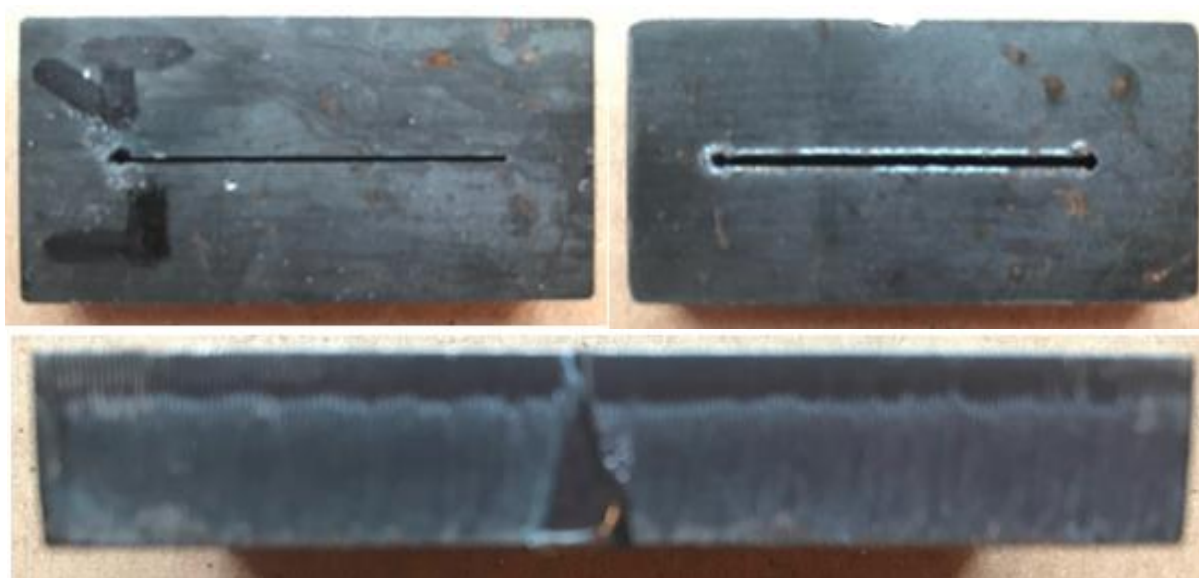
Узорак 3	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,4	59	29,4	29	0,8	1,1	9.4	43.1

Узорак 4

За сечење узорка 4 коришћени су параметри:

Табела бр.7 Параметри обраде за узорак 4

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 4	2200	700	Kiseonik	0,6	150



Слика 5.8 Узорак 4

Табела бр.8 Вредности добијене мерењем узорка 4

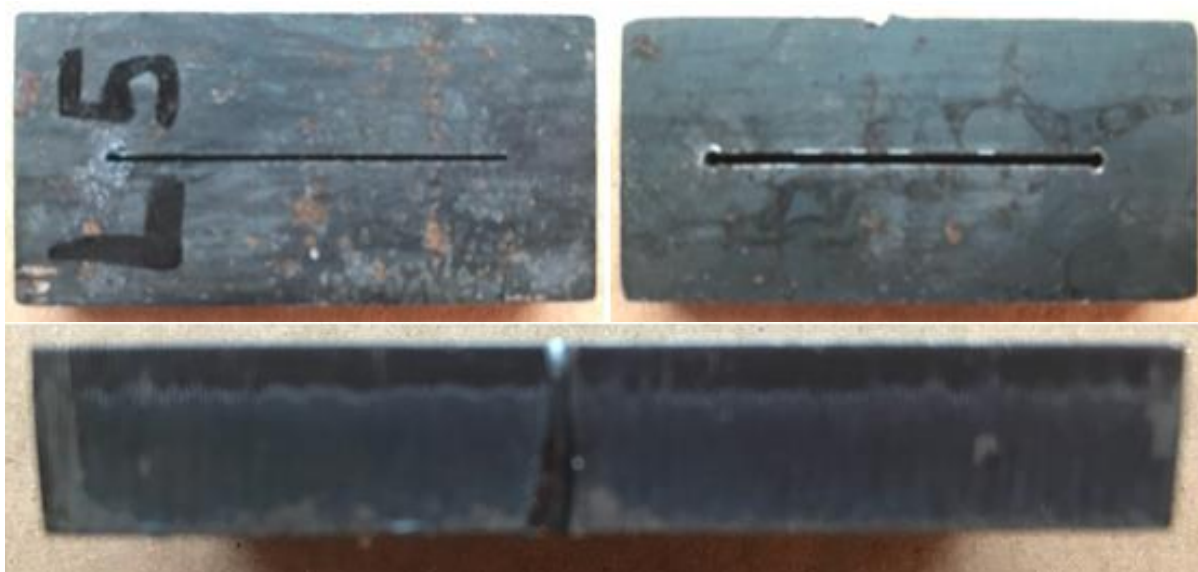
Узорак 4	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,4	58,9	29,6	29	0,7	1,2	6.95	49.3

Узорак 5

За сечење узорка 5 коришћени су параметри:

Табела бр.9 Параметри обраде за узорак 5

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 5	2200	1100	Kiseonik	0,6	150



Слика 5.9 Узорак 5

Табела бр.10 Вредности добијене мерењем узорка 5

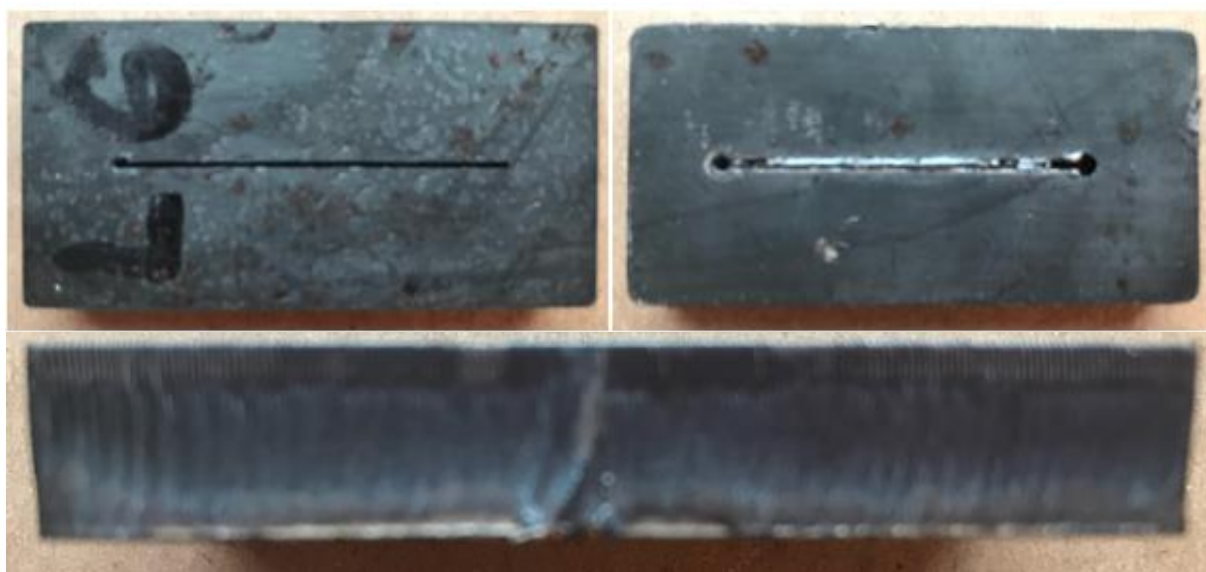
Узорак 5	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,4	58,8	29,4	28,8	0,7	1,1	9.26	69.2

Узорак 6

За сечење узорка 6 коришћени су параметри:

Табела бр.11 Параметри обраде за узорак 6

Редни бр.	Снага (W)	Брзина (mm/min)	Гас	Притисак (bar)	Удаљеност сочива (mm)
Узорак 6	2200	1400	Kiseonik	0,6	150



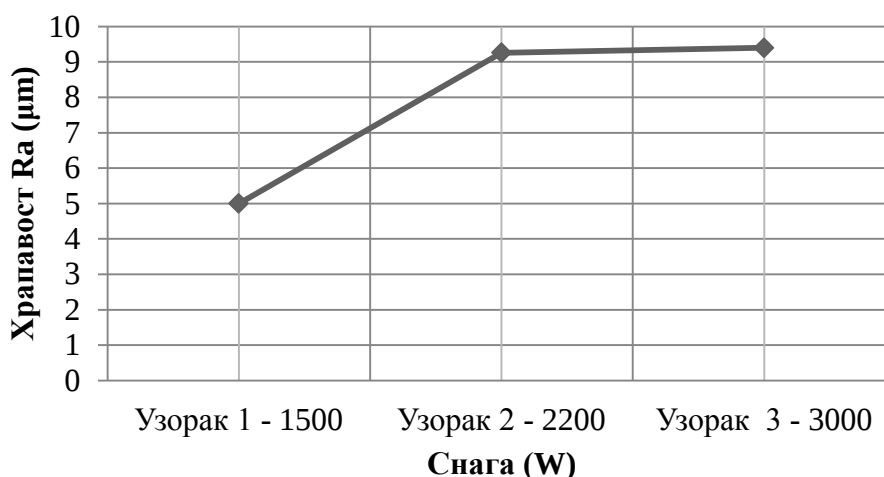
Слика 5.10 Узорак 6

Табела бр.12 Вредности добијене мерењем узорка 6

Узорак 6	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,5	59	29,5	29,1	0,6	1,0	9.26	49.6

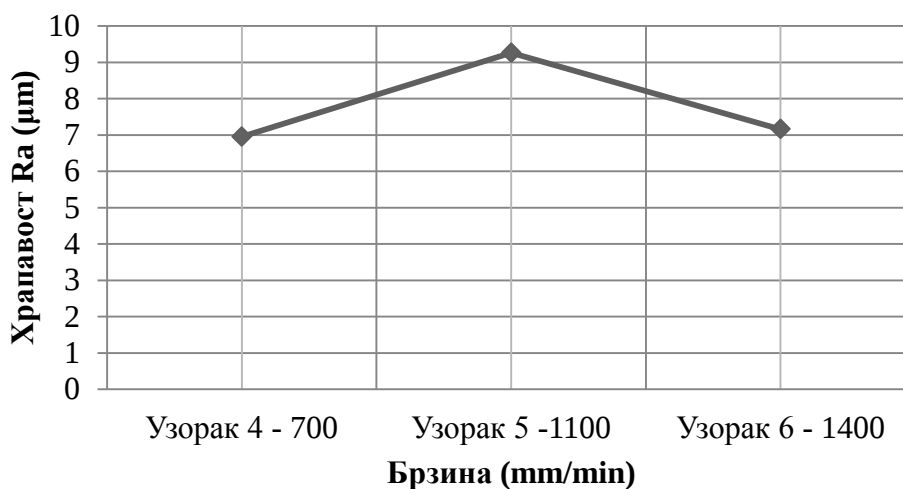
5.3 Дијаграми средњег аритметичког одступања од средње линије профила код сечења ласером

На слици 5.11 приказан је дијаграм зависности средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила од снаге ласера. Са дијаграма се може видети да је уз промену снаге, вредност средњег аритметичког одступања од средње линије профила постепено повећава. Висина неравнина за снагу 3000W је највећа, док је за снагу 1500W најмања.



Слика 5.11 Утицај снаге на храпавост код сечења ласером

На слици 5.12 приказан је дијаграм зависности средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила од брзине сечења. Висина неравнина за брзину од 1100mm/min је највећа, док је за брзину од 700mm/min најмања.



Слика 5.12 Утицај брзине сечења на храпавост код сечења ласером

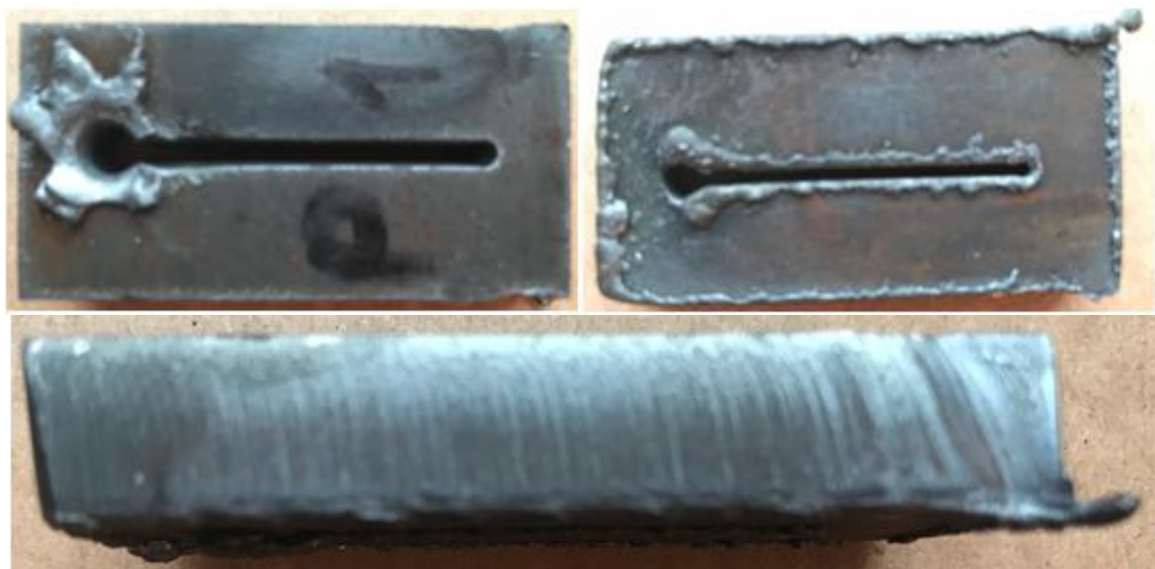
5.4 Испитивања на плазми

Узорак 1

За сечење узорка 1 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.13 Параметри обраде за узорак 1

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 1	80	950	Кисеоник	2,5



Слика 5.13 Узорак 1

Табела бр.14 Вредности добијене мерењем узорка 1

Узорак 1	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59,1	59,5	29,5	30	2,3	1,5	1,79	13,2

Узорак 2

За сечење узорка 2 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.15 Параметри обраде за узорак 2

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 2	100	950	Кисеоник	2,5



Слика 5.14 Узорак 2

Табела бр.16 Вредности добијене мерењем узорка 2

Узорак 2	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59	59,1	29,2	29,7	2,3	1,4	2,04	13,3

Узорак 3

За сечење узорка 3 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.17 Параметри обраде за узорак 3

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 3	120	950	Кисеоник	2,5



Слика 5.15 Узорак 3

Табела бр.18 Вредности добијене мерењем узорка 3

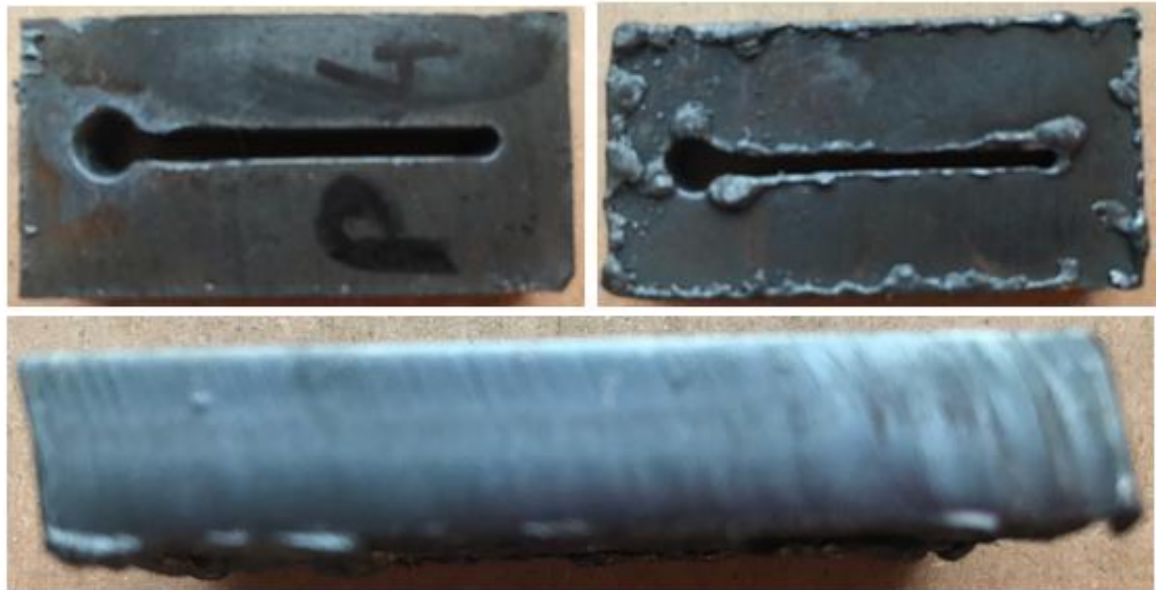
Узорак 3	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	58,5	59	28,8	29,6	2,8	1,9	1,32	10,9

Узорак 4

За сечење узорка 4 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.19 Параметри обраде за узорак 4

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 4	100	800	Кисеоник	2,5



Слика 5.16 Узорак 4

Табела бр.20 Вредности добијене мерењем узорка 4

Узорак 4	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	58,6	58,2	29,4	29,8	2,7	1,7	6,07	33,9

Узорак 5

За сечење узорка 5 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.21 Параметри обраде за узорак 5

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 5	100	950	Кисеоник	2,5



Слика 5.17 Узорак 5

Табела бр.22 Вредности добијене мерењем узорка 5

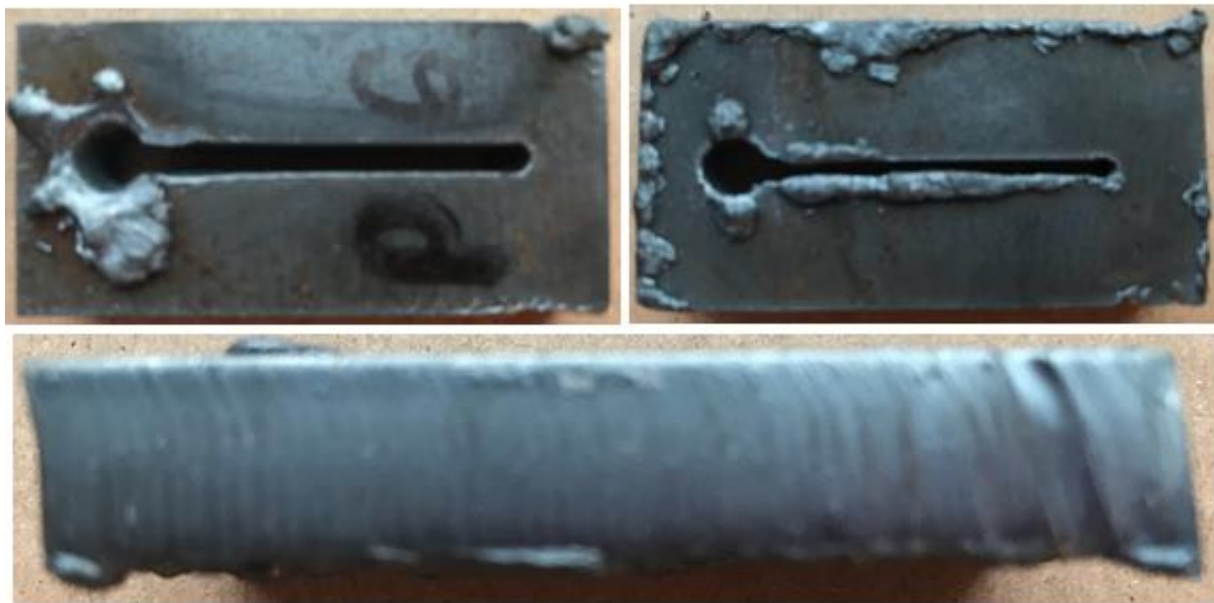
Узорак 5	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59	59,1	29,2	29,7	2,3	1,4	2,04	13,3

Узорак 6

За сечење узорка 6 коришћени су следећи параметри:

Табела бр.23 Параметри обраде за узорак 6

Редни бр.	Јачина струје (А)	Брзина (mm/min)	Гас	Удаљеност дизне од радног комада (mm)
Узорак 6	100	1100	Кисеоник	2,5



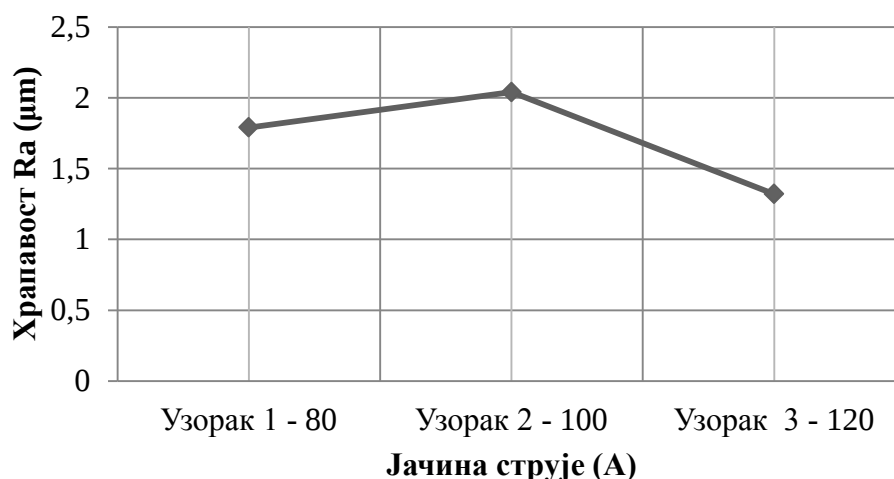
Слика 5.18 Узорак 6

Табела бр.24 Вредности добијене мерењем узорка 6

Узорак 6	Дужина са горње стране (mm)	Дужина са доње стране (mm)	Ширина са горње стране (mm)	Ширина са доње стране (mm)	Дебљина реза са горње стране (mm)	Дебљина реза са доње стране (mm)	Ra (μm)	Rmax (μm)
Задате вредности	60	60	30	30	/	/	/	/
Добијене вредности	59	59,2	29,4	29,6	2,5	1,4	1,86	9,6

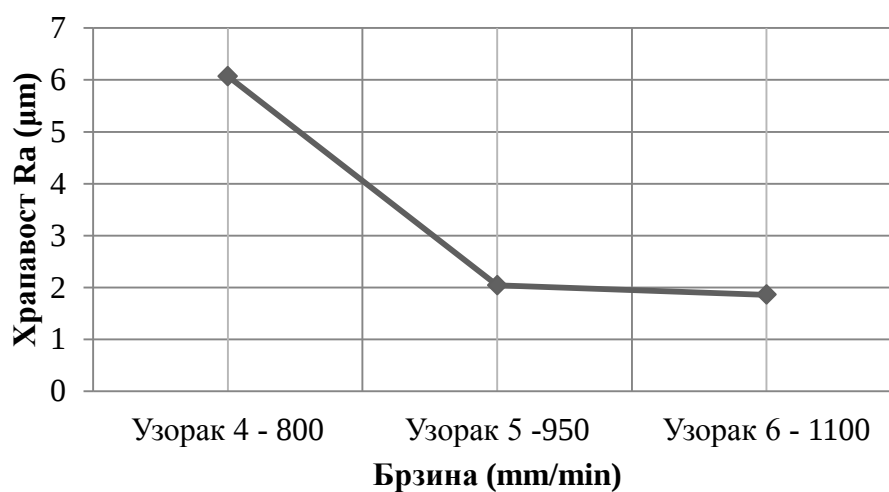
5.5 Дијаграми средњег аритметичког одступања од средње линије профила код сечења плазмом

На слици 5.19 приказан је дијаграм зависности средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила од снаге код сечења плазмом. Висина неравнина за јачину струје 100А је највећа, док је за јачину струје 120А најмања.



Слика 5.19 Утицај јачине струје на храпавост код сечења плазмом

На слици 5.20 приказан је дијаграм зависности средњег аритметичког одступања профила од средње линије профила од брзине сечења код плазме. Са дијаграма се може видети да је уз примену брзине, вредност средњег аритметичког одступања од средње линије профила постепено пада. Висина неравнина за брзину од 800mm/min је највећа, док је за брзину од 1100mm/min најмања.



Слика 5.20 Утицај брзине сечења на храпавост код сечења ласером

6. ЗАКЉУЧАК

Неконвенционални поступци обраде нуде много већи спектар могућности обликовања метала, најчешће без физичког стругања материјала. Они обраду чине много бржом, једноставнијом, безбеднијом и лакшом. Једина мана неконвенционалних поступака обраде у односу на конвенционалне поступке обраде резањем, јесте далеко већа цена набавке и одржавања машина. Али и тај проблем се свакодневно све више смањује, јер су произвођачи приморани да смањују цене под притиском кинеских понуђача машина и опреме.

Интеграцијом CNC технологије и технологије сечења ласером плазмом добијен је технички систем који представља најбољи однос цене и квалитета за већину серијских, као и малосеријских типова производње. Поред тога, брзина обраде је далеко већа од технологије обраде резањем.

Систем је врло једноставан за управљање. Контролише се у потпуности преко одеђених софтвера, који су прилагођени стандардним рачунарима, CAD софтверима и лако су доступни.

Аутоматизација је, путем CNC технологија, достигла највиши могући ниво, резултат чега је минимализован утицај људског фактора и могућност грешке или шкарта у производњи.

Захваљујући меморисаним програмима сечења постигнута је поновљивост идентичног комада у неограниченом броју. Овај поступак, најчешће, представља најбољи избор и за производњу појединачних комада, због брзине, једноставности и квалитета сечења.

На основу реализованих испитивања може се закључити да код сечења ласером промена параметара обраде не утиче значајно на димензије предмета, мада постоје разлике код параметара као што су храпавост обрађених површина и дебљина реза. Са повећањем снаге резања храпавост површина расте док са повећањем брзине кретања предмета храпавост се незнатно мења.

Код испитивања сечења плазмом може се закључити да се са повећањем брзине кретања храпавост добијених површина смањује, док промена јачине струје нема много утицаја на квалитет резања. Код сечења плазмом добија се површина мање храпавости него при сечењу ласером, али је квалитет обраде са много троске, које код сечења ласером готово да нема. Ширина реза је знатно већа и значајнија је разлика ширина реза на улазу и излазу плазменог лука из предмета обраде.

Кад се узме у обзир да је сечење на ласеру много скупље у односу на сечење плазмом може се закључити да уколико не постоји захтев за високу тачност обраде дела или је неопходна механичка обрада након сечења, економичније је користити плазма поступак резања. Ако се део користи без накнадне механичке обраде и захтев је за серијском производњом, боље је користити сечење ласерским снопом.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић М., Лазић М.: Производне технологије-обрада метала резањем, предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
- [2] Лазић М. : Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [3] <https://www.engineeringclicks.com/plasma-arc-cutting-pac/> 1.2018.
- [4] <http://www.westermans.com/cncplasma.aspx> 1.2018.
- [5] <http://www.cityplasma.co.uk/cnc-plasma-cutter-table/>1.2018.
- [6] http://www.bocgas.com.au/internet.lg.lg.aus/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology351_68107.pdf
- [7] Квалитет обраде код плазма сечења- IMK14-No.19-1-2_SR
- [8] <http://wophotonics.com/portfolio-item/laser-drilling-of-optical-fibers/> 1.2018.
- [9] Иван Пантић, Примена технологије обраде ласером, Дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу
- [10] Svelto O.: Principles of Lasers Fifth Edition, Polytechnic Institute of Milan and National Research Council Milan, Italy
- [11] <http://www.warsash.com.au/products/laser-systems/MICROMACHINING.php> 1.2018.
- [12] <https://weldguru.com/laser-beam-welding/> 1.2018.