

**Факултет инжењерских наука Универзитета у
Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 403/2017

Никола З. Николић

**Савремени обрадни системи за сечење ласером и
абразивним воденим млазом**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић

2. _____

3. _____

Датум одбране:

Оцена:



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Никола Николић**

Број индекса: **403/2017**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Савремени обрадни системи за сечење ласером и абразивним воденим млазом**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о савременим обрадним системима који се користе за сечење ласером и воденим абразивним млазом. Потребно је извршити анализу поступака обраде, описати суштину процеса сечења и дати карактеристике савремене опреме на примерима машина из предузећа у Крагујевцу. У посебном делу рада извршити експериментална испитивања квалитета обраде на расположивој опреми.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Обрада ласером и воденим абразивним млазом,
3. Савремена опрема за обраду ласером и воденим абразивним млазом,
4. Експериментална испитивања,
5. Закључци,
6. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 16.11.2019.

Резиме

У оквиру овог мастер рада извршена је анализа процеса обраде ласером, као и обрада абразивним воденим млазом. Поред анализе представљене су савремене машине које се данас користе за обраду специјалних челика попут описаних. Мастер рад је посвећен упознавању са технологијом квалитета обраде воденим абразивним млазом, као и експериментално утврђивање зависности квалитета обраде од радних параметара АWJM машине. Дати су основни принципи рада, утицај параметара на процес обраде као и карактеристике обрађене површине воденим абразивним млазом.

Кључне речи: *обрада ласером, АWJM, храпавост, резање*

Abstract

In the course of this master's work, an analysis of the laser treatment process as well as an abrasive water jet treatment was performed. In addition to the analysis, modern machines used to process special steels such as those described are presented today. The master's work is dedicated to learning about the quality of water abrasive blasting technology, as well as experimentally determining the dependence of machining quality on the operating parameters of the AWJM machine. Basic principles of operation, influence of parameters on the processing process and characteristics of the treated surface with a water abrasive jet are given.

Key words: *laser treatment, AWJM, roughness, cutting*

Садржај

1. Уводна разматрања.....	5
2. Теоријска анализа процеса обраде ласером (LBM).....	8
2.1. Врсте ласера	9
2.1.1.. Чврсти ласери.....	10
2.1.2. Течни ласери.....	10
2.1.3. Гасни ласери.....	10
2.2. Опис настанка ласерског зрака и опис ласера	15
2.2.1. Настанак ласерског зрака.....	15
2.2.2. Структура ласерског постројења	18
2.2.3. Особине ласерског зрачења	19
2.2.4. Геометријске карактеристике ласерског зрака F	20
2.3. Принцип обраде	22
2.4. Технолошки поступци	28
2.4.1. Обрадљивост материјала ласером	29
2.4.2. Отврдњавање ласером.....	33
2.3. Ласерско бушење	34
2.4. Заваривање ласером	35
2.5. Ласерско гравирање	37
2.6. Ласерско сечење.....	38
3. Анализа процеса обраде абразивним воденим млазом (AWJM)	41
3.1. Развој воденог млаза	42
3.1.1. Обрада абразивним воденим млазом.....	43
3.1.2. Абразив.....	44

3.2. Принцип обраде	46
3.3. Технолошки поступци	50
3.3.1. Утицај параметара на процес резања	51
3.3.2. Карактеристике обрађене површине абразивним воденим млазом ...	54
3.3.3. Квалитет реза	55
4. Опрема за LBM и AWJM обраду	57
4.1. Опрема за ласерску обраду	57
4.1.1. Глава ласера	58
4.1.2. Покретна јединица	59
4.1.3. Резонатор	60
4.1.4. Програмско радно место	60
4.2. Опрема за обраду абразивним воденим млазом	61
4.2.1. Систем за припрему воде	62
4.2.2. Погонски део	62
4.2.3. Магацин абразива са системом за довод абразива	63
4.2.4. Резна глава	64
4.2.5. Радни сто	65
4.3. Савремене машине за обраду сечењем	66
4.3.1. Prima power fiber laser 1530 снаге 3 KW (Platino Fiber)	66
4.3.2. Фибер ласер машина „NUKON NF 2060 - 3 kW SERIES“	69
4.3.3. WJS NCP 30	71
5. Експериментална испитивања и резултати	75
5.1. Материјали коришћени за експеримент	75
5.1.1. Weldox 700	75

5.1.2. Hardox 400	77
5.1.3. Protac 500	79
5.1.4. Č0563 (ST 52-3)	80
5.2. Обрада абразивним воденим млазом PTV WJ 2030-1Y-SJ-L.....	81
5.3. План експеримента	83
5.4. Ток експеримента.....	84
5.5. Резултати експерименталних испитивања	84
6. Закључци	92
Литература	93

1. Уводна разматрања

Индустрија представља једну од најзначајнијих и најбрже растућих грана привреде. Након Другог светског рата, индустрија бележи веома брз развитака, а овакав прогрес ствара нове тенденције. Наиме, креће развитака аутомобилске, авионске, нуклеарне, металуршке индустрије и настаје потреба за новим материјалима и новим начинима обраде. Услед специфичности захтева индустрије и услед нових особина материјала старији начини обраде више нису могли да прате и задовоље брзину развијања, те настају нови, јединствени начини обраде. Материјали тадашњег доба, као и материјали садашњости добијају јединствене особине које захтевају непрестално надограђивање – веће тврдоће, високе отпорности на топлоту, економичност, прецизност, особине које су захтевале специфичну обраду и тиме уткале пут стварању нових метода обраде материјала које се називају неконвенционали поступци обраде.

Техничко-технолошки напредак и константно развијање великог броја различитих техника као што су авионска, нуклеарна, рачунарска и друге технике, довео је до незаустварног 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].

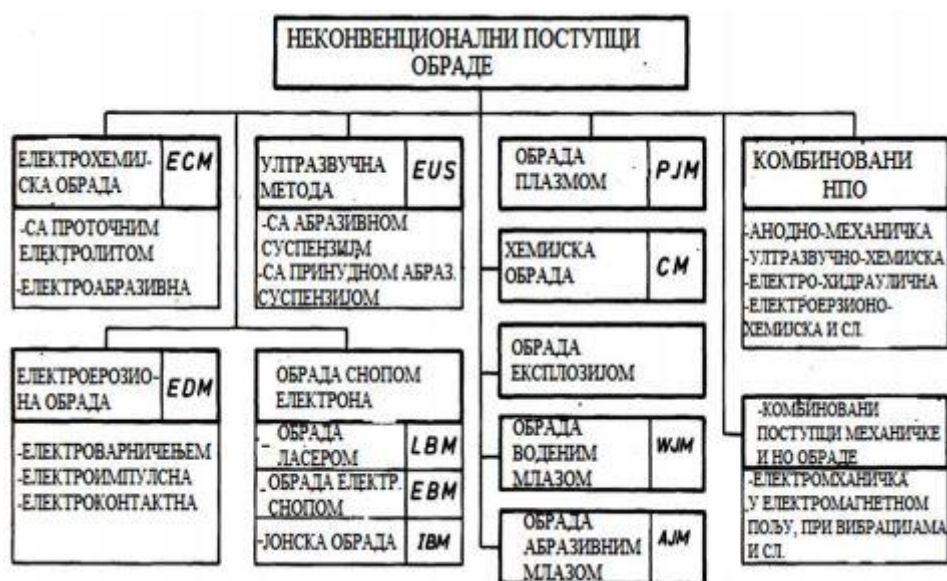
Неконвенционални поступци обраде - НПО су поступци обликовања уклањањем вишка материјала различитим физичко-хемијским механизмима, коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне и других видова енергије [2].

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) Електрохидрауличне 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 [3]

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 обратка;
- Могућност обраде изузетно сложених површина;
- Могућност обраде тешкообрадљивих материјала;
- Практично нема контакта и механичких сила између алата и обратка;
- Независност квалитета обрађене површине и производности од механичких својстава материјала обратка (тврдоћа, жилавост,...);
- Значајно је смањење одстрањеног материјала у односу на конвенционалне поступке обраде итд. [3].

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 [3].

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 [3].

У раду се описује детаљна теоријска анализа ласера, принцип рада, врсте ласера, технолошки поступци, као и настанак ласерског зрака, што је представљено у другом поглављу.

Треће поглавље се састоји од детаљне теоријске анализе и принципа рада обраде абразивним воденим млазом, технолошки поступци истог, као и сам развој воденог млаза и абразива који имају своју намену.

Затим у четвртм делу дате су ласерске машине и машине за обраду абразивним воденим млазом, као и савремене машине које се данас примењују за продуктивнију и адекватнију обраду уз што бољи квалитет резне површине.

Експериментални део се састоји из више тачака које су имале за циљ да што веродостојније објасне и покажу примену машине PTV WJ 2030 1Y-SJ-L, такође и употребу различитих материјала на којима су одређени параметри попут храповости површина и улазних и излазних ширина реза.

2. Теоријска анализа процеса обраде ласером (LBM)

Ласер представља светлост електромагнетних таласа у видљивом спектру. 1704. године Њутн је окарактерисао светлост као струјање малих делића (честица). Ласери су уређаји за генерисање и појачавање монохроматских кохерентних електромагнетних таласа у видљивом, инфрацрвеном ултраљубичастом и у последње време рендгенском делу спектра. Ајнштајн је постулирао постојање фотона као појавног облика светлости. Светлост има способност таласања. Максвелова електромагнетна теорија је објаснила појам светлости као брзину вибрација у електромагнетном пољу проузрокованих осциловањем честица.

Први ласер је пронађен у Мајамију, маја 1960. године. То је био рубинов ласер изузетне чврстоће. Кумар Пател је рођен 1938. у Барамати, у Индији 1964. Године. Кумар Пател је изумео CO_2 ласер. Од 1961. се бави истраживањем ласера, што доводи открићу CO_2 ласера 1963. године. Први плински ласер велике снаге употребљен је 1964. године. Успркос његовом труду да нађе користан начин употребе тог уређаја, CO_2 ласер своју практичну примену има тек данас.

Ласерски сноп, који емитује ласерско тело разликује се од других познатих видова светлости:

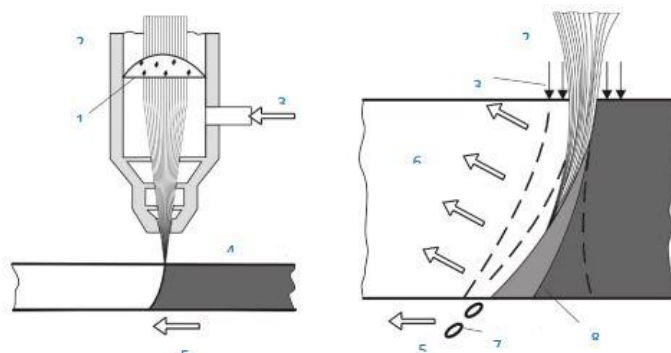
- Ласерски зраци су монохроматски, тј. имају само једну одређену таласну дужину;
- Ласерски зрак је висококохерентан, са паралелним зрацима исте фазе;
- Ласерски зрак може да се фокусира на веома малу површину и да обезбеди високу густину.

Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде (слика 1). Овај нови правац обраде материјала добио је назив ласерска технологија [5].

1954. конструкција првих уређаја за појачавање микроталасног зрачења. Конструкција првог гасодинамичког CO_2 ласера- 1966. Касније се конструишу многи ласери са чврстим супстанцама као активном средином. Сви ови ласери називају се оптички, јер покривају углавном видљиви део спектра. Од 1984. интензивно се ради на развоју рендгенског ласера [5].

За последњих 16 до 18 година технолошки процеси који се базирају на локалном загревању обрађиване површине помоћу ласера, добијају значајан развој и примену. Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома

различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде. Овај нови правац обраде материјала добио је назив **ласерска технологија**.



Слика 2.1. Принципијелна шема формирања ласерског снопа: 1-Сочиво за фокусирање, 2-Ласерски снап, 3- Радни гас, 4-Предмет обраде, 5-Вр, 6-Испаравање материјал, 7-Честица материјала, 8- Разгрејана зона [5]

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. Врсте ласера

Постоји више критеријума за поделу ласера. На слици 2.2. приказана је најчешћа подела.



Слика 2.2. Подела ласера [5]

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.

У ласерима на бази течности постиже се иста концентрација активних честица као и у активној средини на бази чврстих тела, тако да се може добити велика енергија зрачења по јединици запремине. Течност је оптички хомогенија од чврстог тела, па су зато у течности мањи губици зрачења него у чврстим телима, у којима постоје разни дефекти у структури. Хлађење течности као активне средине врши се циркулацијом што представља једноставну и ефикасну методу. Недостатак ласера на бази течности представља временска нестабилност раствора. У раствору се већ након 1÷2 месеца стварају талози који битно смањују ласерско зрачење [5].

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 CO_2 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, молекуларни 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.

CO_2 ласери емитују светлост таласне дужине $10,6 \mu\text{m}$ те имају укупну ефикасност отприлике 10 до 13%. За стварање ласерског зрака CO_2 користе мешавину гасова. Мешавина се састоји од хелијума, азота, CO_2 и других додатака. Активни медиј ласера, гас CO_2 је стимулисан електричним пражњењем. Током тог процеса молекули азота предају енергију од судара електрона молекулима CO_2 . Прелаз из вишег енергетског нивоа побуђених CO_2 молекула у нижи енергетски ниво се постиже отпуштањем фотона, што доводи до стварања ласерског зрака. Сударањем молекула CO_2 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 CO_2 , N_2 и He. Осцилације се одвијају на два различита вибрирајућа нивоа молекула CO_2 , док N_2 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 снап 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;
- 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.

Ласер се састоји од:

Стаклене цеви у којој се налази смеша гасова: угљениковог диоксида, азота, хелијума и евентуално неког другог гаса. На крајевима цеви се налазе два паралелна

огледала, која су премазана слојем силикона, молибдена или злата, која рефлектују ласерски зрак натраг у цев и формирају резонатор. Сочива и прозори су направљени од германијума и цинкселенида $ZnSe$. У цеви се налазе и електроде на које је прикључен високи напон. Високи напон производи мноштво брзих електрона у цеви који сударима предају своју енергију молекулима плина [4].

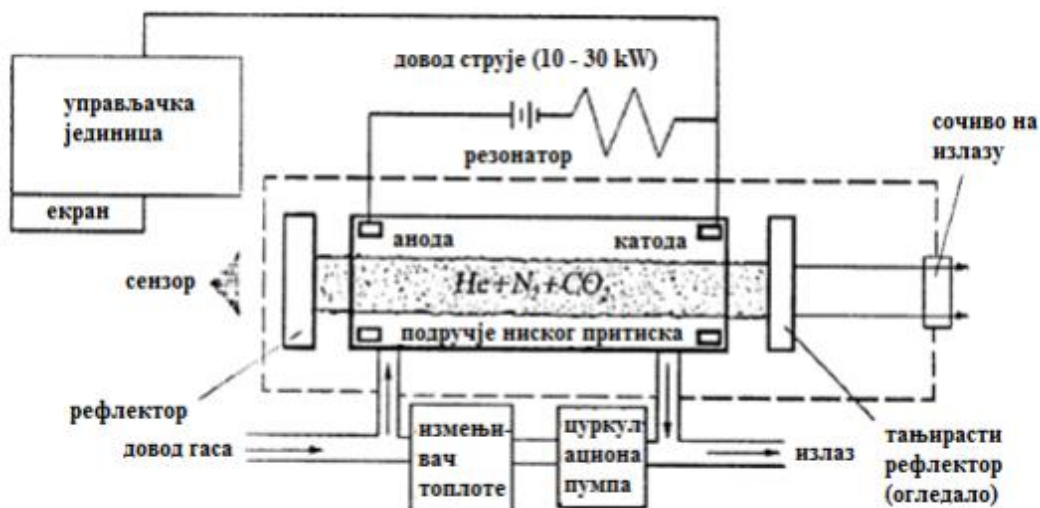


Слика 2.3. *Стаклена цев у којој се налази смеша гасова [4]*

Састав ласерске гасне мешавине је зависан од врсте ласера, снаге и произвођача. Ласерски гасови се обично достављају у посебним плинским боцама или су претходно смешани у једној боци. Нечистоће у ласерској гасној мешавини, могу створити проблеме у раду CO_2 ласера, и смањити му излазну снагу, дестабилизovati електрични набој или повећати потрошњу ласерских плинова. Уз то нечистоће утичу на интерну оптику, смањујући трајност огледала, а поправке могу бити скупе [4].

CO_2 ласер нуди пуно већу снагу и то до 50 kW. Састави до приближно 4 kW, често се користе за ласерско сечење. Поступак стварања ласерских зрака у CO_2 ласеру, темељи се на следећим ласерским гасовима: на CO_2 , азоту и хелијуму. Те гасове је потребно уредно контролисати и поставити строге стандарде за квалитет. Гасови у CO_2 ласеру производе светлост у инфрацрвеном подручју, што значи да ласерски сноп није видљив.

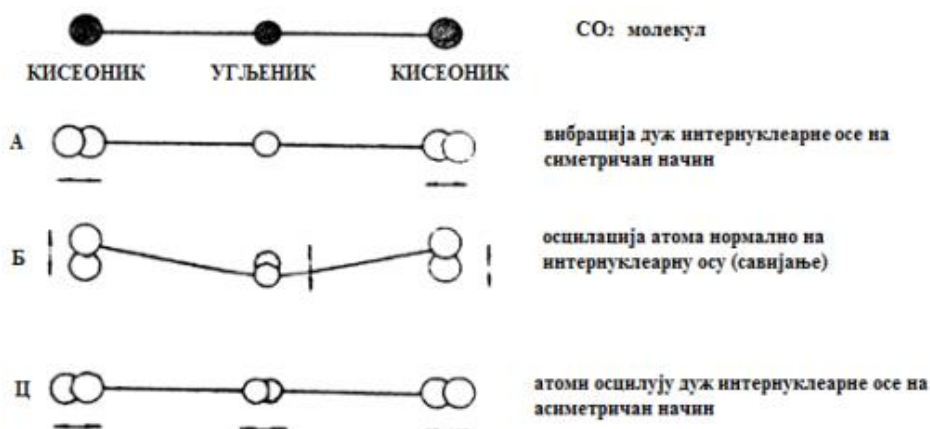
Енергија протока гаса неопходна за процес електричног пражњења је знатно већа од потребне енергије. Једна од ефективних метода за решавање овог проблема је да се изврши претходна јонизација гаса, а самим тим да се смањи напон електричног пражњења. Ефикасност CO_2 ласера је знатно изнад оне која се креће код других типова ласера. Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина [9].



Слика 2.4. Принцип обраде CO₂ ласером [10]

Ови ласери могу да емитују велике снаге. За постизање великих снага израђују се ласери великих дужина. Ласерска емисија је добијена на неколико стотина прелаза у области од 8,7 до 11,8 μm , с тим што се најснажнија емисија добија у области 10,6 μm . Први CO₂ ласер је прорадио са чистим CO₂, а веће снаге су добијене тек када је додат азот који је вишеструко повећао снагу ласера [1].

Вибрациона стања CO₂ молекула се описују са три квантна броја V1: описује број вибрационих кваната у симетричном моду, V2: број вибрационих кваната у моду савијања, V3: број вибрационих кваната у асиметричном моду осциловања. Као додатни гас најчешће се употребљава хелијум. Улоге He су следеће: Услед велике топлоте проводности, He смањује температуру гаса у пражњењу, па на тај начин смањује број сударних деекситација горњег ласерског нивоа CO₂ (001); Смањује температуру електрона у пражњењу, што доводи до ефектније екситације N₂ (V=0) у N₂ (V=1) и CO₂ (000) у CO₂ (001); Врши ефикасно деекситацију CO₂ (010) нивоа [1].

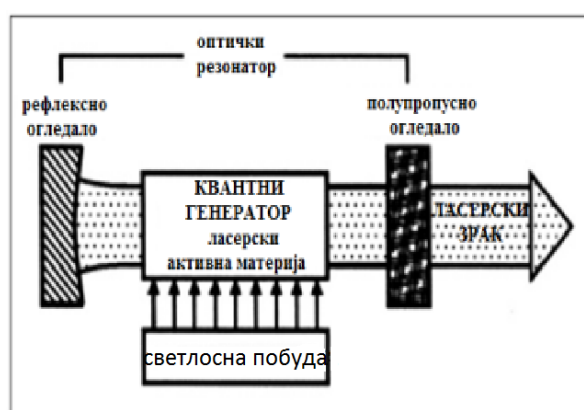


Слика 2.5. Молекула CO₂ [1]

2.2. Опис настанка ласерског зрака и опис ласера

2.2.1. Настанак ласерског зрака

Ласерски зрак се добија у ласерском резонатору, чија је принципијална шема дана на слици 2.6. Саставни делови тог резонатора су: квантни генератор, кога чини ласерски активна материја, извор светлосне побуде и два паралелна огледала; лево које рефлектује светлост и десно које делимично пропушта светлост (највише до 10%), овде називамо полу пропусно огледало. Физикални процеси добијања ласерског зрака, тј. стимулације (индуковане) емисије зрачења. Процес се одиграва у ласерски активинвој материји – квантном генератору под непосредним дејством спољашње светлосне побуде.

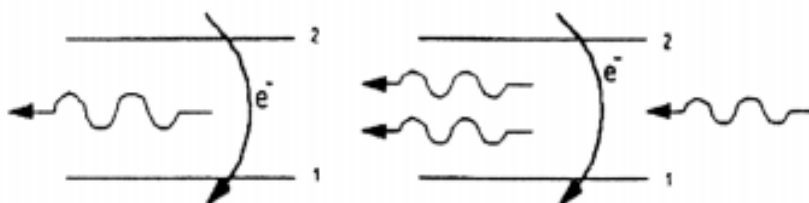


Слика 2.6. Принципијална шема извора ласерске светлости – оптичког резонатора [3]

Сваки фотон има енергију пропорционалну фреквенцији светлости коју репрезентује, а обратно пропорционалну таласној дужини:

$$E_{\text{fot}} = h\nu = h \cdot c/\lambda = h\omega/2\pi$$

Први ослобођени фотон или сноп фотона треба да буде исте енергије (таласне дужине) као и фотони које ће емитовати атоми при преласку из побуђеног у основно стање; у том случају сакупљена светлост биће монохроматска и високо кохерентна [1].

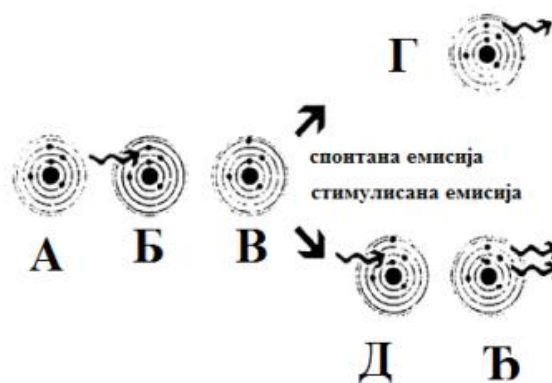


Слика 2.7. Ослобођени фотони [1]

Основа за функционисање ласера је својство неких супстанци да спонтано остварују инверзну насељеност енергијских нивоа [1].

Велики број електрона при том напушта основне нивое и сели се у виша, метастабилна стања, одакле могу, опет спонтано, да се врате у нижи енергетски ниво и емитују фотон чија је енергија једнака разлици енергије два нивоа између којих се врши прелаз:

$$E_{\text{fot}} = \Delta E = E_{\text{meta}} - E_0$$

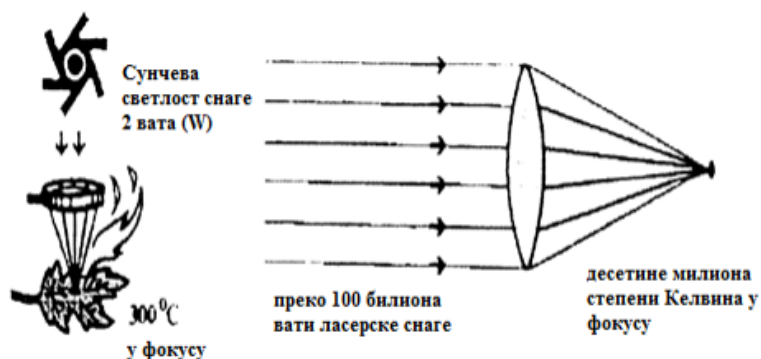


Слика 2.8. *Спонтанна и стимулисана емисија* [1]

На слици 2.8. приказано је следеће:

- А - Атоми са електронима у различитим енергетским стањима,
- Б - Фотон резонантне енергије пада на атом побуђује један електрон,
- В - Електрон се подиже на виши енергетски ниво,
- Г - После истека времена живота електрон се враћа на првобитни ниво и емитује фотон,
- Д - Други фотон исправне енергије погађа атом пре него што електрон спонтано падне на предходни ниво,
- Ђ - Атом емитује идентичан фотон у истом правцу и смеру као и упадни фотон.

Код активних супстанци већи број електрона се налази у метастабилним стањима, што их чини погодним за коришћење код ласера. Уколико се кроз такву средину пропусти фотон или сноп фотона са резонантном енергијом, наступиће тзв. стимулисано зрачење у облику прелаза са виших на ниже нивое у многим атомима, што ослобађа нове фотоне који пропадају у истом правцу и смеру као и упадни фотони. На овом ефекту је заснован рад највећег броја ласера [1].



Слика 2.9. Фокус ласерске снаге при сечењу [1]

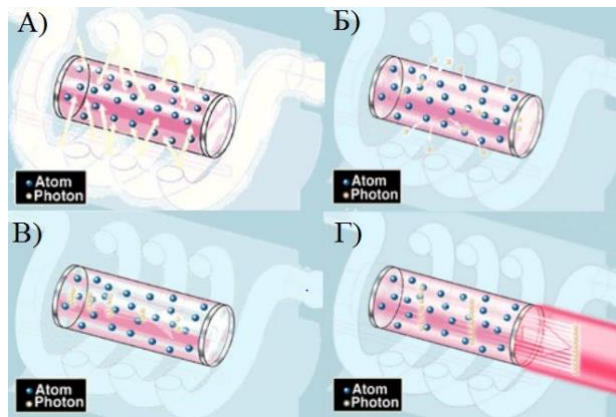
Емитована светлост је монохроматска (сви фотони су исте таласне дужине, односно енергије. Први, Маиманов ласер (1960.) је као активну средину користио рубин-кристал алуминијумског оксида (Al_2O_3) у коме су неки атоми алуминијума (0,05% целокупног броја) замењени атомима хрома (Cr) [1].

Ласерски зраци су кохерентни, са константном фазном разликом и строго паралелни. Убрзо после појаве првог оптичког ласера успешно су се показали и неодим (Nd), празеодим (Pr), талијум (Tm), холијум (Ho), ербијум (Er), итербијум (Yb), гадолинијум (Gd), па чак и уранијум (U); коришћени су и страни супстрати, као нпр. YAG (итријумалуминијумски гранит), калцијум флуорид (CaF_2) и др. 1962. совјетски физичари Басов и Ораевски пројектовали су метод добијања инверзне популације у молекуларним системима путем наглог хлађења гаса [1].

Прототип првог гасног ласера прорадио је 1962. год. у “Avco Everett” истраживачкој лабораторији [1].

CO_2 ласери данас имају веома широку примену, посебно за припрему, сечење, топљење и легирање материјала. Поред CO_2 ласера, главни кандидат за улогу “драјвера” у процесу ласерске фузије је ласер на неодимском стаклу (коришћен је у уређају “Nova”). Радна супстанца је хемијски чисто стакло допирано атомима неодима (Nd). Још једна врста која би се користила за процесе директне фузије је гасни ласер на бази мешавине криптона и флуора са додатком аргона (KrF- ласер). Данас се употребљавају ласери на бази металних пара, течних органских боја и полупроводнички ласери. [1].

Поларни вештачки кристал рубина величине оловке $\phi=7\text{ mm}$ и $l=125\text{ mm}$, ставља се унутар спиралне импулсне лампе или паралелно са правом лампом. Горње чело кристала је посребрено, а доње је полупосребрено, или се близу чела кристала ставе два квалитетна огледала, строго паралелна и нормална на осу кристала, која представљају оптички резонатор. Око рубинског штапа и лампе налази се плашт са рефлектујућом површином. Код савремених ласера сви елементи ласера стављају се у омотач ласера који се хлади посебним системом хлађења ваздушним или воденим.



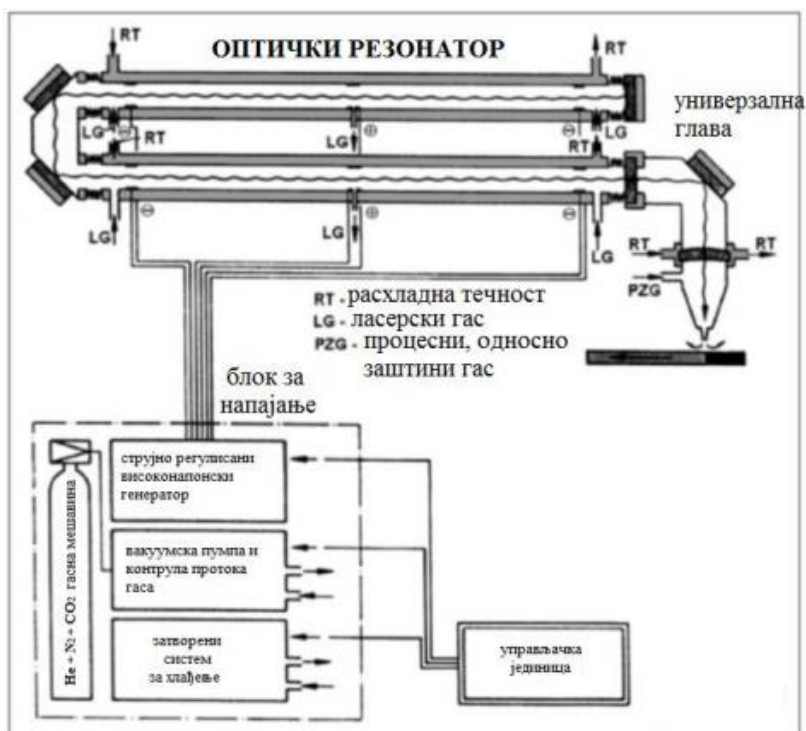
Слика 2.10. Појаве које се дешавају у рубинском ласеру [2]

- А) Кварцна лампа емитује светлост која изазива побуђивање атома у кристалу рубина на виши енергетски ниво.
- Б) На већем енергетском нивоу неки атоми емитују фотоне. Фотони атома изазивају стимулисану емисију фотона других атома.
- В) Огледала на крајевима рефлектују фотоне. Интензитет светлости се рапидно повећава.
- Г) Фотони излазе кроз полупропусно огледало. То је ласерски светлосни сноп.

2.2.2. Структура ласерског постројења

Ласерско постројење има задатак да обезбеди генерисање ласерског зрака одређених карактеристика, као и да осигура његово вођење и обликовање пре самог усмеравања на површину обратка. Осим тога оно мора да обезбеди прихватање и стезање обратка, као и потребна кретања при обради слично као код машина за обраду резањем. Ласерска постројења сачињавају низ јединица које обављају одређене задатке, а све су преко контроле и управљања повезане у једну функционалну целину. У састав ласерских постројења улазе следеће:

- Ласер, односно јединица за добијање ласерског зрака;
- Оптички систем за вођење и обликовање зрака;
- Систем за хлађење ласерске јединице и оптичког система (сочива, призми, огледала);
- Јединица за напајање електричном енергијом или енергетским гласовима;
- Систем за контролу и управљање целим постројењем;
- Радна јединица која обезбеђује прихватање обратка и даје потребна кретања при обради;
- Сигурносни систем, с обзиром да неконтролисани излазак ласерског зрака из постројења може бити катастрофалан за послужоца и околину.



Слика 2.11. Шематски приказ структуре ласерског постројења са CO₂ – ласером [3]

На слици 2.11. дат је шематски приказ структуре ласерског постројења за обраду помоћу CO₂ – ласера на којој су приказане неке од предходно наведених јединица. Врсте активне материје у квантном генератору представљају најважнију карактеристику ласерског постројења на основу које се дефинише његова номинална снага и подручје економичне примене. Активна материја ласера може бити у сва три агрегатна стања, односно у чврстом, гасовитом и течном стању, зависно од жељене снаге и подручја примене [3].

2.2.3. Особине ласерског зрачења

Ласерско зрачење се разликује од зрачења техничког светлосног извора по великој спектралној густини енергије, великој дужини кохеренције таласа, стационарном фронту таласа у снопу ласерског зрачења, великој стабилности амплитуде као и у могућности производње ултракратких светлосних импулса.

Осим тога, ласерско зрачење се разликује од других извора електромагнетне енергије малим степеном дивергенције својих таласа тј. врло уским правцем свога распрострањања. Зрачење ласера има висок степен монохроматичности, тј. садржи веома уски интервал таласних дужина.

Монохроматичност одређује дијапазон фреквенција, односно таласних дужина, садржаних у зрачењу, тј. ширину спектра ласерског зрачења. Степен

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

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

где је:

$\Delta\lambda$ - ширина спектра

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

Дивергенција (разилажење) снопа ласерских зрака одређује се из израза:

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

где је:

d - пречник ласерског материјала (активне средине)

λ - таласна дужина зрачења

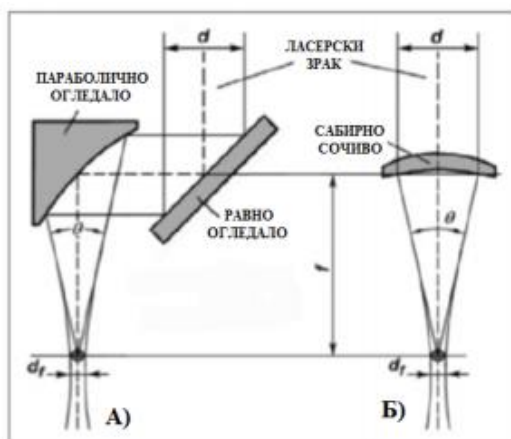
Дивергенција утиче на пречник фокусираног снопа ласерских зрака, а стога и на максималну густину снаге која се може добити при фокусирању.

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

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

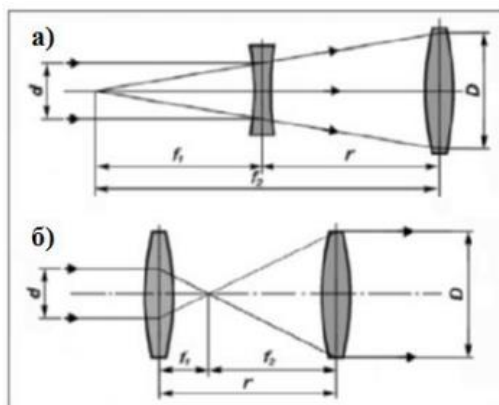
2.2.4. Геометријске карактеристике ласерског зрака F

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



Слика 2.12. Карактеристичне величине фокусираног ласерског зрака а) фокусирање помоћу параболичних огледала, б) фокусирање помоћу сабирних сочива [3]

Попречни пресек ласерског зрака d може задржати исту меру као на изласку из резонатора, или се применом телескопа та мера може повећати на пречник D . На слици 2.13. је шема два типа ових телескопа, са којима се може видети да се промена пречника ласерског зрака врши променом растојања r између сочива телескопа. Вредност пречника ласерског зрака утиче на пречник фокусираног зрака, што ће касније бити и практично показано, па се исти може користити за регулисање интензитета зрака у фокусу [3].



Слика 2.13. Повећање пречника ласерског зрака помоћу телескопа а) Галилејов телескоп; б) Кеплеров телескоп [3]

где је:

θ - стварни угао дивергенције

f_s - жижна даљина сочива

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

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

где је:

E - енергија импулса ласерског зрачења

t_i - трајање импулса зрачења

A_f - површина светлосне мрље

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

Енергија импулса ласерског зрачења је:

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

где је:

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

t_i - трајање импулса

Средња снага импулса ласерског зрачења је:

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

Трајање једног импулса ласерског зрачења је:

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

2.3. Принцип обраде

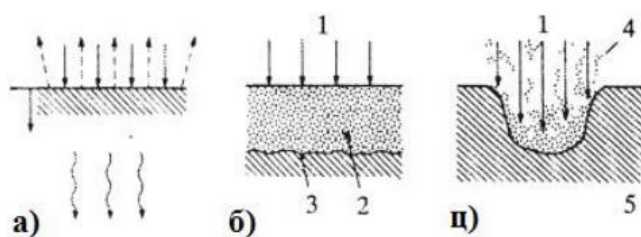
При судару ласерског снопа са непрозирним чврстим телом, на његовој површини и у подповршинским слојевима (на одређеној дубини) се одигравају различити физички процеси. Под његовим утицајем долази до интензивног површинског загревања материјала предмета обраде, топљења и испаравања материјала предмета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

- рефлексија (одбијање) ласерског снопа од површине,

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

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

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



Слика 2.14. Интеракција ласерских зрака са обрађиваним материјалом а) рефлексија и апсорпција, б) топљење, ц) испаравање 1 - ласерски зраци, 2 - истопљени материјал, 3 - гранична зона између чврстог и истопљеног материјала, 4 - одношење материјала, 5 - предмет обраде [3]

Количина ласерског снопа која се одбија, зависи од таласне дужине светлости, густине снаге ласерског зрачења, топлотне проводљивости материјала предмета обраде, специфичне енергије потребне за одређену обраду итд. У одређеним случајевима, висока рефлексија на многе материјале при одређеној таласној дужини ласерског зрачења, доводи до тога да је материјал непогодан за обраду ласером.

У табели 1. дате су вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења.

Табела 1. Вредности коефицијента рефлексије за различите материјале и различите таласне дужине таласног зрачења [5]

Таласна дужина ласерског зрачења	Коефицијент рефлексије, R						
	Au	Cu	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0.415	0.415	0.437	0.952	0.85	-	-	0.597
0.930	0.930	0.831	0.961	0.82	0.555	0.575	0.676
1.06	0.981	0.901	0.964	0.73	0.57	0.65	0.741
10.6	0.975	0.948	0.989	0.97	0.97	-	0.941

Према табели 1, за CO_2 ласере ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) коефицијент рефлексије R је много велики за све наведене метале, тако да се за обраду метала користи само мали део енергије ласерског млаза. Зато су ови ласери непогодни за обраду метала. Међутим, повећањем густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm^2 доводи до смањења коефицијента рефлексије [5].

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

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

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

- Гаусова и
- равномерна.

За нормалну расподелу густине снаге важи израз:

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

где је:

q_0 - максимална густина снаге,

k - коефицијент који одређује степен оштрине просторне расподеле и

r - радијална компонента.

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

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

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

где је:

λ_θ - коефицијент топлотне проводљивости материјала предмета обраде и

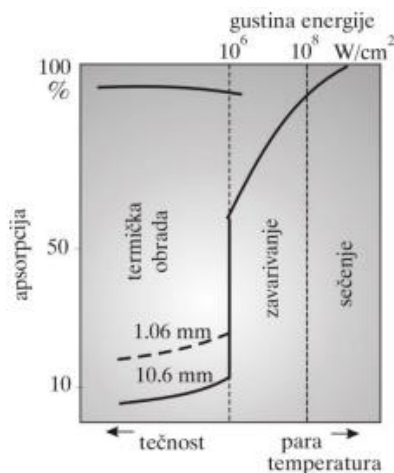
T_t - температура топљења материјала предмета обраде.

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

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

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

За већи број метала, поред пораста температуре површинских слојева, поспешује се стварање оксидног слоја, који има значајно мали коефицијент рефлексије, односно велики коефицијент апсорпције и при $\lambda=10.6\mu\text{m}$ [5]. На слици 2.15. приказана је зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала.



Слика 2.15. Зависност коефицијента апсорпције од температуре на површини метала [5]

Битан утицај на коефицијент рефлексије има и густина ласерског млаза. Са повећањем густине од $10^7 \div 10^8 \text{ W/cm}^2$ за већи број метала коефицијент рефлексије се значајно повећава.

Повећање густине ласерског млаза изнад 10^{10} W/cm^2 , доводи до знатног смањења коефицијента рефлексије, у поређењу са вредностима датим у табели 1. Са повећањем храпавости обрађене површине исто тако се смањује коефицијент рефлексије, тј. расте коефицијент апсорпције. Веза између њих дата је изразом:

$$\alpha = 1 - R$$

Карактеристично је да коефицијент апсорпције и рефлексије, са једне стране, зависе од карактеристика извора ласерског зрачења и оптичког система, а са друге, од особина обрађиваног материјала. Апсорпција зависи и од стања површине предмета обраде параметра храпавости, предходне обраде, нечистоће, оксидних превлака, итд, као и од режима обраде брзина померања снопа ласерских зрака, димензија светлосне мрље. Повећањем брзине обраде и пречника светлосне мрље, може се битно повећати апсорпциона способност $A \%$. У циљу повећања ефикасности обраде ласером може се вештачки снизити рефлексиона способност повећањем храпавости површине, претходним загревањем или коришћењем разних превлака [5].

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

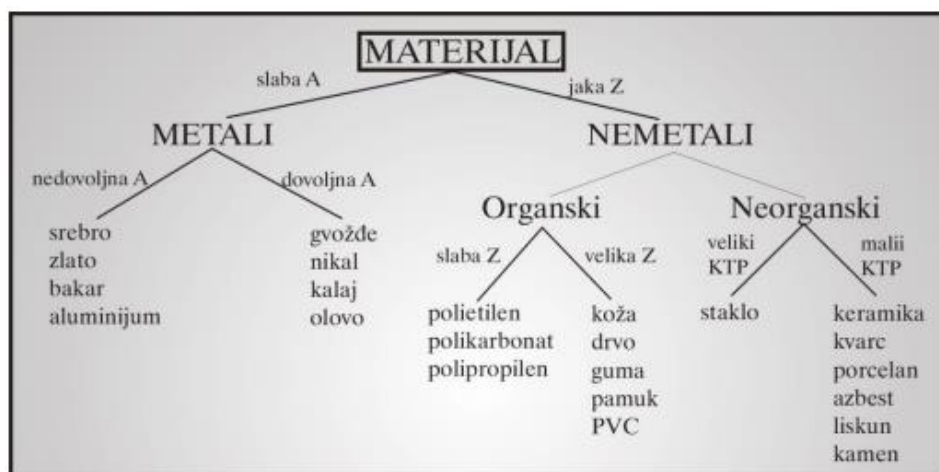
$$A = a + bT$$

где је:

T, K - температура површине која апсорбује зрачење и

a, b - коефицијенти добијени експериментом.

На слици 2.16. приказан је утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост.



Слика 2.16. Утицај врсте материјала на апсорпцију, термичку проводност и запаљивост [5]

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

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

где је:

k - термичка проводност материјала предмета обраде,

T_t - температура топљења материјала предмета обраде,

λ - температура топљења материјала предмета обраде,

α - коефицијент апсорпције и

C - константа блиска јединици која узима у обзир апроксимације.

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

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

или време топлотне дифузије за материјале дебљине X:

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

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

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

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

2.4. Технолошки поступци

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. За разлику од конвенционалног алата он је без облика, па се не мора специјално наручивати за производњу и не намеће трошкове везане за складиштење, оштрење и подешавање.

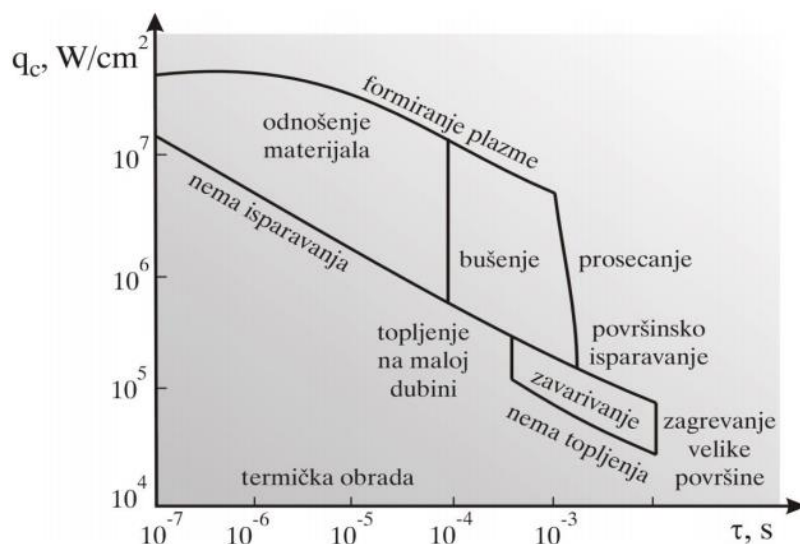
За правилно одређивање могућности и подручја примене ласерске обраде, врши се класификација са енергетског и технолошког аспекта.

За класификацију обраде са енергетског аспекта, користе се параметри:

- густина снаге q_c
- трајање дејства ласерског снопа τ

На слици 3.1. приказан је дијаграм примене обраде ласером на бази енергетских карактеристика ласерског снопа. Постоје четири карактеристичне зоне:

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



Слика 2.17. Дијаграм примене ласерске обраде са енергетског аспекта [5]

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

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

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

При $q_c > 10^8$, W/cm² и $\tau < 10^{-3}$, s не могу да се врше технолошке операције јер формирана плазма, испод површине материјала, практично потпуно апсорбује ласерске зраке и спречава њихово дејство на материјал [5].

Технолошке карактеристике обраде ласером зависе од врсте технолошке операције. За операције одношења материјала, то су [5]:

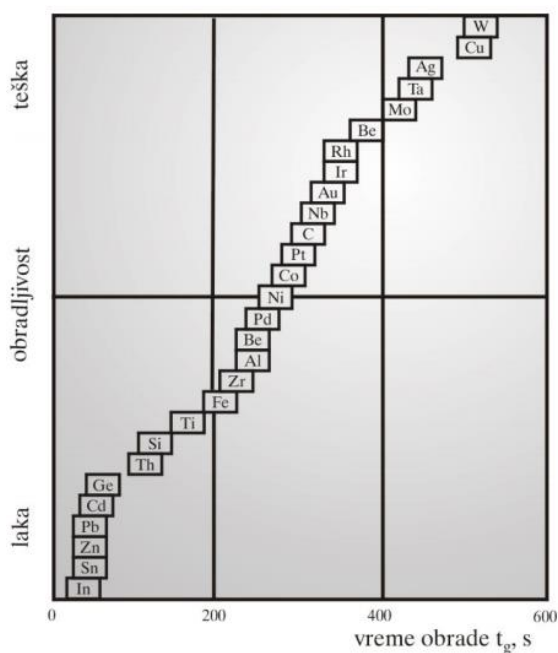
- тачност мера (пречник и дубина избушеног отвора, тачност линије реза и сл.)
- квалитет обрађене површине (храпавост обрађене површине, структурне промене на површини и сл.)
- производност обраде (количина скинутог материјала по импулсу, број избушених отвора у јединици времена).

2.4.1. Обрадљивост материјала ласером

Обрадљивост материјала ласером је различита и зависи од разних својстава материјала, а нарочито од топлотнофизичких својстава (специфични топлотни

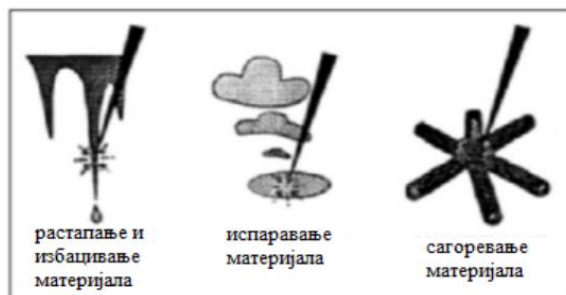
капацитет, топлотна проводност, топлота топљења и сублимације, температура топљења и испаравања, итд.) [5].

Метали имају бољу обрадљивост уколико имају мању енергију испаравања и слабију топлотну проводљивост. На пример, Cu, Ag, Au (добра топлотна проводност) и W, Ir, Mo (велика енергија испаравања), врло тешко се обрађују ласером. Међутим, Zr, Ti (слаба топлотна проводљивост) и Zn, Pb, Sn (мала енергија испаравања), лако се обрађују ласером [5].



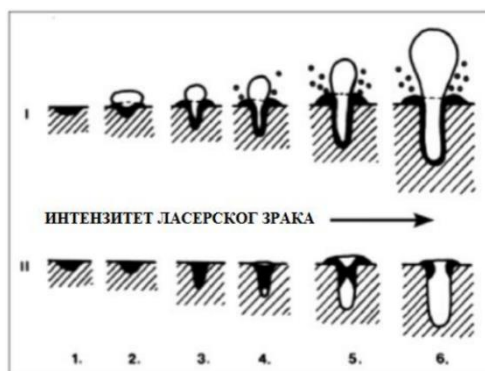
Слика 2.18. Обрадљивост метала ласером [5]

Скидање материјала при обради ласером се остварује путем абсорпције светлосне енергије ласерског зрака у површински слој материјала обратка, који се загрева на температури 4000 К до 6000 К. Тако високе температуре доводе до тренутног растапања, испаравања или сагоревања било ког материјала и стварања малог удубљења – кратера. Као што се из наведеног види, механизам скидања материјала при обради ласером је исти као код снопа електрона, само је енергетски извор другачији.



Слика 2.19. Основни механизми скидања материјала при обради ласером [3]

Са истопљеним и испареним материјалом из обратка се одстрањују и чврсте честице што је резултат разарања материјала због високог термичког напрезања. У зависности од густине фотоског млаза, дужине импулса и материјала обратка, течна фаза у подручјима обраде износи 30 – 80 % од укупне количине скинутог материјала. На рачун апсорбоване енергије ласерског зрака настаје кратер чија дубина и пречник зависе од енергетских карактеристика зрака, види се да се повећањем интензитета пречника улазног отвора, али знатно спорије него што се повећава дубина продирања [3].



Слика 2.20. Зависност димензија кратера од интензитета ласерског зрака *I* - за време обраде; *II* - после обраде [3]

2.4.1.1. Квалитет површине реза

На површини ласерског реза уочава се специфичан облик неравнина. Ове неравнине у облику полукружних жљебова или бразди правилног облика последица су облика фокусираног снопа ласерских зрака. Брзине кретања радног предмета и процеса стварања, одношења и очвршћавања растопине на месту реза. Визуелним посматрањем површине реза код ласерског сечења уочавају се две зоне: горња, у подручју улазне стране снопа ласерских зрака, која је једна фино обрађена површина правилних жљебова на међусобном растојању 0.1 ÷ 0.2 mm, и доња зона, у подручју излазне стране снопа ласерских зрака, код које је површина реза грубља, са жљебовима насталим услед одношења растопине и шљаке из зоне реза [5].

Разликује се храпавост површине реза у правцу осе снопа ласерских зрака и храпавост у правцу ласерског реза тј. у правцу који је нормалан на осу снопа ласерских зрака [5].

Оцена храпавости површине садржи облик и величину неравнина. Оцена храпавости површине реза у пракси се своди на истраживање појединих пресека кроз површину. Храпавост површине у неком пресеку приказана профилем на посматраној референтној дужини или дужини оцењивања, као графички метод, даје доста јасне податке о геометријском облику и величини неравнина [5].

Најчешће примењивани параметри за оцену храпавости површине су: средња висина неравнина R_z и средње аритметичко одступање профила R_a и $R_{\max}$ - максимална висина неравнина. Средња висина неравнина R_z је средња вредност апсолутних вредности висина пет највиших испупчења и дубине пет најнижих удубљења у границама референтне дужине:

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5}$$

где је:

y_{pi} - висина i -тог највишег испупчења,

y_{vi} - дубина i -тог најнижег удубљења.

Средње аритметичко одступање профила R_a је средња аритметичка вредност одступања профила у границама референтне дужине l [5]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

За квантитативно одређивање квалитета реза код ласерског сечења поред параметара храпавости R_z и R_a користи се и "толеранција" нагиба реза (u). У табели 2. дата је зависност параметра храпавости R_z и "толеранције" нагиба реза (u) у функцији од дебљине лима (s), одређена стандардом DIN 2310 [5].

Табела 2. Зависност параметра храпавости R_z и "толеранције" нагиба реза [5]

Средња висина неравнина R_z (μm)	"Толеранција" нагиба реза u (mm)
$R_{z,1} = 10+2 s$	$u_1 = 0,05+0,0025 s$
$R_{z,2} = 30+3 s$	$u_2 = 0,10+0,015 s$
$R_{z,3} = 60+4 s$	$u_3 = 0,25+0,025 s$
s (mm) - дебљина лима	

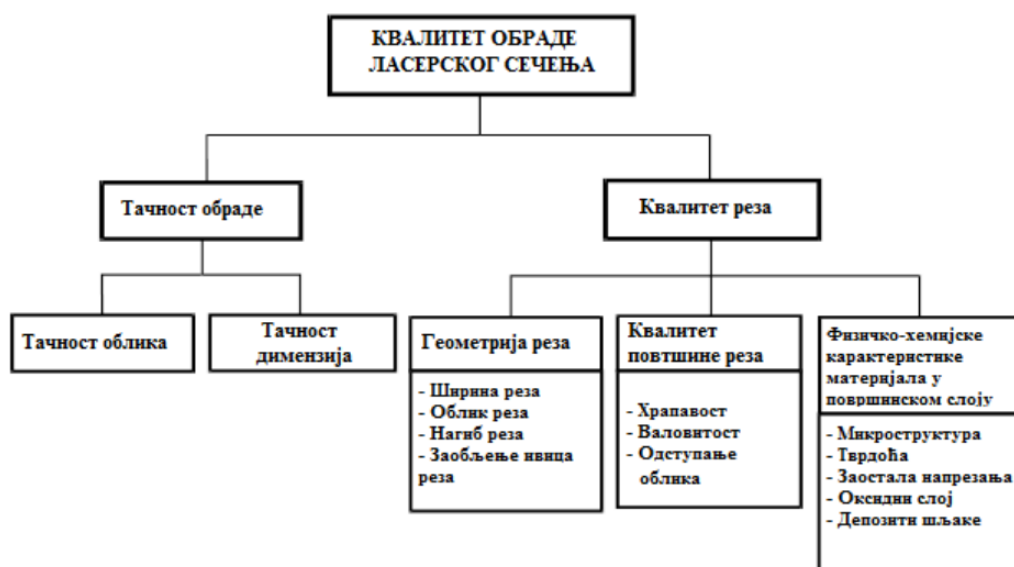
2.4.1.2. Утицајни фактори на квалитет обраде

Од бројних фактора највећи утицај имају: снага ласера, особине материјала радног предмета, брзина резања, врста и притисак помоћног гаса, карактеристике

снопа ласерских зрака, временска стабилност снаге ласера, прилагођавање снопа ласерских зрака и параметара обраде процесу резања и др. [5].

2.4.1.3. Квалитет обраде ласером

Код сечења металних лимова значајан критеријум је квалитет обраде. Квалитет обраде код ласерског сечења одређен је тачношћу облика и димензија и квалитетом реза. Тачност облика и димензија радног предмета одређена је карактеристикама координатног радног стола (тачност позиционирања) као и квалитетом управљачке јединице у случају NC или CNC ласерске машине за сечење лима. При овоме, изузимајући из разматрања тачност облика и димензија, квалитет обраде код ласерског сечења своди се на квалитет реза. Квалитет реза се односи на геометрију реза, квалитет површине реза и физичко-хемијске карактеристике материјала у површинском слоју реза. Карактеристике квалитета обраде код ласерског сечења, посматрано са становишта тачности, прегледно су приказане на слици 2.21. [5].



Слика 2.21. Карактеристике квалитета обраде код ласерског сечења [5]

Квалитет површине реза садржи оцену храпавости, валовитости и одступање обликаповршинске грешке. Физичко-хемијске карактеристике материјала у површинском слоју реза односе се на површински слој настао у процесу ласерског сечења при топлотном дејству снопа ласерских зрака на материјал радног предмета. При томе се посматра микроструктура материјала, тврдоћа, појава заосталих напрезања и величина оксидног слоја [5].

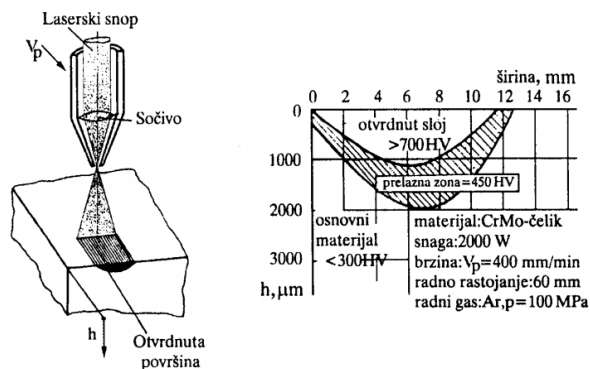
2.4.2. Отврдњавање ласером

Површинска термичка обрада или отврдњавање применом ласерског снопа 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 отворнутог слоја (на пример, бочних површина зуба зупчаника и чеоних површина вратила) зависе од карактеристика ласерског снопа и низа других параметара, а мењају се са дубином и ширином отворнутог слоја. Основни карактеристични параметри отворнувања 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%.

Отворнување површине метала ласером омогућује низ предности као што су:

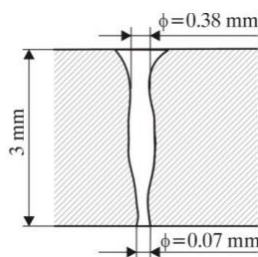
1. отворнување површине радних предмета сложене конфигурације које су неприступачне за обраду класичним методама;
2. примена за завршну обраду при чему се постиже висок квалитет обрађене површине;
3. могућност аутоматизације процеса, итд.



Слика 2.22. Принцип отворнувања ласером [9]

2.3. Ласерско бушење

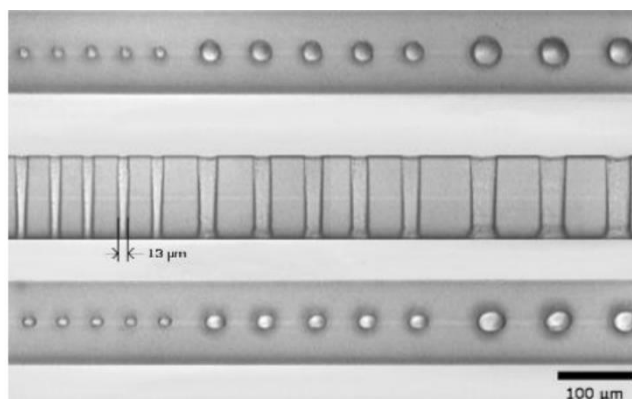
Ласерско бушење је типична операција ласерске обраде која представља основу за друге технолошке операције обраде ласером. Процес обраде се заснива на стварању рупе или отвора на материјалу предмета обраде деловањем фокусираног ласерског зрачења при чему се материјал уклања испаравањем. При импулсу ласерског зрачења наступа снажно избацивање продуката испаравања материјала при чему се добија рупа или отвор кружног облика. При бушењу отвора у лимовима улазни пречник је већи од излазног, а кратер има улазни конус и венац на почетку [5].



Слика 2.23. Попречни пресек отвора у челику добијен ласерским бушењем [5]

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

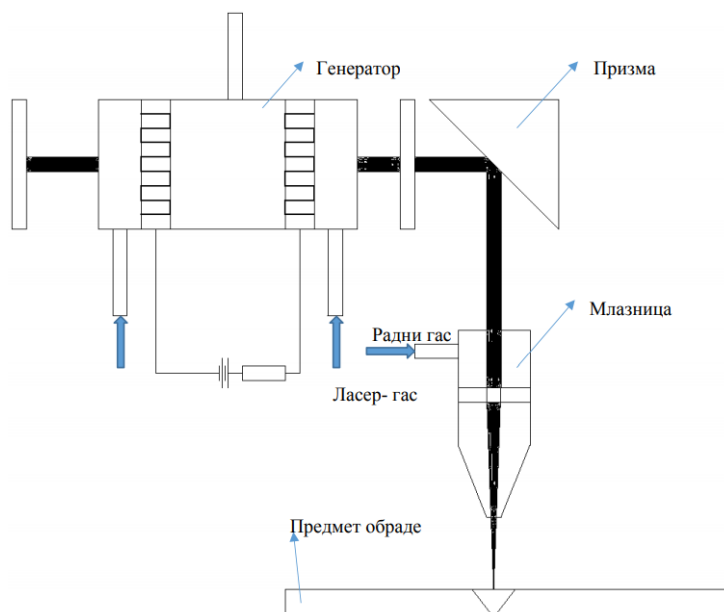
Експериментално је утврђено да се дно отвора формира испаравањем материјала, а бокови топљењем и истискивањем растопљеног материјала из отвора. Геометријски облик отвора зависи од места фокусирања ласеског снопа, док је дубина отвора директна функција енергије ласерског снопа. С обзиром да се ласери сноп може компјутерски наводити, облици и положаји рупа и отвора, њихове димензије и густоћа у материјалу могу се унапред планирати, што доводи до невероватне прецизности, па је овом методом могуће бушење на микрометарској скали (слика 2.24).



Слика 2.24. Микрометарско бушење [9]

2.4. Заваривање ласером

Представља технолошки процес који карактерише локално топљење метала на месту спајања (заваривања) елемената (слика 3.8). Ласерска техника и технологија се све шире примењује за извођење производних операција заваривања јер обезбеђује загревање веома уске зоне у околини шави (што је посебно значајно за заваривање лимова и других малогабаритних делова), непропустљивост спојева на резервоарима и пуњеним различитим течностима, микрозаваривање код микрошема, интегралних микрошема и других елемената микроелектронике, заваривање неметала (стакла, керамике и сл.), итд.



Слика 2.25. Принципијелна шема заваривања ласером [11]

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 топљења, 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.



Слика 2.26. Изглед циркуларног ласерског заваривања [9]

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

- загревање веома уске зоне у околини шави,

- непропустљивост спојева на резервоарима испуњеним различитим течностима,
- микрозаваривање код микрошема и других елемената микроелектронике,
- заваривање неметала (стакла, керамике и сл.) [5].

2.5. Ласерско гравирање

Гравирање ласером или ласерска контурна обрада се користи за различите намене [5]:

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

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

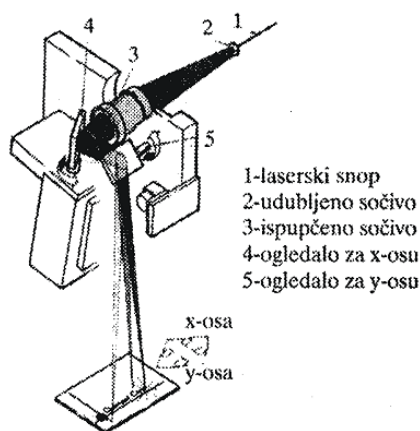
Поред YAG, користе се и CO₂ ласери за добро моделовање и веома квалитетно гравирање.

Померање ласерског снопа по програмираној контури врши се помоћу два огледала која се могу окретати, једно око вертикалне а друго око хоризонталне осе. При томе ласерски сноп може да се креће по одређеној линији (контури и др.) у једној равни. Метода гравирања вођењем ласерског зрака се користи у случајевима када је потребан висок квалитет гравирања и велика флексибилност. Критеријуми за оцену квалитета гравирања су: контраст, оштрина контуре, храпавост површине, отпорност на механичке и хемијске утицаје и др. Поред наведене методе, велику примену има и метод гравирања маском, који је нарочито погодан за означавање радних предмета у масовној производњи [5].

Предности гравирања ласером су следеће:

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

Највећи недостатак гравирања ласером је скупа опрема. Међутим, овом опремом се постиже висока продуктивност, флексибилност и жељени квалитет гравирања, те је стога знатно исплатива [5].



Слика 2.27. Шема рада савремене машине за гравирање ласером [5]

2.6. Ласерско сечење

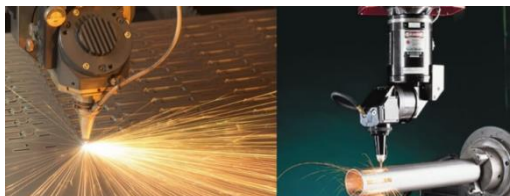
Сечење и димензионална обрада представља најчешће коришћене производне операције изведене применом ласера. Сам принцип обраде заснива се на локалном топљењу метала и одношењу продуката обраде под дејством силе теже, гасне струје радног гаса или струје снопа светлости ласера.

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 [5].

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 [5]:

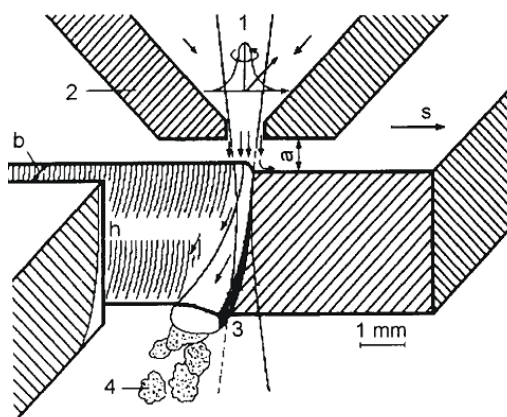
- снага импулса P , [W],
- густина ласерског снопа q_c , [W/cm²],
- притисак гаса p , [bar],
- врста гаса,
- величина фокусне тачке d , [mm],
- брзина сечења V , [mm/s],
- тачност померања ласерског снопа по предвиђеној контури и др.

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 расте 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 [9].



Слика 2.28. Ласерско сечење [14]

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 [5].



Слика 2.29. Шематски приказ ласерског сечења [5]

Са технолошке тачке гледишта, процеси сечења ласером доводе до пуног изражаја термичке ефекте (загревање, топљење, испаравање, термичко распадање и ерозија), који настају ласерским зрачењем. Почетак сечења ласером условљен је спајањем ласерског зрачења са радним предметом. Феноменологија сечења ласером је

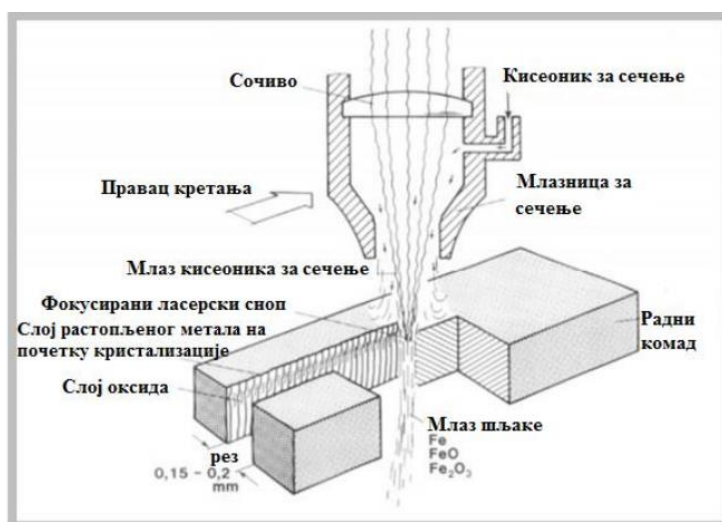
знатно сложена. Поступак се заснива на озрачењу радног предмета покретним, континуалним или импулсним снопом ласерских зрака, са локалним развојем такве густине снаге q_c , W/cm^2 , која је у стању да произведе најповољније термофизичке, термохемијске, хидродинамичке, гасодинамичке и ерозивне процесе за одвајање материјала [9].

Постоје три методе сечења ласером [5]:

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

За сечење метала се најчешће користи реактиван помоћни гас O_2 , док се за сечење неметала користи неутрални гас N_2 или инертни гас Ar [5].

Кисеоник је изузетно високе чистоће, веће од 99,95%. Смањењем чистоће кисеоника рапидно опадају брзина сечења и квалитет реза. Азот се употребљава за сечење високолегираних челика. Захтева се висока чистоћа, без трагова кисеоника. Остали гасови за сечење аргон и његове мешавине са кисеоником и азотом. Мешавине се користе за резање Al и Al легура. Мешавина аргона и кисеоника се користи за сечење Ti [6].



Слика 2.30. Шематски приказ принципа сечења ласерским снопом. Гас за сечење може да буде кисеоник (ласерско кисеонично сечење) или азот (ласерско сечење топљењем) [6]

3. Анализа процеса обраде абразивним воденим млазом (AWJM)

У природи је већ милионима година позната снага воде у виду ерозије. Размере дејства воде, кроз спирање и одношење материјала са површине Земље, се могу видети на много примера. Прва примена воденог млаза при рударском ископавању минерала, угља и руда била је крајем XIX века [2].

Тридесетих година прошлог века инжењери у Совјетском савезу и Сједињеним америчким државама су почели да примењују технологију воденог млаза високог притиска у рударству. Први патент о употреби воденог млаза био је у области бушења у рударској индустрији у Совјетском савезу. Године 1936. Петар Тупитсин, који је радио у Доњецком басену угља у Украјини, дошао је на идеју да употреби млаз воде за бушење рупа у наслагама угља. Педесетих и шездесетих година двадесетог века потреба за ископавањем руде урана, где је постојала опасност од радијације, појачала је интересовање за коришћење воде високог притиска која би се користила са даљински управљаним бушилицама.

Водени млаз високог притиска користи како за сечење меких материјала, као што су дрво и кожа, тако и чврстих и кртих материјала - гранит и цигла. Каснија већа примена ове методе била је код сечења пелена, папира и делова за опремање унутрашњости аутомобила.

Немогућност сечења метала чистим воденим млазом подстакла је истраживања која су довела до првог индустријског система за обраду млазом воде помешаним са абразивом. Додавање абразива воденом млазу драстично је проширило лепезу материјала који могу да се секу. Могле су да се остваре веће брзине сечења, секу материјали веће тврдоће и дебљине и оствари бољи квалитет реза. Обрада абразивним воденим млазом (Abrasive Water Jet Cutting) је релативно нова неконвенционална технологија обраде одвајањем честица, која је за кратко време нашла своје место у различитим гранама индустријске производње.

Први човек који се бавио изучавањем промене врло високих притисака био је Др. Норман Франз, заступајући идеју, могућност да се од воде врло високог притиска направи резни алат. Дошао је до идеје да резање дрвене грађе из стабла великих пречника врши применом воденог млаза под великом притиском. Први је употребио млазницу са малим отвором и доказао моћ воденог млаза, односно огромну снагу за сечење и обраду резањем. Коришћење абразивног воденог млаза за обраду материјала почело је раних осамдесетих година XX века [2].

Године 1980. абразивни водени млаз је употребљен за сечење челика, стакла и бетона, а 1983. је продата прва комерцијална машина за обраду аутомобилског стакла.

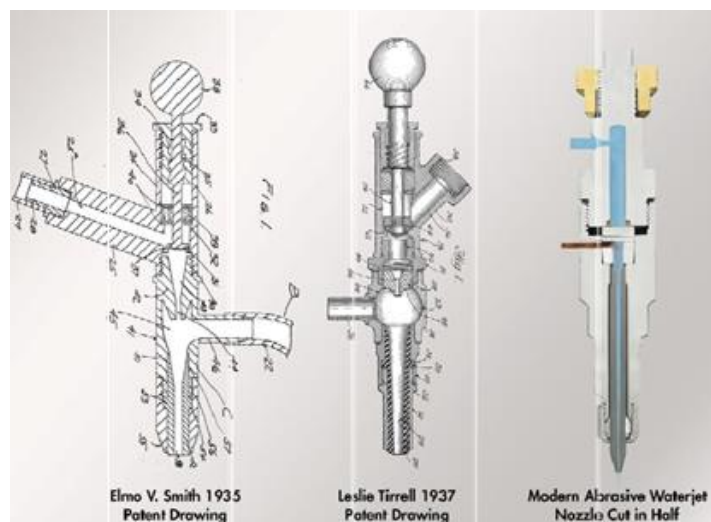
Нова техника сечења најпре је прихваћена у аутомобилској и авио индустрији, где је коришћена за обраду материјала као што су: нерђајући челик, титан и композити ојачани угљеничним влакнима. Од тада је обрада воденим абразивним млазом прихваћена и у осталим индустријама, као што су: металопрерађивачка, индустрија стакла, грађевинарство, бродоградња итд.

Године 1990. Др, Јохн Олсен као један од оснивача "OMAX" корпорације истражује концепцију сечења абразивним воденим млазом (AWJM), упоредо развијајући и софтверска решења за програмирање и вођење операције сечења. Убрзо патентира комерцијалне AWJM машине и уводи кроз ланац специјализованих продавница у слободну продају.

Сечење абразивним воденим млазом је интересантна због свог малог утицаја на животну средину. При сечењу овим поступком користе се, у природи два најзаступљенија материјала, вода и камен (песак) [2].

3.1. Развој воденог млаза

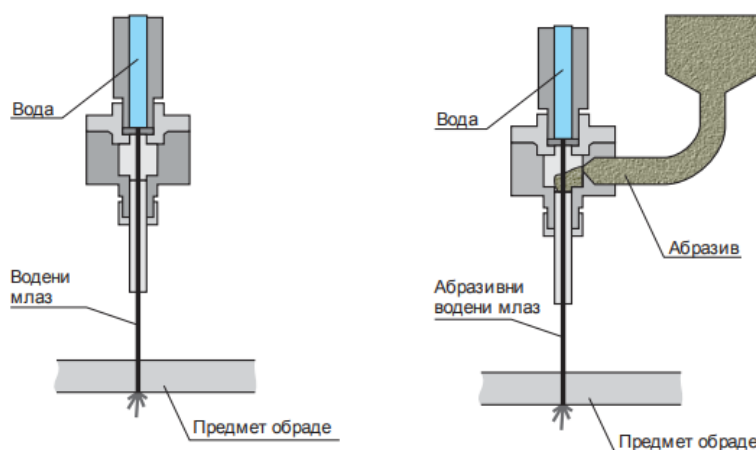
Прва употреба млазница воде под притиском забележена је 1852. године за ископ злата. Након тога млазнице воде употребљавале су се за чишћења. СССР је почео користити водени млаз за чишћење рудника у Украјини, а након тога за копање рупа за постављање експлозива у стенама унутар рудника. Шумарски инжењер Норман Франз педесетих година прошлог века употребио је водени млаз за резање дрвета, али ти први покушаји нису нашли ширу тржишну примену. Прва пумпа за резање воденим млазом почела се производити у САД-у 1971 године. У почетку су се млазом воде резали само композитни материјали. Али тек 80-тих година прошлог века почела је шири примена воденог млаза због додавања абразивних честица, те се поступак назвао резање абразивним воденим млазом (слика 3.1.). Данас поступак резања воденим млазом налази све већу примену.



Слика 3.1. Развој млазнице за обраду воденим млазом кроз историју [15]

Обраду воденим млазом можемо поделити на два поступка обраде који се не разликују претерано, а они су:

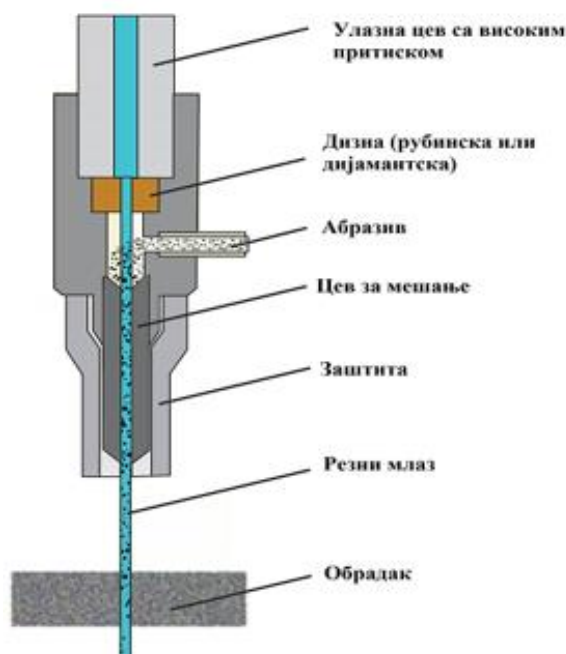
- Обрада чистим воденим млазом и
- Обрада абразивним воденим млазом



Слика 3.2. Обработка чистим воденим и абразивним воденим млазом [7]

3.1.1. Обработка абразивним воденим млазом

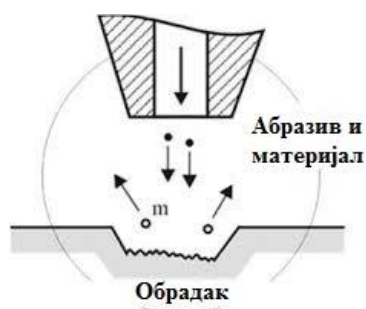
Поступак обраде материјала абразивним воденим млазом је механички поступак обраде, при којем честице абразива великом брзином напуштају млазницу у резној глави и ударају о обрадак (слика 3.3.).



Слика 3.3. Обработка абразивним воденим млазом [15]

Абразивни водени млаз је танак млаз мешавине воде и абразивног средства под високим притиском који делује на материјал који се обрађује и ерозијом односи материјал са предмета обраде.

За поступак обраде потрбно је имати врло висок притисак воде, абразивно средство и одговарајуће параметре. Абразивне честице при излазу из млазнице, због своје велике брзине и тврдоће ударају у обрадак и тако изазивају пукотине, а вода додатно шири пукотине и односи материјал (слика 3.4.).



Слика 3.4. Процес одношења материјала уз помоћ честица и воде [15]

Сечење абразивним воденим млазом се примењује за сечење тврдих материјала као што су: метали, камен, керамика, стакло, композитни материјали итд. Захваљујући додавању абразива учинак сечења абразивним воденим млазом је више стотина пута већи од учинка сечења чистим воденим млазом. У циљу упоређивања ова два поступка, у табели 3. наведени су параметри обраде чистим и абразивним воденим млазом [7].

Табела 3. Параметри обраде чистим и абразивним воденим млазом [7]

Параметар	Сечење чистим воденим млазом	Сечење абразивним воденим млазом
Радни притисак, Мра	150÷1000 (300÷400)*	
Пречник излазне млазнице, mm	0.08÷0.4	0.75÷1.2
Брзина истицања воде, m/s	540÷1400 (900)*	
Запремински проток воде, l/min	5	
Растојање резне главе од обратка, mm	1	2÷5
Брзина кретања резне главе, mm/min	100÷1000	
* Напомена: У загради су дате средње вредности које се најчешће примењују		

3.1.2. Абразив

Абразив се додаје води због повећања учинковитости млаза. Зато се абразивни водени млаз користи за резање тврђих материјала као што је челик, камен... При резању мекших материјала папира, коже... може се употребљавати чисти водени млаз.

Абразивне честице делимо на оксиде (корунд или алуминијумов оксид, кварцни песак или силицијумов оксид) и минерале (гранит, оливин, цирконијумов силикат). Најчешће употребљаван абразив је гранит јер је тврд, тежак и економски најисплативији. За обраду површина може се додатно употребити здробљена троска или челичне и стаклене куглице.

С обзиром на начин добијања абразивних средстава употребљавају се две врсте абразива. Једна врста је песак добијен дробљењем великих стена. Друга врста абразива добија се просејавањем морског песка. Дробљени песак има више шиљасте ивице, те је тако погодан за грубо резање, док је просејани морски песак погоднији за финију обраду због заобљеног облика ивица. Према величини абразивне честице, абразив се дели на абразив за грубо резање (веће честице) и абразив за фино резање (мање честице).



Слика 3.5. Облици абразивних честица [15]

Гранулација абразива је различита, а зависи од врсте примене. Уколико се жели фина обрада онда се означава са 120, најчешће се употребљава средњи квалитет који се означава са 80 и груба обрада са 50.

У резној глави, односно у цеви за мешање, долази до мешања воде која је под високим притиском и абразивних честица које се из посебног дела доводе до резне главе. Процес мешања је доста сложен с обзиром на турбулентну природу млаза. Вода у цеви за мешање захвата абразивне честице и убрзава их, тј. предаје им део кинетичке енергије, док се други дио енергије губи. С обзиром на то да вода при великој брзини захвата абразивне честице, ту долази до њиховог ломљења на које се троши одређена количина енергије. Губици енергије се јављају и услед удара честица о зидове цеви који доводи до даљњег лома честица. Долази и до међусобног судара честица, тако да већ при самом формирању млаза део честица бива толико уситњен да представља отпад. Честице у млазу ротирају огромним брзинама које се крећу од неколико хиљада до 5 милиона обртаја у секунди. Од абразивних честица се захтева да су отпорне на раслојавање и да су тврде.

Дакле, абразивне честице и сломљене абразивне честице локално ометају проток воде, тј. смањују га. Млаз потом излази кроз излазну цев која, осим што служи за фокусирање млаза, служи и за повећање брзине истицања и кинетичке енергије с

обзиром на то да у њој долази до коначне редукције попречног пресека млаза. Због удара абразивних честица о унутрашње зидове цеви за усмеравање долази до њеног трошења које је нарочито изражено у горњем делу цеви. Због трења између абразива и зидова цеви, које може утицати на смањење брзине млаза, препоручује се да излазна цев (цев за фокусирање) не буде дугачка, при чему јој промер треба бити до пет пута већи од промера абразивних честица.

Искоришћена вода се, помоћу посебних система, може рециклирати и поново користити за процес резања, мада је понекад довољно извршити стандардни процес филтрирања претходно коришћене воде. Систем за воду – абразивно резање троши свега до 4 l воде у минути. Најчешће се користе Гарнет абразивна зрна. Њихова потрошња се, обично, креће у границама од 0,25 до 0,68 kg/min, а могу се и рециклирати.

Систем за довод абразива до резне главе је доста сложен, јер проток абразива треба прилагодити осталим параметрима. Раније се проток абразива прилагођавао врсти и дебљини обрађеног материјала. У последње време је тај систем поједностављен тиме што се проток абразива прилагођава само протоку воде, док се брзина кретања млазнице прилагођава врсти и дебљини материјала који се реже.

3.2. Принцип обраде

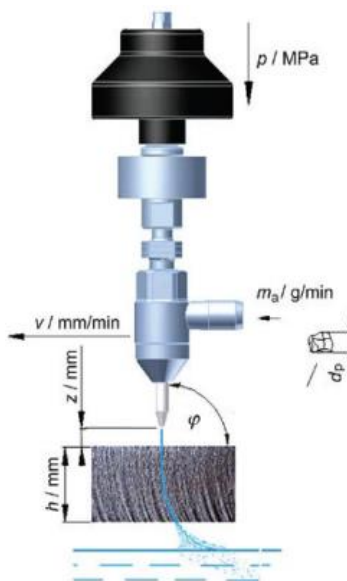
Проблем сечења тешко обрадљивих материјала (материјала високе тврдоће или насупрот томе меканих и еластичних материјала), нарочито у космичкој индустрији, авио индустрији и аутомобилској индустрији, довео је до развоја и примене данас најатрактивније технологије за контурно сечење материјала – сечење воденим абразивним млазом (AWJC Abrasive Water Jet Cutting).

Сечење воденим млазом је нова, мало изучена и распрострањена, врло ефикасна метода контурног сечења материјала. Заснована је на ерозионом дејству узаног млаза воде велике брзине струјања помешаног са абразивом. Абразивни водени млаз се усмерава на обрадак млазницом чији је пречник од 0,75 до 2,5 mm.

Задатак млаза воде је да пренесе кинетичку енергију на честице абразива и усмери их ка обратку. Принцип обраде абразивним воденим млазом, заснован је, пре свега, на резању. Савремене инсталације за обраду абразивним воденим млазом раде са притиском воде и преко 4000 bar, при чему водени млаз достиже брзине и до 900 m/s. Температура у зони резања не прелази 70 °C. Честице абразивног материјала, високо убрзане струјом воденог млаза, односе материјал обратка из зоне реза скидањем струготине. [2]

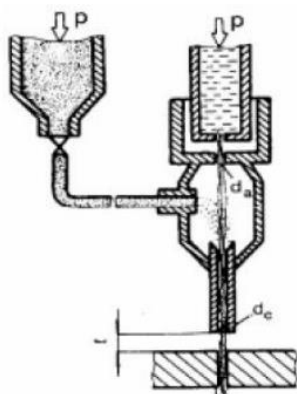
На слици 3.6. приказани су неки од параметара обраде воденим млазом: p – притисак воде (Mpa); v – брзина кретања млазнице (mm/min); z – удаљеност дизне од

површине радног комада (mm); φ - улазни угао на млазници ; m_a - износ коришћених абразива (g/min); h – дебљина радног комада (mm).



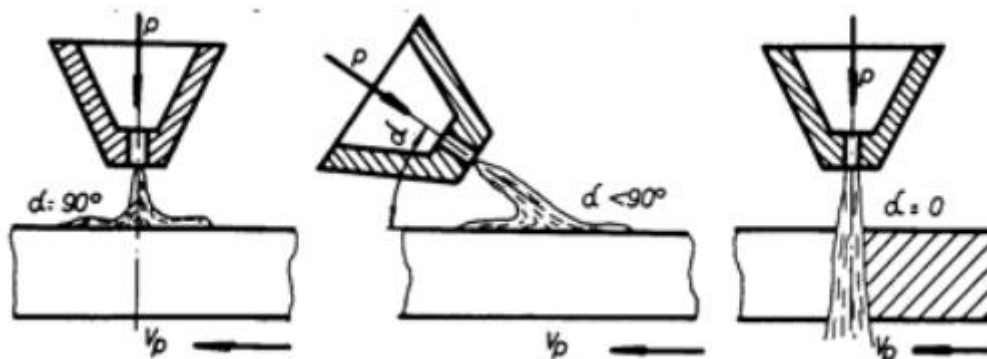
Слика 3.6. *Обрада абразивним воденим млазом [6]*

При обради абразивним воденим млазом користи се специјално конструисана радна глава. Вода под високим притиском пролази кроз млазницу чији је отвор d_a и улази у комору за мешање. У комору за мешање се дозира и абразивни прах који се меша са водом. Овако добијена абразивна мешавина пролази кроз млазницу чији је отвор d_c , и ствара абразивни водени млаз. Цев за довод абразива се прави од волфрам карбида, унутрашњег пречника од 0,8 до 1,6 mm и дужине 50 до 80 mm. Честице абразива се крећу турбулентно у цевчици, ударају у зидове све док не добију довољну брзину да их понесе водени млаз. Млазнице за обраду абразивним млазом су једноставне конструкције. Могу се јавити проблеми, као што су кратак век трајања појединих делова млазнице, као и због појаве нечистоћа повремено блокирање отвора на излазу из коморе за мешање [2].

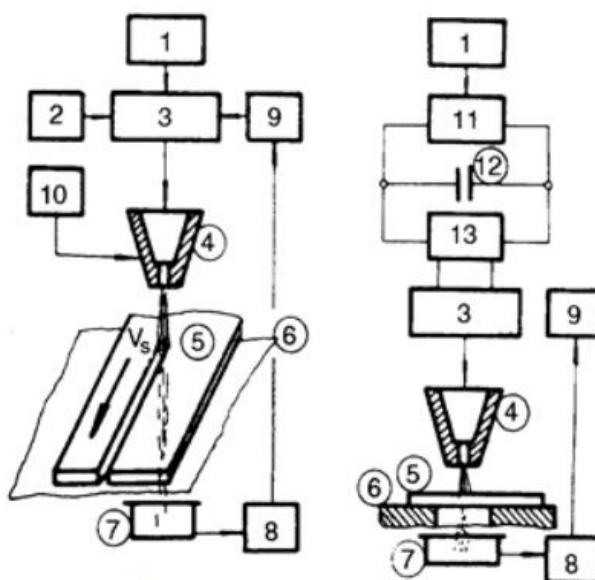


Слика 3.7. *Принцип рада AWJC методе [2]*

Резне способности и карактер изведених производних операција (слика 3.8.) зависе од низа фактора као што су материјал предмета обраде, састав радне течности, притисак и брзина струјања течности, начин и правац дејства струје течности на предмет обраде и тд.



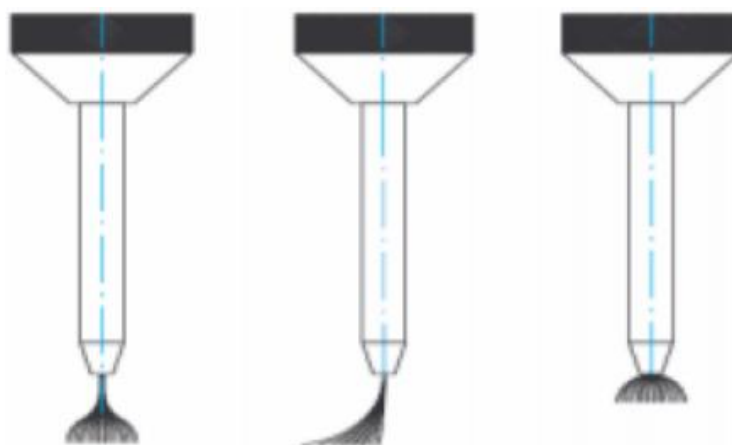
Слика 3.8. Шема дејства млаза течности на површину предмета обраде: обрада ударним а), косим б) и клизним в) правим млазом [2]



Слика 3.9. Шема инсталације за обраду воденим млазом [2]

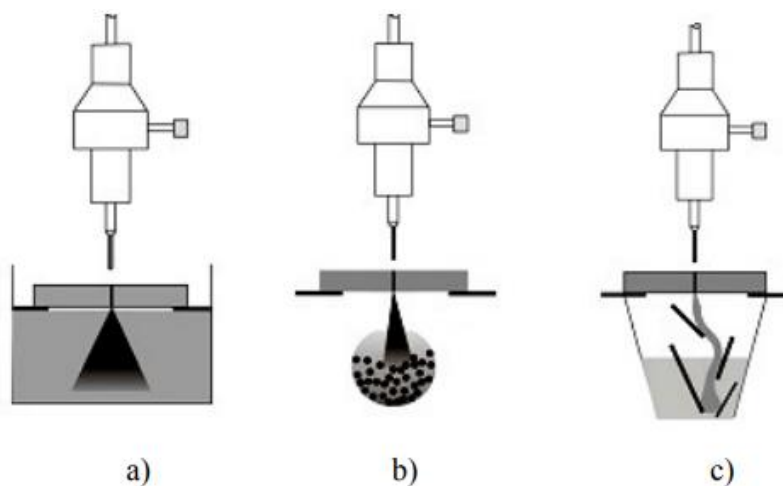
Елементи инсталације су: 1 - систем управљања, 2 - погонски систем хидропретварача, 3 - хидропретварач (мултипликатор, пумпа и сл.), 4 - млазница, 5 - предмет обраде, 6 - радни сто, 7 - сабирни резервоар, 8 - филтер, 9 - систем напајања хидропретварача, 10 - систем припреме абразивне мешавине, 11 - додатни уређај млазнице за дозирање абразива, 12 - извор напајања кондензатора и 13 - импулсни кондензатор, 14 - уређај за пражњење (служи за пражњење унутар течности и формирање импулсног млаза течности). Као абразив најчешће се користе: гарнет, силицијумски песак, силицијум карбид, ситни опиљци гвожђа и др. У зависности од облика абразивног млаза он може да буде добар слика 6. а) или лош слика 6. б) и в). У

новије време користе се абразиви који не загађују и постоји могућност поновне употребе. Истраживања у овој области доводе до залеђеног млаза где течни азот замењује воду, а кристали сувог леда абразив.



Слика 3.10. Облици абразивног млаза добар а); б) и ц) лош [5]

Када се абразивни млаз искористи за процес обраде, још увек има значајну енергију која зависи од предмета обраде. Енергија коју поседује водени млаз мора се обуздати пре него што оштети неки део машине или околине. У ту сврху се користи хватач. Хватач служи да апсорбује енергију воденог млаза и да је распрши. На слици 3.11. су приказана три различита типа хватача.



Слика 3.11. Типови хватача: а) тип воденог базена, б) потопљене челичне кугле, ц) тип плоче [4]

Највећу примену имају хватачи типа воденог стола. После одређеног времена решетке – носачи радних предмета морају да се мењају због оштећења услед дејства воденог млаза.

3.3. Технолошки поступци

Обрада абразивним воденим млазом се данас све више користи у индустрији јер има доста предности у односу на конвенционалне поступке обраде. Обрада абразивним воденим млазом се најчешће користи за контурно сечење различитих материјала. Процес резања воденим млазом је веома сложен и састоји се од: резања, ерозије, пластичних деформација и променљивог напонског стања. Млаз воде високог притиска и абразива удара у површину материјала, разара материјал, односи честице и сече га. Процес резања воденим абразивним млазом чине [2]:

1. Резање материјала обратка у виду ситне струготине деловањем високо убрзаних честица абразивног материјала,
2. Пластично деформисање, одвајање и одношење материјала обратка у зони реза услед ударног дејства абразивних честица и воденог млаза и
3. Испирање продуката резања и разарања воденим млазом.

Најзначајнија особина резања воденим млазом је хладно резање које термички не утиче на материјал. Током резања не долази ни до какве промене у структури материјала, па самим тим не постоји никакво оштећење материјала на местима реза. Рез воденог млаза је веома узак, што је посебно погодно при резању производа компликованих облика, али и обраде скупих полупроизвода.

Најважније карактеристике абразивног воденог млаза дате су кроз следеће закључке:

- ❖ Нема никаквог термичког утицаја на материјал;
- ❖ Минималан утицај снаге млаза на материјал који се обрађује;
- ❖ У површини реза се не јављају никакви заостали напони и микропукотине;
- ❖ Правилном применом процеса рада ствара се минимална количина прашине приликом резања материјала;
- ❖ Нема штетног загађења атмосфере;
- ❖ Нема никаквог хемијског деловања на материјал;
- ❖ Могу се резати материјали који су осетљиви на оксидацију: титан, кобалт, никл и њихове легуре;
- ❖ Може се резати без ограничења у свим смеровима, положајима, облицима контуре и угловима нагиба;
- ❖ Мали губитак материјала због врло уског реза;
- ❖ Могу се резати слојевити материјали са различитим физичким особинама;
- ❖ Један агрегат високог притиска може да напаја и до пет абразивних резних глава;
- ❖ Универзалност ове технологије омогућује да се са једним уређајем обради скоро читав спектар материјала [2].

3.3.1. Утицај параметара на процес резања

Технологија резања абразивним воденим млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала који се обрађује. Карактеришу је четири основна параметра резања кључна за реализацију основних резултата резања изражених кроз дубину резања и квалитет површине [7]:

- радни притисак,
- проток абразива и воде,
- брзина резања,
- удаљеност дизне од површине радног комада.

Технологија сечења абразивним воденим млазом је комплексан процес интеракције абразивног воденог млаза и материјала обратка. Ефикасност процеса сечења абразивним воденим млазом, као основа његове успешне примене, зависи од избора утицајних фактора. Први корак ка том циљу је идентификација и разумевање фактора који утичу на процес сечења. Процес је дефинисан бројним факторима, који одређују ефикасност, економичност и квалитет обраде.

Остали фактори који карактеришу технологију резања воденим абразивним млазом су: конструкција агрегата високог притиска, конструкција материјала и обрада унутрашњег профила дизне, врста материјала који се обрађује, угао удара млаза, утицај влажности обратка, температура резања, ширина реза [7].

На процес обраде абразивним воденим млазом утичу бројни параметри. Параметри се могу сврстати у четири карактеристичне групе:

- **параметри машине за обраду абразивним воденим млазом,**
- **параметри предмета обраде,**
- **параметри абразивног воденог млаза,**
- **параметри процеса обраде.**

Параметри машине за обраду абразивним воденим млазом су у ствари радни параметри машине и дефинисани су избором машине. Ови параметри су:

- тип пумпе високог притиска,
- тип резне главе и
- систем за обезбеђење основних кретања и управљачка јединица.

Параметри предмета обраде чине:

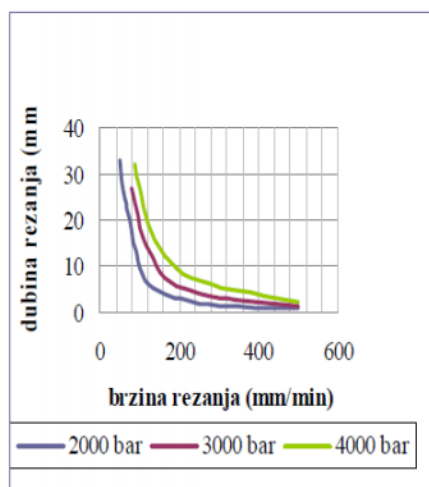
- механичке карактеристике материјала предмета обраде,
- дебљина материјала и
- сложеност, тачност и квалитет обрађене површине.

- Параметри абразивног воденог млаза су:
- квалитет воде и њена чистоћа,
- пречник абразивног воденог млаза,
- структура абразивног воденог млаза (удео воде, абразива и ваздуха) и
- брзина абразивног воденог млаза.

Параметри процеса обраде су параметри на које се најлакше може утицати. Ови параметри су:

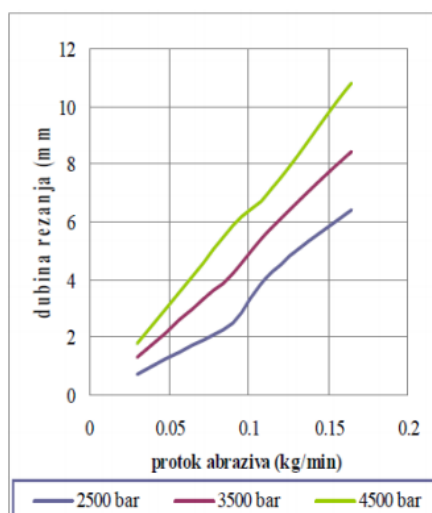
- радни притисак (притисак воде),
- брзина кретања резне главе,
- проток абразива,
- пречник абразивне млазнице,
- растојање резне главе од предмета обраде и др.

Максимална дубина реза коју је могуће постићи зависи пре свега од радног притиска и протока смеше воде и абразива. Зависност дубине реза од брзине резања при различитим радним притисцима смеше дата је на слици 3.12. Са дијаграма зависности дубине реза од брзине резања може да се уочи да се при већем радном притиску остварују дубља продирања у материјал. Брзина резања негативно утиче на дубину реза за било који радни притисак.



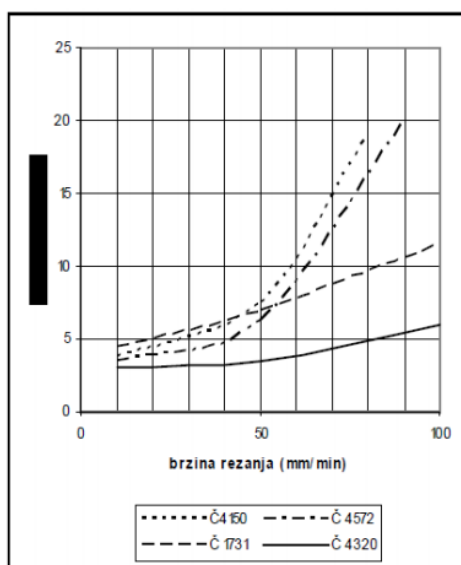
Слика 3.12. Дијаграм зависности дубине реза од брзине резања и радног притиска [7]

Зависност дубине реза од протока смеше са абразивом за три радна притиска дата је на слици 3.13. Са дијаграма се јасно види да повећање протока смеше, а самим тим и абразива омогућава дубље продирање у материјал.



Слика 3.13. Дијаграм зависности дубине реза од протока абразива и радног притиска [7]

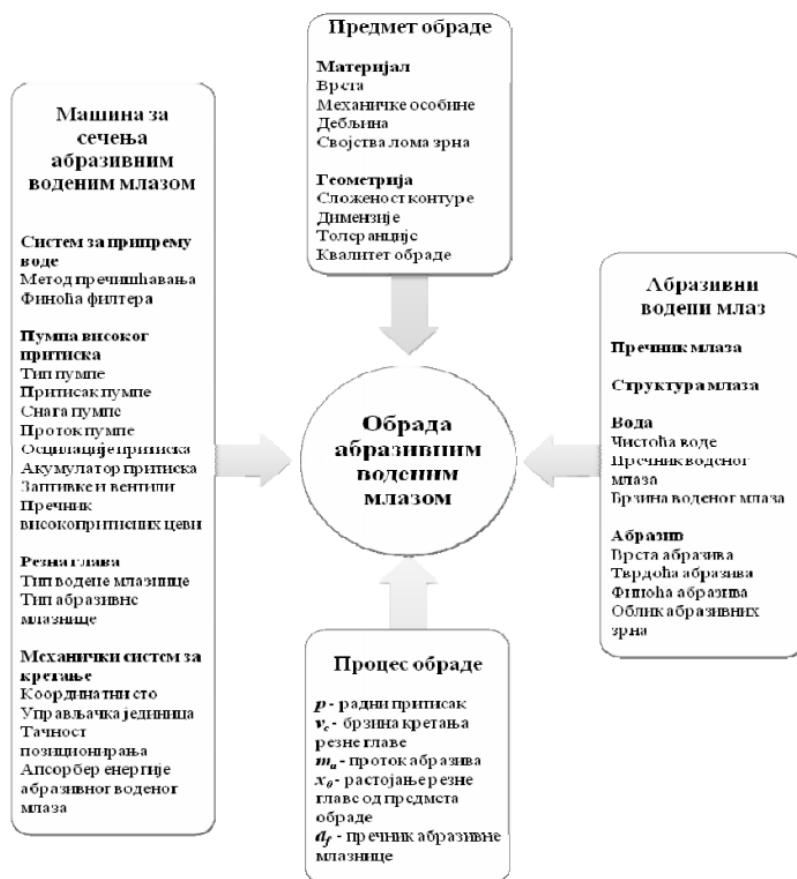
Храпавост добијене површине реза представља кључни фактор за сваку реализацију технолошке обраде резања материјала. На слици 3.17. је наведена зависност храпавости површине радног комада од брзине резања за различите врсте метала. Код свих испитиваних врста челика при брзинама резања од 60 mm/min практично се не мења квалитет површине Ra. Преко те брзине се квалитет површине Ra погоршава и то уколико више ако челик садржи више легирајућих елемената карбида, тј. никла, титана, хрома, ванадијума, молибдена и волфрама.



Слика 3.14. Дијаграм зависности квалитета површине Ra (μm) од материјала и брзине резања [7]

3.3.2. Карактеристике обрађене површине абразивним воденим млазом

Како би се добиле тачне вредности карактеристика потребно је да се избегну грешке које се јављају у току процеса обраде. Ако се одступања стварних карактеристика крећу у границама толеранције, предмет је у технолошком смислу исправан. Постизање захтеваних толеранција израде предмета обраде зависи у првом реду од квалитета израде и монтаже делова инсталације, брзине сечења, гранулације абразива, чврстоће и дебљине материјала предмета обраде, начина и прецизности вођења млазнице, тачности постављања радног стола, радног притиска и сл. [2].



Слика 3.15. Фактори процеса обраде абразивним воденим млазом [2]

Алатна машина велике тачности не значи да ће истовремено израдак бити тачних димензија. Највеће грешке су последица самог процеса обраде. Тачност позиционирања радног стола машине је у већини случајева 0,01 mm. Међутим, тачност обраде је обично између $\pm 0,07$ и $\pm 0,4$ mm када је дебљина материјала мања од 25 mm, односно, тачност је између 0,5 и 1,5 mm, када је дебљина материјала већа од 25 mm. [2]

Предмет обраде се дефинише одређеним карактеристикама:

- геометријским (димензије, облик и положај површина),
- механичким (материјал, чврстоћа, тврдоћа)

- технолошким (дозвољена одступања облика и положаја, квалитет обрађене површине).

Основне карактеристике површине обрађене абразивним млазом су [2]:

- ширина реза (W_g – горе и W_g – доле),
- коничност реза (α),
- храпавост обрађене површине (RZ – средња висина неравнина и RA – средње аритметичко одступање профила).

3.3.3. Квалитет реза

Идеалан облик предмета, дефинисан цртежом, састоји се из скупа линија и површина које дефинишу геометријски облик предмета и морају стајати у одређеном једнозначном односу, при чему су површине у геометријском смислу апсолутно глатке, без неравнина, храпавости и других одступања од димензија и облика.

Стварне линије и површине и њихови узајамни односи на предмету, нису скоро никада идентични са онима на идеалном предмету.

Обрадак је дефинисан, према конструкцијској документацији (радионичком цртежу), одређеним бројем [2]:

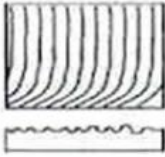
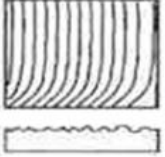
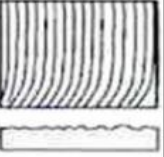
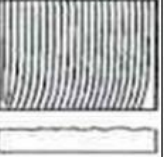
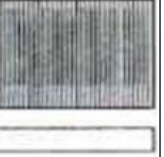
- геометријских (облик и положај површина, димензије и храпавост),
- механичких (материјал, чврстоћа, тврдоћа) и
- технолошких карактеристика (дозвољена одступања облика и положаја, толеранције димензија, квалитет обрађене површине).

Димензије реза и геометрија и храпавост површине реза повезани су са параметрима сечења абразивним воденим млазом: брзином кретања резне главе, радним притиском, типом и величином абразива, протоком абразива и пречником водене и абразивне млазнице.

Брзина кретања резне главе је важан параметар који највише утиче на квалитет реза. Међутим, "квалитет" није увек пропорционалан само брзини кретања резне главе.

На квалитет реза утиче геометрија дела јер је промена брзине кретања резне главе у зависности путање дефинисане обликом дела (права путања, путања по луку или са променом угла кретања). Такође, зависи од материјала предмета обраде и његове дебљине [2].

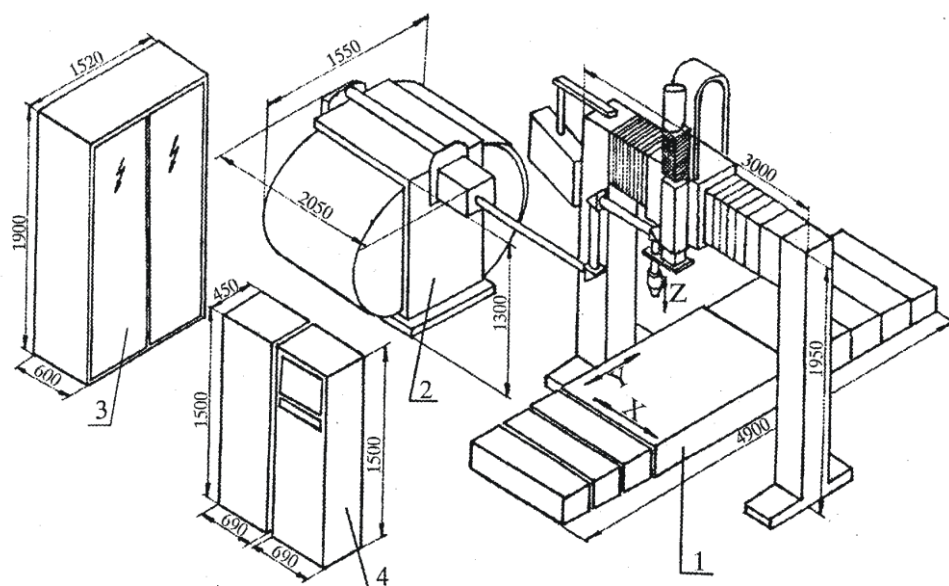
Табела 4. Класе квалитета реза при сечењу абразивним воденим млазом [2]

	Класа квалитета у систему квалитета од 1 до 5				
	1	2	3	4	5
	Рез раздвајања	Груб рез	Рез средњег квалитета	Фин рез	Врло фин рез
Скица					
Слика					
Коментар	Користи се за грубо сечење. Значајна сила при сечењу.	Значајне бразде на дну реза. Захтева накнадну обраду.	Умерене бразде на дну. Најчешће у употреби јер се не захтева накнадна обрада.	Добар квалитет обраде. Огранично појављивање бразди.	Глатка површина и поред постојања малих, али вертикалних бразди.

4. Опрема за LBM и AWJM обраду

4.1. Опрема за ласерску обраду

Савремене конфигурације ласерских машина подразумевају различите конфигурације ласерског уређаја, оптичког система за превођење снопа, обрадне главе, координатног радног стола, енергетског система и управљачког система у оквиру једне интегралне целине. Основна конфигурација ласерске машине приказана је на слици 4.1. [5].



Слика 4.1. Основна конфигурација ласерске машине [5]

Код ласерских машина за обраду материјала (бушење, сечење, термичка обрада, заваривање) најефикаснији су CO₂ ласери са снагама од 100 W до 5 kW, као и Nd: YAG ласери до 400 W континуалне снаге [5].

Оптички систем за пренос снопа представља погодни реализовани манипулатор.

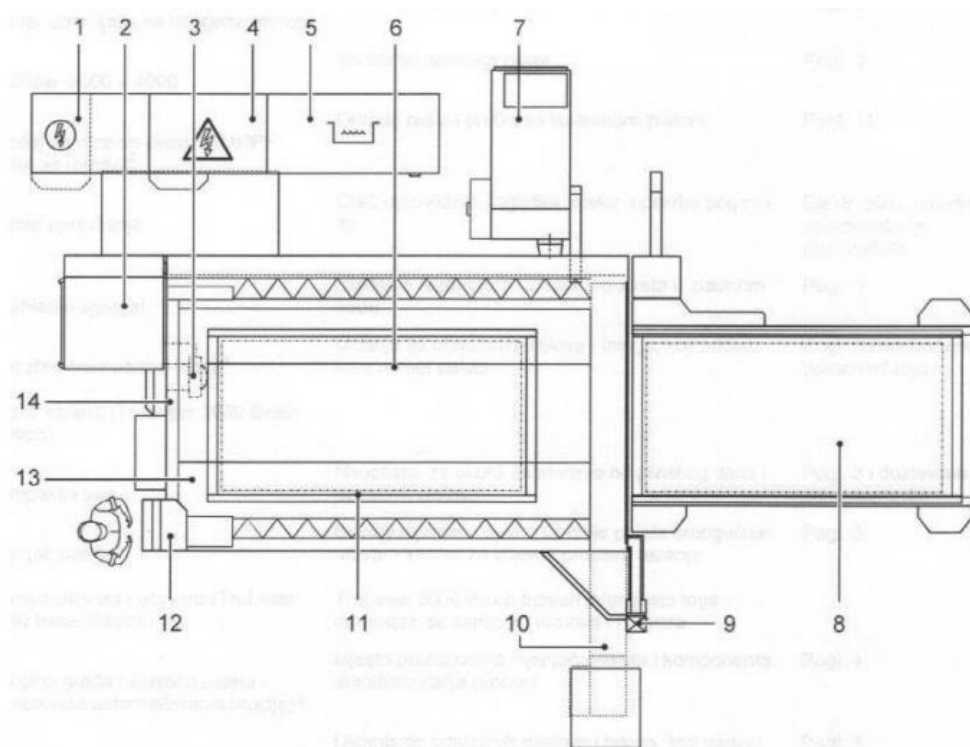
За велике снаге ласерског зрачења то су вишеосне телескопске цеви са водено хлађеним огледалима (скретачима зрака), док код ласера мање снаге веома су погодна оптичка влакна за дислоцирање места примене чак до 100 m. Манипулатори снопа преводе снап од ласера (извора) до обрадне главе. Обрадна глава се састоји од система за фокусирање ласерског снопа и млазнице за продубљивање помоћног гаса. Обрадна глава може бити изменљива, чиме се обезбеђује оптимална адаптивност према концепцији машине.

Координатни радни сто најчешће представља вишеосни механички систем који омогућује транслаторна и ротациона кретања [5].

На избор ласерске машине утичу:

- врста обраде,
- облик радног предмета и
- димензије које треба обрадити.

Код ласерских машина, нарочито када се ради о тродимензионалној обради велику примену имају роботи. Роботи који се користе за рад са ласерима називају се ласер роботи. Ласер робот обезбеђује релативно кретање између радних предмета који се обрађују и ласерског снопа. Карактеристике их миран рад, тачност и могућност програмирања, праволинијско кретање, угаоно кретање и промена у оријентацији. Повећање поузданости и безбедности ласер робота обезбеђују сензори за радне предмете, сензори сигурности и процесни сензори [5].



Слика 4.2. 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]

4.1.1. Глава ласера

Ласерска глава 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 Zоси, која се покреће преко зупчастог ремена од Z-мотора осовине [9].



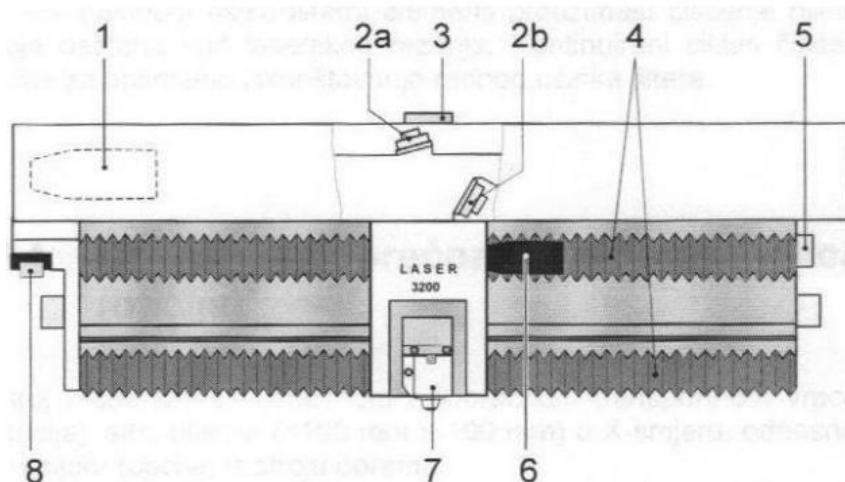
Слика 4.3. Глава за ласерско резање метала [16]

4.1.2. Покретна јединица

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

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.

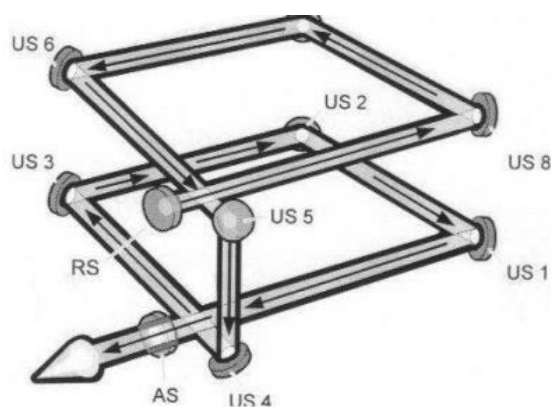


Слика 4.4. Покретна јединица; 1- Мотор погона X-осе, 2a- покретно огледало и аутофокус, 2b- Огледало FocusLine, 3- Мотор погона Y-осе, 4- Вођење X-осе, 5- Вођење X-траке, 6- Мотор погона Z-осе, 7- Глава ласера, 8- Вођење Y-осе [9]

4.1.3. Резонатор

Резонатор је квадратно склопљен и подељен на две равни. Зрачење ласера заокреће се покретним огледалима (US1 до US 8).

Резонатор (RS) 36 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.



Слика 4.5. Резонатор [9]

4.1.4. Програмско радно место

NC ласерске машине за сечење лима користе програмско радно место, које се састоји од хардвера и софтвера. Хардвер чине: РС рачунар, штампач, плотер и бушач траке. Софтверски део чине програмски пакети намењени за решавање проблема

сечења лима (израда развијеног стања радних предмета од лима, ласерско сечење итд.). У принципу то је интегрисани CAD/CAM систем за ласерско сечење радних предмета од лима који тежи да повеже CAD (computer aided desing) и CAM (computer aided manufacturing) као и друге софтверске модуле ради поједностављења производње [5].

CAD је софтверски модул намењен за конструисање радних предмета од лима у 2D/3D. CAD хардвер обухвата [5]:

- рачунар (CPU),
- једну или више графичких јединица,
- тастатуру и
- остале периферијске уређаје (миш, дигитајзер, палица итд.).
- CAD софтвер садржи:
- програме за примену рачунарске графике,
- апликационе програме и
- програме за остваривање комуникације између различитих CAD система.

CAM системи обухватају системе за припрему и реализацију ласерског сечења на CNC машинама.

4.2. Опрема за обраду абразивним воденим млазом

AWJC постројење у основи се састоји из два дела: уређаја за прихватање млазника и обратка (машина у ужем смислу) и хидрауличног уређаја за генерисање воденог млаза високог притиска.

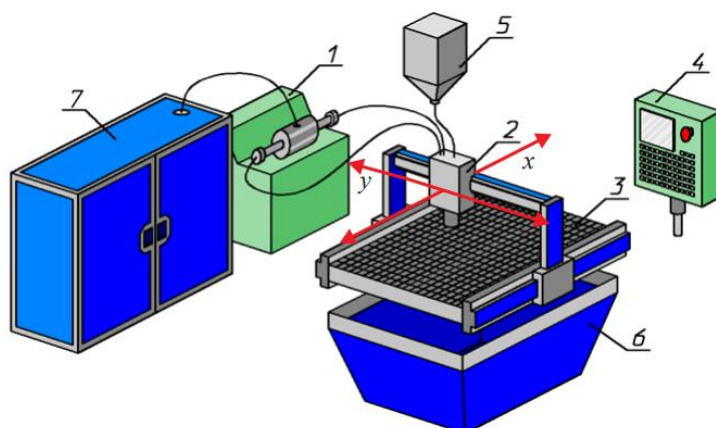
Широка примена технологије абразивним воденим млазом учинила је да се појединачна радна места разликују. Међутим, поједине групе опреме су сличне за све типове употребе. Главна карактеристика технологије је употреба воде под високим притиском за резање материјала. Стога је високопритисна пумпа која компресује воду до жељеног притиска срце комплетног система.

Цео систем чине следеће јединице:

- високопритисна пумпа,
- периферна помоћна опрема за НР пумпу,
- високопритисни разводник,
- уређај за обраду,
- абразивна обрада,
- корито за сакупљање садржаја млаза,
- систем за одстрањивање одпада.

Машина за обраду абразивним воденим млазом је веома сложен систем и производ је савремене, врхунске технологије. У индустрији се могу видети различити

облици и констукције машина за обраду абразивним воденим млазом, али је најчешћи облик и основне компоненте машине упрошћено приказан на слици 4.6.



Слика 4.6. Компоненте машине за обраду абразивним воденим млазом [2]

4.2.1. Систем за припрему воде

Вода која се користи за обраду абразивним воденим млазом се најчешће узима из локалног водовода. Оваква вода у себи садржи доста растворених минерала и соли који имају штетан утицај на машину за обраду абразивним воденим млазом. Због тога, пре уласка у пумпу, вода се третира, да би њене карактеристике биле у складу са спецификацијом произвођача машине [2].

Чврсте материје се из воде уклањају филтрирањем. У систему за напајање водом најчешће постоји низ филтера (од $0.5\ \mu\text{m}$ до $20\ \mu\text{m}$) [68]. Соли које су растворене у води се могу отклањати на три начина: омекшавањем воде, применом обратне осмозе или применом јонског измењивача. Какав је систем за припрему воде и какав третман воде се примењује, зависи од квалитета воде на улазу у машину за обраду абразивним воденим млазом [2].

4.2.2. Погонски део

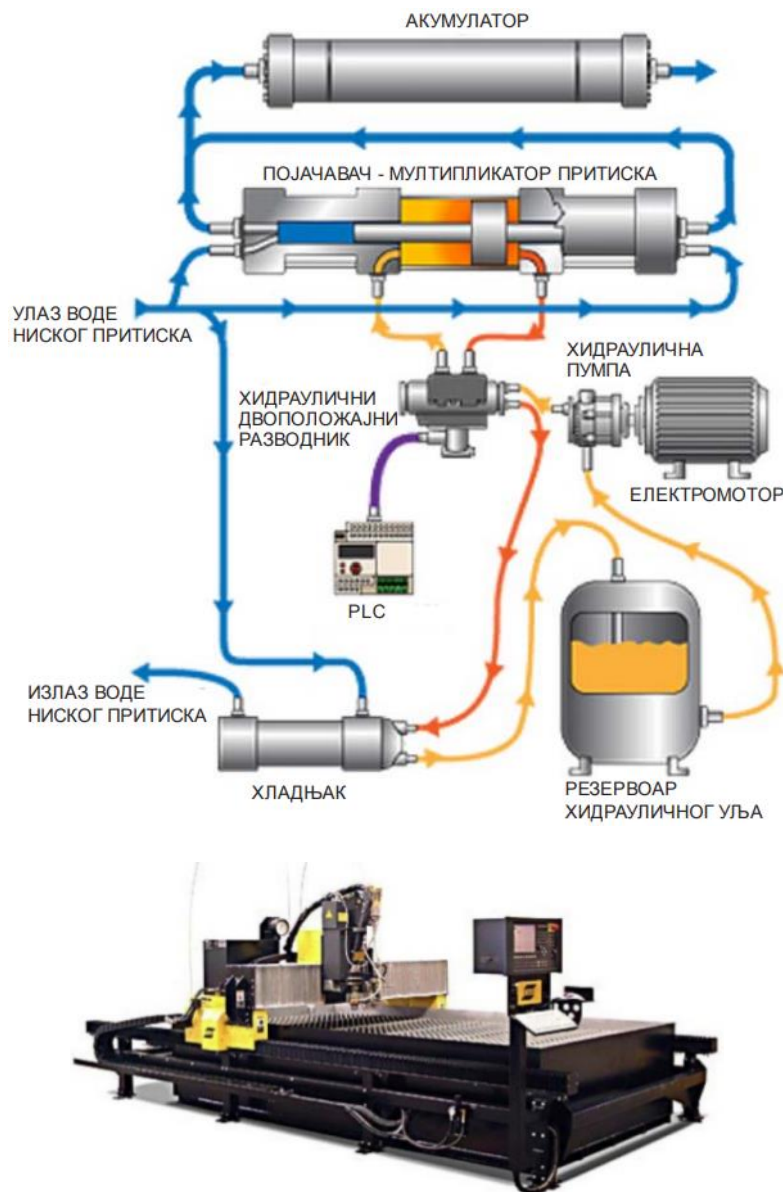
Погонски део је срце машине за обраду абразивним воденим млазом. Његов задатак је да обезбеди довољан проток воде високог притиска, и да ту воду кроз цевовод високог притиска допреми до извршног дела машине.

На слици 4.7. је дат шематски приказ најчешће примењиваног облика погонског дела инсталације за обраду абразивним воденим млазом.

Погонски део се састоји од следећих компоненти:

- Електромотор,
- Хидраулична пумпа са хидрауличним разводником,
- Пумпа високог притиска – појачавач (мултипликатор) притиска,

- Акумулатор притиска,
- Резервоар хидрауличног уља и
- Хладњак.



Слика 4.7. Погонски део инсталације за обраду абразивним воденим млазом [2,17]

4.2.3. Магацин абразива са системом за довод абразива

Да би систем за пословање са абразивом, почео да ради неопходно је магацин напунити абразивом. У магацин абразива се преко електромагнетног вентила доводи ваздух под притиском. Помоћу ваздуха се врши транспорт абразива. Начин на који је магацин повезан са остатком инсталације уређаја за дозирање абразива не омогућава континуалан доток абразива у систем.

Да би се процес обраде абразивним воденим млазом неометано обављао потребно је обезбедити континуални доток константне количине абразива у водени млаз. То омогућава уређај за дозирање количине абразива, слика 4.8.

Овакав уређај омогућава прилагођавање протока абразива тренутним захтевима обраде, што обезбеђује:

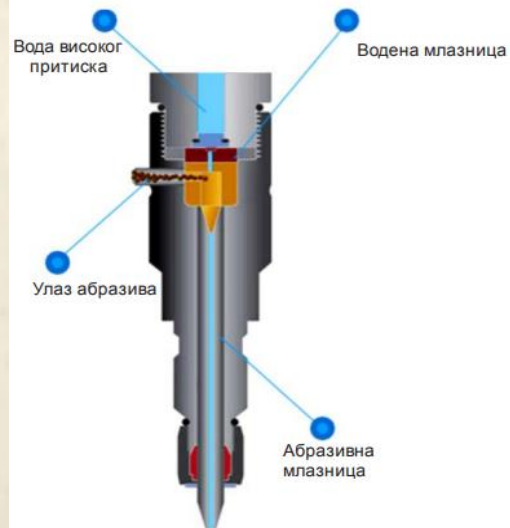
- Смањење потрошње абразива,
- Смањење времена потребног за обраду,
- Смањење могућности загушивања абразивне млазнице при почетном просецању материјала,
- Повећање квалитета обрађене површине,
- Продужење века трајања абразивне млазнице.



Слика 4.8. Систем за довод абразива [2]

4.2.4. Резна глава

Извршни део машине представља резна глава. То је део где се вода високог притиска меша са абразивом и где настаје абразивни водени млаз. Изглед резне главе је дат на слици 4.9..



Слика 4.9. Резна глава [2,15]

Резна глава се састоји из три основна дела:

- водене (дијамантске) млазнице,
- коморе за мешање и
- абразивне млазнице (цеви за усмеравање млаза).

Вода која долази у резну главу је најчешће под притиском од $130 \div 400$ МПа и пролази кроз водену млазницу. Пречник отвора водене млазнице се креће у границама од $0.08 \div 0.4$ mm [2].

Мешавина воде и абразивних честица као абразивни водени млаз излази из абразивне млазнице као кохерентни млаз и врши обраду. Веома је битно да водена млазница и абразивна млазница буду добро центриране, јер од тога зависи изглед абразивног воденог млаза, а самим тим и квалитет обраде [2].

4.2.5. Радни сто

Димензије и конструкција радног стола машине за обраду абразивним воденим млазом зависе од димензија предмета обраде, врсте обраде и жељеног квалитета обраде. Да би се остварило резање по задатој контури, неопходно је остварити релативно кретање резне главе и предмета обраде. Уколико су задате контуре дводимензионалне, довољне су машине са $2\frac{1}{2}$ осним управљањем, док су за тродимензионалне контуре потребне машине са 5–осним управљањем. Најчешће су у примени порталне машине са троосним управљањем. Координатни столови су крути рамови испод којих се налазе апсорбери - хватачи енергије абразивног воденог млаза, преостале након обраде [2].

4.3. Савремене машине за обраду сечењем

4.3.1. *Prima power fiber laser 1530 snage 3 KW (Platino Fiber)*

Platino Fiber је развијен тако да његовим купцима буде алат који је [17]:

- Једноставан за рад, лак за инсталацију, одржавање и коришћење;
- Широки распон материјала, *Platino Fiber* реже различите материјале и дебљине све до 25 mm конструкцијског челика;
- Продуктивност се повећава нарочито са танким и средње-дебелим материјалима.

Ласерско сечење је невероватно флексибилна технологија. Могу се обрађивати разноврсни материјали као и безброј могућих облика. Његово програмирање је толико брзо да се било каква промена може применити у било којој вашој фази производње без додатних трошкова и времена. Одликује га огромна прецизност, квалитет обрађене површине је одличан, а оно што је јако важно не прави деформације материјала.

Најбоља примена за ласерску технологију је обрада металних материјала (челик, нерђајући челик, алуминијум, бакар и месинг) дебљине од 0,8 mm до 25 mm.

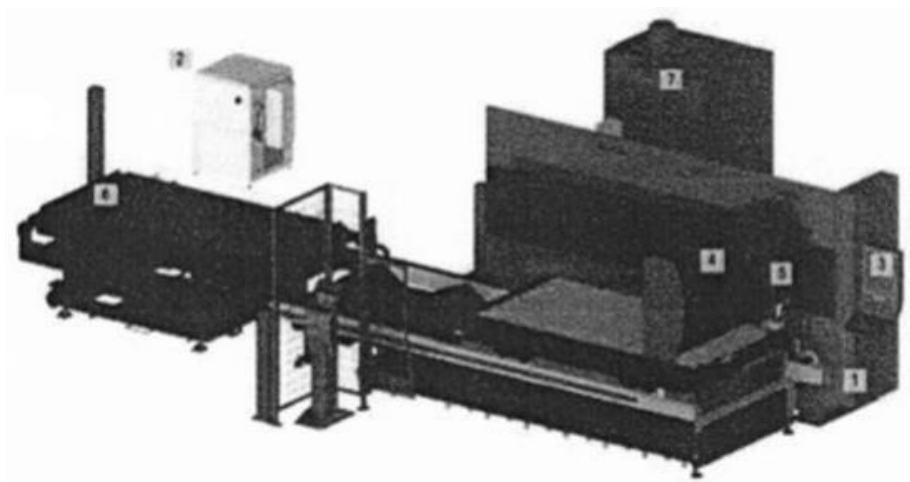


Слика 4.10. Ласерска обрада [17]



Слика 4.11. Изглед ласера Platino Fiber [17]

Основни делови ласера су:



Слика 4.12. Делови ласера Platino Fiber [17]

1. Оквир машине
2. Ласерски генератор
3. CNC
4. Конзола рука
5. Фокусна глава
6. Систем за одсис плинова и обраде прашине

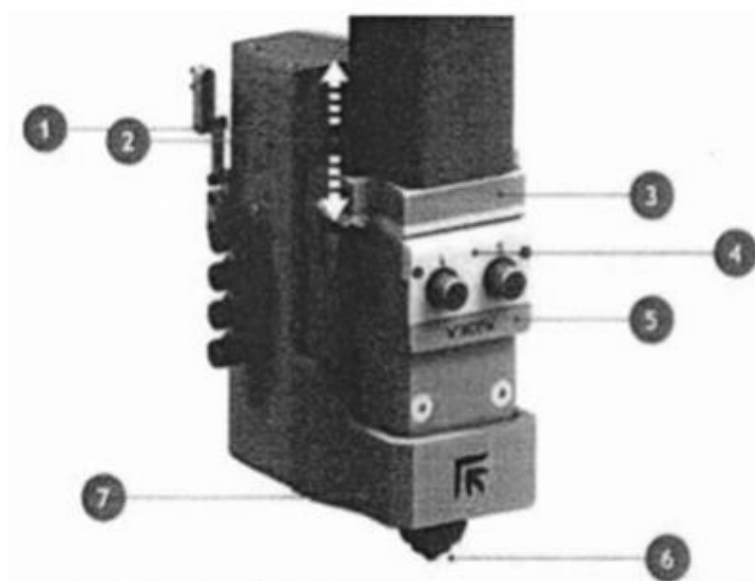
Platino Fiber је систем са летећом оптиком [17]:

- Брзина и тачност не зависе од масе радног комада;
- Радни простор је $X=3048\text{ mm}$, $Y=1524\text{ mm}$, $Z=150\text{ mm}$;
- Потребна површина је најмања могућа узимајући у обзир ход машине;
- Има најбољу тачност на тржишту: P_a and $P_s = 0,03\text{ mm}$ (пуни ход) према VDI/DSQ 3441 стандардима (статистичко испитивање радне и позиционе тачности машинских алата).

Platino Fiber има конзолну архитектуру:

- Потпуна приступачност на три стране;
- Могућност ручног утовара/истовара танких лимова, без коришћења без употребе аутоматског измењивача палета;
- Максимална укупна брзина од 140 m/min .

Ласерска глава за сечење са аутоматским фокусом [17]:



Слика 4.13. Глава ласера Platino Fiber [17]

1. SIF са прибором;
2. Висока динамика жаришне осе са са 35 mm хода;
3. LPM аутоматско поновно покретање ради плазме (Опција);
4. Кадице за сочива са брзим системом поравњања (ОРС);
5. Кадица за заштитно стакло за лаку контролу;
6. Широког распона дизни за сваку примену, са аутоматском изменом (Опција);
7. Nitrogen piercing – Пробијање амонијаком (Опција).

Prima Power је развила нову фибер главу са прилагодљивом оптиком за аутоматско управљање фокалне позиције и дијаметра и брзо, реактивно и прецизно мерење stand-off од материјала. Нова глава је дизајнирана за изврсан квалитет резања и динамичност на свим материјалима, највише притиске резања и најгоре услове околине (потпуно затворене и заштићене кутије). Глава је опремљена са једним фокусним сочивом, погодна за све потребе производње.

Заштитно стакло је интегрисано у за то предвођену кутију, за лакшу инспекцију. Контролишући подешавање фокусне позиције и дијаметра фокуса, флексибилност у резању различите дебљине лимова без потребе за ручним подешавањем осигурава највишу продуктивност у производњи. Фокусна позиција се измењује померањем колиматорских сочива [17].

Остале техничке спецификације Platino Fiber-а [17]:

- Радна површина ласера: $X = 3000 \text{ mm}$, $Y = 1500 \text{ mm}$, $Z = 150 \text{ mm}$.
- Максимална брзина: $X, Y = 100 \text{ m/min}$.

- Максимална комбинована брзина: 140 m/min.
- Линеарна резолуција осе: 0.001 mm.
- Тачност:
 - Позициона тачност (Pa): 0.03 mm;
 - Поновљивост (Ps): 0.03 mm;

У складу са VDI/DSQ 3441 стандардима, статистичко испитивање радне и позиционе тачности машинских алата. Сечење цеви (Опција):

- CNC – управљива ротациона оса за сечење округлих и правоугаоних цеви.
- Максимална укупна димензија:
 - Дужина: 10.500 mm
 - Ширина: 3.400 mm
 - Висина: 2.200 mm
- Маса машине: 12.000 kg.
- Снага стандардног Platino Fiber ласера: 2.000W - 5.000 W.

4.3.2. Фибер ласер машина „NUKON NF 2060 - 3 kW SERIES“

Фибер ласер је развијен и заснован према идеји стварања машине која има веома мале трошкове и могућност замене више машина у различитим операцијама обраде сечења, бушења, глодања, гравирања итд. Машина за ласерско сечење под називом Фибер ласер „NUKON NF 2060 - 3 kW SERIES“.



Слика 4.14. Машина за ласерско сечење [19]

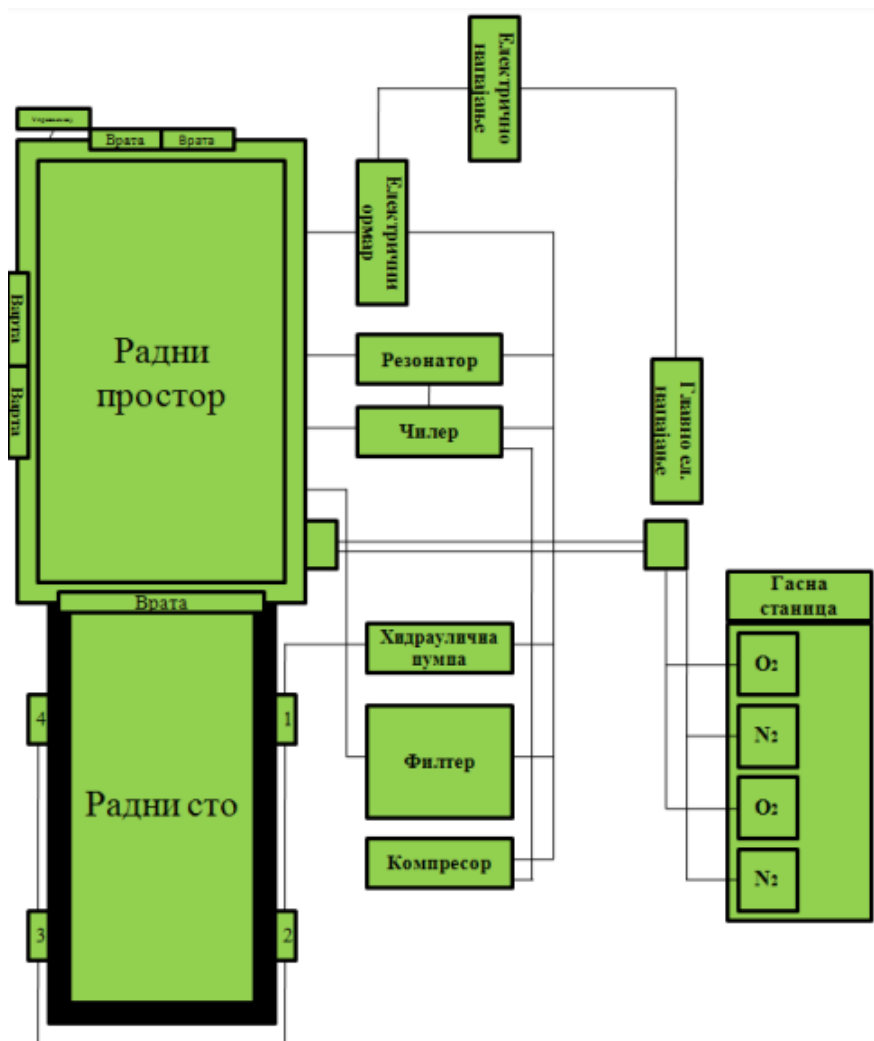
Табела 5. Опште карактеристике „Фибер ласер машине“

Назив		Карактеристике		Опис
Модел машине		NF-2060		
Ласерски извор		3 kW		
Потребна снага		40kW		
Тип		Пливајућа Оптичка Глава		Кретање ласер светла
Препоручен систем емисије		PL-4000		Капацитет:4000m³/h, Потрошња:5.5 kW Мотор притисак вентилатора:3100Pa- 310mmSS
Макс. капацитет сечења	Димензије табле	2030 x 6050 mm		(/)
	Дебљина табле: Мек челик	18 mm		
	Дебљина табле: Нерђајући челик	10 mm		
	Дебљина табле: Алуминијум	8 mm		
Висина радног стола		900 mm		
Максимална носивост стола		2000 Kg		
Оса	X оса	2030 mm		
	Y оса	6050 mm		
	Z оса	85 mm		
Убрзање(G)		X, Y, Z : 1 G		
Брзина дуж осе(m/min)		X, Y : 70 (m/min)		
Кретање дуж осе		Z осе Кретање дигиталним мотором		
Прецизност позиционирања (mm)		X&Y : +/- 0.05 mm/500 Z : +/-0.05mm/100		(/)
Прецизност понављања (mm)		X,Y ve Z: +/- 0.01mm		
Глава за сечење		7.5" Focused Head		Pressure Strength : 2MPa
Z Оса контрола одступања		Без додира Tun Z ОсаTreising Tipe		
Job List Support Management		Оштрица тестере	50 mm - Корак	
Осветљење		5 ком Fluo лампи		
Аларм светло	Зелено	Систем рада		
	Жуто	Спремно за рад		
	Црвено	хаварија		
Контрола бирања помоћног гаса	2 Тип гаса		Азот и кисеоник	
	Вредност подешавања притиска			
	ЗаO₂ између 0,03 i 0,6 Мра Обезбеђен притисак: 0,8 Мра			
	За N₂ између 0,1 i 2,0 Мра обезбеђен притисак: 2,5 Мра			
Нумеричка контрола помоћног гаса	(Подешња софтверски)		Опционо висок притисак у цефоводу се може ручно подесити	
	За O₂ ; Мах.Притисак0,6 Мра			
	За N₂ ; Мах.Притисак 2 Мра			
Маса		25.500 KG		Јединица за хлађење и измењ.

Пре свега ова машина је пројектована за рад при сечењу различитих материјала који након исецања на ласеру добијају облике делова који су потребни за деље уклапање у различите конструкције, израда делова на оваквој машини је веома једноставна и смањује број операција које су некада биле потребне да би се дошло до финалног дела. Овим поступком долази не само до повећања квалитета израђеног дела већ и до смањења трошкова који су некада били потребни за израду истог. Једноставност при раду се огледа у оперативном делу рада са машином. Оператер мора да прати рад машине и да подешава параметре као би израда делова била добра и како би квалитет добијених комада био задовољавајући. [27]

Елементи машине

Као и код сваке функционалне машине, тако и код фибер ласера постоје елементи који чине једну функционалну целину (слика 5.3). Сваки од елемената треба да поседује максималну исправност и задовољење одређених параметара како би рад могао да се обави и како би се извршило максимално искоришћење у погледу израде делова приликом сечења.



Слика 4.15. Приказ елемената ласерске машине [19]

4.3.3. WJS NCP 30

Премиум машина је свестран и ефикасна алатна машина која се може наћи у готово свим професионалним радњама или индустрији. Са огромним опсегом опционалних подешавања, може се дизајнирати тако да задовољи широк спектар потреба за сечењем, и 2D и 3D сечење. Заснован на механичком дизајну водеће класе Water Jet Sweden, то је модел машине за стручњаке и тешке захтеве за перформансама.

Технички подаци машине:

- Конструкција: носећа машина (WJS – широки патентирани систем вођења)
 - Оквир – заварен
 - Сто за сечење – нерђајући челик
 - Поклопац – нерђајући челик
 - Систем за покретање – линеарни мотор/вијак
 - Управљачка јединица - PanelOne Operator HMI
 - CNC систем - FANUC 31i or 31i -5 за косу обраду
- Аутоматска променљива глава: 2-4 главе, (гнездеће оптимизација)
- 3D сечење – систем косог млаза
- Обрада - PWJ и AWJ (компатибилно са FAWJ)

Перформансе:

- Максимално померање по Z оси - 250 mm
- Максимално оптерећење стола - 1200-3000 kg/m²
- Тачност позиционирања - ± 0.050 mm/m
- Тачност понављања - ± 0.025 mm

Перформансе косог млаза:

- Максимално померање по Z оси - 170 mm
- Перформансе сечења - 60°
- Померање по оси B - $\pm 91^\circ$
- Померање по оси C - $\pm 400^\circ$
- Тачност преноса B и C осе - < 1 arcmin
- Тачност понављања B и C осе - $< \pm 0.1$ arcmin

Помоћу више глава може се оптимизовати гнезђење и да буде веома ефикасна употреба материјала. Резањем различитих делова истовремено смањујете и време производње у операцијама. Аутоматске вишеструке главе за резање повећавају флексибилност [14].

Димензије стола:

- Ширина – 1200
- Дужина L1 – 1705
- Дужина L2 – 2275

Капацитет и могућности се могу додати функцијама као што су вишеслојно резање и кошење цеви. WJS NCP 30 посебно је дизајнирана за тешке услове, где је потребна непрестана производња, наглашавајући дуготрајност и дуготрајне перформансе. Постоје различите решетке стола у зависности од примене, сечења и захтева. Осим стандардне мреже користе се и таласне решетке за резање дебљих материјала, а када је у питању резање тешких материјала користе се цев-решетке.



Слика 4.16. WJS NCP 30 [14]

Остали делови које поседује машина:

- Сензор висине
- Абразивни доводни систем са посудом под притиском
- Абразивни торањ
- Абразивна контрола нивоа и контрола блокаде
- Даљинско управљање НР пумпе у НМІ
- Абразивни систем за уклањање са контејнерским врхом и резервоар за седимент

Остале опције машине:

- Сензор судара
- Индикатор нулте тачке
- јединица за бушење
- Систем индикатора обратка (функција сонде)
- Операције беспилотних операција
- Jet Pen Marker систем
- Online абразивни систем храњења
- Електронски абразивни доводник, са регулацијом протока од PanelOne-а
- Праћење притиска НР пумпе у НМІ
- Пропорционална контрола притиска вентила НР пумпе у НМІ
- Брзо подешавање нивоа воде

Основни параметри и фактори утицаја, који се дефинишу приликом припреме WJM су [2]:

- потрошња воде (l/min)
- повишење радног притиска (bar)
- проток воде (l/min)
- брзина излаза воде из млазнице (m/s)
- температура на предмету резања ($^{\circ}\text{C}$)
- потрошња струје у току рада (V)
- проток коришћених абразива (g/min)
- коришћен абразив и његова тврдоћа
- пречник абразива на излазу из млазнице (mm)
- пречник клипа на пумпи (mm)
- повишење притиска за улазни притисак воде (bar)
- улазни пречник воде у млазници (mm)
- улазни пречник абразивне млазнице у млазници (mm)
- удаљеност млазнице (mm)
- притисак воде у случају пражњења (MPa)
- улазни угао на млазници - потрошња енергије (kwh)
- брзина кретања млазнице V (mm/min)
- бука

5. Експериментална испитивања и резултати

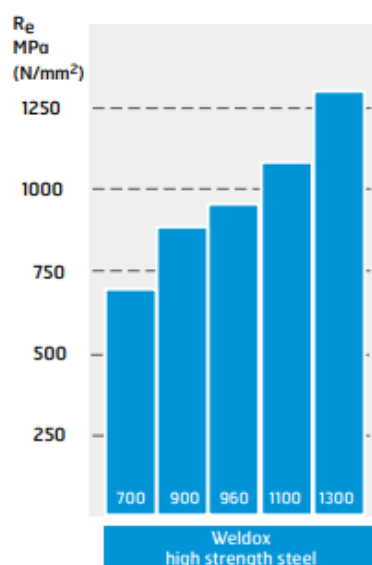
Експериментална испитивања имала су за циљ да се утврди повољност сечења абразивним воденим млазом, тако и утицај параметара обраде на обрађену површину, квалитет реза, као и време које је потребно при резању специјалних челика. У даљем тексту биће детаљно објашњени параметри који су се користили на машини за AWJM обраду, као и детаљно представљање материјала који су се користили за сечење.

5.1. Материјали коришћени за експеримент

- | | | | |
|-------------------|---------------|---------------------|--------|
| • Weldom 700 | дебљине 10 mm | димензија 600 x 250 | 1 ком. |
| • Hardox 400 | дебљине 10 mm | димензија 140 x 860 | 1 ком. |
| • Protac 500 | дебљине 10 mm | димензија 410 x 450 | 1 ком. |
| • St 52-3 (Č0563) | дебљине 10 mm | димензија 390 x 200 | 1 ком. |

5.1.1. Weldom 700

Weldom је развијен да пружа одличну завариваност, у комбинацији са великом чврстоћом и чврстином. Металургија на бази руде и напредна прерада у фабрици челика обезбеђују веома низак садржај заосталих елемената у челику. Weldom челици високе чврстоће имају одлична својства савијања и обрадивости.



Слика 5.1. Weldom – челик повише чврстоће [20]

Weldom 700 је општи структурални челик са минималном чврстоћом од 650 до 700 МПа у зависности од дебљине. Weldom 700 испуњава захтеве EN 10025 за одговарајуће димензије и дебљине табле. Типичне примене захтевају конструкције које носе оптерећење [18].

Weldox 700 E је доступан у дебљини плоче од 4 до 160 mm, а weldox 700 F доступан је у дебљинама плоча од 4 - 130 mm. Обе дебљине су доступне у ширинама до 3350 mm и дужинама до 14630 mm. За дебљине преко 100 mm жељена ширина је 1650 mm са неоштећеном ивицом.

Табела 6. Механичке карактеристике [18]

Дебљина [mm]	Жилавост $R_{p0.2}$, [min MPa]	Затезна чврстоћа R_m , [MPa]	Издужење A_5 , [min %]	Тврдоћа по Бринелу HBW
4 – 53	700	780 – 930	14	260 – 310
(53) – 100	650	780 – 930	14	260 – 310
(100) – 160	650	710 – 900	14	240 – 290

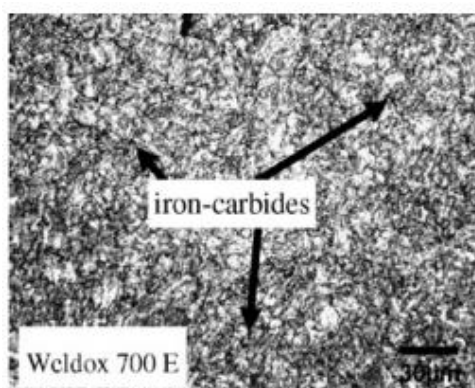
Према EN 10025-6, хемијски састав челика S690QL (комерцијална ознака *weldox* 700) је дефинисан за петнаест елемената, табела 5., при чему је еквивалент угљеника максимално $CEV=0,65$ [19].

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15}, [19]$$

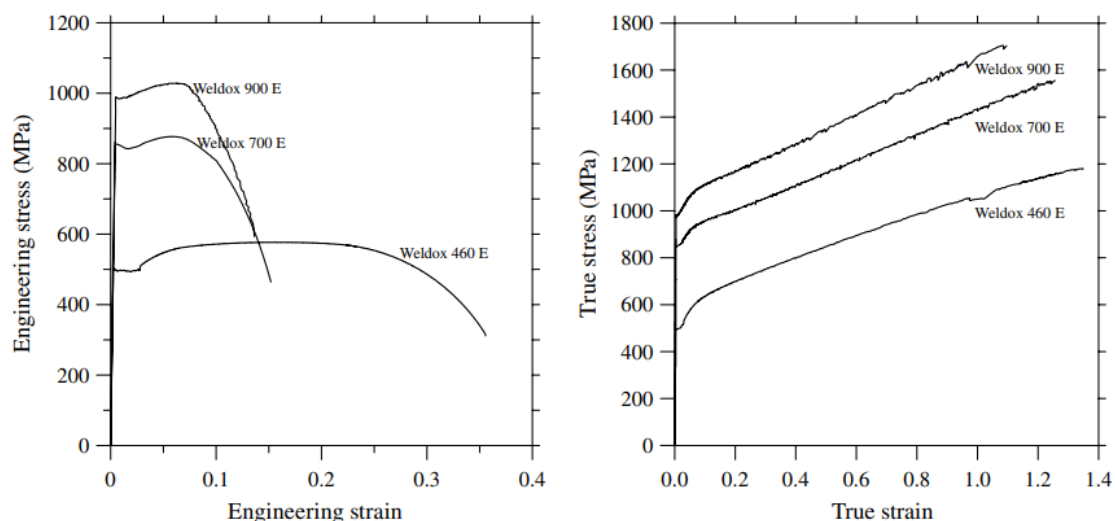
Табела 7. Хемијски састав S690QL у процентима (%) [19]

C	Si	Mn	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V	Zr
0,20	0,80	1,70	0,02	0,01	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,05	0,12	0,15

Weldox 700 E је материјал у групи која пролази кроз значајан процес гашења и каљења (назван као QT), а микрографије показују да се састоје од каљеног мартензита. Мартензит даје већу чврстоћу, али и смањује дуктилност. Да би се легуре учиниле дуктилнијим, материјали су подвргнути каљењу [22].



Слика 5.2. Оригинална микроструктура челика *Weldox* 700 E [22]



Слика 5.3. Инжињерске и стварне криве напона и напрезања у квази-статичком стању и собној температури за Weldox 460 E, Weldox 700 E и Weldox 900 E [22]

Weldox 700 је своје механичке особине постиже накнадном термичком обрадом. Накнадним довођењем топлоте губе се махичке карактеристике за је зато препоручљивије сечење абразивним воденим млазом него било којим другим сечењем. При заваривању, сечењу, брушењу или на било који други начин на овом материјалу морају се предузети одговарајуће мере заштите и здравља. Брушење, посебно слојева превучених темељним премазом, може произвести прашину са високом концентрацијом честица [18].

Код Weldox челика, ради ефикаснијег контролисаног ваљања легирање се врши са мањим количинама Nb. Овај елемент подиже подручје рекристализованог аустенита ка вишим температурама, што омогућава извођење већих пластичних деформација аустенита приликом ваљања.

5.1.2. Hardox 400

Hardox удовољава строгим захтевима за чврстином, сталним квалитетом, равномерношћу и стању површине. Јединствена комбинација константно високе тврдоће, високе чврстоће и одличне отпорности на ударце чини *hardox* врло погодним материјалом за широк спектар примене. Производ је на тржишту од 1970.-их и континуално се развија како би задовољио захтеве купаца. Плоче се производе у дебљинама од 3 до 130 мм и тврдоћи до 600 HBW.

Одликује их висока тврдоћа и отпорност на хабање. Због своје високе чврстоће, производи могу бити једноставнији и лакши, али могу да носе и веће корисне носивости. Штавише, *hardox* плоча има добру отпорност на удар и на ниским температурама. Његова добра својства заваривања и обрадивости поједностављују производњу и поправке. Већа корисна оптерећења, нижи трошкови одржавања, добра

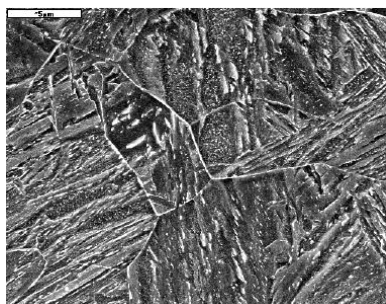
распоживост и дужи радни век комбинују да би се обезбедила боља укупна економичност.

За Hardox челике контролисано ваљање завршава се у аустенитном подручју. Температуре загревања слабова обично су ниже у поређењу са уобичајеним ваљањем. Први део ваљања обавља се у подручју рекристализованог аустенита, (изнад 950 °C), где се рекристализација врши већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукцијом дебљине улошка. Ваљање се затим наставља у подручју метастабилног аустенита (између A_{r3} и A_{r1}), где долази до хладне деформације, а аустенитна зрна остају деформисана. У овој фази не долази до рекристализације, или не до потпуне рекристализације [24].

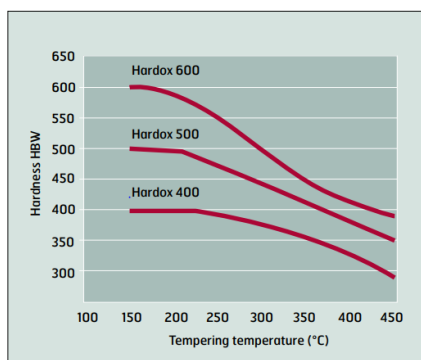
Током трансформације свако деформисано аустенитно зрно даје многе феритне зачетке по кристалним границама и деформацијским појасевима који настају у унутрашњости кристалних зрна. После завршене трансформације ствара се велики број феритних зрна који побољшавају чврстоћу и жилавост [24].

Hardox 400 је челик отпоран на абразију са номиналном тврдоћом од 400 HBV. Типичне примене су компоненте за конструкције подложне хабању. [28]

Hardox 400 није предвиђен за даљу топлотну обраду. Своја механичка својства стекао је гашењем, а по потреби и накнадним каљењем. Својства услова испоруке не могу се задржати након излагања температурама већим од 250 °C. [28]



Слика 5.4. Микроструктура челика Hardox 400; увеличана 5000x [29]



Слика 5.5. Повишинска тврдоћа у зависности од температуре каљења [21]

Нема разлике код ласерског резања *Hardox* у поређењу са обичним челиком, тј. користе исте параметре процеса. Прајмер смањује брзину сечења, али то се може решити тако што ћете прво испаравати темељни премаз, а затим обрезасти контуру.

Чврсти челик, који спада у групу нисколегираних борних челика, углавном је пожељан у бродској и рударској индустрији, тешкој грађевинској опреми, дробилицама и применима транспортера због високе жилавости, добре обрадивости и заваривања. Међутим, триболошке перформансе ових челика су неадекватне у неким апликацијама за инжењеринг који укључују корозивно окружење [21].

Из тог разлога је потребна површинска обрада да би се превазишао овај недостатак. Површине материјала могу се модификовати помоћу неколико техника као што су термохемијски третмани уз помоћ плазме и премази са танким филмом у циљу побољшања хабања и корозије челичних материјала [21].

Абразивно резање воденим млазом је најбоља метода када постоји ризик од појаве прслина при резању, и зато се препоручује за дебеле лимове *Hardox* челика [24].

5.1.3. Protac 500

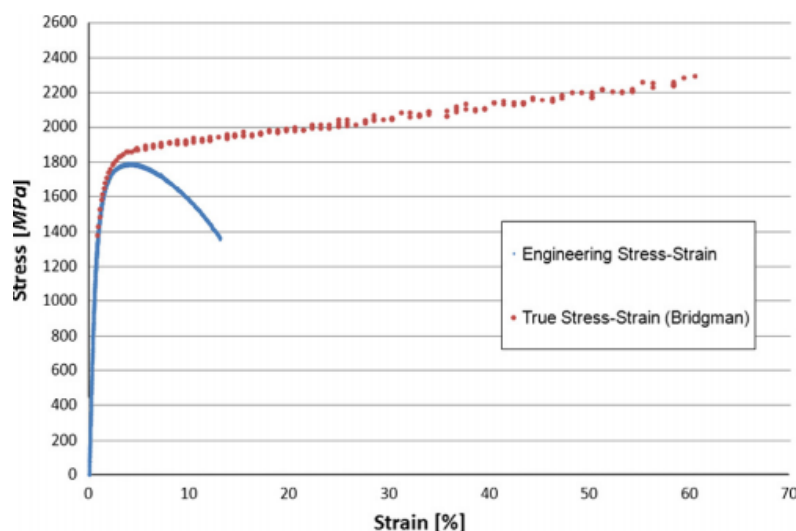
Због својих механичких својстава Protac 500 се сврстао међу висококвалитетне материјале у опсегу тврдоће 480 – 540 НВ. Пошто га карактерише велика чврстоћа, дуктилност и специфична тврдоћа, погодан је за наношење експлозије и балистичке заштите лаких оклопних возила, специјалних возила, врата и заштитних конструкција зграда, итд. Његова хемијска и основна механичка својства према произвођачи су представљени у табелама 8. и 9. респективно [25].

Табела 8. Хемијски састав *Protac 500* према дефиницији произвођача у процентима (%) [25]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.3	0.7	1.2	0.8	0.7	0.35

Табела 9. Основна механичка својства *Protac 500* како је дефинисано у произвођач [25]

Густина	7850 [kg/m ³]
Жилавост	1400 [MPa]
Затезна чврстоћа	1800 [MPa]
Издужење A ₅	10 [%]
Тврдоћа	470 – 540 НВ



Слика 5.6. Инжењерске и стварне криве напона и напрезања за Protac 500 [25]

5.1.4. Č0563 (ST 52-3)

Спада у групу конструкционих челика и користе се за одговорне заварене конструкције изложене динамичким оптерећењима и ниским температурама, до -30°C . Челик ST 52-3 N је челик са ниским садржајем угљеника кога одликује висока чврстоћа и лака заврљивост са другим заварљивим челицима.

Са својим ниским еквивалентом угљеника, поседује добра својства хладног обликовања. Испоручује се у шипкама у нормализованом или контролно ваљаном стању.

Примењује се за делове машина за које је потребан челик за заваривање, покретну опрему, дизалице, носаче, шасије, сидрене вијке, клипњаче, мостове, као и рађевинарству [26].

Табела 10. Хемијски састав Č0563 у процентима (%) [26]

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	N
max 0.20	0.15-0.50	max 1.60	max 0.035	max 0.035	0.02-0.04	min 0.02	max 0.009

Ако је челик рафиниран зрном са Al, N = max 0,015% [26].

Табела 11. Механичке карактеристике Č0563 [26]

Жилавост R_{eH} [N/mm ²]	Затезна чврстоћа R_m [N/mm ²]	Издужење A_5 [%]
355 min	490 min	20 % min

5.2. Обрада абразивним воденим млазом PTV WJ 2030-1Y-SJ-L



Слика 5.7. Изглед машине PTV WJ 2030-1Y-SJ-L [27]

Карактеристике машине:

- Тачност позиционирања - $\pm 0,04 \text{ mm} / 300 \text{ mm}$
- Поновљивост - $\pm 0,03 \text{ mm}$
- Максимална радна брзина - $60\,000 \text{ mm/min}$
- Максимална попречна брзина - $20\,000 \text{ mm/min}$
- Висина Z-осе - 300 mm
- Број Z-носача - 1
- Број резних глава - 1-8
- Ширина - 4500 mm
- Дужина стола - 2500 mm

Остале карактеристике машине:

- широк распон формата радних површина од $1 \times 1 \text{ m}$ до $4,5 \times 12 \text{ m}$
- основна челична носива конструкција са AL прикључком
- линеарно кретање са носачима кугличних лежајева
- каљени регали и зупци од нехрђајућег челика
- прецизни планетарни мењачи погоњени серво-моторима
- кућиште од нехрђајућег челика
- компоненте су од престижних добављача

Додатна опрема:

- Софтвер ATD V за контролу довода абразива

Омогућује промену течности абразивног тока током сечења без заустављања процеса сечења. Штавише, умањује потрошњу абразива потребног за пробијање материјала.



Слика 5.8. *Контролисање довода абразива [27]*

➤ Сензор висине

Висински сензор аутоматски посматра оптималну удаљеност између робусног полупроизвода и сечења током сечења.



Слика 5.9. *Сензор висине [27]*

- ProgresJet систем
- ProgresJet 5AX систем
- ваздушна бушилица
- абразивни доводни систем
- екстрактор са пнеуматском регулацијом нивоа воде
- Светлосна баријера, жичани систем

Светлосна баријера или жичани систем су делови сигурносног система неких PTV машина. Служи за заштиту руковаоца од могућих повреда изазваних покретним деловима машине или повредама технологије коју носи.



Слика 5.10. Светлосна баријера [27]

5.3. План експеримента

Експеримент је обављен у фирми „ПАК PROMET” D.O.O. Производно предузеће “ПАК PROMET” D.O.O. почело је са радом 01.06.1989. године у Крагујевцу. Динамичан развој и дугогодишње искуство стручњака у области производње машина за паковање у прехранбеној индустрији, а највише у млекарству, уврстиле су ову фирму у ред препознатљивих предузећа на просторима југоисточне Европе, Русије, централне Африке. Основну делатност фирме “ПАК PROMET” представља: производња, ремонт и сервис машина у поменутим областима.

Обрада абразивним воденим млазом

Сечење узорака димензија 40 x 40 mm дебљине 10 mm.

Табела 12. *Č0563 (ST 52-3)*

	Снага, [bar]	Брзина	mm/min
1	5140	Препоручена Q ₃	192
2	5140	Препоручена већа Q ₂	302
3	5140	Препоручена мања Q ₄	138

Табела 13. *Hardox 500, Protac 500, Weldom 700*

	Снага, [bar]	Брзина	mm/min
1	5140	Препоручена Q ₃	160
2	5140	Препоручена већа Q ₂	255
3	5140	Препоручена мања Q ₄	115

Висина млазнице: 3 mm
Проток абразива: 400 g/min
Машина: PTV WJ 2030-1Y-SJ-L
Абразив: Гарнат 80
Пречник дизне: 1.2 mm

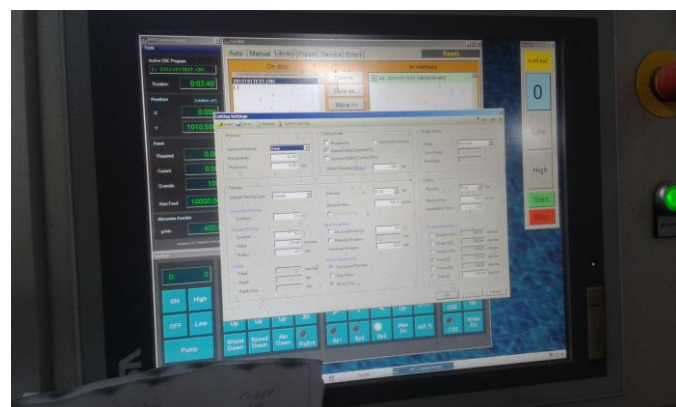
5.4. Ток експеримента



Слика 5.11. *Машина на којој је извршен експеримент у фирми “РАК ПРОМЕТ”*



Слика 5.12. *Позиционирање и причвршћивање делова на машини*

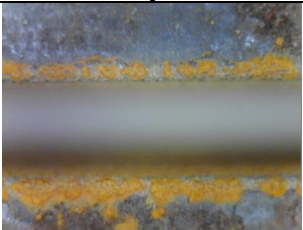
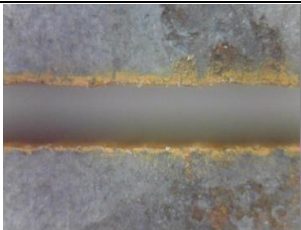
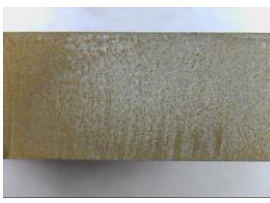
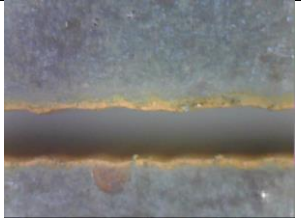
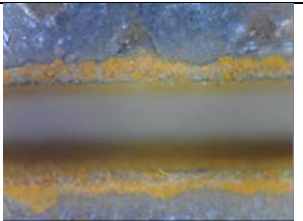
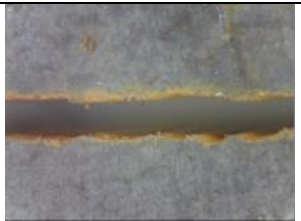


Слика 5.13. *Уношење параметара за извођење операција*

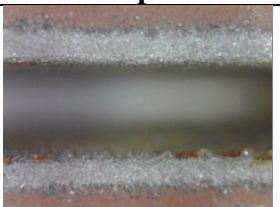
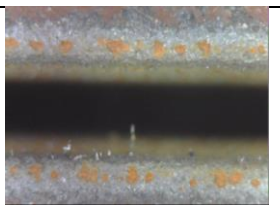
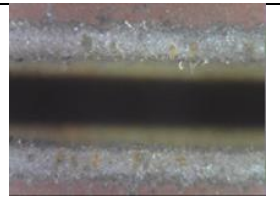
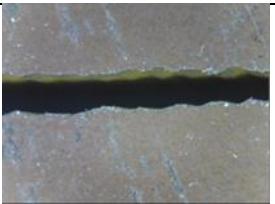
5.5. Резултати експерименталних испитивања

Изгледи резних ивица са горње и доње стране после сечења, као и храпавост улазне и излазне ширине дати су у следећим табелама.

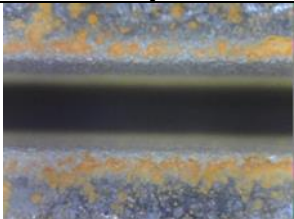
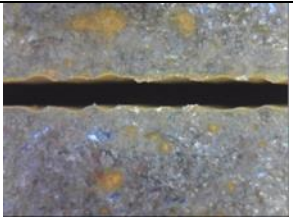
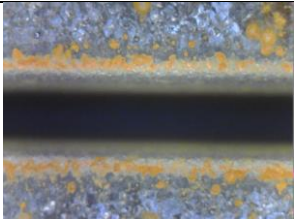
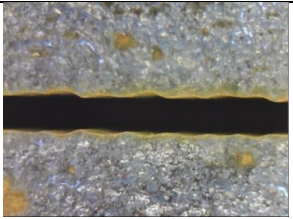
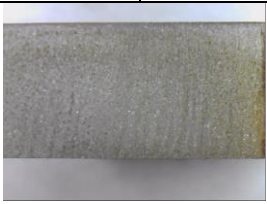
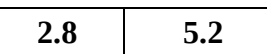
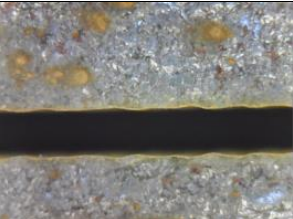
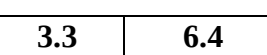
Табела 14. Ширина реза и хrapавост узaвисности од брзине резања за Č0563

Č0563 (ST 52-3)	Брзине, [mm/min]	Ширина реза, [mm]		Хрaпавост, [μm]	
		горе	доле	горе	доле
	Q4=138				
		1.51	0.935	1.8	4
	Q3=192				
		1.442	0.815	2.2	6.7
	Q2=305				
		1.34	0.8	2.8	7.2

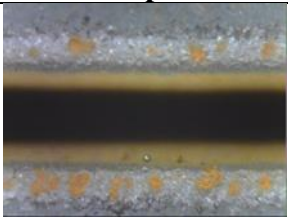
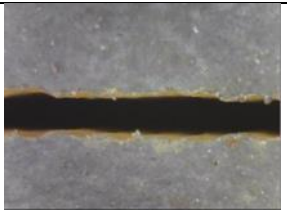
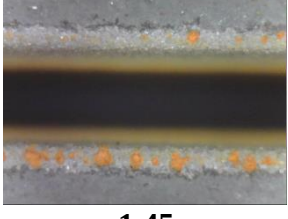
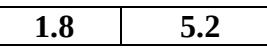
Табела 15. Ширина реза и хрaпавост узaвисности од брзине резања за Hardox 400

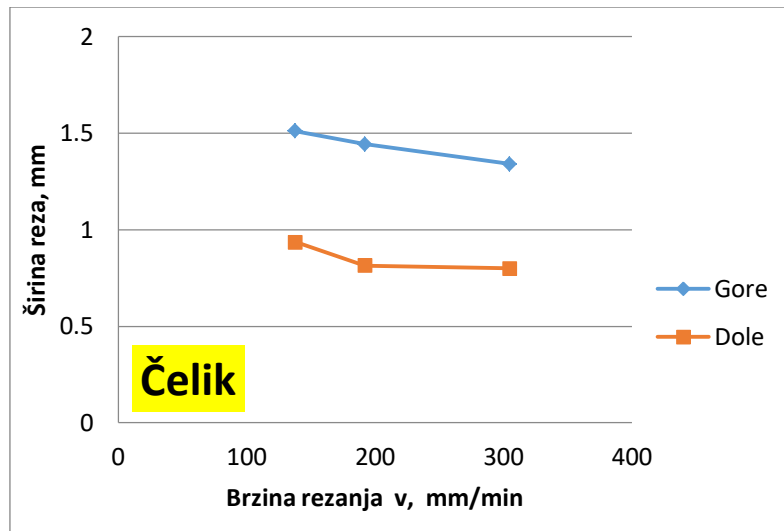
Hardox 400	Брзине, [mm/min]	Ширина реза, [mm]		Хрaпавост, [μm]	
		горе	доле	горе	доле
	Q4=115				
		1.67	1	1.8	2.7
	Q3=160				
		1.555	0.875	3.4	5
	Q2=255				
		1.425	0.815	3.6	6.6

Табела 16. Ширина реза и хrapавост узависности од брзине резања за Protac 500

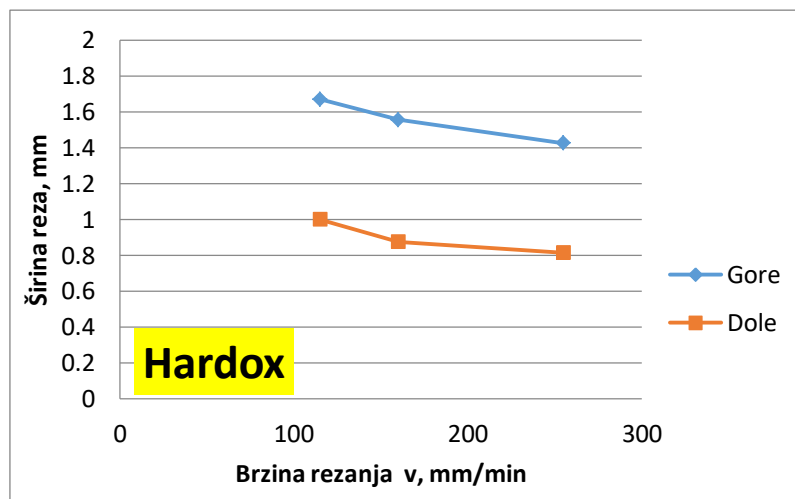
Protac 500	Брзине, [mm/min]	Ширина реза, [mm]		Храпавост, [μm]	
		горе	доле	горе	доле
	Q4=115	 1.72	 0.935	 2.4	 4.8
	Q3=160	 1.52	 0.885	 2.8	 5.2
	Q2=255	 1.51	 0.665	 3.3	 6.4

Табела 16. Ширина реза и хrapавост узависности од брзине резања за Weldom 700

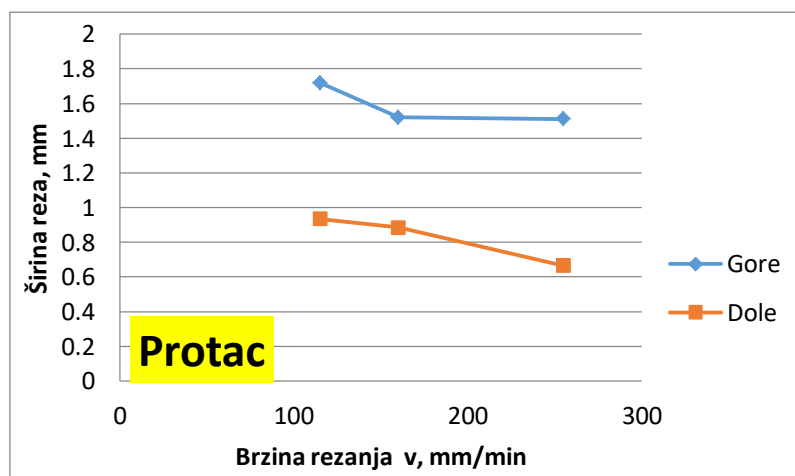
Weldom 700	Брзине, [mm/min]	Ширина реза, [mm]		Храпавост, [μm]	
		горе	доле	горе	доле
	Q4=115	 1.495	 0.91	 1.6	 4
	Q3=160	 1.474	 0.9	 1.8	 4.1
	Q2=255	 1.45	 0.785	 1.8	 5.2



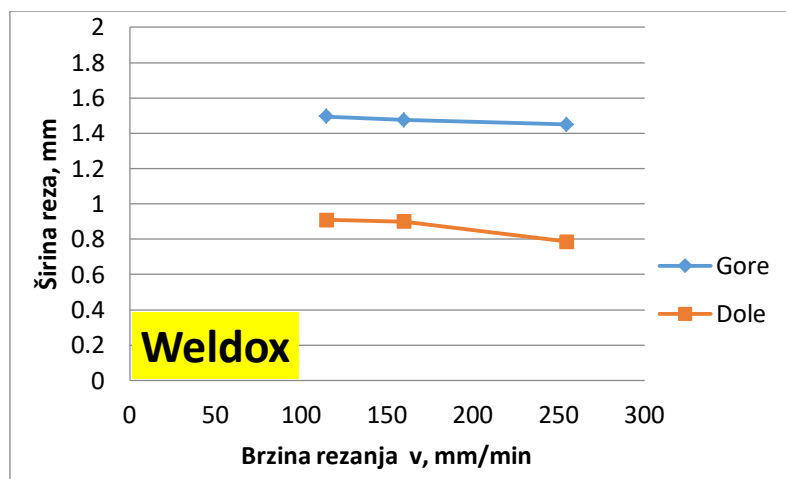
Слика 5.14. Дијаграм зависности ширине реза од брзине резања за Č0563



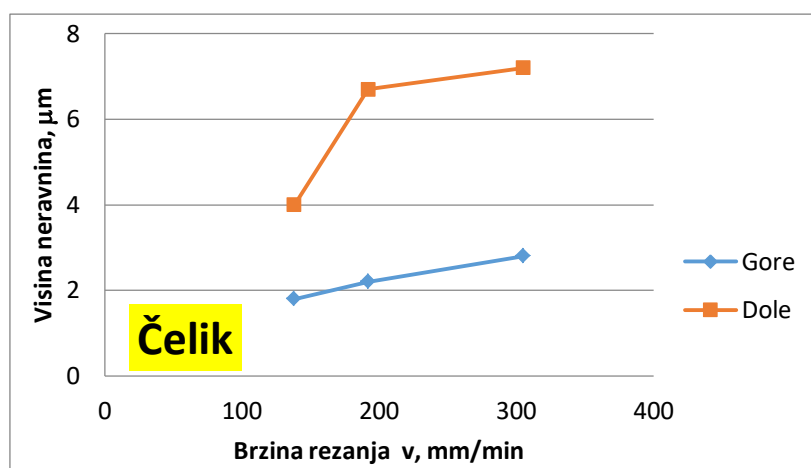
Слика 5.15. Дијаграм зависности ширине реза од брзине резања за Hardox 400



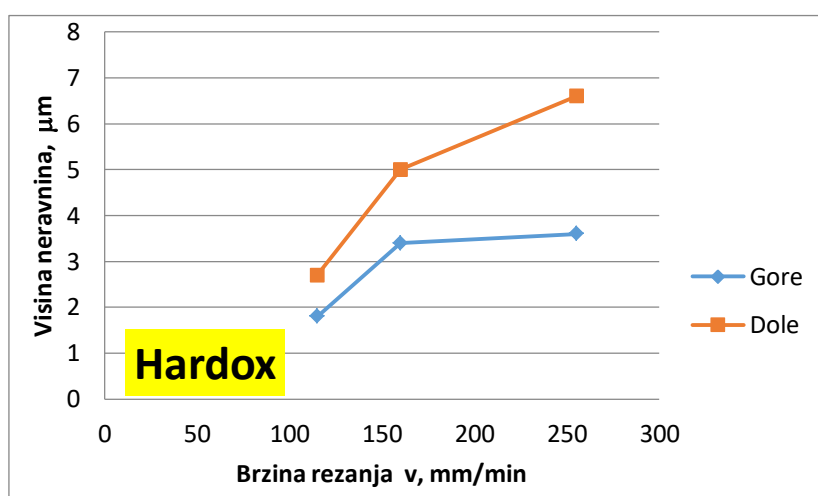
Слика 5.16. Дијаграм зависности ширине реза од брзине резања за Protac 500



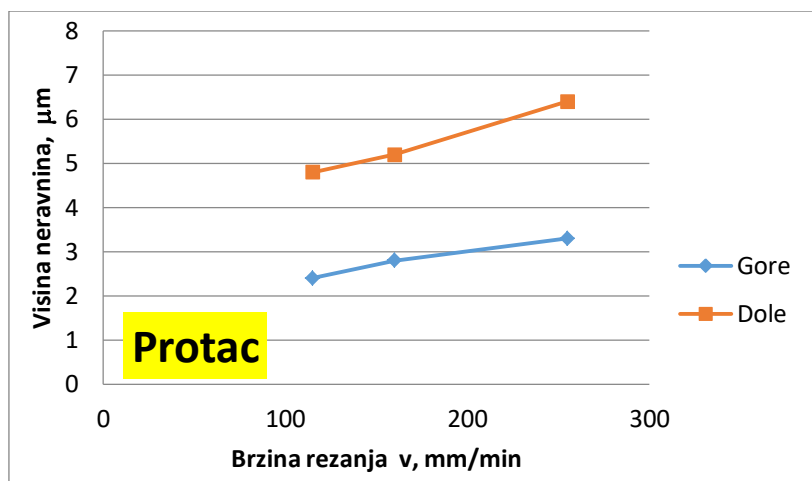
Слика 5.16. Дијаграм зависности ширине реза од брзине резања за Weldox 700



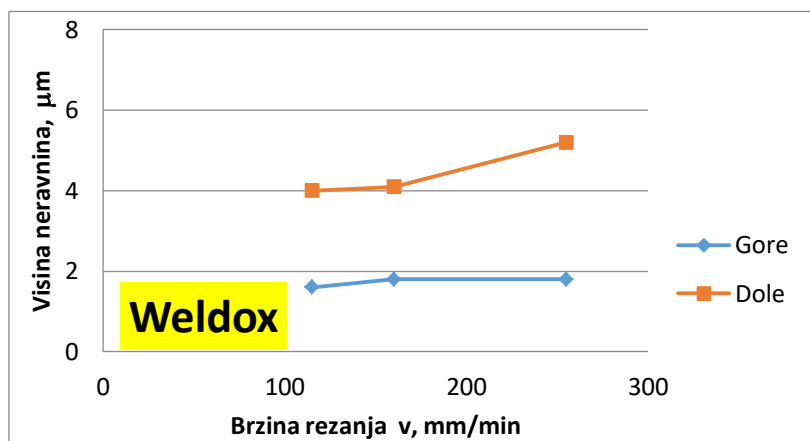
Слика 5.17. Дијаграм зависности висина неравнина горње и доње ширине реза од брзине резања за Č0563



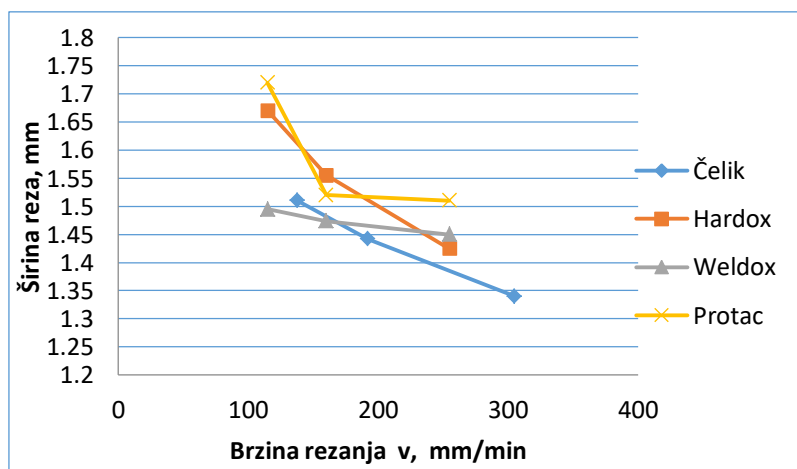
Слика 5.17. Дијаграм зависности висина неравнина горње и доње ширине реза од брзине резања за Hardox 400



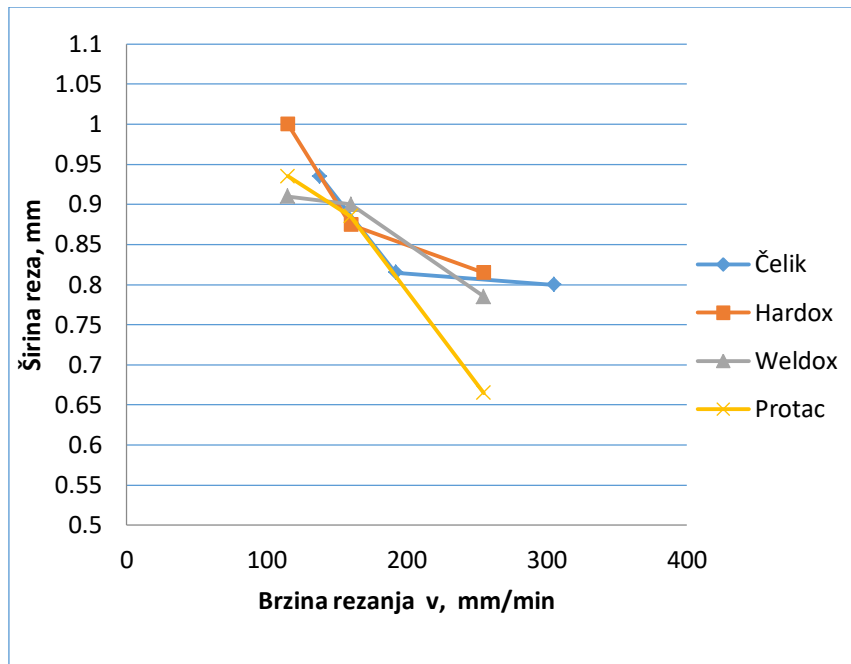
Слика 5.18. Дијаграм зависности висина неравнина горње и доње ширине реза од брзине резања за Protac 500



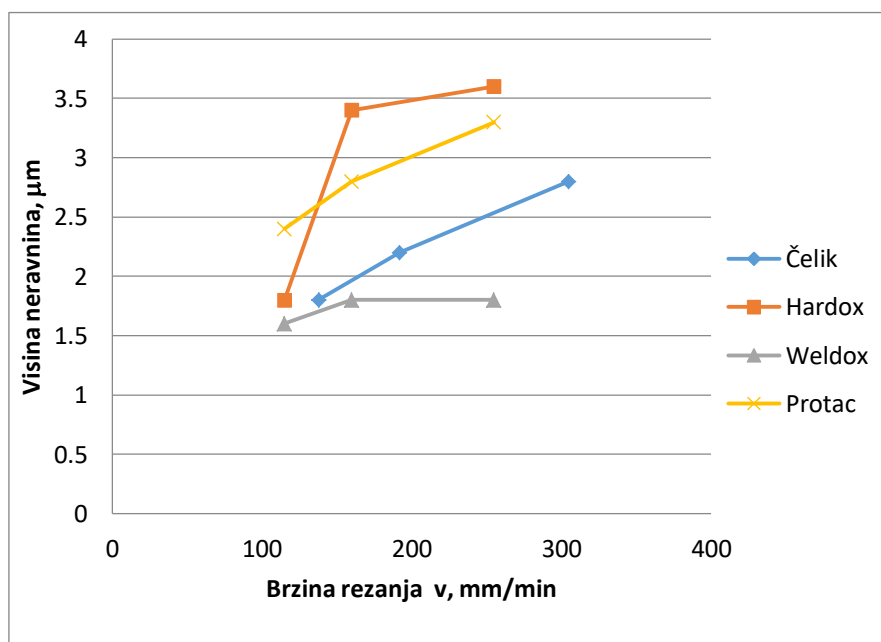
Слика 5.19. Дијаграм зависности висина неравнина горње и доње ширине реза од брзине резања за Weldox 700



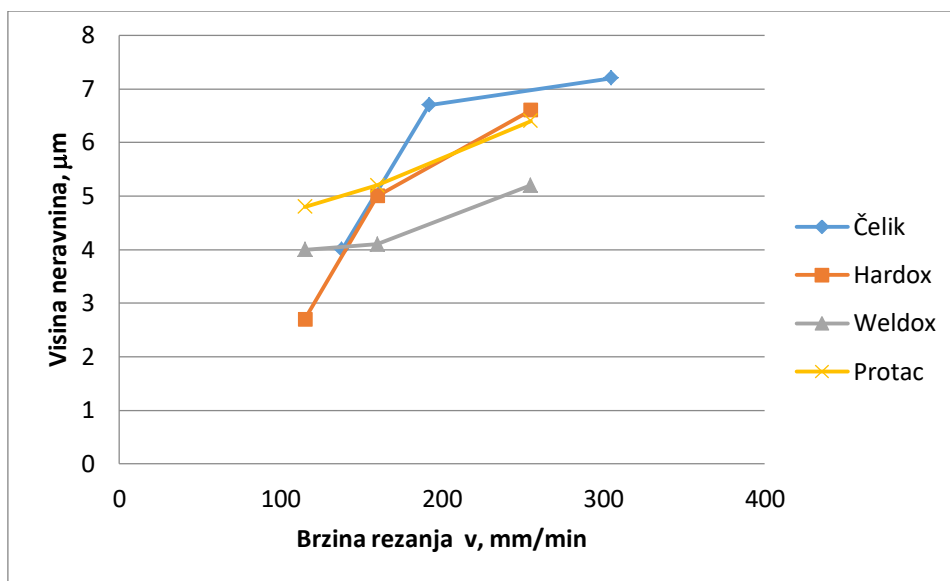
Слика 5.20. Дијаграм зависности доње ширине реза сва четири материјала од брзине резања



Слика 5.21. Дијаграм зависности горње ширине реза сва четири материјала од брзине резања



Слика 5.22. Дијаграм зависности доње висине неравнина сва четири материјала од брзине резања



Слика 5.23. Дијаграм зависности горње висине неравнина сва четири материјала од брзине резања

6. Закључци

Неконвенционални поступци обраде нуде много већи спектар могућности од обликовања метала, најчешће без физичког контакта алата са материјалом који се обрађује. 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 одржавање машина.

Технологија резања материјала воденим абразивним млазом је високопрогресивна и модерна метода и може да се користи при сечењу практично свих до сада познатих материјала. Потпуну револуцију у сечењу материјала је донело сазнање, да је на једном радном месту (при коришћењу погодног манипулационог средства) могуће у великом броју случајева без накнадних завршних операција израдити сложен део (он је раније израђиван на неколико радних места, нпр. На тестери, бушилици..) и то без додатне топлотне обраде нужне за одстрањивање унутрашњих напона насталих при сечењу гориоником.

Поређење поступака обраде воденим абразивним млазом са другим поступцима долази се до интересантних закључака. Сечење материјала плазма поступком има предност у погледу брзине при сечењу дебљих материјала, који се не могу сећи ласером или који се воденим млазом секу спорије.

Према експерименталним истраживањима и извршеним поређењима на материјалима Č0563, Hardox 400, Protac 500, Weldox 700 добијени су различити дијаграми зависности ширине реза (улазне и излазне) и храпавости пошврине на улазној и излазној ширини реза у односу на брзину.

Такође, оно што је врло важно нагласити, да је оваква врста експеримента увод у даља испитивања квалитета реза и квалитета површине, односно веће корекције параметара и поновљивост експеримента довела би што јаснијих резултата.

Као што и са дијаграма видимо највећу улазну ширину реза има Protac 500 при најмањој датој брзини, насупрот томе најмању улазну ширину реза има Č0563 при највећој датој брзини, док када су у питању излазне ширине реза највећа ширина је измерена код Hardox 400, а најмања код Protac 500.

Када је су у питању висине неравнина, материјал различито показао, што је и био циљ експеримента како би се имали увид у што адекватнију примену. Запажа се то да су код сва четири материјала висине неравнине веће на излазној ширини, него на улазној.

Показало се да што је већа брзина резања смањује се ширина реза, а храпавост односно висина неравнина има узлазну вредност.

Литература

1. Недић М., Лазић М.: Производне технологије-обрада метала резањем, предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
2. Баралић Ј., Недић Б., Радовановић М., Јанковић П.: Обрадивост материјала резањем абразивним воденим млазом, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
3. Лазић М., Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
4. Лазаревић, Д., Радовановић, М., Неконвенционалне методе, Машински факултет, Ниш, 1994.
5. Миликић И.: Квалитет обраде ласером, Дипломски рад, машински факултет Крагујевац.
6. „Обрада ласером“, (скрипта за ученике), Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
7. <http://www.cqm.rs/2010/pdf/37/71.pdf>, приступљено 12.08.2019.
8. Радојевић, Н., Мастер рад: Квалитет обраде воденим млазом, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2011.
9. Пантић И.: Примена технологије обраде ласером, Дипломски рад, Машински факултет у Крагујевцу.
10. <https://weldguru.com/laser-beam-welding/>, приступљено 19.09.2019.
11. <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/249-253.pdf>, приступљено 27.09.2019.
12. <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcoursecontents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-37.pdf>, приступљено 01.10.2019.
13. http://www.waterandwastewater.com/www_services/readingroom/dewatering.htm, приступљено 21.09.2019.
14. <https://www.mechanicwiz.com/laser-beam-machining/>, приступљено 20.10.2019.
15. <https://www.slideshare.net/dpksoobs/water-jet-abrasive-water-jet-machining>, приступљено 21.10.2019.
16. <http://hr.au3laser-ap.com/laser-cutting-head/manual-fiber-laser-cutting-head/laser-cutting-head-for-metal.html>, приступљено 20.10.2019.
17. Бојанић А.: Примена ласера за израду делова за војно наоружање, дипломски рад, Крагујевац.
18. Ђурчић С.: Неконвенционални поступци обраде, Технички факултет, Чачак, 2005.
19. <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-an-excimerlaser/>, приступљено 09.11.2019.
20. <http://tribolab.mas.bg.ac.rs/proceedings/2007/249-253.pdf>, приступљено 21.11.2019.
21. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X18300239>, приступљено 20.11.2019.

22. <https://www.zerohedge.com/news/2016-06-27/us-navy-begin-testing-powerful-150-kilowatt-laser-weapon-system>, приступљено 10.11.2019.
23. https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-Hardox-500-steel-in-delivery-state-thickness-8-mm-etched-with-Mi1Fe_fig3_283568934, приступљено 19.11.2019.
24. <https://www.sciencedirect.com>, приступљено 21.11.2019.
25. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-f8a70a65-15c9-3d2c-96f5-9952f2314464>, приступљено 19.11.2019.
26. <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net>, приступљено 21.11.2019.
27. <http://koplas.co.rs/?s=fiber+laser>, приступљено 05.12.2019.
28. http://www.mtladv.com/wp-content/uploads/2016/01/151_HARDOX_400_UK_Data-Sheet.pdf, приступљено 15.12.2019.
29. https://www.researchgate.net/figure/The-microstructure-of-the-steel-Hardox-400-5000x_fig1_272263662, приступљено 15.12.2019.