

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

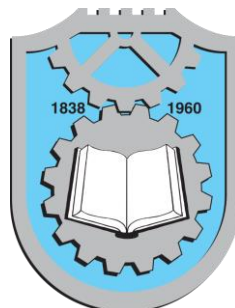
Милош Д. Ивановић

КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ СЕЧЕЊА ПЛАЗМОМ

мастер рад

Крагујевац, 2017.

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: 347/2015

Милош Д. Ивановић

КВАЛИТЕТ ОБРАДЕ СЕЧЕЊА ПЛАЗМОМ

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Богдан Недић, ред. проф. – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о обради плазмом, да изврши теоријску анализу поступака обраде и анализу и систематизацију података о производној опреми. У посебном делу рада потребно је извршити израду узорака у различитим условима и мерења квалитета обраде.

Дипломски рада треба да садржи следеће целине:

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

Препоручена литература:

- [1] Недић М., Лазић М.: Производне технологије-обрада метала резањем, предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
- [2] Лазић М. : Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [3] Миликић Д.: Неконвенционални поступци обраде, уџбеник, Факултет техничких наука Нови Сад, 2002.

Крагујевац, септембар 2017.

Ментор:

Проф.др Богдан Недић, ред. проф.

САДРЖАЈ

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
2. ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ПЛАЗМОМ	5
2.1 Историјски развој обраде метала плазмом.....	5
2.2 Процес настанка плазме.....	6
2.3 Најважније карактеристике плазме	8
2.4 Процес обраде материјала плазмом.....	8
2.5 Постројење за обраду плазмом	10
2.6 Карактеристике реза и фактори који утичу на квалитет обраде плазмом	11
3. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ПОСТУПАКА ОБРАДЕ ПЛАЗМОМ.....	14
3.1 Поступци резања плазмом.....	14
3.1.1 Плазма резање без додатног гаса	15
3.1.2 Плазма резање са додатним гасом	15
3.1.3 Плазма резање са убризганом водом.....	18
3.1.4 Поступак резања плазмом под заштитом воде	19
3.1.5 Поступак резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука	19
3.2 Заваривање плазмом.....	21
3.2.1 Уређаји за заваривање плазмом	21
3.2.2 Поступци заваривања плазмом	22
3.2.3 Додатни материјал за заваривање плазмом	23
3.3 Наношење превлака	23
4. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ОПРЕМЕ ЗА ОБРАДУ СЕЧЕЊА ПЛАЗМОМ.....	25
4.1 Подела уређаја за обраду плазмом	25
4.2 Опрема за обраду сечења плазмом	29
4.2.1 Извор напајања за обраду плазмом.....	29
4.2.2 Извор плазме за резање.....	29
4.2.3 Технички гасови при резању плазмом	31
4.2.4 Пиштољ за плазма резање	32

4.2.5 Систем за вођење и управљање.....	36
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	38
5.1 Стандард EN ISO 9013	38
5.2 План експеримента, опрема и услови.....	39
5.3 Резултати експеримента.....	42
6. ЗАКЉУЧЦИ	48
7. ЛИТЕРАТУРА.....	50
8. ПРИЛОГ	51

РЕЗИМЕ

У раду је описан развој обраде метала плазмом кроз историју као и начин добијања плазма као четвртог агрегатног стања, односно њено формирање на машини. Представљени су и детаљно анализирани најважнији поступци обраде материјала плазмом уз посебан осврт на поступке резања плазмом као најчешће коришћеним поступцима у пракси. Дат је преглед и анализа опреме за обраду сечења плазмом.

Иизвршена су експериментална испитивања, исечени су комади при различитим параметрима, а затим је испитивана храпавост на профилометру.

На крају изведени су закључци и наведена је коришћена литература и дат је прилог који је добијен приликом испитивања храпавости.

Кључне речи: обрада метала, резање, плазма, храпавост, прифилометар

ABSTRACT

In this master thesis describes the development of metal plasma production through the history, as well as the method of obtaining plasma as the fourth aggregate state and its formation on the machine. The most important methods of plasma material processing have been presented and thoroughly analyzed, with a special review of the plasma cutting processes as the most commonly used procedures in practice. A review and analysis of plasma cutting equipment is given.

Experimental tests were carried out, pieces were cut at different parameters, and then the roughness on the profilometer tested.

Finally, the conclusions were presented and the literature used was given and the attachment obtained during the roughness test given.

Key words: metal processing, cutting, plasma, roughness, profilometer

ПРЕДГОВОР

Овај рад представља мастер рад на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. Тема мастер рада је из области сечења плазмом, овај поступак обраде спада у неконвенционалне поступке обраде.

У оквиру првог поглавља направљен је увод у рад са посебним освртом на поделу поступака за обраду метала. Посебно је одрађена детаљна подела неконвенционалних поступака обраде у које спада и обрада сечења плазмом.

У оквиру другог поглавља описан је развој обраде метала плазмом кроз историју као и начин добијања плазма као четвртог агрегатног стања, односно њено формирање на машини.

У оквиру трећег поглавља представљени су и детаљно анализирани најважнији поступци обраде материјала плазмом уз посебан осврт на поступке резања плазмом као најчешће коришћеним поступцима у пракси.

У четвртом поглављу дат је преглед и анализа опреме за обраду сечења плазмом. У овом поглављу извршена је подела уређаја који се користе за обраду материјала плазмом и дата је анализа свих најважнијих компоненти уређаја за обраду плазмом.

У петом поглављу извршена су експериментална испитивања, упознавање са опремом. Наведен је и приказ добијених резултата приликом мерења храпавости.

У шестом поглављу изведени су закључци и на крају наведена је коришћена литература за израду мастер рада и прилог који је добијен приликом испитивања храпавости.

Захваљујем се ментору професору др Богдану Недићу, ред. проф. на сарадњи током израде мастер рада. Захваљујем се и предузећу Амига из Краљева што ми је омогућило извођење практичног дела мастер рада.

У Крагујевцу, октобар 2017. године

Милош Ивановић

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

У оквиру првог поглавља направљен је увод у рад са посебним освртом на поделу поступака за обраду метала. Посебно је одрађена детаљна подела неконвенционалних поступака обраде у које спада и обрада сечења плазмом о којој ће више бити речи у наредним поглављима.

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]

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

Поступци механичке обраде се деле на:

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

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

То су поступци:

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

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

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

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

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

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

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

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

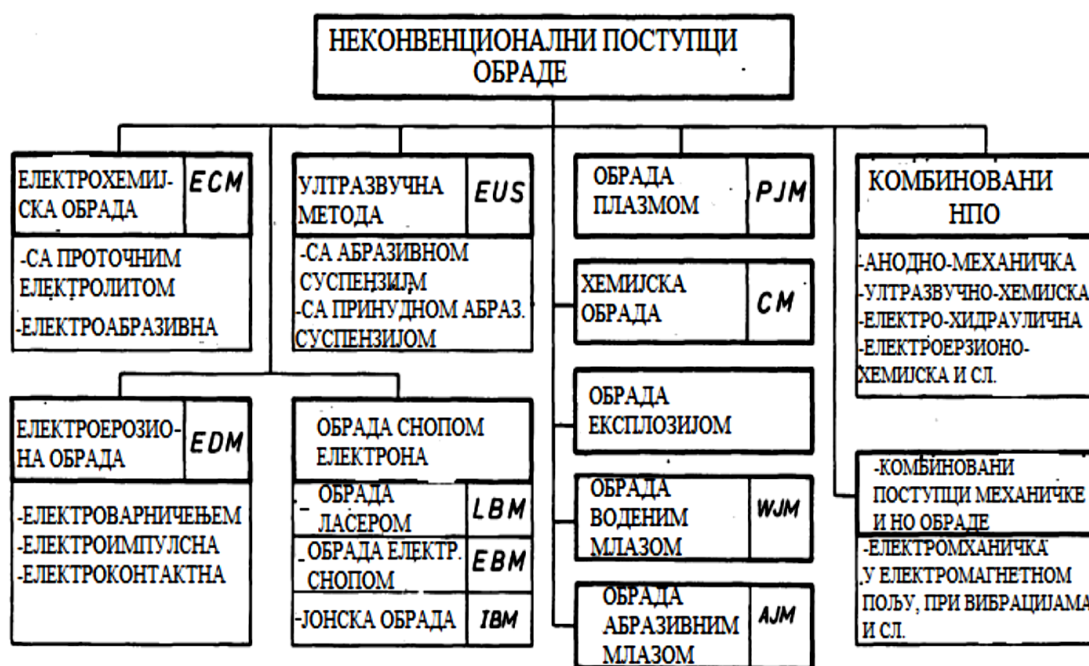
Неконвенционални поступци обраде - НПО су поступци обликовања уклањањем вишка материјала различитим физичко-хемијским механизмима, коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне и других видова енергије. [2]

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

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

- 13) Електрохидрауличне обраде;
- 14) Обраде у елетромагнетном пољу;
- 15) Комбиновани поступци обраде.

Доста сложенија и прецизнија подела неконвенционалних поступака обраде дата је на слици 1.



Слика 1. Једна од подела неконвенционалних поступака обраде [2]

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

Неке од најважнијих предности су следеће:

- Одсуство потребе за постојањем алата веће тврдоће од тврдоће материјала обрадка;
- Могућност обраде изузетно сложених површина;
- Могућност обраде 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. [2]

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

- Релативно мала производност у односу на конвенционалне поступке обраде;
- Висок утрошак енергије по јединици запремине;
- Висока цена машина на којима врши обрада. [2]

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

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

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

2. ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА ПРОЦЕСА ОБРАДЕ ПЛАЗМОМ

У оквиру другог поглавља описан је развој обраде метала плазмом кроз историју као и начин добијања плазма као четвртог агрегатног стања, односно њено формирање на машини. У наставку поглавља представљене су најважније карактеристике плазме уз детаљну анализу обраде сечења материјала плазмом. У последњем делу поглавља описано је постројење за обраду плазмом као и карактеристике реза и фактори који утичу на његов квалитет.

2.1 Историјски развој обраде метала плазмом

Један од најчешће примењиваних и најпоузданијих неконвенционалних поступака обраде метала јесте обрада млазом плазме. (PJM)

Резање плазмом је започело педесетих година прошлог века, да би се од 1957. почео примењивати такозвани суви поступак. Користио је врло скупе мешавине аргона и водоника, које су пролазиле поред волфрамове електроде, и кроз млазницу би се плин сабијао. Волфрамова електрода је била негативна катода, а радни комад је био позитивна анода. Пиштољ за резање се морао поставити што је могуће ближе радном предмету. Недостатак је била појава закошења и заобљења ивица реза, због расипања топлотне енергије на врху лука. Обично су се резали лимови до 50 mm. [6]

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

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

Од 1977. године се развило резање плазмом испод воде, које користи велике снаге са јачином струје изнад 100 А, које је постало врло популарно. Радни комад се потапао под воду на дубину од 50 до 75 mm, па се онда вршило резање. Предност је била у томе што је смањена бука, елиминисано је стварање дима и бљесак електричног лука је значајно смањен. Недостатак је био смањење брзине резања, немогућност оцене квалитета резања по звуку плазме, као и разлагање воде на водоник и кисеоник.

Кисеоник тежи да се спаја с растављеним металом (осим код алуминија и лаких метала), па се стварају метални оксиди. Водоник остаје у води, па се вода мора стално мешати, да не дође до накупљања водоника и малих експлозија у додиру с плазмом.

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

Искључиво се користио за меке челике и нешто је повећао брзине резања. Недостатак је неправилан облик резања и ограничена примена. [6]

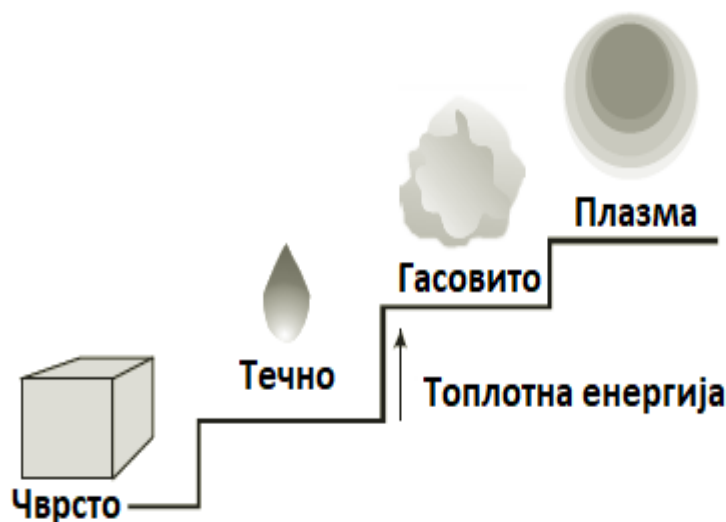
Од деведесетих година па до почетка новог миленијума обрада метала плазмом и неконвенционалним поступцима уопште доживела је велики напредак. Данас, савремене производне услове карактерише све шира примена машина за обраду плазмом.

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

2.2 Процес настанка плазме

Плазма је осим свог примарног назива позната још и под називом четврто агрегатно стање. Променом три основна агрегатна стања неке материје долазимо до њеног гасовитог стања, чијим загревањем добијамо јонизовани гас односно плазму.

Овај процес настанка плазме дат је на слици 2.

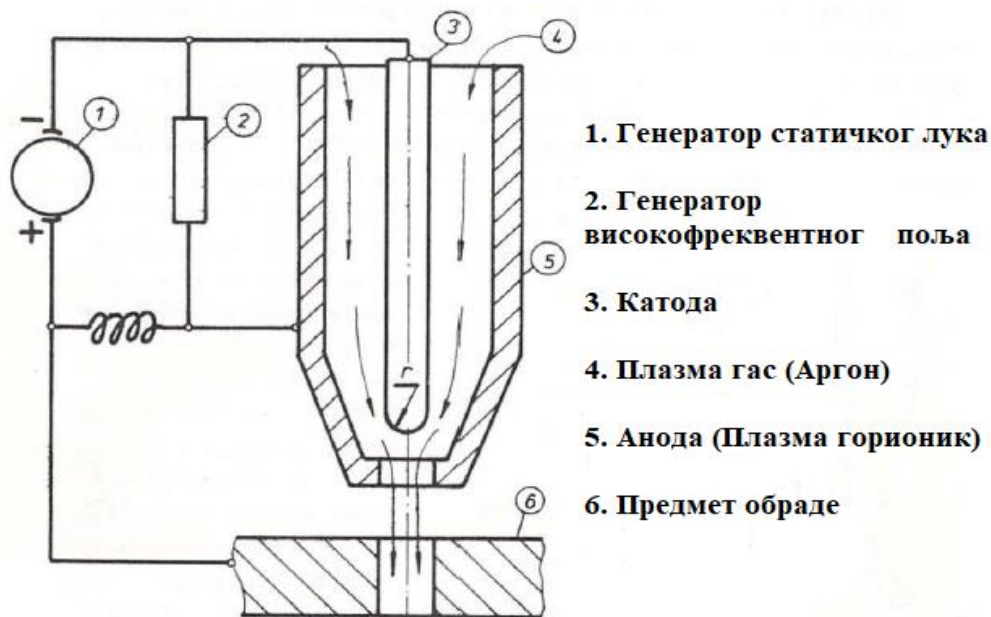


Слика 2. Настанак плазме кроз промену агрегатних стања материје [7]

Плазма се састоји од позитивно и негативно наелектрисаних честица, тачније од јона и анјона. Пропуштањем плазма гасова, најчешће радних гасова као што су аргон, водоник, кисеоник и сличних гасова, преко електричног лука створеног између аноде и катоде, формира се буктиња односно плазма.

Тако формирана супстанца или материја, садржи молекуле, атоме, јоне, електроне и кванте светлости. У једном центиметру кубном плазме налази се око $10^9 - 10^{10}$ наелектрисаних честица. [2]

Шематски приказ процеса формирања плазме дат је на слици 3.

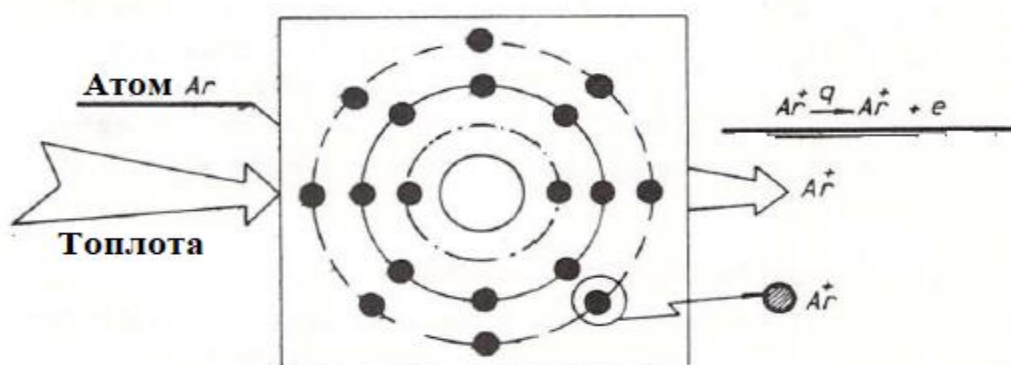


Слика 3. Шематски приказ процеса формирања плазме [2]

Како се плазма састоји од позитивно и негативно наелектрисаних честица (јона), други назив за плазму је јонизовани гас. Материја у овом стању, које се често назива и четвртим агрегатним стањем, не понаша се по законима нормалних гасова, па о томе треба водити рачуна код примене ове врсте обраде.

Јонизација је резултат губитка једног или више електрона из спољашње љуске атома плазма гасова. Губитак настаје као резултат дејства спољашњих сила изазваних високом температуром или јаким електричним пољем. То значи да плазма може бити лучна (термичка) или високо-фреквентна. За процес прераде метала посебно је значајна лучна плазма. [2]

На слици 4 дат је приказ процеса јонизације аргона (Ar) као плазма гаса.



Слика 4. Процес јонизације аргона (Ar) као плазма гаса [2]

У процесу формирања плазма лука уочава се неколико карактеристичних појава. Услед високог степена загревања катодe долази до емисије електрона и јонизације плазма гаса. Тиме се стварају, између електрода, честице јона и електрона различитих наелектрисања. Усмереним кретањем долази до судара (међусобних и са неутралним атомима и молекулима) и повећања степена јонизације.

2.3 Најважније карактеристике плазме

Плазма има велики број важних карактеристика а три најважније су следеће:

1) Једна од најважнијих карактеристика јесте брзина истицања. Брзина кретања јонизованих честица у струји плазме зависи од јачине електричне струје, густине плазма гаса и полупречника активне површине катоде и може достићи веома велику вредност, чак и до 1500 m/s. Ова карактеристика се може одредити преко следећег обрасца:

$$v = \frac{0,8 I \sqrt{\rho}}{r}$$

При чему је:

I- Јачина електричне струје (А);

ρ - Густина гаса (cm^3);

r- Полупречник активне густине електроде (cm).

2) Електропроводљивост плазме је такође једна важна њена карактеристика јер омогућава управљање током плазме помоћу магнетних или електромагнетних поља, што је веома битно код одређених примена плазме.

3) Температура лука плазме је његова најважнија карактеристика. Она је веома неуједначена, тако да постоји више температурских зона. Неуједначеност температура у луку плазме је неповољно, с обзиром да битно утиче на тачност и квалитет обраде. Због тога се и садашњем тренутку, обрада плазмом и не користи у производним операцијама и којима се захтева висока тачност мера и квалитет обрађене површине. [2]

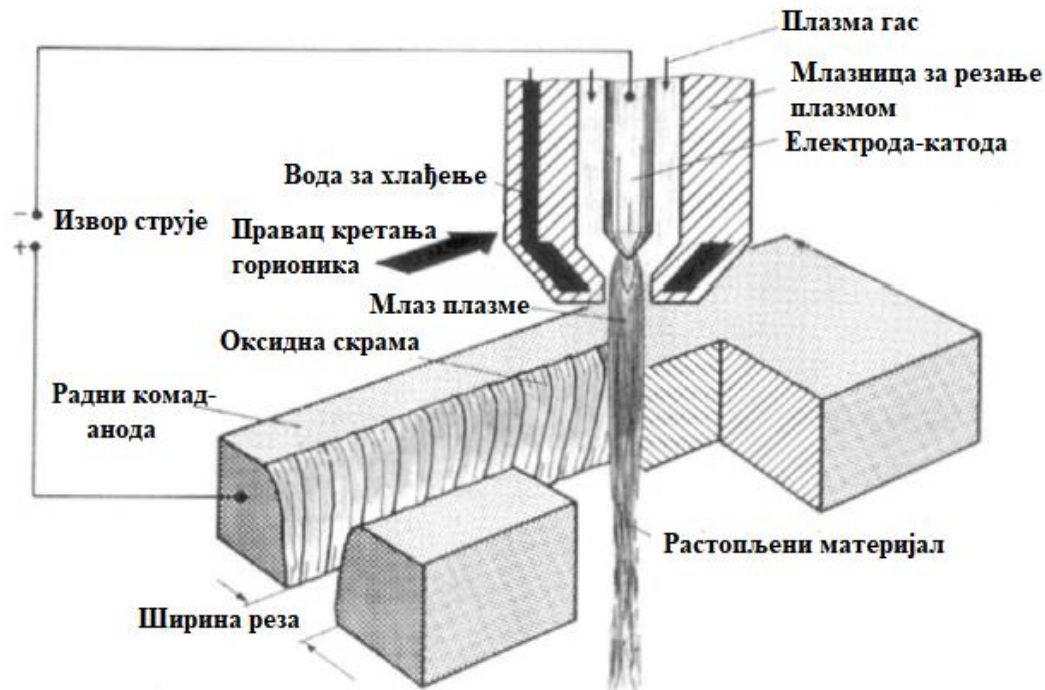
2.4 Процес обраде материјала плазмом

Процес обраде материјала базира на високој топлотној и кинетичкој енергији лука плазме. Деловањем ове две енергије при удару млаза плазме о површину обратка долази до развоја врло високих температура које изазивају интензивно растапање, а делимично и испаравање материјала обратка.

Растопљени материјал се уклања експлозивним деловањем унутрашњих хидродинамичких сила, као и јаком струјом гаса плазме. Температуре на месту обраде достижу вредности од 4000 до 16000 степени целзијуса па и знатно више од тога, што је сасвим довољно за тренутно растапање и најтврђих металних и неметалних материјала.

Под дејством високих температура Плазма долази до топљења, а често и до испаравања материјала. Уклањањем растопљеног метала створени су услови за извођење одговарајућих операција. [2]

На следећој слици 5 приказан је поступак обраде материјала плазмом са најважнијим елементима.



Слика 5. Поступак обраде материјала плазмом [8]

Обрада плазмом користи се и за реализацију операција које захтевају високу концентрацију топлотне енергије.

Ова обрада се најчешће користи за процесе:

- Заваривања;
- Топљења;
- Резања метала и неметала;
- Наношење тврдих превлака на металне и неметалне површине;
- Ливење;

Поступак обраде метала плазмом не користи се у производним операцијама у којима се захтева висока тачност мера и квалитет обрађене површине. Плазмом се могу сећи било који материјал велике дебљине, уз формирање реза било које конфигурације и уз високу производност која не зависи од механичких особина материјала, могуће је сећи материјал дебљине 250 - 300 mm. [8]

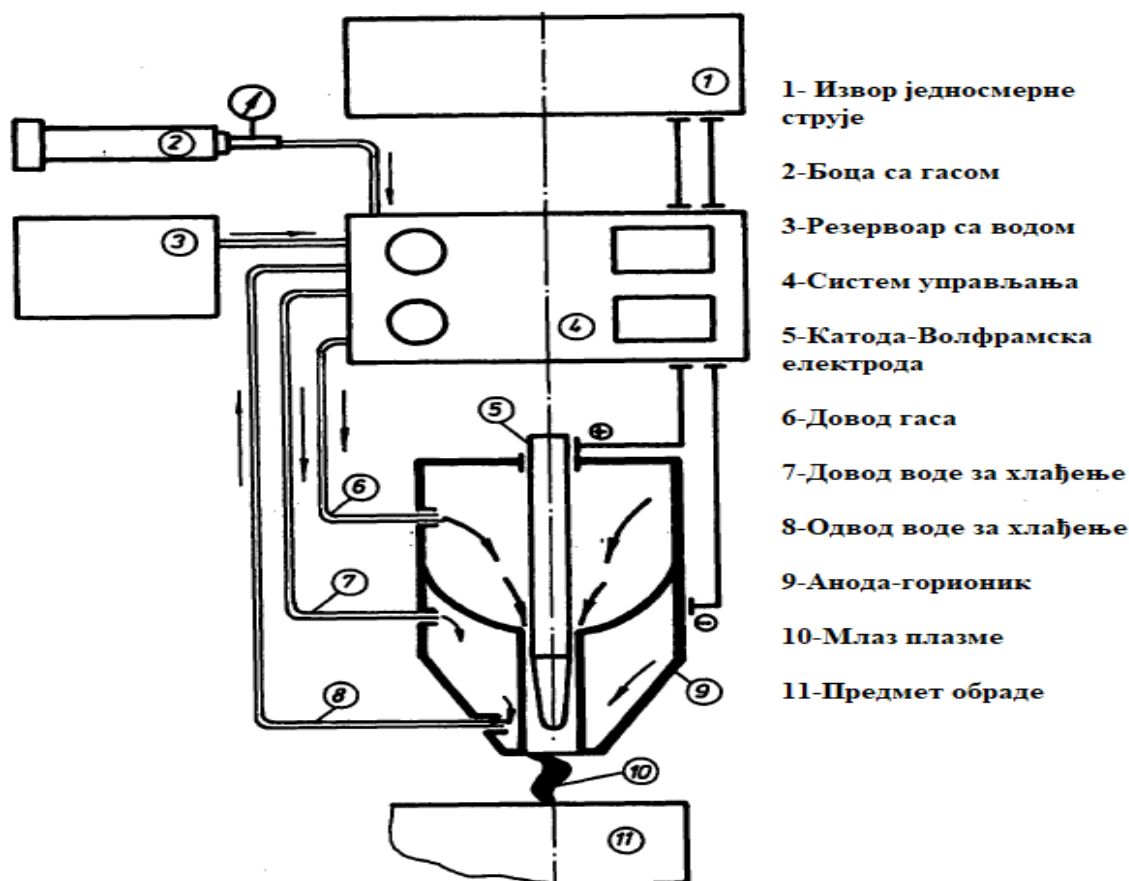
Плазма поступак обраде материјала карактерише:

- Могућност топљења и испаравања материјала без обзира на врсту и механичке карактеристике;
- Могућност велике концентрације топлотне енергије у мало запремини материјала;
- Могућност формирања струје плазме веома малог пречника;
- Могућност управљања струјом плазме магнетним и електромагнетним или електричним пољем;
- Низ других параметара који уз даље усавршавање методологије и технологије плазма поступка, могу довести до његове знатно шире примене у индустрији. [2]

2.5 Постројење за обраду плазмом

За правилно одвијање процеса обраде и постизање одговарајућих техноекономских ефеката обраде, инсталација треба да садржи низ елемената, од којих су најзначајнији: извор напајања, систем довођења плазма гасова, систем довођења течности за хлађење најчешће је то вода, конструктивно решење (облик и карактеристике) плазма горионика и систем контроле одвијања процеса обраде и управљања. [2]

Шематски приказ једне овакве инсталације приказан је на слици 6.

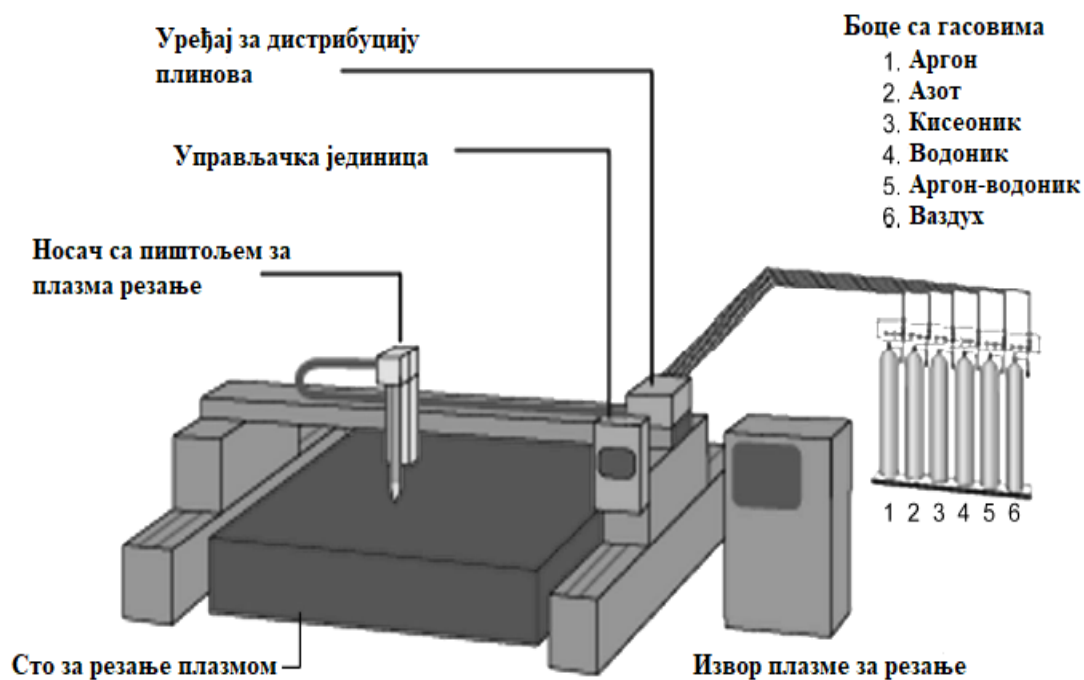


Слика 6. Шематски приказ инсталације за плазма поступак обраде [2]

Циљ комплетног система за плазма резање је јефтино резање и израда радних комада и то у што краћем времену са што бољим квалитетом резања. Исто тако, уравнотежење трошкова, квалитет резања и брзина машине може постати тешко када се пројектује или побољшава учинковитост система за резање.

Због тога је јако битно да свако ко управља системом за плазма резање буде у потпуности свестан његове функционалности и мора бити обучен за његово коришћење и одржавање. Разумевањем и оптимизацијом својстава сваке компоненте машина за резање, јако брзо се може створити висококвалитетан производ са релативно малим трошковима резања. [3]

На следећој слици 7 приказано је постројење са опремом које се користи у пракси за обраду метала плазмом.



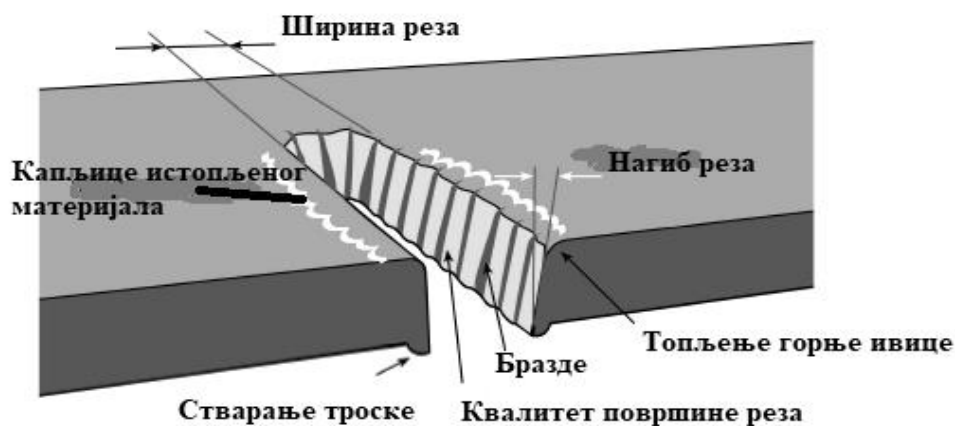
Слика 7. Састав постројења за обраду плазмом [3]

Опширнија анализа опреме за обраду плазмом дата је у четвртном поглављу овог рада.

2.6 Карактеристике реза и фактори који утичу на квалитет обраде плазмом

Неодговарајући квалитет реза захтева накнадну обраду и повећава трошкове производње. Зато је од одлучујуће важности познавање деловања утицајних фактора на квалитет резања.

Слика 8 приказује изглед реза код плазма обраде са свим важним карактеристикама.



Слика 8. Изглед реза код плазма обраде са свим важним карактеристикама [6]

Основно својство реза је његова ширина, односно количина метала која је уклоњена млазом плазме. По правилу ширина реза је 1 до 2 пута већа од пречника отвора млазнице. Фактори који утичу на ширину реза у односу на величину млазнице јесу брзина резања, јачина струје резања и удаљеност млазнице од радног комада

Друго важно својство квалитета реза је нагиб реза (угао површине реза). Ако је површина реза од горње до доње површине радног материјала тачно под углом од 90° , тада је угао површине реза једнак нули. Код коришћења вртложних гасова као заштите при резању, нагиб реза на горњој страни материјала износи од 1 до 3° , а 3 до 8° на доњој страни радног материјала. Код ламинарног струјања заштитних гасова, нагиб на обе стране радног материјала износи од 4 до 8° . Удаљеност млазнице може знатно утицати на нагиб реза, мања удаљеност значи и мањи нагиб реза. Исто тако смањивањем брзине резања може се такође смањити нагиб реза. [6]

Закривљеност горње ивице реза зависи од дебљине материјала као и од самог избора поступка плазма резања и заштитног гаса. До закривљености долази зато што плазмени млаз има највишу температуру на месту излаза из млазнице односно на горњој страни радног материјала. Закривљеност се највише појављује код плазма резања тањих материјала. Применом заштитне атмосфере (гас, вода) закривљеност се може свести на минимум.

Троска углавном настаје на дну реза, а зависи од брзине резања, струје резања као и од врсте и дебљине материјала. И превелика и премала брзина резања могу узроковати настајање треске, а тиме и додатне трошкове уклањања, због чега је нужно наместити оптималне параметре резања. Исто тако, уз сам врх реза може доћи до накупљања мање количине истопљених капљица које се разливају и које настају као последица мале брзине резања, превеликог размака млазнице од радног материјала или истрошености млазнице.

Зона утицаја топлоте (ЗУТ) при плазма резању је подручје око површине реза које је процесом резања дошло под утицај топлоте. ЗУТ при плазма процесима резања је релативно узак, најпре због уског фокуса плазменог млаза и брзине самог процеса. Применом плазма резања под водом ЗУТ се смањује. [6]

Најважнији параметри процеса који највише утичу на квалитет при резању плазмом су:

- Јачина струје;
- Притисак гаса;
- Брзина резања;
- Истрошеност катоде;
- Истрошеност млазнице.

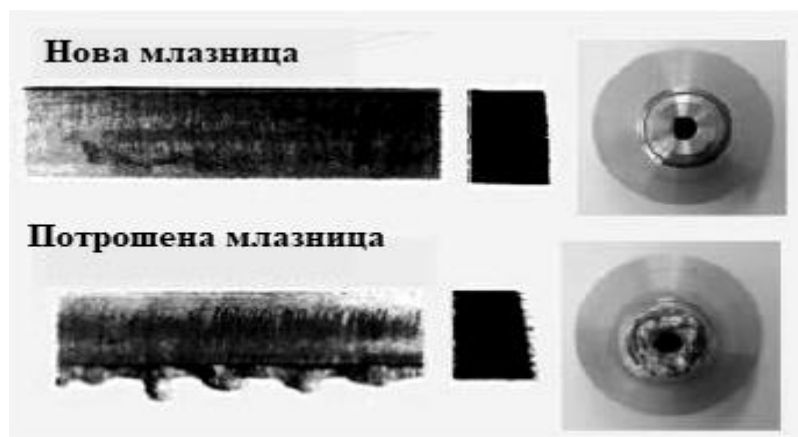
Јачина струје зависи од материјала који се реже као и од величине млазнице. Како би се повећала продуктивност и брзина резања користи се највећа млазница као и највећа струја коју систем вођења млазнице дозвољава. Како би се оптимизовао квалитет реза потребно је резати мањим брзинама, с мањом млазницом и мањом јачином струје што као резултат даје равнији и квалитетнији рез. Величина млазнице зависи од јачине струје резања. Пречник млазнице од 1.5 mm ће подносити струју од 100 A , док ће млазница пречника од 6 mm моћи подносити струју од 1000 A .

Јачина струје треба бити таква да се остварује 95% излазне снаге на млазници. Мања излазна снага, односно мања јачина струје од оне за коју је млазница предвиђена имаће као последицу мању енергију плазменог млаза, нефокусирани млаз као и прљав рез. Са друге стране превелика излазна снага, односно јачина струје имаће за последицу слабији лук и грубљу површину реза.

Брзина резања која је премала или превелика узрок је лошег квалитета реза. Код резања различитих материјала постоје оптимални услови који ће осигурати раван и чист рез без стварања троске. Ако је брзина резања превелика лук ће заостајати и осциловати што ће узроковати степеначасте бразде у облику слова С, велики нагиб реза као и настајање троске на доњој страни реза. Троску која настаје као производ превелике брзине реза је тешко уклонити па се захтева накнадно брушење. Ако је брзина превелика може доћи и до тога да плазма не прође кроз кроз материјал. Ако је брзина резања премала, ширина реза ће бити већа, а растаљени материјал неће бити издуван плином него ће се накупљати на дну реза као троска коју је лако уклонити за разлику од троске која настаје код превелике брзине резања.

Најбољи начин процене брзине резања је посматрати лук који би требао бити вертикалан у односу на радни материјал, односно нагиб лука на излазној ивици би требало да буде нула. Познајући брзину резања за одређене дебљине и врсте материјала може се лако одредити капацитет производње, који је најчешће изражен у метрима реза по сату.

Истрошеност млазнице има највећи утицај на вертикалност реза и толеранцију нагиба као и на појаву троске по резној ивици. Слика 9. приказује утицај стања потрошености млазнице на стање резне површине и појаву троске са наличја реза. На другом је месту истрошеност катоде. У разматрању интеракција између параметара може се закључити највећи утицај брзине резања и јачине струје на правоугаоност реза као и његову ширину. [6]



Слика 9. Утицај стања потрошености млазнице на квалитет и стање резне површине [8]

3. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ПОСТУПАКА ОБРАДЕ ПЛАЗМОМ

У оквиру трећег поглавља представљени су и детаљно анализирани најважнији поступци обраде материјала плазмом уз посебан осврт на поступке резања плазмом као најчешће коришћеним поступцима у пракси.

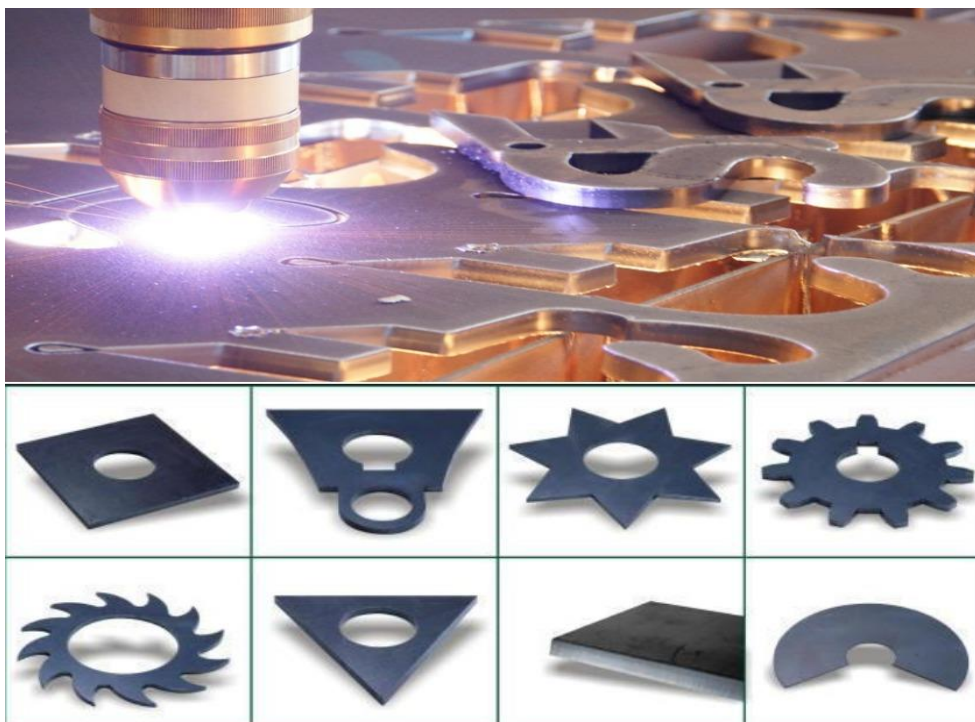
Обрада материјала плазмом може се вршити на више различитих начина у зависности од онога што желимо да добијемо као крајњи производ. У претходном поглављу овог рада поменуто је да се плазма најчешће користи за поступке обраде као што су обрада резањем уз помоћ плазме, заваривање плазмом и за наношење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

3.1 Поступци резања плазмом

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

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

На следећој слици 10 дат је приказ резања плазмом као и делови који се добијају овим поступком обраде.



Слика 10. Поступак сечења плазмом и производи добијени овим поступком [6]

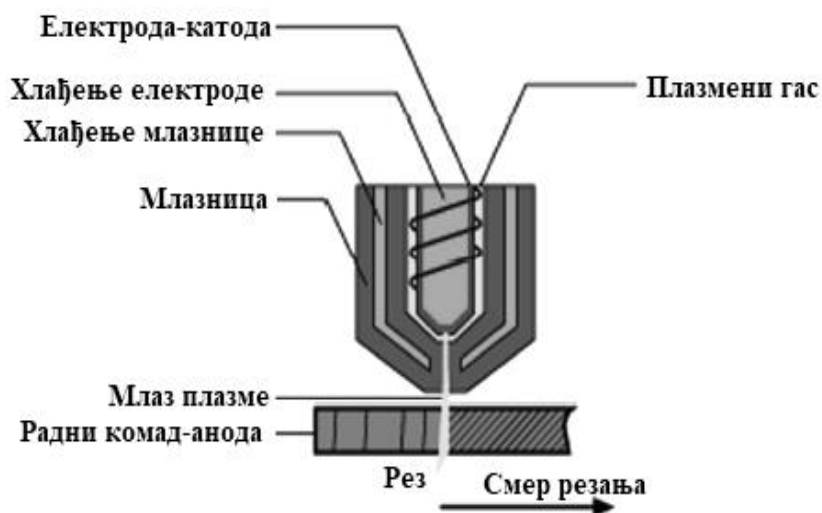
3.1.1 Плазма резање без додатног гаса

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

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

Слика 11 приказује стандардни поступак плазма резања. За ову варијанту плазма резања постоје многобројни случајеви примене са CNC управљаним системима за вођење плазма пиштоља, нпр. код производње панела у бродоградњи, где је резање плазмом непосредна припрема за заваривање, затим код завршне обраде и паковања лимова у челичанама као и код роботизованог резања цеви, I – профила и плоснатих профила са избочинама. [5]

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



Слика 11. Поступак обраде плазмом без додатног гаса-стандардни поступак обраде [6]

3.1.2 Плазма резање са додатним гасом

Употреба плазма пиштоља са секундарним гасом, има предност код:

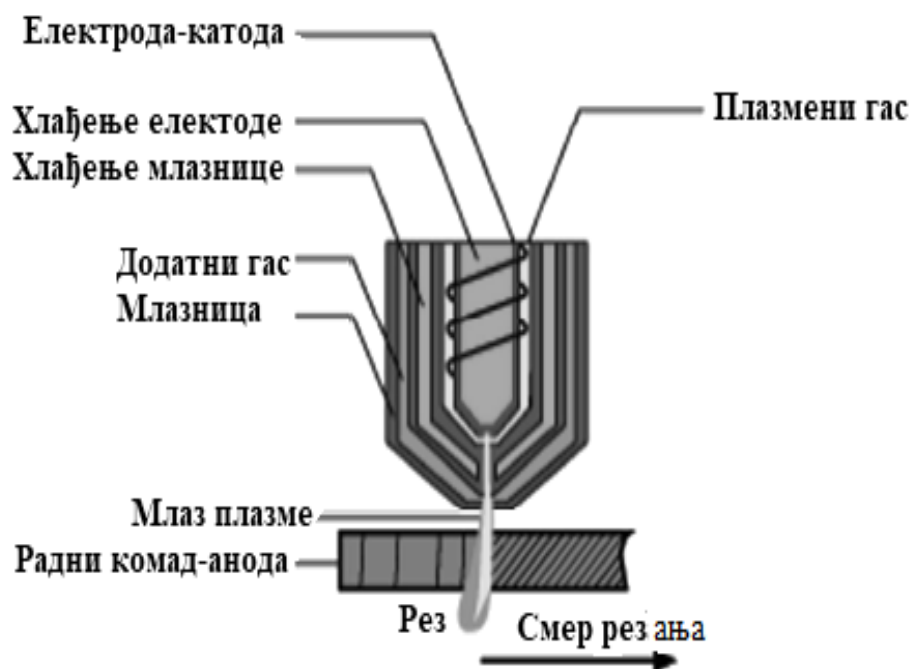
- 1) Производње мањих делова;
- 2) Честог бушења, односно започињања резања;
- 3) Потребног високог квалитета реза, посебно код Cr-Ni челика и код алуминијума;
- 4) Резања решетака, односно резова с прекидима;

5) Подводног резања плазмом.

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

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

Резање плазмом са секундарним односно додатним гасом приказано је на следећој слици 12.



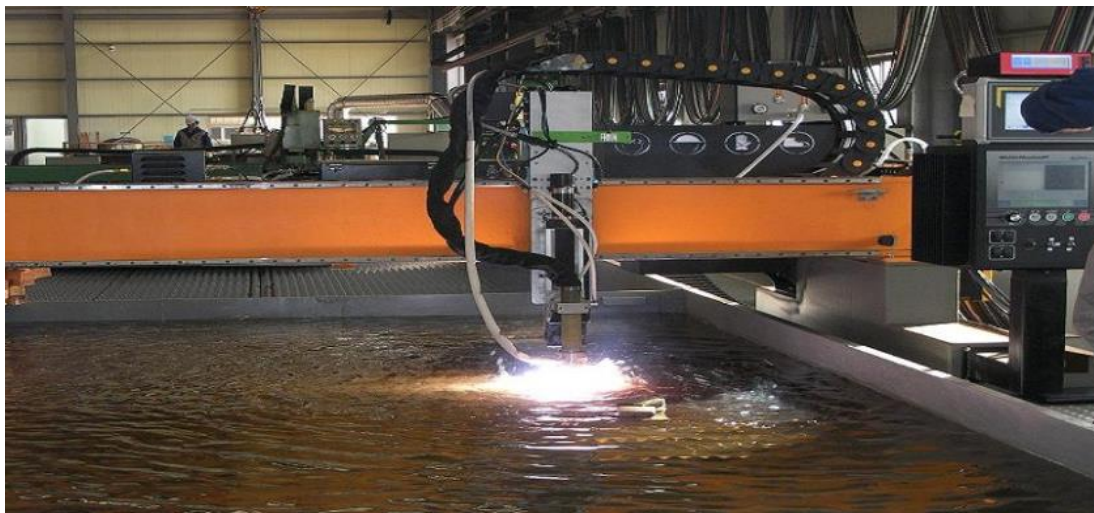
Слика 12. Плазма резање са секундарним гасом [6]

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

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

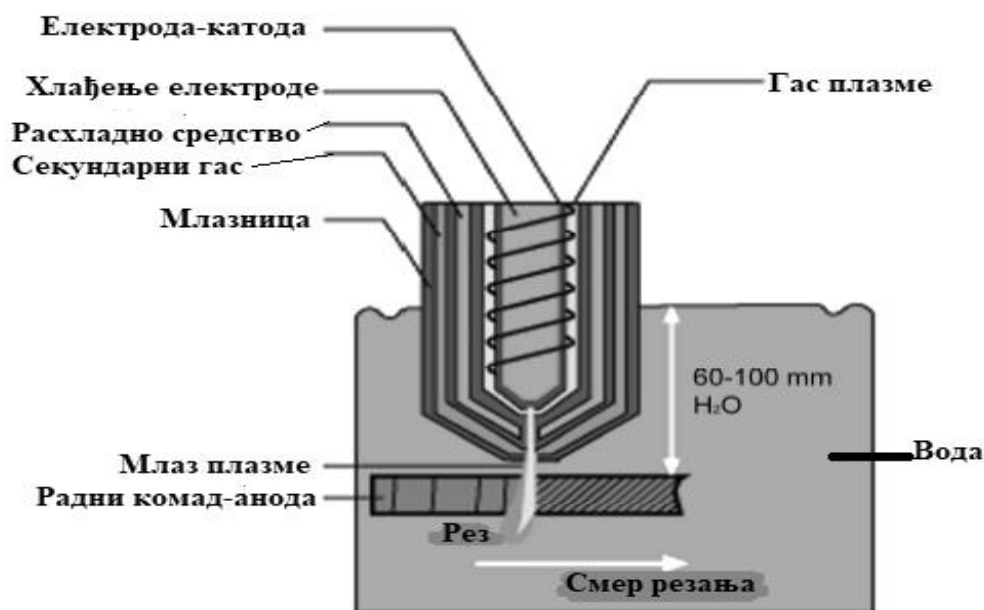
На слици 13 приказано је резање плазмом у води.

Док са друге стране слика 14 приказује шему плазма резања са секундарним гасом у води. У односу на суво резање плазмом, код приказаног подводног резања је у великој мери редукована бука као и појава штетне прашине, а ултраљубичасто зрачење лука се додатно пречишћава, односно филтрира у води што је једна од великих предности овог поступка обраде.



Слика 13. Плазма резање у води [6]

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



Слика 14. Плазма резање са додатним гасом у води [6]

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

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

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

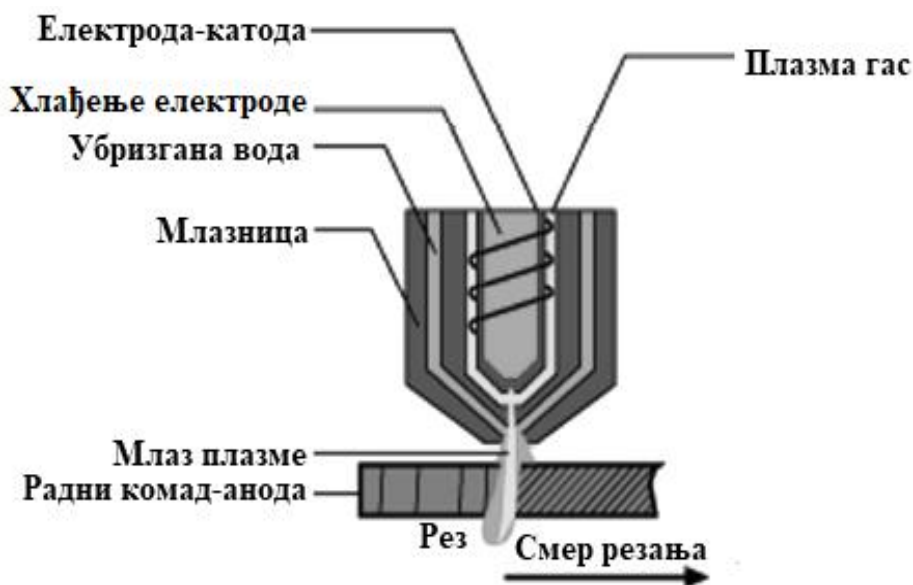
Како би се избегли додатни трошкови чишћења столова и заустављања производње, данас су развијени водени столови који имају могућност самочишћења што представља практично и економично решење за кориснике.

3.1.3 Плазма резање са убризганом водом

На слици 15 приказује се плазма резање са убризганом водом. Овај поступак резања користи само један гас за плазму, а воду убризгава радијално или вртложно директно у лук чиме се постиже сужавање лука и повећање густине плазменог лука.

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

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



Слика 15. Поступак плазма резања са убризганом водом [6]

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

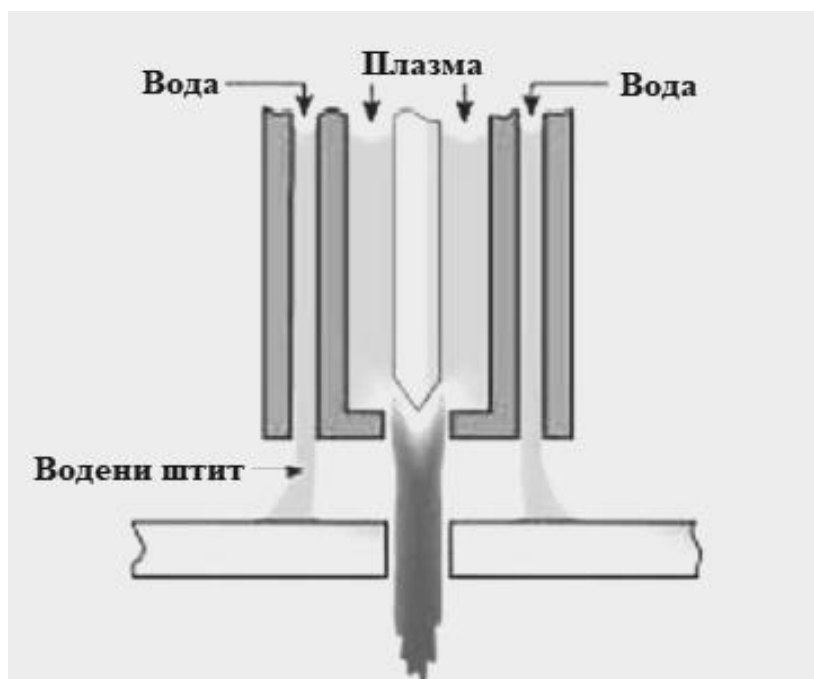
Поред азота, за плазмени гас може се користити и ваздух што чини поступак значајно јефтинијим. Физички, азот је најповољнији за коришћење због своје способности преноса топлоте из електричног лука на радни комад. Упркос високим температурама на месту где се вода убризгава у електрични лук, мање од 10 % воде испарава. [5]

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

3.1.4 Поступак резања плазмом под заштитом воде

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

Слика 16 приказује плазма резање под заштитом воде.



Слика 16. Поступак резања плазмом под заштитом воде [6]

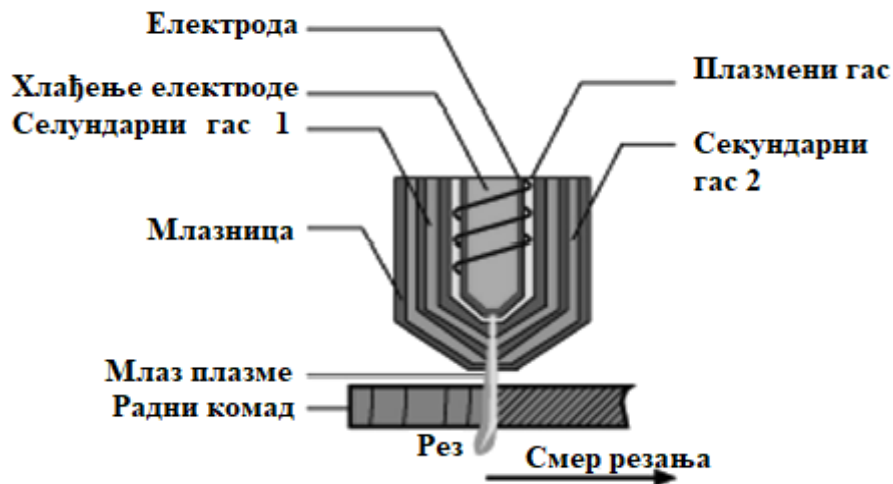
3.1.5 Поступак резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука

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

Побољшан квалитет реза је резултат тога што се користе технологије које имају повећано сужавања лука, односно повећања густине енергије електричног лука, док су на пример мање брзине резања потребне како би се остварили прецизнији помаци код резања.

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

Слика 17 приказује поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука.



Слика 17. Поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука-прецизно плазма резање [6]

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

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

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

Подручје употребе HiFocus плазма уређаја је вишеструко:

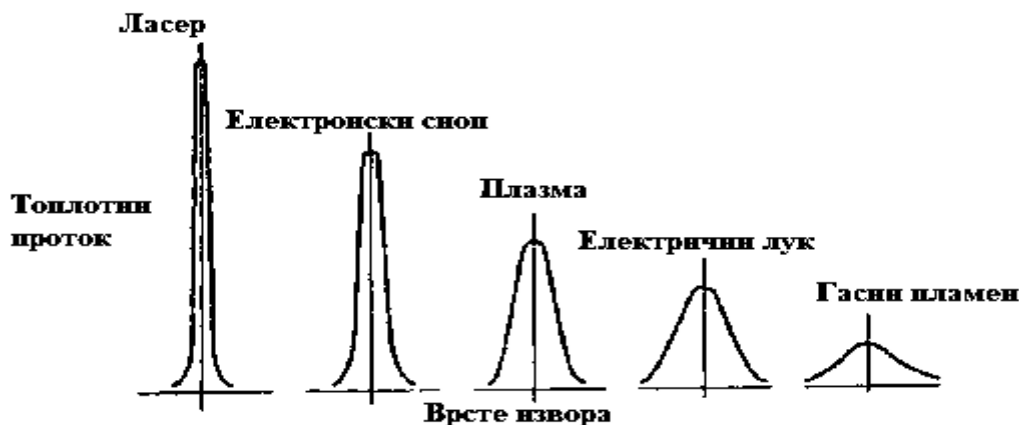
- 1) Са технологијом „HiFocus – Quality“ постиже се квалитет реза упоредив са ласером, код резања конструкционих челика и алуминијумских легура дебљине од 1 до 8 mm; струја резања 20 до 50 A.
- 2) Са технологијом „HiFocus – Speed“ постиже се већа продуктивност код резања конструкционих челика дебљине 4 – 10 mm, али је тада одступање реза од правог угла минимално повећано; струја резања 50 – 100 A.
- 3) FineFocus технологија користи се са струјама 40 – 130 A, како за резање конструкционих челика тако и за резање Cr-Ni челика и алуминијумских легура, за лимове дебљине од 6 до 25 mm. [5]

3.2 Заваривање плазмом

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

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

На слици 18. дат је приказ плазменог луку односу на друге изворе.



Слика 18. Концентрација заваривачких извора топлоте [4]

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

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

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

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

3.2.1 Уређаји за заваривање плазмом

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

Независан лук се успоставља између електроде и унутрашњости млазнице док се топлота основном материјалу предаје струјањем загрејане плазме.

Плазма струји кроз конични отвор на дну млазнице. Овај лук се примењује у случајевима када се при заваривању тражи мала концентрација топлоте посебно код обраде материјала као што је керамика. (Слика 19.) [4]

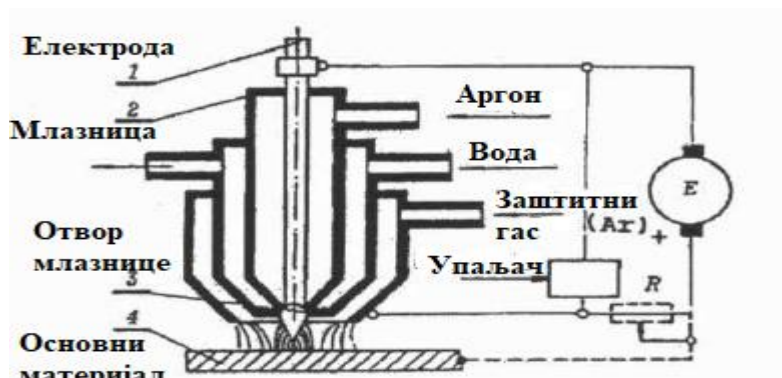
С друге стране зависан лук се успоставља између електроде и основног материјала. Он се успоставља између позитивног пола на основном материјалу и негативног пола на волфрамској електроди. (Слика 19.) [4]

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

3.2.2 Поступци заваривања плазмом

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

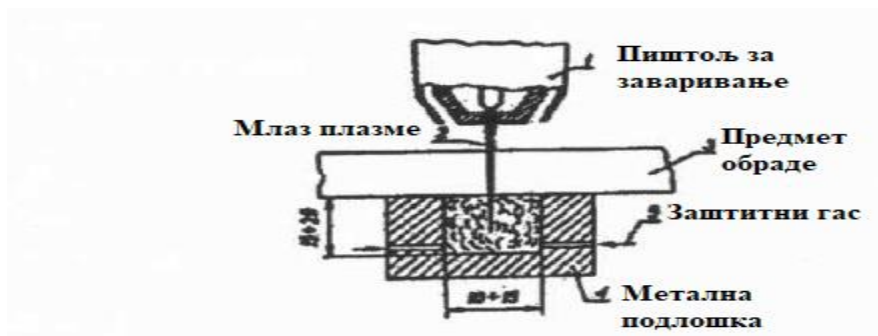
Плазма поступак заваривања се примењује за спајање лимова дебљине веће од 1,5 mm при чему јачина струје прелази 20 А. Шема овог поступка дата је на слици 19.



Слика 19. Заваривање плазмом [4]

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

На слици 20. приказано је заваривање микроплазмом које даје узак шав и готово невидљивом зоном под утицајем топлоте и малим сопственим напонима и деформацијама.



Слика 20. Микроплазмено заваривање [4]

3.2.3 Додатни материјал за заваривање плазмом

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

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

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

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

3.3 Наношење превлака

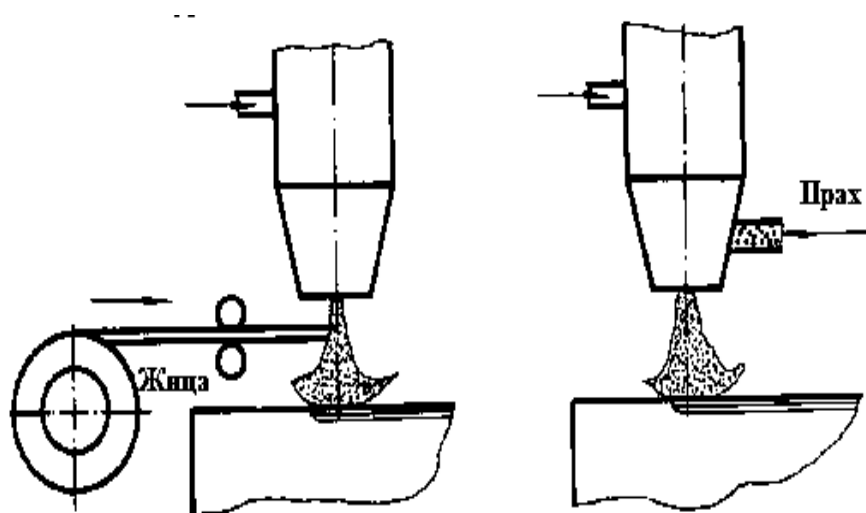
Плазма поступак је веома перспективан поступак повећања отпорности на хабање елемената машина и алата. То из разлога што обезбеђује наношење превлака ниске порозности, високе тврдоће и превлака чврсто везаних за основни материјал. При наношењу превлака додатни материјал се, у виду праха, доводи у специјално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

Прах односно материјал се, у струји плазме, претвара у течност и пада у виду капљице на основни материјал, разлива се по њему и формира превлаку одговарајућих карактеристика. Честице материјала превлаке се, у струји плазме, топе и не разлажу нити испаравају. [2]

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

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

Следећа слика 21 нам приказује шему поступка наношења превлака помоћу плазме са жицом односно са додавањем праха као додатним материјалом за овај поступак.



Слика 21. Шема наношења превлака плазма поступком [2]

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

4. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗА ОПРЕМЕ ЗА ОБРАДУ СЕЧЕЊА ПЛАЗМОМ

У овом поглављу извршена је подела уређаја који се користе за обраду материјала плазмом и дата је анализа свих најважнијих компоненти уређаја за обраду плазмом.

Операције резања плазмом изводе се на свим материјалима, а нарочито на нерђујућим челицима, лаким легурама, бакру, и бакарним легурама. Добијене дебљине обратка крећу се од 0,5 до 160 mm, а за вертикално резање до 30 mm. Брзине резања могу бити 200-2 000 mm/min. Наравно, при томе се мењају карактеристике и називна снага уређаја (70w/100kw), и јачина струје 20/1000 А. Плазмени лук формира се према материјалу, и на њега преноси велику количину топлоте. Услед снажне локалне фузије долази до топљења и испаревања метала који се кинетичком енергијом гаса односи из зоне обраде.

Плазма технологија широко је примењива у разним областима: индустрији, репарацији, истраживању, развоју, и разним научним гранама, а од посебног значаја у:

- Авио индустрији;
- Аутомобилској индустрији;
- Бродоградњи;
- Индустрији пољопривредних машина;
- Процесној техници (пумпе, пеуматика, хидраулика);
- Општој машинској индустрији;
- Картонажи, папирној и штампарској индустрији;
- Хемијској индустрији;
- Индустрији стакла.

4.1 Подела уређаја за обраду плазмом

Из специфичности захтева произилази различитост конструкционих решења, могућности, производности, и аутоматизованости плазма уређаја.

Према карактеру производње (појединачна или серијска) и карактеру обрадака (мањи и правилни облици, или велики неправилни) плазма уређаји могу бити:

- Мобилни, углавном са ручном манипулацијом;
- Стационарни.

Што се мобилних уређаја за обраду плазмом тиче, њима се углавном може манипулисати ручно и то су најчешће уређаји који се користе код резања и заваривања појединачних обрадака, и обрадака без посебних захтева везаних за тачност обраде. За разлику од стационарних уређаја, преносни уређаји за обраду плазмом имају знатно слабије карактеристике и могућности попут мање укупне снаге, мање јачине струје и брзина резања. Због своје конструкције погодне су за ручну употребу као и за рад на терену и ван погона. [12]

На слици 22. приказани су неки од преносних уређаја за обраду плазмом.



Слика 22. Неки од преносних уређаја за обраду плазмом [12]

С друге стране, стационарне машине за обраду плазмом су знатно веће конструкције и габаритније су од преносних, а користе се углавном у погонима и фабрикама које се баве серијском производњом. Ови уређаји имају изузетне карактеристике које омогућавају веома висок ниво тачности обраде уз минималне трошкове и учешће оператера у самом раду машине. Захваљујући модерним софтерима и савременој опреми коју поседују, на једноставан начин је могуће извршити обраду великог броја делова за кратак временски период. То су најчешће системи са аутоматским или CNC управљањем. [12]

Пример једног оваквог уређаја приказан је на слици 23.



Слика 23. Пример стационарног уређаја за обраду плазмом [12]

По начину управљања и регулације могу бити:

- Класични;
- Аутоматизовани;
- CNC регулисани.

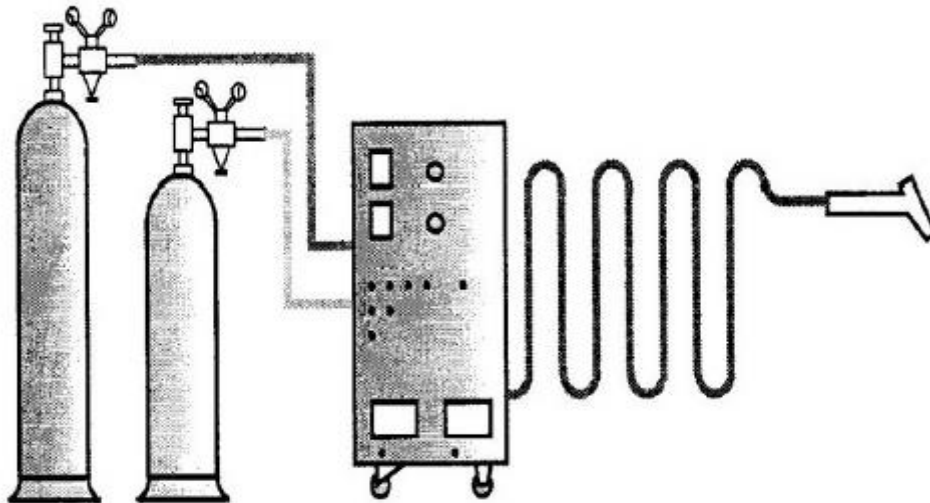
Класични уређаји имају основни садржај кога чине:

- Млазник;

- Јединица за електрично напајање;
- Извор гаса.

Код класичних плазма уређаја подешавање електричних карактеристика, пуштање гаса, и регулација протока и брзине, подешавање растојања између електрода, и положаја млазнице, укључивање-искључивање, и позиционирање према радном комаду, су мануелни. Највећи број примена код заваривања и резања покрива се у оваквим уређајима. Код заваривања приношење додатног материјала такође је ручно. Резање мањих деоница обавља се слободним позиционирањем, а већих помоћу колица са точићима за прислањање млазника за ручно вођење. [12]

Шема класичног плазма уређаја дата је на слици 24.

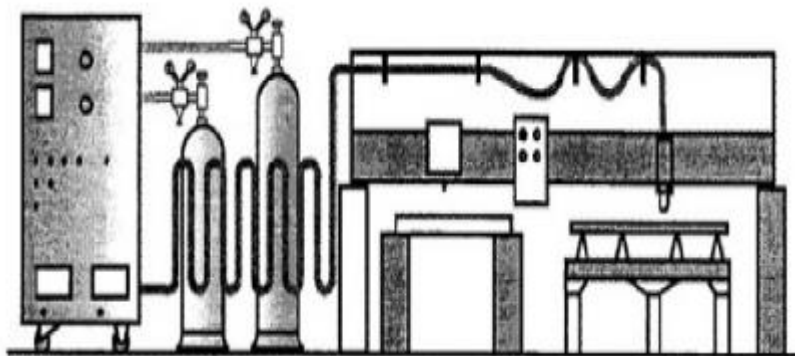


Слика 24. Шема класичног плазма уређаја [12]

Већи производни захтеви и већи радни комади захтевају аутоматизоване уређаје. Аутоматизација се односи на механичко држање, позиционирање и вођење или обратка, или млазника помоћу класичних уређаја и система.

На пример, већи број истих сложених контура могу се резати вођењем преко копир уређаја са пантографом и електрооптичког блока. Резање трака обавља се са већим бројем млазника постављених у јединствени држач.

Шематски приказ аутоматског плазма система дат је на слици 25.



Слика 25. Шема аутоматског плазма система [12]

Најсавременији плазма уређај, који представљају производно обрадне системе, су са CNC регулацијом, и управљањем. Тада садржај употпуњују радни столови, за наношење обратка, портални носачи, манипулатори, или роботи за наношење млазника и процесорска јединица за подешавање параметара обраде, позиционирање, вођење и стартовање. Микро процесорска контрола може обезбедити 3 или 6 степени слободе манипулације са млазницима, столом или комбиновано. Радни режим програмски се дефинише.

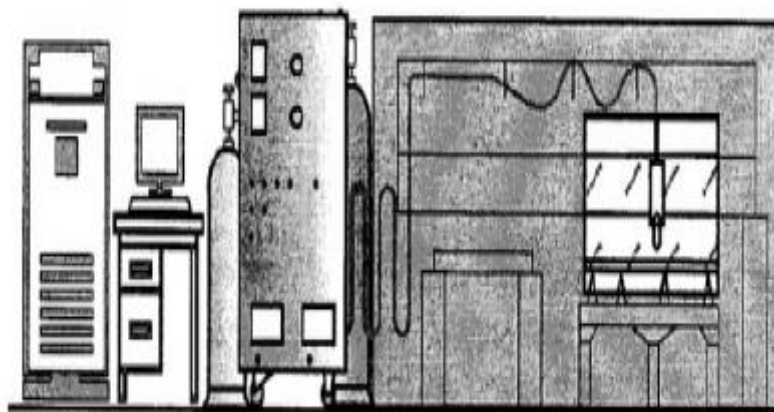
CNC технологије подразумевају увођење информационих технологија и примену рачунара у производњи. Преко одговарајућег софтвера, генерише се CNC код, који рачунар машине алатке препознаје, и на основу кога извршава наредбе. Овом технологијом се обезбеђује минималан утицај људског фактора, а аутоматизација подиже на највиши ниво.

CNC машина (Слика 26.) за сечење плазмом представља технички систем настао интеграцијом CNC технологије и технологије сечења плазмом. CNC машина за сечење плазмом је машина која ради у 2D координатном систему и са њом се могу сећи како обојени метали тако и разне врсте челика, прохромских лимова са великом прецизношћу, брзином и са минималном количином отпада. Сечење плазмом је веома заступљен поступак обраде у скоро сваком процесу производње где је потребно исећи материјал прецизно.

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

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

Руковање овим машинама је веома једноставно захваљујући софистицираном софтверу и управљачкој јединици, а кројне листе се увозе из свих стандардних CAD програма. Савременији модели ових машина опремљени су ТНС уређајем који пружа могућност кретања по Z-оси, и на тај начин обезбеђује аутоматску калибрацију висине бренера приликом сечења чиме се елиминише проблем неравних табли. [12]



Слика 26. Шематски приказ CNC плазма обрадног система [12]

4.2 Опрема за обраду сечења плазмом

Како би се постигао што је могуће већи квалитет плазма резања, развијени су системи који омогућају бољу контролу процеса, односно већу прецизност. Применом оваквих система, могуће је изводити и захтевније операције резања, а правилном оптимизацијом параметара утиче се и на економичност.

Неки од најважнијих елемената система за плазма сечење су следећи:

- Извор напајања;
- Извор плазме;
- Систем довођења плазма гасова;
- Челичне боце за плазмени и додатни гас;
- Пиштољ за плазма резање;
- Систем за управљање;
- Радни сто.

4.2.1 Извор напајања за обраду плазмом

За електролучне радове са плазмом (сечење и заваривање) употребљавају се извори стрме струјно-напонске карактеристике ($I = \text{const}$) који су слични изворима за ТИГ, што је логично будући да су плазмени поступци проистекли из ТИГ-а са сабијеним луком. Извор напајања (на излазу) даје једносмерну струју, а волфрамска електрода се везује на минус пол (Е-). Примар трансформатора се укључује на градску мрежу напона 220 или 380 волти, а силицијумски регулациони исправљач конвертује наизменичну струју у једносмерну.

За ручно сечење, користи се ваздух, било као плазмени или као заштитни гас. Плазмено-ручно се могу сећи угљенични и нерђајући челици као и алуминијум. Мањи извори напајања данас су инверторског типа и могу се укључити било на монофазну или трофазну електромрежу. Инвертори садрже електронске компоненте, који струјну фреквенције 50 Hz преводе у 50 kHz и ова високофреквентна струја се уводи у примар трансформатора, а на секундару се добија низак напон и струја велике јачине. Трансформација на високој фреквенцији омогућава да маса трансформатора буде знатно мања. [4]

4.2.2 Извор плазме за резање

Извор за плазма резање је најбитнији део плазма система за резање.

Извор за плазма резање одређује врсту плазменог или заштитног гаса који се може користити при резању. Како је квалитет реза радног комада пресудан при производњи неког производа, потребно је проверити који се гасови и њихове мешавине могу користити са одређеним извором за плазма резање. Надаље, уколико постоји проблем са мењањем струје или протоком гаса током резања, век трајања система, као и квалитет резања ће бити смањен.

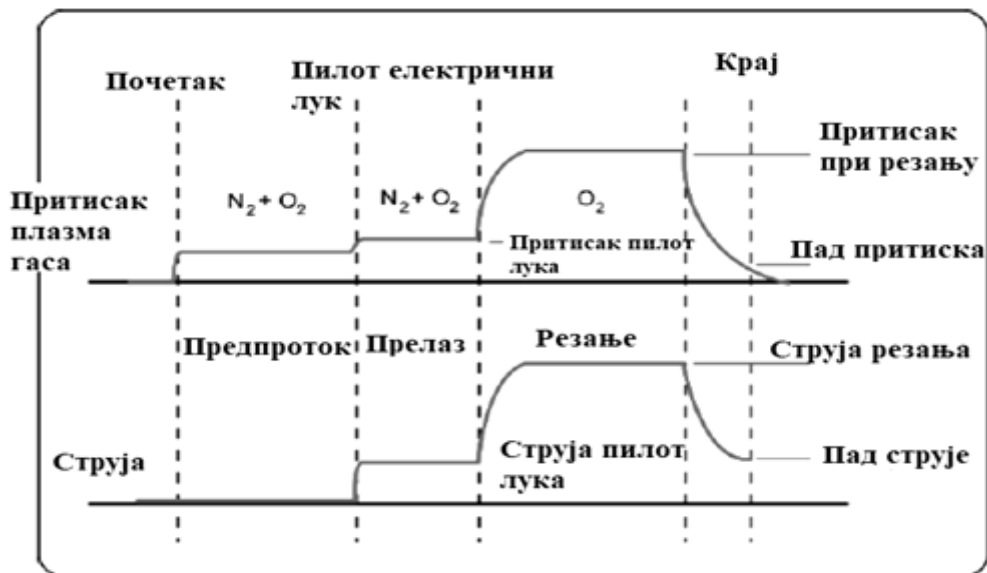
Уопштено гледајући, извори за плазма резање који помоћу микропроцесорског контролера могу повећавати струју и притисак гаса на почетку резања, као и смањивати параметаре на крају резања, продужују век трајања потрошних делова система за резање.

Неоштећени потрошни делови система доприносе добијању квалитетног реза за даље време трајања производње.

Такав контролер омогућује:

- Почетак протока гасне мешавине ($O_2 + N_2$) у тренутку паљења електричног лука што чини паљење лука бржим и лакшим и спречава превелико трошење електроде;
- Контролу повећавања струје резања и интензитета протока гаса што смањује топлотно оптерећење катодe и самим тим продужује њен век трајања;
- Контролу смањења струје резања и интензитета протока гаса на крају процеса резања што омогућује скрућивање оксида катодe пре њиховог „уклањања“ са површине катодe. [11]

На слици 27. приказан је алгоритам микропроцесорског контролера.



Слика 27. Алгоритам микропроцесорског контролера [10]

Старији извори за плазма резање били су робусне грађе, садржали су фиксни мосни исправљач састављен од серијски спојених диода, уз помоћ којих се преко трансформатора наизменична струја претварала у једносмерну струју.

Овакви системи су давали велике снаге, али и било је доста изгубљене енергије па су имали много одступања у излазној снази. Касније су развијени силицијумски – контролисани исправљачи, а самим тим и нови променљиви плазма извори снаге.

Такви извори су директно преко трансформатора претварали трофазну наизменичну струју у једносмерну струју, погодну за поступак резања. Такви системи су такође били масивни, а користили су се у системима са високим струјама резања па нису били погодни за ручне апликације плазма резања. Након тога дошло је до развитка преклопних модула извора снаге, који су након исправљача користили и транзисторе за подешавање једносмерне струје. „Чопери“ су врста преклопних извора снаге који користе полуводичке уређаје као што су биполарни транзистори, који исправљају једносмерну струју са одступањима па добијамо врло глатку излазну криву снаге.

Други тип преклопних извора снаге су инвертори. Они користе такве транзисторе којима се повећава фреквенција наизменичне струје, а тиме се омогућује коришћење мањег трансформатора. Због коришћења мањих трансформатора инвертори су много лакши и покретнији од конвенционалних извора плазма енергије што их чини прикладним и за ручне апликације. [12]

Данашњи извори су већином конструисани са инверторском технологијом и имају одличне могућности интегрисања са роботизованим CNC системима. Управљање и контрола главног лука, пилот лука, напона лука и струје резања изводи се аутоматски, што омогућује одржавање константног квалитета реза.

4.2.3 Технички гасови при резању плазмом

Уз све до сада наведене утицајне факторе, кључни утицај на стабилност и брзину процеса резања као и на квалитет тако добијених резних површина имају технички гасови који се користе у процесу, било да се ради о плазменим или заштитним, односно додатним гасовима. У циљу постизања економичног процеса резања и захтеваног квалитета резања потребан је правилан одабир плазменог гаса или мешавине гасова за одређени материјал.

При одабиру техничког гаса најважнију улогу имају његова физичка својства, као што су јонизација и енергија дисоцијације, топлотна проводљивост, атомска тежина и хемијска реактивност.

Ваздух је најсвестранији плазмени гас и омогућава добар квалитет и брзину резања нелегираних и нерђајућих челика, као и алуминијума. Ваздух исто тако смањује трошкове резања јер није потребна његова набавка.

Компримовани коришћени ваздух треба бити очишћен од свих нечистоћа, као што су честице или влага. Главне компоненте ваздуха су азот ($\approx 70\%$) и кисеоник ($\approx 21\%$). С употребом ваздушне плазме може доћи до појаве нитрације и оксидације површине реза, што касније може узроковати порозност у завареним спојевима. [4]

Аргон припада групи инертних гасова, што значи да хемијски не реагује са материјалом током процеса резања.

Његова висока атомска маса (највећа од свих гасова) доприноси високој енергији за топљење, док ниска енергија јонизације омогућава лагано успостављање лука. Резултат тога је висока кинетичка енергија плазменог млаза. Аргон се већином користи у мешавинама, због његове мале топлотне проводљивости као и његове високе цене.

Водоник, насупрот аргону, има врло добру топлотну проводљивост. Надаље, водоник дисоцира при високим температурама. То значи да се велика већина енергије повлачи с електричног лука, што резултује сужењем електричног лука и могућношћу постизања веће густине енергије. Због мале атомске масе чисти водоник је неприкладан за коришћење па тако не може произвести довољну кинетичку енергију за топљење метала.

Азот са материјалом реагује само при високим температурама, док при ниским температурама остаје инертан.

Што се тиче физичких својстава, односно топлотне проводљивости и атомске масе, налази се између аргона и водоника. Као додатак аргону повећава топлотну проводљивост и квалитет реза. Још увек је најбоље решење при резању алуминијума и нерђајућег челика. Уопштено говорећи, употреба ваздуха као секундарног извора је најбоља комбинација при плазма резању азотом. Исто тако, могуће је и коришћење воде као секундарног гаса, чиме се добија јако глатка површина реза нерђајућих челика и алуминијума као и мање деформације самог радног комада. Овакова апликација захтева употребу воденог стола. [4]

Кисеоник је по својој топлотној проводљивости и атомској маси једнак азоту. Кисеоник делује оксидишуће на топљење па се производи додатна топлота која може повећати брзину резања. Кисеоник као плазмени гас је постао стандардан при резању угљеничних челика и притом даје најбољи квалитет резања и највећу брзину резања од свих плазмених гасова. Употреба кисеоника при резању угљеничних челика даје фини млаз топљења метала, смањујући површинску напетост сваке капљице метала па тако омогућује лагано издување топлоте. Недостатак употребе кисеоника као плазменог гаса је његова цена и век трајања потрошних материјала плазма пиштоља, али последња достигнућа плазма система за резање омогућују започињање резања мешавином кисеоника и азота као и наставак резања кисеоником, чиме се продужује век трајања потрошних материјала. Повећани трошкови због цене кисеоника и смањења века трајања потрошних материјала се уобичајено надокнађују смањењем трошкова секундарних операција, као што је уклањање троске и равнање косих површина реза. Исто тако, кисеоник се може употребљавати за резање нерђајућих челика и алуминијума, али се добија грубља површина реза па се не препоручује за резање наведених материјала. [4]

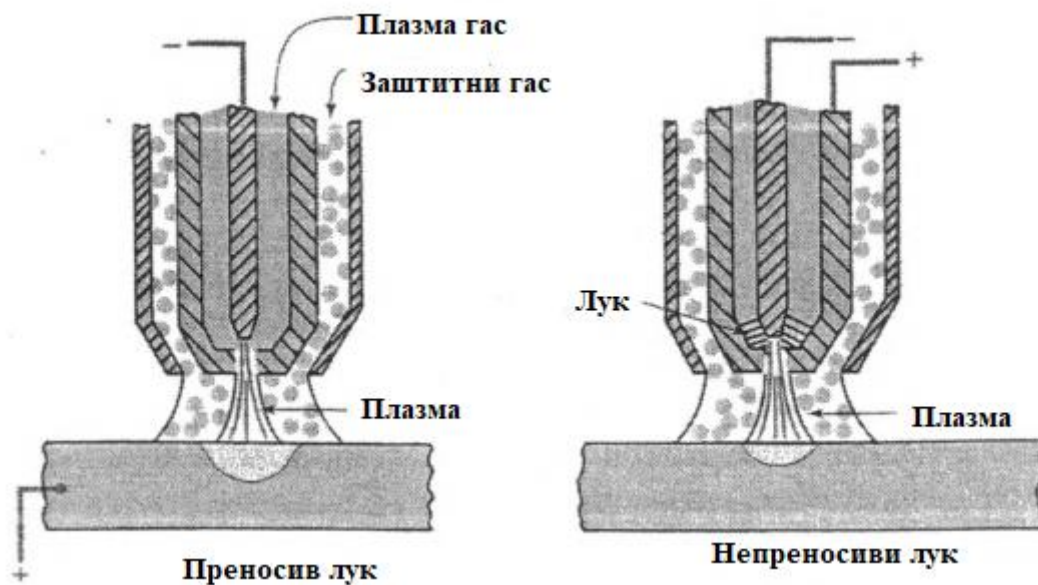
Мешавине гасова добијају се мешањем претходно наведених гасова. На пример, добра топлотна својства водоника се могу комбиновати са великом атомском масом аргона. Ово омогућава резање алуминијума и нерђајућих челика, дебљина већих од 5 mm, са садржајем водоника зависно од дебљине материјала (најчешћа мешавина: 35% H₂, 65% Ar).

Премало водоника даје грубљу површину реза и заобљен горњи руб реза, а превише водоника даје глатку горњу страну реза, али на доњем рубу остаје део растопљеног метала. Правилан избор мешавине Ar/H₂ даје вертикалан рез и глатку, готово полирану површину реза нерђајућих челика. Притом је такође могућа појава троске на доњем рубу реза. Као заштитни гас мешавине Ar/H₂, уобичајено се користи азот. Недостатак употребе овакове комбинације гасова за плазма резање је висока цена.

4.2.4 Пиштољ за плазма резање

Код процеса плазма резања користе се ручно вођени или механизовано управљиви плазма пиштољи. Постоји неколико различитих врста и величина једних и других, а бирају се зависно од дебљине радног комада. Уколико се жели постићи што бољи квалитет резања удаљеност пиштоља од радног комада се мора одржавати у јако ниским толеранцијама. Неки механизовани плазма пиштољи су опремљени са аутоматским контролним уређајима како би се одржала константна удаљеност, односно размак између врха пиштоља и радног комада што је веома корисно ако узмемо у обзир да је то један од веома важних фактора који утичу на квалитет обраде. [2]

Горионици за сечење плазмом дају највишу температуру од свих термичких метода сечења. Комбинацијом екстремно високих температура плазме (око 14000°C) и динамичког притиска јонизованог гаса добијају се уски резови и веома глатке пресечене површине. Директан лук се обично употребљава за сечење метала, а индиректни за сечење неметала. Кад је реч о заваривању плазмом, користи се индиректан лук. Код директног лука, струјно коло се непосредно успоставља између врха волфрамске електроде и основног материјала, а код индиректног, најпре се успоставља помоћни лук између електроде и оклопа млазнице, а затим се тај лук преноси на основни материјал, а за одржавање лука пожељна је струја мање јачине која се лакше регулише него код директног лука. Ова два типа горионика приказана су на слици 28. [2]



Слика 28. Типови горионика, са преносивим луком лево, и непреносивим луком десно [4]

Плазма пиштољ конструисан је тако да различити гасови, било плазмени или заштитни, и електрична струја могу истовремено пролазити кроз сами пиштољ без икаквог утицаја једне величине на другу.

Пиштољи већином имају облогу споља која штити унутрашње делове пиштоља од топлоте узроковане електричним луком. Исто тако пиштољ садржи изведен систем каналића за разне плинове (плазмене, заштитне) који су прописно одвојени и затворени један од другог па садржи изолацијске материјале како би се спречило стварање електричног лука унутар самог плазма пиштоља. [2]

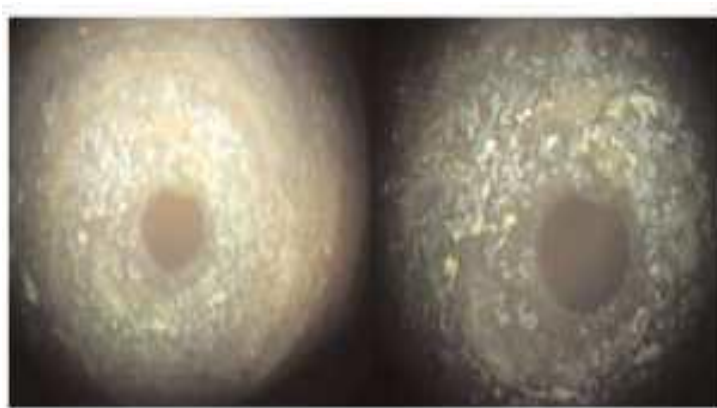
Главни потрошни материјали у пиштољу су електрода, млазница, доводник гаса, заштитна навлака. Што су квалитетнији и дуготрајнији потрошни материјали плазма пиштоља, бољи је и квалитет резања.

Електрода – затајење електроде појављује се када се емитиујући елемент тако истроши да се емитовани електрични лук почиње одбијати од окружујуће бакрене или сребрене навлаке. Једном када електрични лук дође у контакт с том навлаком, може доћи до уништења целе електроде.

Као емитиујући елемент електроде у неоксидишућим околинама користи се волфрам, док се хафниј преферира при резању кисеоником.

Млазница – конструкција елемената млазнице је најважнија за постизање оптималног квалитета резања. Млазница је тако конструисана да је њен отвор мало већи од пречника фокусираног јонизирајућег гаса. То омогућава да млазница садржи и фокусира плазмени млаз без неповољног деловања на саму млазницу. Квалитет резања се смањује када је спољни или унутрашњи део отвора млазнице оштећен. Оштећење унутрашњег дела млазнице може бити узроковано прегоривањем електроде, проблемима око паљења лука или протока гаса, или поставком струје која је превисока или прениска.

Слика 29 приказује оштећење унутрашњег дела млазнице. Оштећење спољашњег дела млазнице може бити узроковано превеликим штрцањем метала које се појављује због мале удаљености пиштоља и радног комада или при пробијању дебљих материјала. Исто тако до оштећења спољашњег дела млазнице може доћи због проблема успостављања електричног лука, између електроде и радног комада.



Слика 29. Оштећење унутрашњег дела млазнице [12]

Слика 30 приказује оштећење спољашњег дела млазнице. Заштитна навлака спречава оштећење млазнице током поступка резања. Отвор навлаке је кључан код заштите, ако је оштећен, може доћи до негативног утицаја на проток плазменог или заштитног гаса, самим тиме и до лошег квалитета реза.



Слика 30. Оштећење спољашњег дела млазнице [12]

Што се довођења гаса тиче – овај део плазма пиштоља је јако битан јер креира вртлог плазмених гасова и одржава га центричним са врхом електроде и средиштем отвора млазнице.

Притисак плазменог гаса у великој мери може да утиче на век трајања и квалитет електроде.

Високи притисци узрокују брзо трошење електроде, док нижи притисци гасова продужују век трајања електроде. Густина вртлога гасова креираног са системом за довођење гаса директно утиче на притисак плазменог гаса. Висока густина вртлога сужава електрични лук, повећава притисак гаса те доприноси високом квалитету резања.

Док мање густине вртлога омогућавају дужи век трајања електроде, али и слабији квалитет реза. Доводник плина (најчешће неки облик прстена) је најчешће направљен од високотемпературне пластике са рупицама под одређеним углом, како би могао узроковати ротацију гасова. [12]

Регулација висине пиштоља за плазма резање од радног комада. За квалитет реза код резања плазмом, између осталог од великог је значаја оптимално подешен и дуж целог реза константно одржаван размак између пиштоља и радног комада. За постизање равномерне ширине реза и поновљиве геометрије, односно димензија радних комада, потребно је имати тачну регулацију удаљености између пиштоља и радног комада. Регулација удаљености омогућује да се плазма пиштољ увек налази на истој удаљености од радног комада, било да је узорак таласаст или да неравно налаже.

Исти захтеви важе и за процес бушења (пробијања) који чува млазницу од штрцања, посебно у подручју средњих и великих дебљина лимова. Погрешни процеси бушења доводе до повећаног трошења млазнице, прекидања процеса резања и лоших резултата резања. По правилу се на почетку резања, помоћу одговарајућег сензора одреди положај плазма пиштоља тако да се пиштољ примиче лиму, док сензор не додирне површину лима. Када сензор дотакне површину материјала, затвара се електрични круг и рачунар је обавештен да је резна глава постављена на висину бушења, која је виша од висине резања како би се спречило штрцање врућег метала директно у млазницу. Кад заврши бушење, глава се помера на висину резања и започиње резање. Оптимална висина бушења, односно резања и оптимална брзина резања зависе од врсте гасне мешавине и материјала који се реже. [12]

Слика 31 приказује ток гibaња пиштоља код CNC управљаног резања плазмом.



Слика 31. Ток гibaња пиштоља код CNC управљаног резања плазмом [12]

Кад једном започне резање плазмом, удаљеност између врха пиштоља и површине материјала одржава се читавањем напона пренесеног електричног лука, у процесу који се зове аутоматска регулација висине.

За постизање високог квалитета реза важно је одржавати константну удаљеност између пиштоља и површине материјала помоћу одговарајућег система аутоматске регулације. Напон у луку се стално проверава, а читања се користе за подешавање Z осе према горе или доле у зависности од читаног напона. Резултат је квалитетан рез који не захтева интервенцију корисника. [12]

4.2.5 Систем за вођење и управљање

Систем за вођење има једнако велики утицај на квалитет реза као и „алат“ – плазмени млаз. За постизање високог квалитета реза по правилу се користе CNC управљани координатни системи или роботи. Систем за вођење мора имати погоне са довољном динамиком како би брзо постигао задату брзину резања.

Од великог је значаја тачно и прецизно управљање следећим фазама резања:

- Почетак и крај резања, посебно код унутрашњих контура;
- Прелажење преко реза;
- Гибање по угловима.

Систем за вођење и плазма уређај повезани су преко сучеља, путем којег се проводи потребна размена информација. У потпуно аутоматизованом погону може се направити датотеку са подацима за аутоматско одређивање технолошких параметара, на основу врсте и дебљине материјала.

У меморији рачунара постоје стандардне контуре, односно понуђени програми најчешће коришћених облика предмета које треба изрезати. Када се изабере геометријски облик предмета, потребно је уписати брзину резања, димензије предмета, начин започињања реза као и да ли желимо изрезати рупу или спољашњу контуру.

Када се реже више једнаких комада, функција кројења омогућава оптимално искоришћење површине плоче. Такође се могу користити технолошке таблице за аутоматско подешавање услова резања.

За добијање тачних димензија потребно је одредити компензацију ширине реза. Компензација резања у угловима и радијусима складно дебљини лима користи се да не дође до прогоревања, односно пада квалитета резања на тим местима.

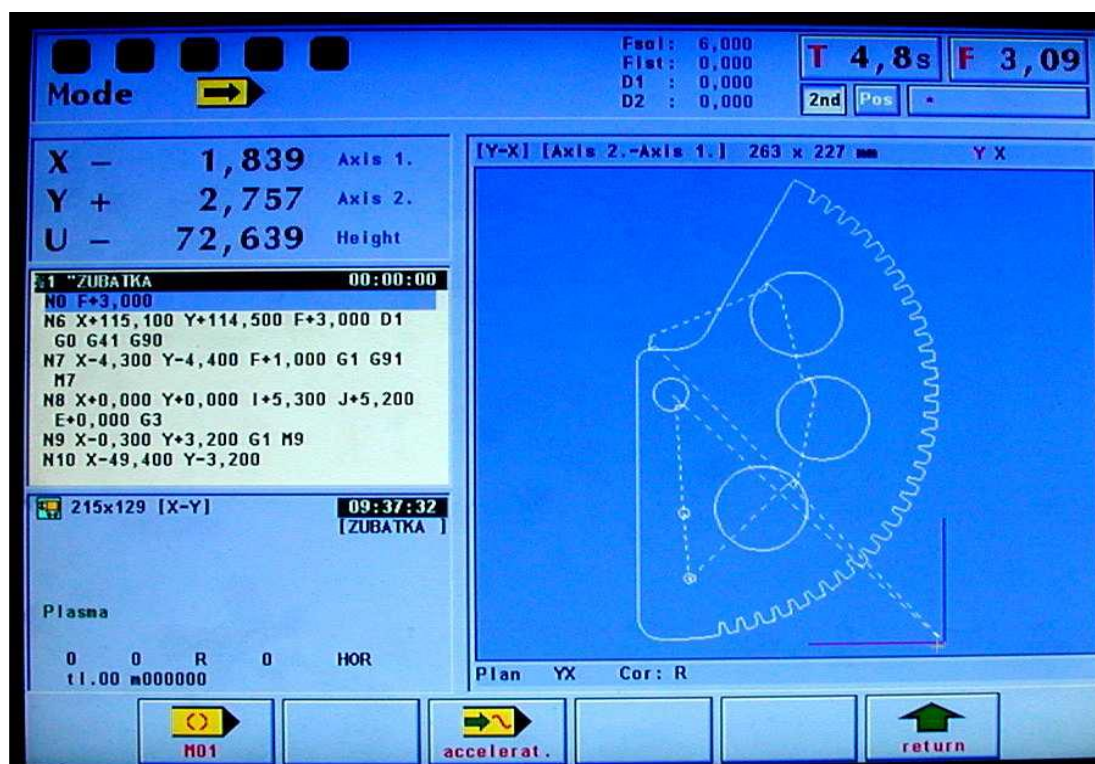
Када се жели изрезати контура сложеног геометријског облика коју је потребно програмирати, користи се савремени програмски пакет за CAD/CAM припрему програма за топлоотно резање. Програмирана контура може се сачувати у рачунару. Тако креирана контура, може се учитати у рачунар CNC стола помоћу дискете или преко мрежног прикључка. [12]

Фактори који утичу на систем вођења и управљања:

- Висока динамика гибања пиштоља – убрзања и успорења утичу на квалитет контура реза;
- Њихање односно померање пиштоља – утиче на константност ширине реза и хрпаваост ширине реза;

- Удаљеност пиштоља од радног комада – константна удаљеност смањује одступања у мерама и појаву треске.
- Програмирање процеса резања – битан је утицај почетка и краја реза и броја пролазака преко реза на саму стабилност плазменог лука и уједначеност резне површине;
- Стање површине радног комада и могући судар пиштоља и радног комада. [12]

Као пример једног оваквог система, на следећој слици 32 можемо видети контролни CNC систем за плазма резање под називом VANAD MEFI, који пружа низ различитих могућности као и остали модерни контролни системи за управљање.



Слика 32. Контролни CNC систем за плазма резање VANAD MEFI [12]

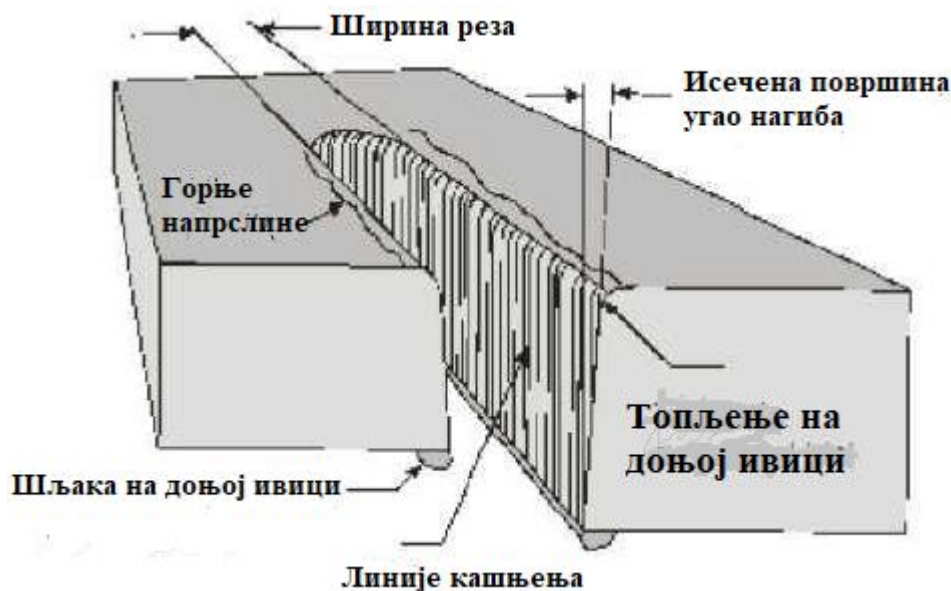
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру овог поглавља детаљно је описан експеримент чији је циљ био да покаже квалитет површине обрађене поступком сечења плазмом у зависности од промене параметара који се тичу брзине резања и дебљине материјала. Остали параметри попут притиска, јачине струје, висине резања, врсте гаса и снаге, остали су константни. Све то је поткрепљено резултатима испитивања која су вршена у лабораторији на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

Описана је и опрема која је коришћена за потребе експеримента као и услови у којима је експеримент вршен. Такође, дати су и закључци на основу приказаних резултата и дијаграма добијених на уређају за мерење храпавости површина.

5.1 Стандард EN ISO 9013

Европски стандард "EN ISO 9013 - Термално сечење" дефинише терминологију и класификацију термалног сечења, садржи геометријску спецификацију производа и начин дефинисања квалитета. Стандард се примењује на материјалима погодним за гасно сечење (сечење кисеоником) од 3 до 300 mm, сечење плазмом од 1 до 150 mm и сечење ласером 0,5 до 40 mm (Слика 33).



Слика 33.

Параметри квалитета обраде код сечења плазмом [14]

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

- Одступање управности и угластости (ћошкост);
- Средња висина неравнина –храпавост;
- Закошеност линија реза;

- Топљење на горњој ивици;
- Могуће формирање неравнина или шљаке (растопљени метал у облику капљица) на дну површине реза. [14]

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

Основни параметри и фактори утицаја, који се дефинишу приликом припреме CNC машине за сечење плазмом су:

- Дебљина материјала (mm);
- Јачина струје (A);
- Одабир цртежа;
- Мерне јединице цртежа (mm - inch);
- Одабир машине;
- Одабир алата;
- Ширина реза (mm);
- Брзина сечења (mm / min);
- Време предзагревања (sec);
- Време задржавања горионика приликом пробијања (sec);
- Висина горионика у току пробијања (mm);
- Висина горионик у току сечења (mm);
- Време задржавања горионика након искључивања лука (sec);
- Лејер цртежа;
- Дефинисње комада и отпада;
- Дефинисање облика и дужине улаза (пробијање) (mm);
- Дефинисање облика и дужине излаза (mm);
- Начин програмирања (аутоматски - мануелни);
- Смер сечења;
- Редослед сечења;
- Координатни почетак;
- Притисак ваздуха (bar). [14]

У оквиру овог рада квалитет обраде резањем плазмом одређивао се на основу параметара храпавости обрађене површине.

5.2 План експеримента, опрема и услови

Први део експеримента који се односи на сечење плазмом вршен је у фирми Амига из Краљева. Машина на којој је обављено сечење носи ознаку Multi Therm Eco, произвођача Messer. Ова машина приказана је на слици 34.

Најважније карактеристике поменуте машине су следеће:

- Квалитетно, брзо и прецизно сечење;
- Радне ширине до 3 m;
- Брзине резања до 12 m/min;
- Процеси сечења могу се вршити мешањем гасова и сувом плазмом;
- Јачина струје се креће од 80 А минимално до 130 А максимално;
- Брзи подизачи (3 m/min) који омогућавају високу продуктивност;

- Поседује управљачку јединицу за једноставно управљање и подешавање параметара;
- Погодна CNC контрола за лако постављање и припрему машине за рад;
- Погон са великом брзином штеди време између резова итд.[13]



Слика 34. Машина произвођача Messer типа Multi Therm Eco [13]

Овај тип машине користи фабрички софтер који носи назив Omni Win 2015 који компанија Messer користи за CNC управљање својих машина. Овај софтвер омогућава брзо и једноставно подешавање и измене свих параметара који се користе при обради плазмом. Могуће је повезати машину са рачунаром и на једноставан начин увозити цртеже до управљачке јединице преко које се могу бирати одговарајући технички цртежи и постављати на таблу. Приказ управљачке јединице помоћу које се могу подешавати параметри и на којој се може управљати машином дати су на слици 35.



Слика 35. Софтвер Omniwin 2017 који користи произвођач Messer [13]

Други уређај који је коришћен у оквиру овог експеримента јесте уређај Talysurf 6 за мерење храпавости која нам у највећој мери показује какав је квалитет неке обрађене површине.

Резултате мерења уређај представља употребом одговарајућих статистичких метода или визуелно у виду кривих и профила површине.

Мерења параметара контактних површина су контактнoг типа, односно изводе се кретањем врха мерне игле по површини чије се карактеристике одређују. Током мерења врх је у сталном контакту са површином, што омогућава мала вредност силе којом мерна игла делује на испитивану површину. Вредност те силе износи 0.5 N. Мерна игла има могућност хоризонталног кретања до 120 mm, док је радијус врха мерне игле 2 μm . [9]

Овај уређај одликује широк спектар могућности, као што су:

- Мерење основних и допунских параметара храпавости и валовитости;
- Статистичка обрада резултата мерења параметара храпавости;
- Приказивање резултата на екрану, њихово меморисање и штампање;
- Просторно скенирање површине.

Коришћењем овог мерног система добијена је информација о почетној микрогеометрији контактних површина испитиваних материјала.

Микрогеометрија контактних површина испитиваних нанокomпозитних материјала представљена је преко основних параметара храпавости:

- R_{max} – максимална висина профила на дужини оцењивања,
- R_z – средња висина профила на дужини оцењивања,
- R_a – средње аритметичко одступање профила храпавости од средње линије профила на дужини оцењивања.

Поред основних параметара могуће је добити и велики број других параметара, тзв. допунских параметара храпавости, међу којима се издваја крива ношења профила. На основу криве ношења профила може се добити потпунија слика о распореду материјала у површинском слоју. Овај уређај приказан је на слици 36. [9]



Слика 36. Уређај за мерење храпавости Talysurf 6 [9]

Што се плана експеримента тиче, циљ је био да се покаже и упореди квалитет реза поступком сечења плазмом при промени брзина и дебљине материјала. Као узорци одабрани су комади конструкционог челика $\check{C}.0361$ (S235) који су изрезани на 15 различитих начина и то тако што је сваки изрезан различитом брзином резања.

Биране су три различите дебљине лима од 3 mm, 4 mm, и 5 mm при чему је за сваку дебљину изрезано по 5 комада и сваки од њих различитим брзинама које су варирале у зависности од дебљине лима.

Брзине које су коришћене су следеће:

- За дебљину лима од 3 mm максимална брзина резања је 6100 mm/min;
- За дебљину лима од 4 mm максимална брзина је 4300 mm/min;
- За дебљину лима од 5 mm максимална брзина је 3400 mm/min.

За сваку од наведених брзина као што је наведено, исечено је по 5 делова од чега су делови сечени са 10%, 30%, 50%, 80%, и 100 % наведене брзине.

Остали параметри остали су константи и имају следеће вредности:

- Јачина струје- 100 А;
- Притисак- 5 Bar;
- Удаљеност млазнице од материјала- 2 cm;
- Врста гаса- Кисеоник-компримовани оксидујући гас 1.

На крају, сваки од тих делова је добио различит визуелни изглед обрађене површине а квалитет реза се на најбољи начин могао одредити испитивањем обрађене површине на претходно описаном уређају за мерење храпавости. Резултати добијени на тај начин показали су којим параметрима је најбоље вршити обраду уколико желимо да добијемо најквалитетнији рез.

Ови резултати биће приказани у наредном делу овог поглавља.

Већ је поменуто да материјал коришћен за експеримент припада групи конструкционих челика па ће у наставку бити речи и о том челику.

Општи конструкциони челици се примењују за израду заварених конструкција и цевовода, конструкција спојених вијцима и заковицама, у високоградњи, мостоградњи, хидроградњи и машиноградњи или за даљу прераду хладним пресовањем, вучењем и врућим ковањем или ваљањем. [15]

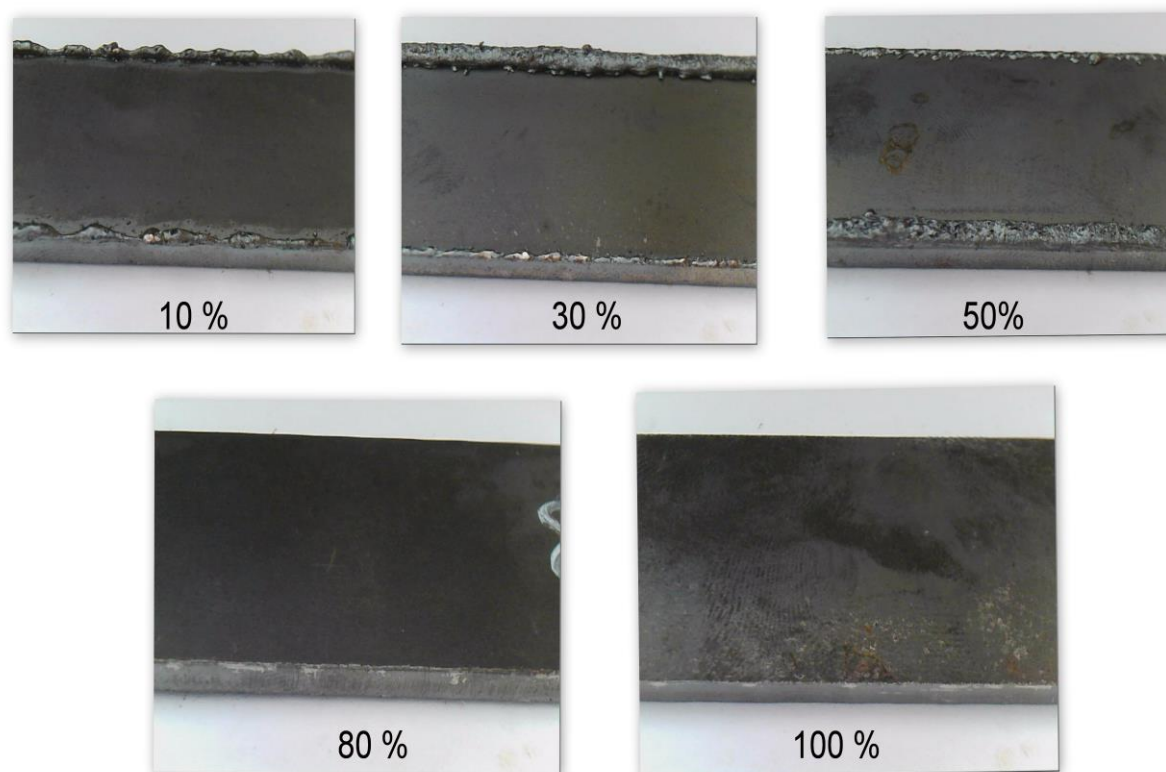
Овај тип челика спада у групу Б где припадају челици чија се основна ознака завршава бројем 1 и користе се за одговорне заварене конструкције код којих не постоји опасност од кртог лома. Могу да буду изложени раду на температури до -10°C (Č0361, Č0371, Č0461 i Č0561). [15]

5.3 Резултати експеримента

У овом делу биће приказани радни комади који су исечени плазма поступком сечења, као и резултати добијени мерењем храпавости на профилметру „Talisurf“.

На следећим сликама биће приказани комади који су исечени, затим биће дати дијаграми зависности храпавости од брзине резања и биће дати коментари на добијене резултате.

Слика 37 приказује делове дебљине 3 mm који се могу сећи максималном брзином од 6100 mm/min.



Слика 37. Површине делова дебљине 3 mm добијене сечењем различитим брзинама

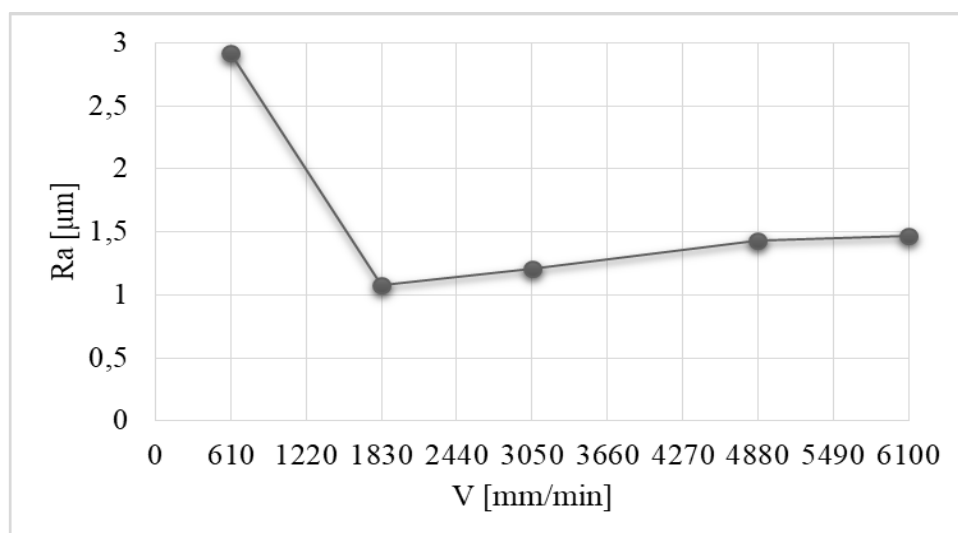
У наредној табели 1 приказане су вредности R_a и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина претходно приказаних делова.

Табела 1. Вредности R_a и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина за делове дебљине 3 mm

R.br. uzorka	R_a [μm]	R_{max} [μm]
1. (10%)	2,92	21,8
2. (30%)	1,08	6,9
3. (50%)	1,21	10,2
4. (80%)	1,43	6,2
5. (100%)	1,47	5,3

На наредном дијаграму 1 приказане су вредности добијене мерењем храповисти на претходно описаном уређају.

Дијаграм је формиран од вредности R_a на вертикалном делу дијаграма и од вредности брзине резања на хоризонталном делу, које у ствари представљају процентуалне вредности од максималне брзине резања на датој машини за дебљину лима од 3 mm која износи 6100 mm/min.

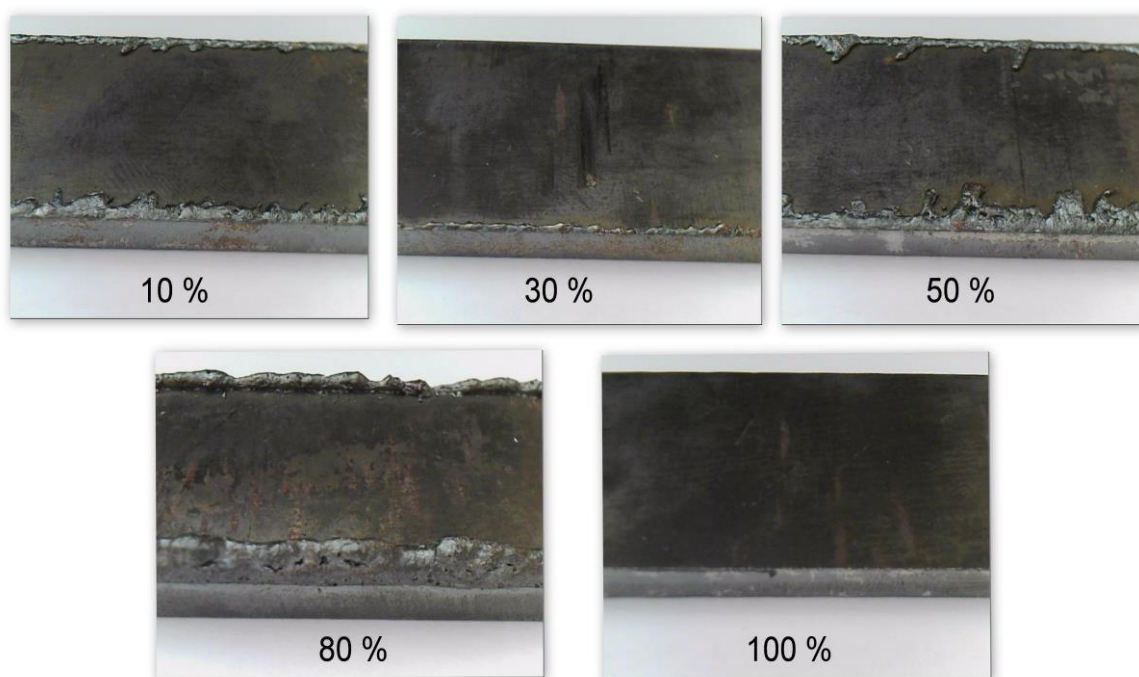


Дијаграм 1. Зависност параметара храпавости од брзине резања, за делове дебљине од 3 mm

На основу визуелног прегледа добијених обрађених површина можемо приметити да је најбољи квалитет обрађене површине остварен код петог комада по реду који је сечен највећом брзином. Рез је у потпуности чист и нема остатака шљаке као код комада који су резани мањим брзинама.

Међутим, и главни параметар који смо користили приликом провере тачности обраде, а то је мерење храпавости, показује баш такве резултате, с тим што са дијаграма можемо видети да квалитет обраде расте са повећањем брзине.

Слика 38. приказује делове дебљине 4 mm који се могу сећи максималном брзином од 4300 mm/min.



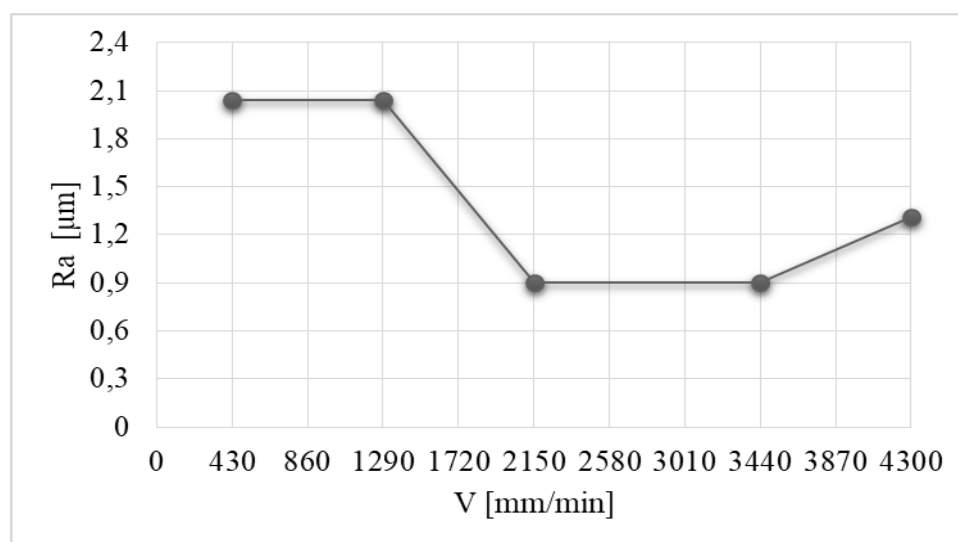
Слика 38. Површине делова дебљине 4 mm добијене сечењем различитим брзинама

У наредној табели 2 приказане су вредности Ra и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина претходно приказаних делова.

Табела 2. Вредности Ra и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина за делове дебљине 4 mm

R.br. uzorka	Ra [μm]	R_{max} [μm]
1. (10%)	2,04	17,4
2. (30%)	2,04	17,4
3. (50%)	0,9	8,8
4. (80%)	0,9	8,8
5. (100%)	1,31	7,4

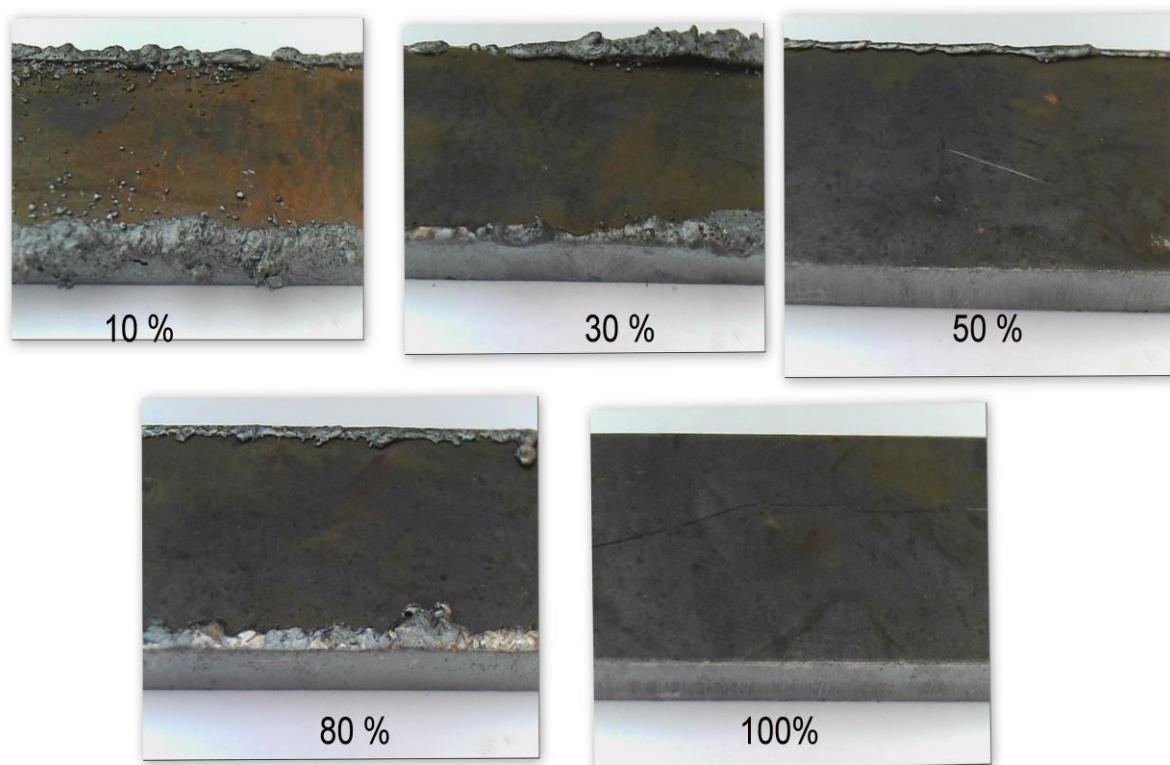
На наредном дијаграму број 2 приказане су вредности добијене мерењем храпавости у зависности од промене брзине.



Дијаграм 2. Зависност параметара храпавости од брзине резања, за делове дебљине од 4 mm

На основу визуелног прегледа добијених обрађених површина можемо приметити да је најбољи квалитет обрађене површине поново остварен код петог комада по реду који је сечен највећом брзином. Рез је у потпуности чист и нема остатака шљаке као код комада који су резани мањим брзинама. Овога пута, комад број 4 је показао добар квалитет реза али изузетно обилну појаву шљаке што није био случај у претходном примеру. То нам говори да квалитет обраде са те стране није увек исти код свих делова када се смањује укупна брзина обраде а повећава дебљина материјала. С друге стране, прва три комада који су у претходном примеру били лоше обрађени, сада знатно боље изгледају и са мање шљаке. Самим тим добили смо и дијаграм који изгледа мало другачије у односу на претходни, али је суштина остала иста и закључак је да се квалитет обраде повећава са порастом брзине.

Слика 39. приказује делове дебљине 5 mm који се могу сећи максималном брзином од 3400 mm/min.



Слика 39. Површине делова дебљине 5 mm добијене сечењем различитим брзинама

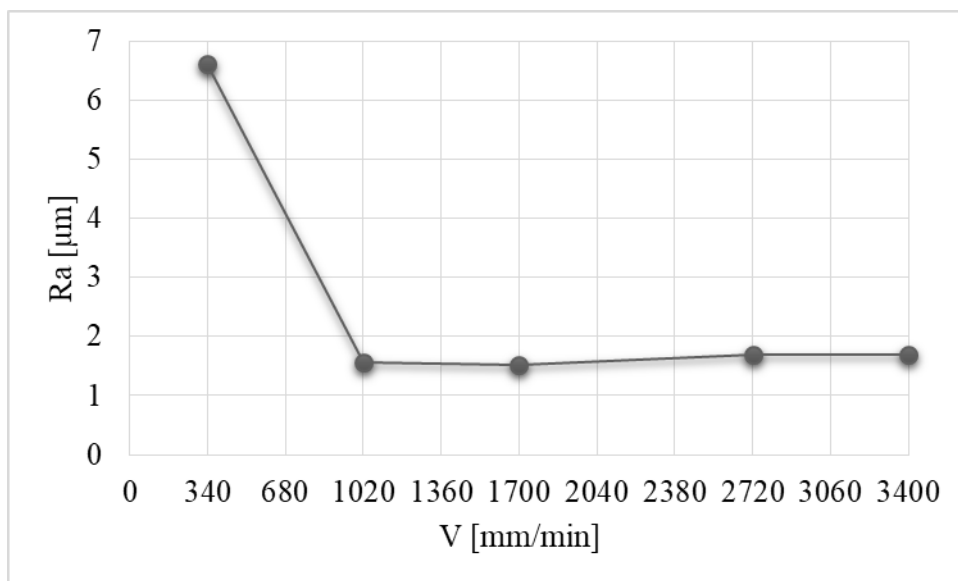
У наредној табели 3 приказане су вредности R_a и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина претходно приказаних делова.

Табела 3. Вредности R_a и R_{max} које су добијене мерењем храпавости обрађених површина за делове дебљине 5 mm

R.br. uzorka	R_a [μm]	R_{max} [μm]
1. (10%)	6,63	40,5
2. (30%)	1,56	8,9
3. (50%)	1,53	8,9
4. (80%)	1,69	20,4
5. (100%)	1,7	12,3

На наредном дијаграму 3 приказане су вредности добијене мерењем храповисти у зависности од промене брзине.

Дијаграм је формиран од вредности R_a на вертикалном делу дијаграма и од вредности брзине резања на хоризонталном делу, које у ствари представљају процентуалне вредности од максималне брзине резања на датој машини за дебљину лима од 5 mm која износи 3400 mm/min.



Дијаграм 3. Зависност параметара храпавости од брзине резања, за делове дебљине од 5 mm

На последњем примеру смо добили такве резултате који су скоро исти као и у првом случају што се може видети на дијаграму. Опет је најбољи рез и квалитет површине добијен највећом брзином. Овога пута су прва два комада добила јако лош квалитет што је и логично с обзиром да је укупна брзина још више смањена док се дебљина материјала повећала. Док се средња брзина резања показала као добро решење јер је комад број 3 по количини шљаке одмах иза комада број 5 који је сечен највећом брзином.

На основу претходно приказаних примера и њихових анализа можемо закључити да је најбоље у оваквим случајевима када је овај тип челика у питању, резати комаде највећом односном максималном брзином без обзира на дебљину лима. Уочљиво је такође да квалитет обраде опада када се смањује укупна брзина али и када се повећава дебљина материјала, док се за максималне брзине није практично ништа мењало у тим случајевима и квалитет реза је остао исти.

6. ЗАКЉУЧЦИ

Неконвенционални поступци обраде учинили су обраду материјала изузетно бржом, једноставнијом, и безбеднијом. Ови поступци нуде много већи спектар могућности обликовања метала, најчешће без физичког стругања материјала. Када је у питању обрада резањем, можда и једина мана неконвенционалних поступака обраде у односу на конвенционалне поступке обраде, јесте далеко већа цена набавке и одржавања машина. Међутим, и тај проблем се свакодневно све више смањује, јер су произвођачи приморани да смањују цене под притиском светских и финансијски моћних понуђача машина и опреме.

Појавом CNC технологије и технологије сечења плазмом добијен је технички систем који представља најбољи однос цене и квалитета за већину серијских, као и малосеријских типова производње.

Осим тога, брзина обраде је далеко већа од технологије обраде резањем, а квалитет реза се може поредити са технологијом ласерског сечења. Ову технологију одликују предности брзине и квалитета ласерског сечења, а приступачност цена као код обраде резањем. Дакле избегнуте су мане споре, компликоване, непрецизне обраде, као и скупе обраде.

Читав систем је веома једноставан за управљање. Контролише се у потпуности преко одговарајућих софтвера, који су прилагођени стандардним рачунарима, CAD софтверима и лако су доступни. Аутоматизација је, путем CNC технологија, достигла највиши могући ниво, резултат тога је смањен утицај људског фактора који је сведен на минимум и могућност грешке или шкарта у производњи су практично немогуће. Након програмирања, улога оператера је искључиво надзор. Дакле, сам поступак сечења не захтева физички напор, нити посебну обуку оператера. Обука је ипак неопходна за програмера CNC машина.

Због могућности меморисања програма сечења, постигнута је и могућност поновљања производње идентичног комада у неограниченом броју. Овај поступак, најчешће представља најбољи избор и за производњу појединачних комада, због брзине, једноставности и квалитета сечења.

У првој половини теоријског дела рада направљена је паралела између неконвенционалних и конвенционалних поступака обраде са посебним освртом на неконвенционални поступак обраде плазмом на основу чега можемо закључити да неконвенционални поступци обраде имају велику предност у свим сегментима и с разлогом данас потискују остале поступке обраде.

Детаљно су анализирани настанак плазме, процес резања метала плазмом, као и фактори који утичу на квалитет поменуте обраде чиме је показано да квалитет реза може бити на високом нивоу уколико се води рачуна о свим факторима у смислу оптималног подешавања параметара, подешавања машине, стручности оператера и опреме коју машина користи.

Друга половина теоријског дела рада показала нам је да постоји велики број поступака обраде плазмом и да њихова примена зависи првенствено од врсте гаса који се користи, а затим и од врсте и других карактеристика материјала, као и од онога што желимо да добијемо као финални производ.

Анализиране су и друга два поступка обраде попут наношења превлака и заваривања који такође имају велику примену када је у питању обрада плазмом. Такође су у овом делу детаљно описане све врсте машина за обраду плазмом чија подела нам је показала да ипак најсавременије CNC управљане машине с разлогом имају највећу примену јер дају најбољи резултат када је обрада резањем плазмом у питању. Посебан акценат у овом делу рада стављен је на опрему која се примењује за обраду сечењем уз помоћ плазме и приказан је значај сваког од најбитнијих делова система за обраду плазмом, од којих сваки на свој начин, у великој мери доприноси и утиче на квалитет обрађеног комада.

У оквиру експерименталног дела рада је описан извршени експеримент чији је циљ био да покаже и упоређи квалитет површина обрађених поступком сечења плазмом у зависности од промене параметара који се односе на брзину резања као и на дебљину материјала. Остали параметри попут притиска, јачине струје, висине резања, врсте гаса и снаге, остали су константни. Детаљно је описана и опрема која је коришћена за потребе експеримента као и услови у којима је експеримент вршен.

Експериментална истраживања су нас довела до закључка да се за изабрану врсту челика најбољи квалитет обрађене површине добија уколико се обрада врши при максималним брзинама за сваку дебљину лима. Такође се на основу приказаних дијаграма сачињених од параметара храпавости, добијених на основу испитивања храпавости обрађених површина на одговарајућем уређају за мерење храпавости, може закључити да се квалитет обрађене површине повећава са повећањем површине, док је квалитет мањи када се материјал обрађује мањим брзинама.

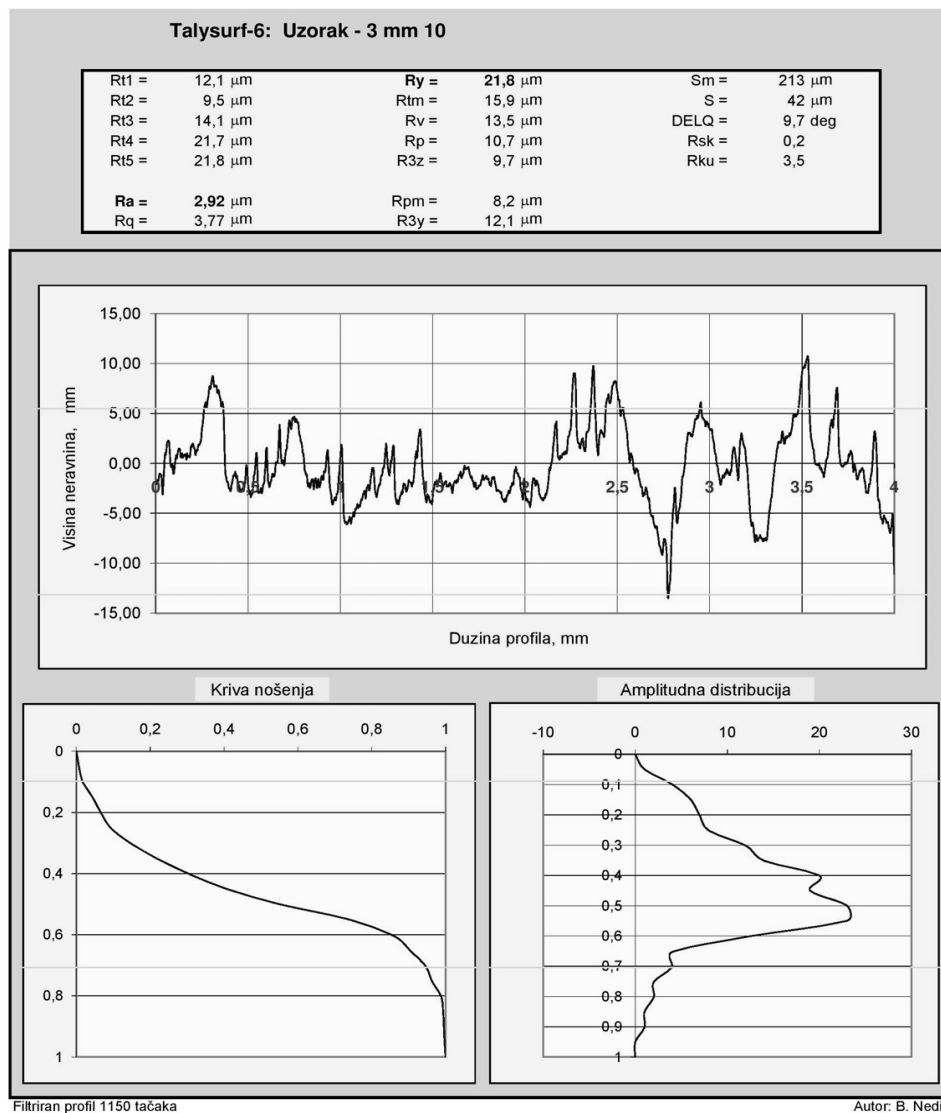
Предмет даљих истраживања могла би да буде одређивање квалитета реза плазме у случајевима када се:

- Мења врста гаса;
- Мења вредност притиска;
- Мењају растојања млазнице од предмета обраде;
- Мењају различите врсте материјала;
- Као и сличне промене параметара обраде.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић М., Лазић М.: Производне технологије-обрада метала резањем, предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
- [2] Лазић М.: Неконвенционални поступци обраде, Научна књига, Београд, 1990.
- [3] Миликић Д.: Неконвенционални поступци обраде, уџбеник, Факултет техничких наука Нови Сад, 2002.
- [4] Јовановић М., Лазић В.: Технологија заваривања и ливења, уџбеник, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2015.
- [5] Simler, H., Krink, V., Laurisch, F., "Modern technology of plasma cutting", Croatian journal for welding and allied techniques, Vol. 48, No 1/2., 2005, pp 5-12.
- [6] Stojanović I.: Plazma rezanje, Seminarski rad na doktorskim studijama, Strojarski (mašinski) fakultet Slavonski Brod, 2005.
- [7] Samardžić I., Stoić A., Klarić Š. Pavić J.: Possibilities of cost effective plasma cutting application, Strojarski (mašinski) fakultet Slavonski Brod, 2005.
- [8] Мартиновски В., Антић М.: Новитети у термичким поступцима резања, Београд, 2011.
- [9] Бабић М.: Основи трибологије, Материјал са предавања, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2013.
- [10] Whiting T.: Improving plasma cut quality, The fabricator, 2007.
- [11] T. Pfeifer: Modern systems of automatic plasma cutting, Zbornik radova, Eurojoin 4: Development of welding and allied process at the beginning of the new millenium, Cavtat – Dubrovnik, 24.-26.05., 2001.
- [12] S. Kralj, B. Bauer, T. Udiljak, I. Garašić, K. Mihoci: Instalacija CNC sustava za kombinirano rezanje laserom i plazmom, Zbornik radova, HDTZ: Mehanizacija, automatizacija i robotizacija u zavarivanju i srodnim postupcima, Zadar, 01.-04.06.2005.
- [13] Интернет презентација компаније Messer: <http://www.messer-cs.com/en/eu/products/software/>, Приступљено: 5.10.2017.
- [14] C. Landry: Elements of plasma arc cut quality: <http://archive.metalformingmagazine.com/1998/05/plasma/plasma.htm>, Приступљено: 4.10.2017.
- [15] Јовановић М., Адамовић Д., Лазић В., Ратковић Н.: Машински материјали, Машински факултет Крагујевац, 2003.

8. ПРИЛОГ

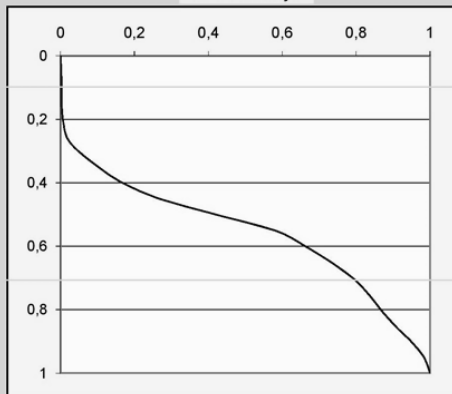


Talysurf-6: Uzorak - 3 mm 30

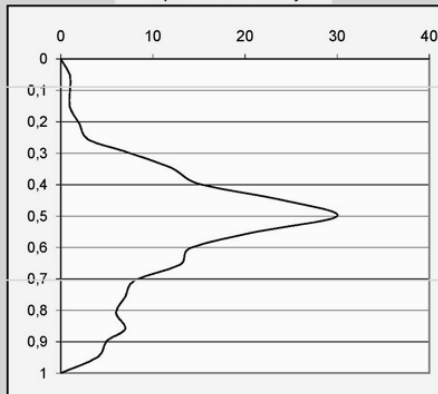
Rt1 =	6,7 μm	Ry =	6,9 μm	Sm =	201 μm
Rt2 =	6,9 μm	Rtm =	5,1 μm	S =	29 μm
Rt3 =	4,5 μm	Rv =	3,8 μm	DELQ =	4 deg
Rt4 =	4,8 μm	Rp =	4 μm	Rsk =	-0,5
Rt5 =	2,6 μm	R3z =	3,5 μm	Rku =	2,9
Ra =	1,08 μm	Rpm =	2,7 μm		
Rq =	1,37 μm	R3y =	4,5 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija

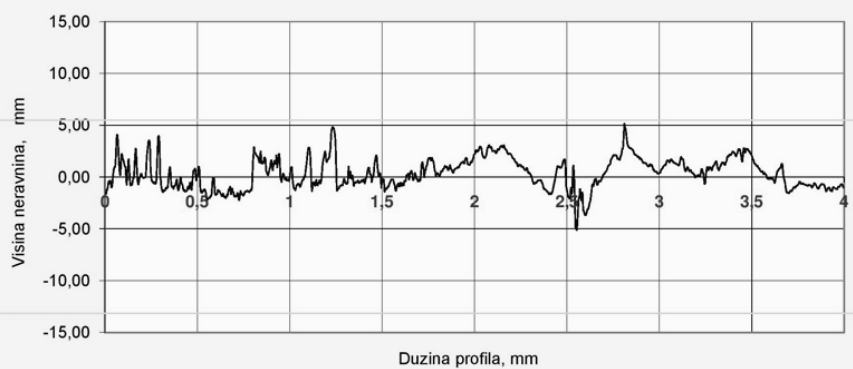


Filtriran profil 1150 tačaka

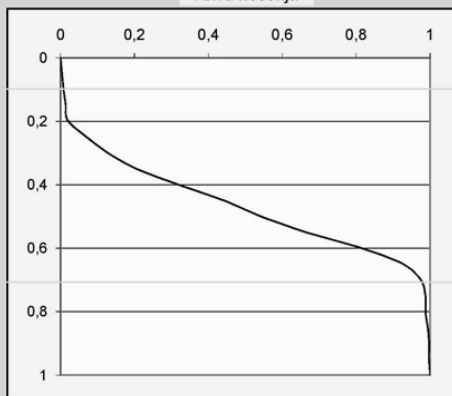
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 3 mm 50

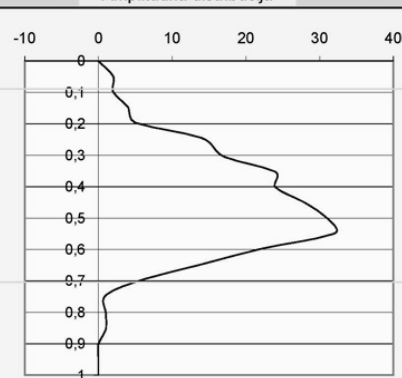
Rt1 =	6,3 μm	Ry =	10,2 μm	Sm =	128 μm
Rt2 =	6,2 μm	Rtm =	6,3 μm	S =	35 μm
Rt3 =	4,6 μm	Rv =	5,1 μm	DELQ =	6,3 deg
Rt4 =	10,2 μm	Rp =	5,1 μm	Rsk =	0,1
Rt5 =	4,4 μm	R3z =	4,2 μm	Rku =	3,1
Ra =	1,21 μm	Rpm =	3,9 μm		
Rq =	1,46 μm	R3y =	5,5 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija

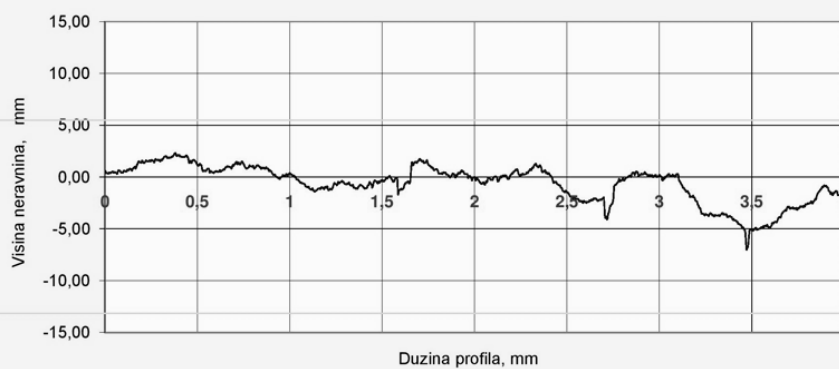


Filtriran profil 1150 tačaka

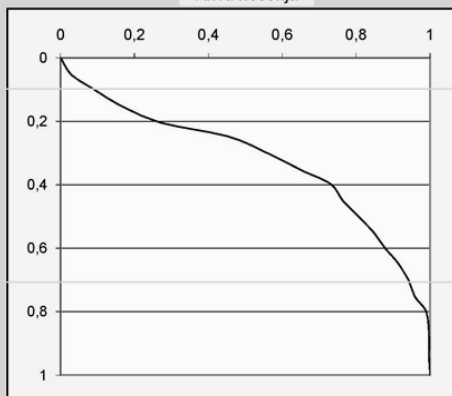
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 3 mm 80

Rt1 =	2 μm	Ry =	6,2 μm	Sm =	266 μm
Rt2 =	2,8 μm	Rtm =	3,7 μm	S =	38 μm
Rt3 =	2,9 μm	Rv =	7 μm	DELQ =	2,2 deg
Rt4 =	4,6 μm	Rp =	2,3 μm	Rsk =	-0,9
Rt5 =	6,2 μm	R3z =	2,5 μm	Rku =	3,2
Ra =	1,43 μm	Rpm =	1 μm		
Rq =	1,79 μm	R3y =	3,6 μm		

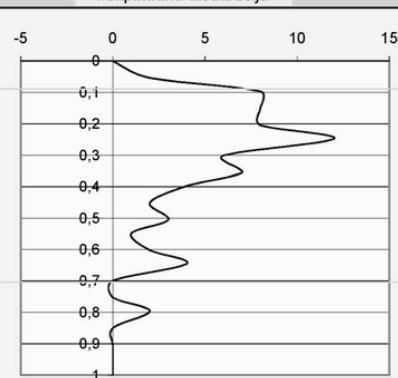


Kriva nošenja



Filtriran profil 1150 tačaka

Amplitudna distribucija



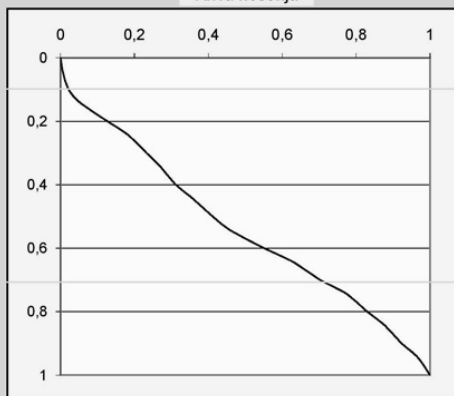
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 3 mm 100

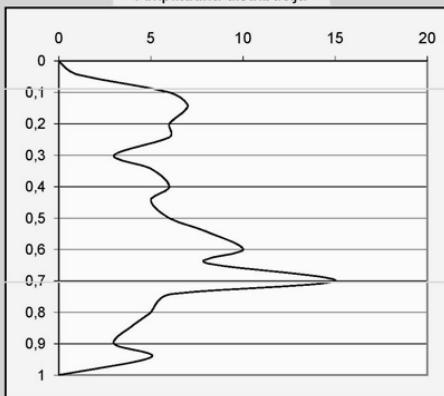
Rt1 =	4 μm	Ry =	5,3 μm	Sm =	447 μm
Rt2 =	2,9 μm	Rtm =	3,6 μm	S =	28 μm
Rt3 =	3 μm	Rv =	3,7 μm	DELQ =	2 deg
Rt4 =	5,3 μm	Rp =	3,3 μm	Rsk =	0,1
Rt5 =	3 μm	R3z =	3 μm	Rku =	2
Ra =	1,47 μm	Rpm =	1,4 μm		
Rq =	1,74 μm	R3y =	4,7 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

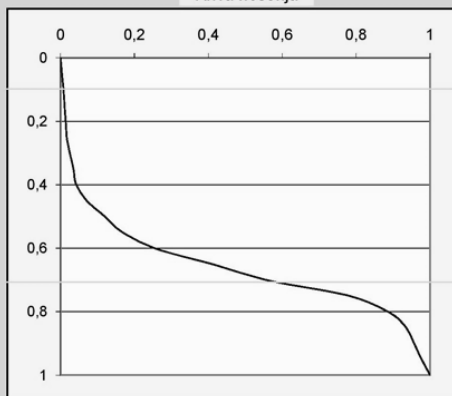
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 4 mm 10

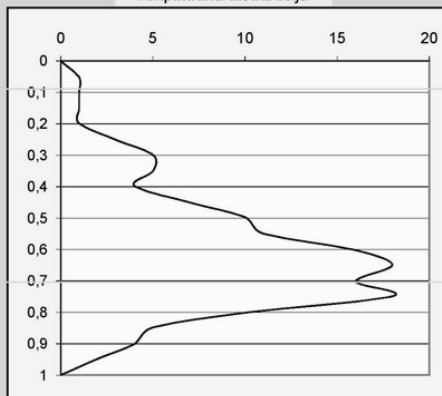
Rt1 =	15 μm	Ry =	17,4 μm	Sm =	243 μm
Rt2 =	17,4 μm	Rtm =	12,2 μm	S =	47 μm
Rt3 =	11,5 μm	Rv =	6,5 μm	DELQ =	7,9 deg
Rt4 =	8,6 μm	Rp =	12,6 μm	Rsk =	1
Rt5 =	8,6 μm	R3z =	5,5 μm	Rku =	5,8
Ra =	2,04 μm	Rpm =	6,8 μm		
Rq =	2,78 μm	R3y =	9,4 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

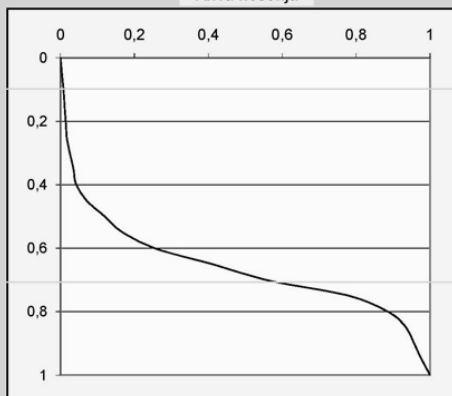
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 4 mm 30

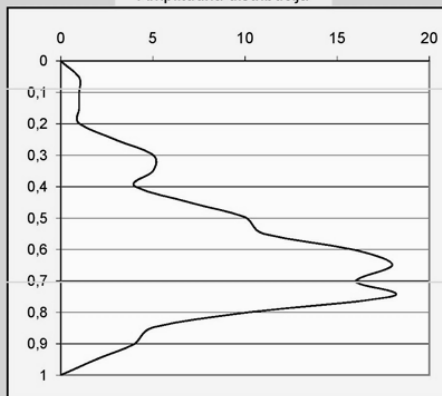
Rt1 = 15 μm	Ry = 17,4 μm	Sm = 243 μm
Rt2 = 17,4 μm	Rtm = 12,2 μm	S = 47 μm
Rt3 = 11,5 μm	Rv = 6,5 μm	DELQ = 7,9 deg
Rt4 = 8,6 μm	Rp = 12,6 μm	Rsk = 1
Rt5 = 8,6 μm	R3z = 5,5 μm	Rku = 5,8
Ra = 2,04 μm	Rpm = 6,8 μm	
Rq = 2,78 μm	R3y = 9,4 μm	



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

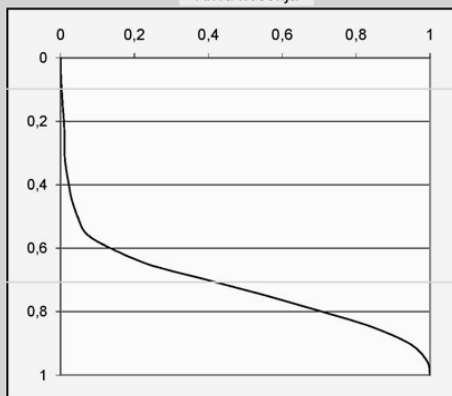
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 4 mm 50

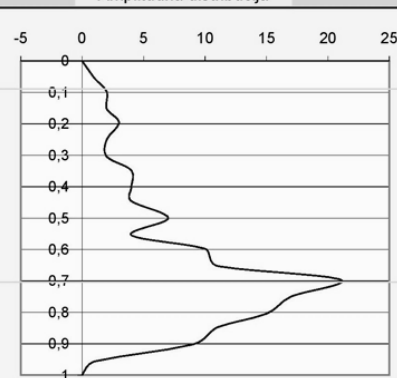
Rt1 =	3,6 μm	Ry =	8,8 μm	Sm =	163 μm
Rt2 =	4,1 μm	Rtm =	4,7 μm	S =	34 μm
Rt3 =	8,8 μm	Rv =	2,2 μm	DELQ =	3,5 deg
Rt4 =	2,8 μm	Rp =	7 μm	Rsk =	1,2
Rt5 =	4 μm	R3z =	3,3 μm	Rku =	6,8
Ra =	0,9 μm	Rpm =	3,3 μm		
Rq =	1,21 μm	R3y =	6,7 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

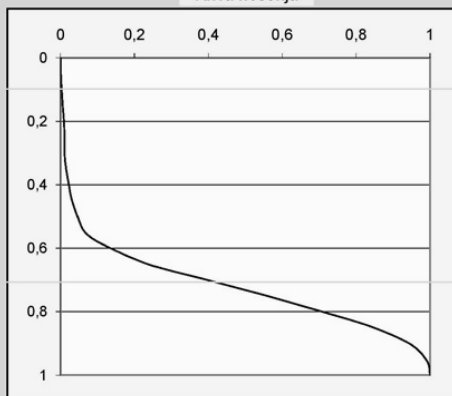
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 4 mm 80

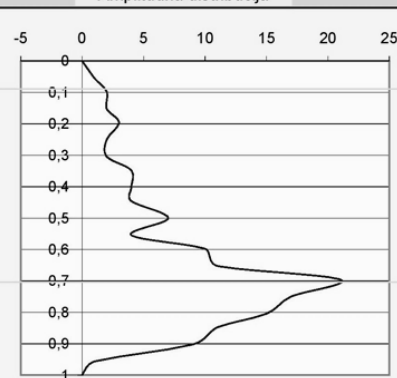
Rt1 =	3,6 μm	Ry =	8,8 μm	Sm =	163 μm
Rt2 =	4,1 μm	Rtm =	4,7 μm	S =	34 μm
Rt3 =	8,8 μm	Rv =	2,2 μm	DELQ =	3,5 deg
Rt4 =	2,8 μm	Rp =	7 μm	Rsk =	1,2
Rt5 =	4 μm	R3z =	3,3 μm	Rku =	6,8
Ra =	0,9 μm	Rpm =	3,3 μm		
Rq =	1,21 μm	R3y =	6,7 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

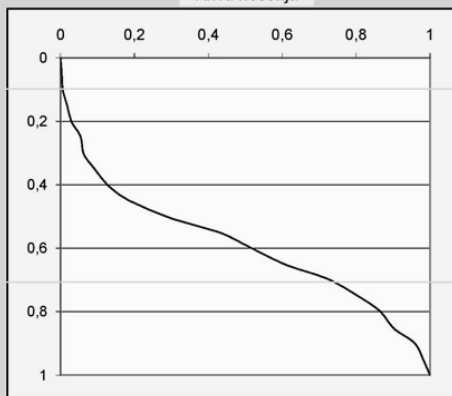
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 4 mm 100

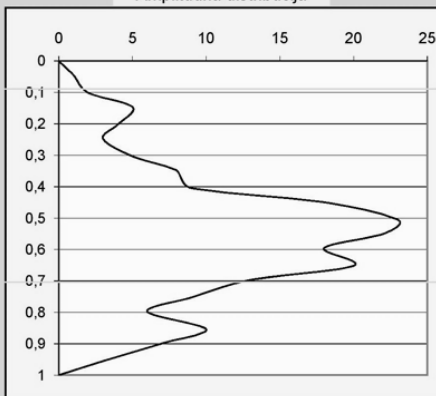
Rt1 =	6,4 μm	Ry =	7,4 μm	Sm =	242 μm
Rt2 =	5,6 μm	Rtm =	6,2 μm	S =	36 μm
Rt3 =	7,4 μm	Rv =	4,1 μm	DELQ =	4,1 deg
Rt4 =	5,4 μm	Rp =	4,8 μm	Rsk =	0,3
Rt5 =	6,4 μm	R3z =	3,8 μm	Rku =	3
Ra =	1,31 μm	Rpm =	3,4 μm		
Rq =	1,64 μm	R3y =	5 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija

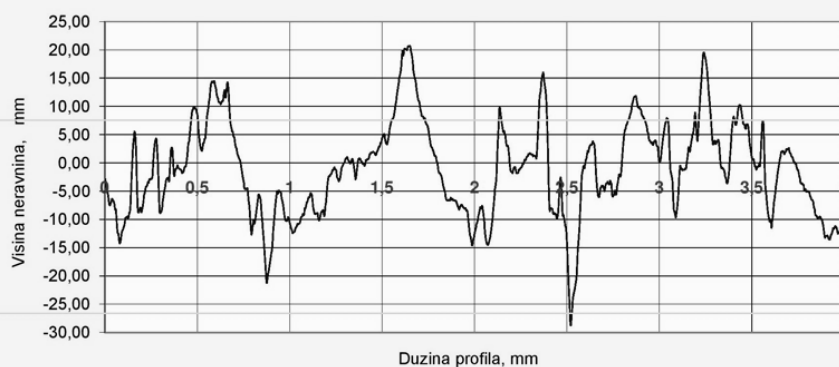


Filtriran profil 1150 tačaka

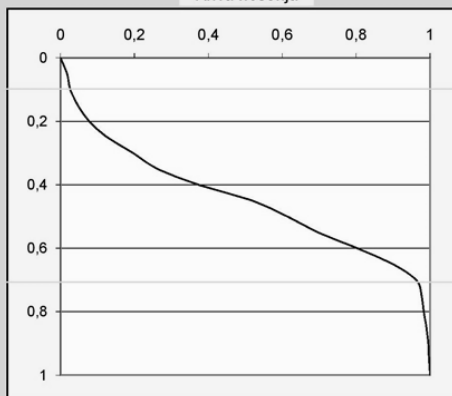
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 5 mm 10

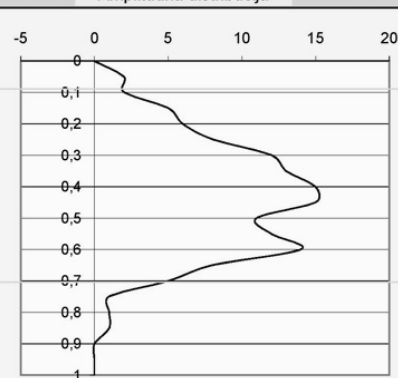
Rt1 =	28,7 μm	Ry =	40,5 μm	Sm =	250 μm
Rt2 =	37,4 μm	Rtm =	35 μm	S =	77 μm
Rt3 =	35,3 μm	Rv =	28,7 μm	DELQ =	15,1 deg
Rt4 =	40,5 μm	Rp =	20,7 μm	Rsk =	0,1
Rt5 =	33,1 μm	R3z =	17 μm	Rku =	3
Ra =	6,63 μm	Rpm =	16,5 μm		
Rq =	8,32 μm	R3y =	21,7 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

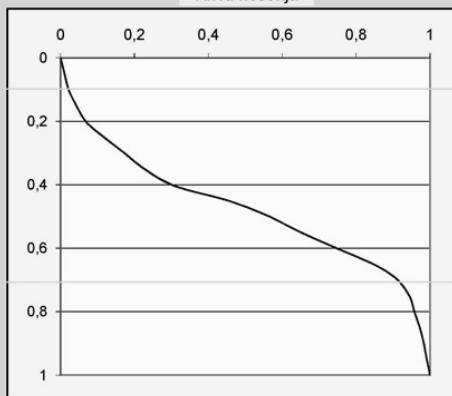
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 5 mm 30

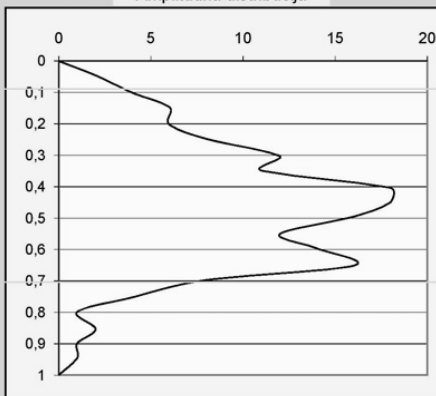
Rt1 =	7,9 μm	Ry =	8,9 μm	Sm =	224 μm
Rt2 =	8,9 μm	Rtm =	7,8 μm	S =	44 μm
Rt3 =	8,1 μm	Rv =	5,8 μm	DELQ =	4,8 deg
Rt4 =	6,9 μm	Rp =	5,1 μm	Rsk =	0
Rt5 =	7,2 μm	R3z =	5 μm	Rku =	3,1
Ra =	1,56 μm	Rpm =	3,9 μm		
Rq =	1,98 μm	R3y =	6,3 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija

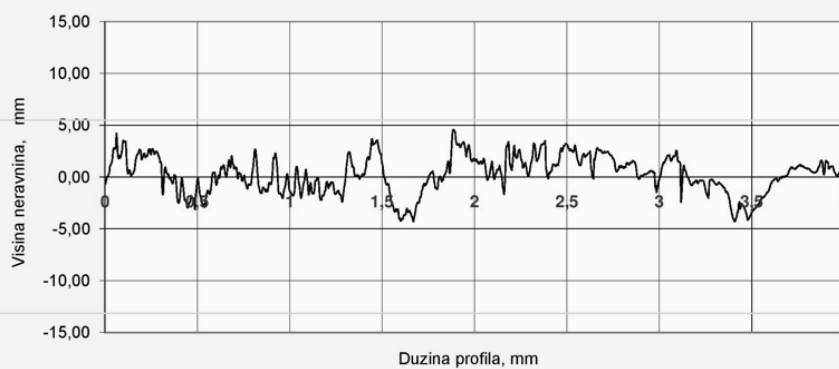


Filtriran profil 1150 tačaka

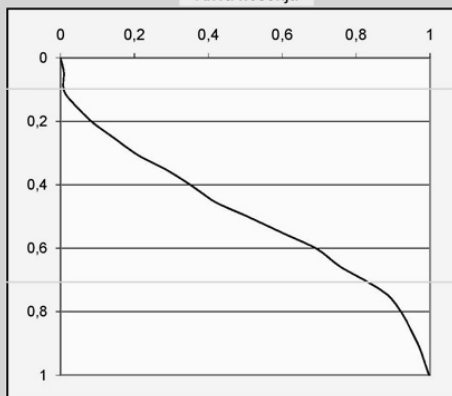
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 5 mm 50

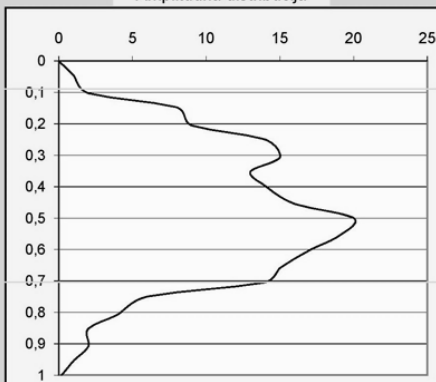
Rt1 =	7,3 μm	Ry =	8,9 μm	Sm =	120 μm
Rt2 =	7,9 μm	Rtm =	8 μm	S =	34 μm
Rt3 =	8,9 μm	Rv =	4,3 μm	DELQ =	6,4 deg
Rt4 =	7,8 μm	Rp =	4,5 μm	Rsk =	-0,1
Rt5 =	8,8 μm	R3z =	5,2 μm	Rku =	2,4
Ra =	1,53 μm	Rpm =	4,1 μm		
Rq =	1,86 μm	R3y =	5,6 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

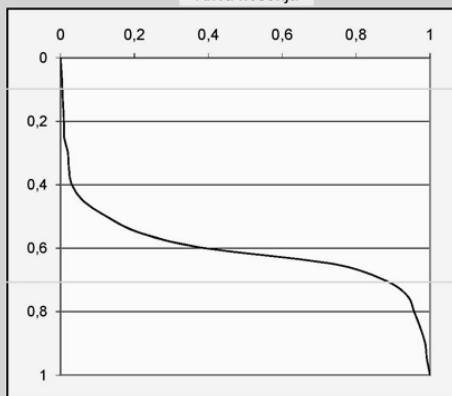
Autor: B. Nedić

Talysurf-6: Uzorak - 5 mm 80

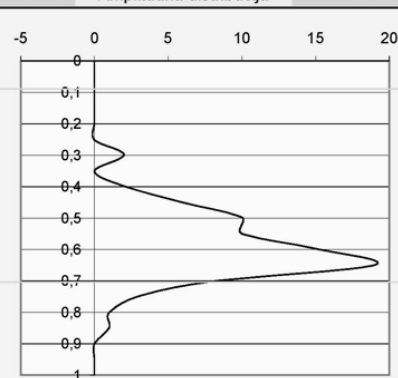
Rt1 =	5,9 μm	Ry =	20,4 μm	Sm =	164 μm
Rt2 =	6,7 μm	Rtm =	11,1 μm	S =	50 μm
Rt3 =	7,9 μm	Rv =	9,1 μm	DELQ =	7,2 deg
Rt4 =	14,5 μm	Rp =	14 μm	Rsk =	0,8
Rt5 =	20,4 μm	R3z =	4,9 μm	Rku =	8,4
Ra =	1,69 μm	Rpm =	6,7 μm		
Rq =	2,59 μm	R3y =	7,7 μm		



Kriva nošenja



Amplitudna distribucija

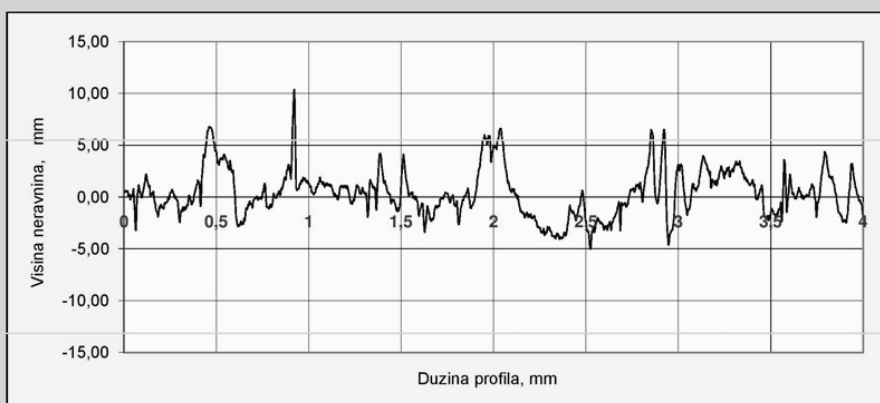


Filtriran profil 1150 tačaka

Autor: B. Nedić

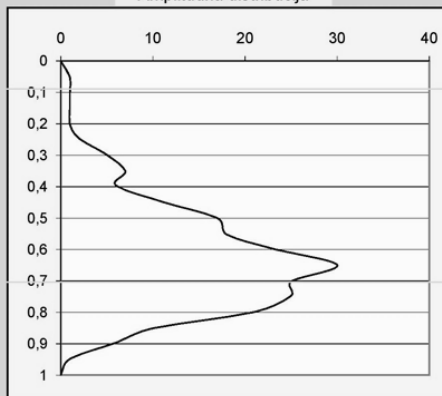
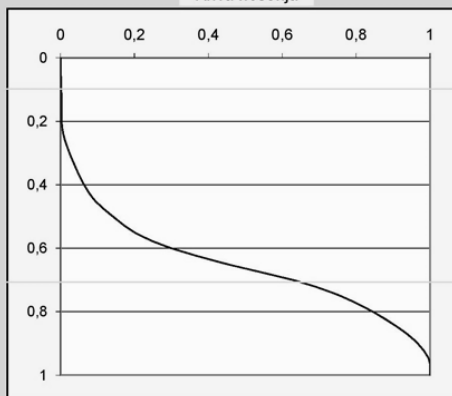
Talysurf-6: Uzorak - 5 mm 100

Rt1 = 10 μm	Ry = 12,3 μm	Sm = 134 μm
Rt2 = 12,3 μm	Rtm = 10,2 μm	S = 35 μm
Rt3 = 10,7 μm	Rv = 5 μm	DELQ = 8,3 deg
Rt4 = 11,5 μm	Rp = 10,4 μm	Rsk = 0,6
Rt5 = 6,8 μm	R3z = 7 μm	Rku = 3,7
Ra = 1,73 μm	Rpm = 6,9 μm	
Rq = 2,27 μm	R3y = 9,6 μm	



Kriva nošenja

Amplitudna distribucija



Filtriran profil 1150 tačaka

Autor: B. Nedić