

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

**Војна академија
Универзитета одбране у Београду**

Никола Б. Стојановић

Обрадивост челика сечењем плазмом

Дипломски рад

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 537/2013

Никола Б. Стојановић

Обрадивост челика сечењем плазмом

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Богдан Недић – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Никола Стојановић**

Број индекса: **537/2013**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Обрадивост челика сечењем плазмом**

Задатак: У оквиру дипломског рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о технологији сечења плазмом специјалних челика који се користе у наменској индустрији. Потребно је посебно описати машине, изворе плазме и горионике. У посебном делу рада дати преглед врста и карактеристика специјалних челика и извршити могућа испитивања обрадивости сечењем плазмом.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Увода разматрања,
2. Теоријска анализа процеса формирања плазме и поступака обраде плазмом,
3. Преглед и анализа поступка сечења плазмом,
4. Машине и опрема за сечење плазмом,
5. Карактеристике специјалних челика,
6. Експериментална испитивања,
7. Закључци,
8. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 25.06.2020.

РЕЗИМЕ

Луком плазме може се сећи било који материјал велике дебљине, уз формирање реза било које конфигурације, и уз високу производност која не зависи од механичких особин материјала. Плазма поступком могуће је сећи материјал дебљине 250÷300mm.

Основу процеса сечења чини локално топљење метала у зони реза и уклањање растопљеног материјала струјом плазме.

Интеграцијом ЦНЦ технологије и технологије сечења плазмом добијен је софистициран технички систем, који се у потпуности контролише информационим технологијама и стандардним ЦАМ/ЦАД софтверима.

У овом раду обрађена је тема одређивања квалитета реза поступком плазма сечења конструкционог челика. Описан је принцип сечења плазмом, опрема и CNC машине. Такође су извршени експерименти сечења са различитим радним параметрима.

Кључне речи: сечење плазмом, CNC технологија, различити радни параметри

ABSTRACT

Plasma arc is able to cut any high thickness material, by forming incision of any configuration, and with high productivity, which does not depend of mechanical characteristics of material. Plasma cutting has ability to cut materials which are thick 250 mm to 300 mm.

Base of cutting process is local melting of metal in cutting zone, and removing melted metrial, by plasma stream.

By integration of CNC technology and plasma cutting technology, sophisticated technical system has been made. It has been controlled by information technology, and by standard CAD/CAM softwares

This paper describes how to determine the quality of the cut of stainless steel made by plasma arc cutting. The work contains description of plasma cutting method, equipment and machinery. There are also described experiments of cutting by different work parameters. There are also described experiments of cutting by different work parameters.

Key words: Plasma cutting, CNC tehnology, different work parameters

Садржај

РЕЗИМЕ	3
1. УВОД.....	6
2. ПЛАЗМА	9
2.1 Процес настанка плазме	9
2.2 Карактеристике плазме	11
3. ОБРАДА ПЛАЗМОМ.....	13
3.1 Заваривање плазмом	13
3.2 Наношење превлака плазма поступком	14
3.3 Загревање плазмом.....	14
3.4 Сечење плазмом	15
3.4.1 Процес сечења плазмом.....	15
3.4.2 Системи за обраду плазмом	17
3.4.2.1 Плазма извор напајања	25
3.4.2.2 Плазма горионици	30
3.4.3 Плазма гасови	34
4. ПОСТУПЦИ ПЛАЗМА СЕЧЕЊА	36
4.1 Плазма сечење без додатног гаса.....	37
4.2 Плазма сечење са доданим гасом	38
4.3 Плазма сечења са убризганом водом	40
4.4 Поступак сечења плазмом са воденом заштитом.....	40
4.5 Поступак сечења плазмом са повећаним сужењем плазменог лука	41
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД	42
5.1 Утицајни фактори на квалитет реза.....	42
5.2 Опрема за сечење	44
5.3 Радни материјал.....	45
5.4 План испитивања.....	47
5.4.1 Резултати експерименталних испитивања ширине реза	47
5.4.2 Резултати експерименталних испитивања угла нагиба страница реза	49
5.4.3 Резултати експерименталних испитивања храпавости реза	51
6. ЗАКЉУЧАК.....	54
ЛИТЕРАТУРА.....	55

1.УВОД

Стални развој технике довео је до непрекидног развоја производње и примене нових 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.

Обрада материјала због својих карактеристика је веома отежана. Због тога се паралелно развијају, усавршавају и уводе нови прогресивни поступци обраде веће продуктивности и економичности обраде метала. Непрекидан развој нових и усавршавање постојећих поступака обраде условио је појаву низа различитих поступака разврстаних у две основне групе: поступци механичке обраде и неконвенционални поступци обраде са и без уклањања вишка материјала.

Поступци механичке обраде имају низ предности, као што су: универзалност, технолошка флексибилност, мала потрошња енергије, висока тачност обраде и квалитет обрађене површине и сл. Управо из тих разлога поступци механичке обраде метала представљају основне поступке обраде метала

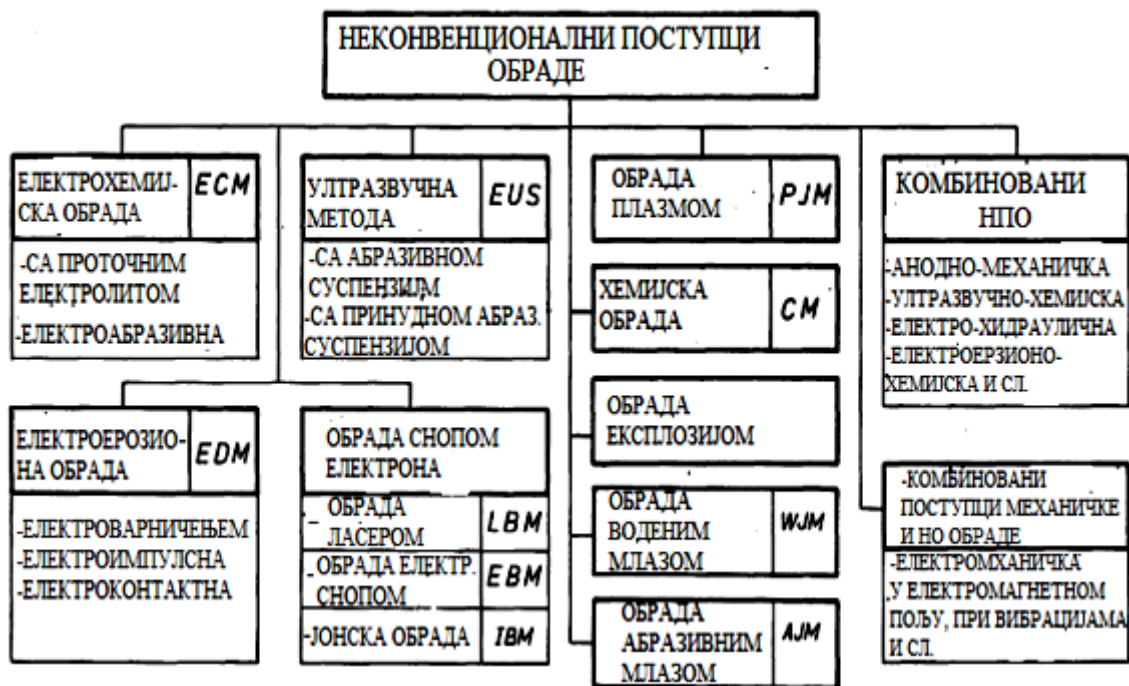
Основни поступци механичке обраде, уклањањем вишка материјала механичким путем, алатима, најчешће знатно веће тврдоће од тврдоће материјала предмета обраде су: бушење, глодање, тестерисање, провлачење, брушење, рендисање, стругање, итд.

Обрада без скидања струготине обезбеђује обраду и обликовање без или са незнатним уклањањем вишка материјала, то су поступци: обрада ливењем, обрада спајањем и обрада деформисањем.

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

Негативни утицаји механичких поступака обраде на животну и радну средину огледају се у виду буке и вибрација, стварању струготине и честичне прашине односно продуката обраде као и примена средстава за хлађење и подмазивање и других испарљивих материја [1].

Неконвенционални поступци обраде су поступци обликовања уклањањем вишка материјала различитим физичко-хемијским механизмима, коришћењем електричне, хемијске, светлосне, магнетне и других видова енергије. Прецизнија подела неконвенционалних поступака обраде дата је на слици 1.



Слика 1. Подела неконвенционалних поступака обраде, [2]

Већина неконвенционалних поступака обраде је знатно касније развијена и уведена у производну праксу у односу на конвенционалне поступке обраде резањем који имају веома дуг период развоја и примене. И поред тога, данас су многи неконвенционални поступци обраде достигли висок степен развоја, који чак ни мало не заостаје за најразвијенијим конвенционалним поступцима обраде резањем, а у неким случајевима их и превазилазе [2].

Конвенционални поступци обраде засновани су на коришћењу средине у чврстом, течном и гасовитом стању. Показало се да следеће, више, енергетско стање (тзв. четврто агрегатно стање „плазма“) омогућава подједнако успешну примену, уз броје и значајне предности.

Поступак обраде материјала плазмом је уз ласерску обраду најчешће коришћени неконвенционални поступак обраде у индустрији. Развијен је 50- их година прошлог века. Почетни недостаци нове технологије уклоњени су великим бројем побољшања и иновација, те се с временом плазма резање развило у економичан поступак.

Предности промене технологије обраде плазменим млазом су: могућност сечења свих електропроводљивих материјала, могућност сечења материјала широког распона дебљине, ниски инвестициони трошкови, висока производност, добар животни век потрошних материјала, оптимална комбинација квалитета реза, производности и трошкова, непотребна накнадна обрада површине реза код тањих и средњих дебљина лимова, итд.

Обрада материјала у плазми је подручје плазма технологијама које се интензивно развија задњих година, па је плазма нашла примену како у машинској тако и у

свемирској, пољопривредној, прерађивачкој и осталим гранама индустријама. Последњих година се ради на примени плазме и у медицинске сврхе.

У другом поглављу рада описан је процес формирања и настанка плазме као и њене основне карактеристике.

У трећем поглављу рада описани су најчешће примењивани плазма поступци, детаљно је описан процес сечења плазмом. Описане су најважније компоненте машина за обраду плазмом и приказани неки од новијих система. Представљен је CNC Hypertherm XPR300 плазма извор као и преносни Powermax 45XP и Powermax 125 плазма извори. Посебно је описан горионик и дате су карактеристике плазма гасова.

У четвртном поглављу рада описани су најчешће примењивани процеси за обраду сечењем плазмом.

Пето поглавље рада обухвата експериментална испитивања квалитета реза сеченог плазмом. Представљени су утицајни фактори на квалитет реза, као и опрема коришћена за експеримент. Дате су основне карактеристике специјалних челика (Weldox 700, Hardox 400 и Protac 500) и препоруке за њихово сечења плазмом. Урађена су експериментална испитивања ширине реза, угла нагиба страница и хрпавости при различитим параметрима.

У шестом поглављу приказани су закључци експерименталних истраживања.

2. ПЛАЗМА

2.1 Процес настанка плазме

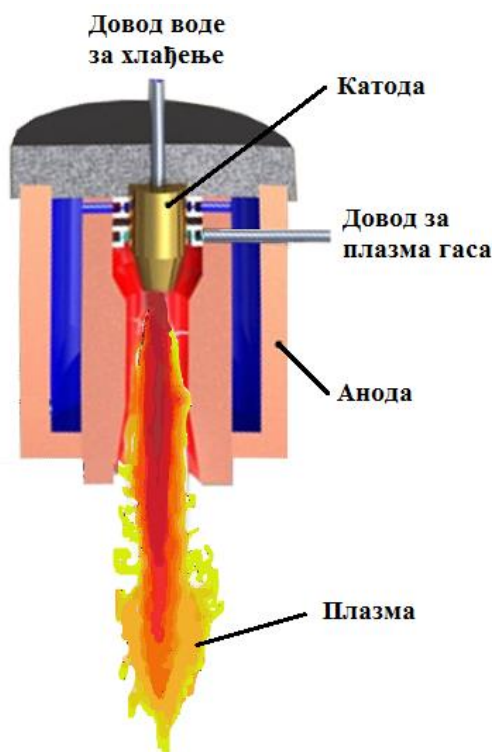
Челик и производи од челика су због својих својстава врло раширени у свакодневној употреби у индустрији. Једна од предности челика је та што је снажан и прилично једноставан за обраду, тако да производ можемо комбиновати са додатком разних адитива у складу са наменом и употребом. Још једна позитивна карактеристика је што се може у потпуности рециклирати. Међутим, његова лоша особина је оксидација, реагује с кисеоником из околног ваздуха и оксидира, временом уништавајући производ. Ово се може спречити употребом различитих заштитних средстава, које крајњи производ чине скупљим.

Додавањем хрома произведен је челик отпоран на оксидацију назван нерђајући челик. Производи од нерђајућег челика не требају заштиту од оксидације, а отпорни су и на неке друге врсте корозије. Обични челични листови се могу сећи пламеним секачима, док се нерђајући челик не може сећи пламеним секачима, јер поступак делује на принципу сагоревања или оксидације једињења гвожђа. Због тога је око 1950. развијена метода сечења плазмом из процеса заваривања ТИГ-а, стручњаци су открили да како се пречник гасне млазнице усмерава према заштитном гасу из горионика, мењају и својства лука. Запажен је ужи блок и значајно повећање температуре. Растопљени метал био је одуван великом брзином нејонизованог и јонизованог гаса. Они су првобитно развили плазму како би је користили за заваривање, развијајући тако и процес сечења.

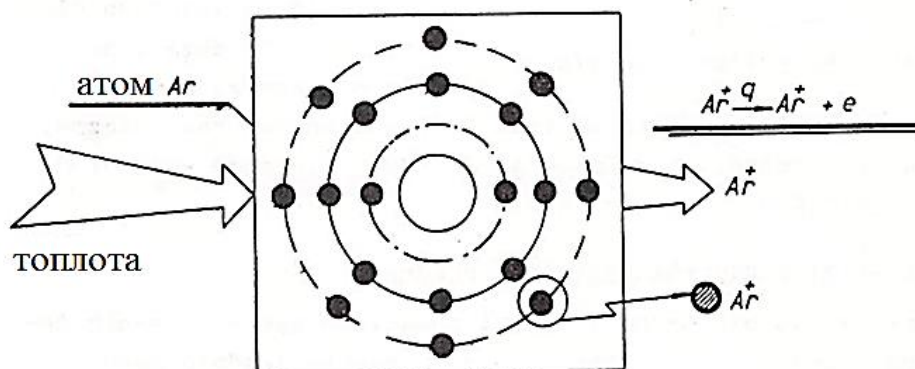
Свака супстанца може се претворити у различита физичка стања у зависности од примљене енергије. То се назива јонизацијом јер се слободни електрони и јони ослобађају између атома гаса. Плазма је такође подложна законима који се примењују на пренос електричне струје кроз металне проводнике. Ужи пресек млазнице кроз који се усмерава плазма, постаје топлији.

Најједноставнија дефиниција плазме је, да је плазма, свака материја загрејана на довољно високу температуру да се претвори у јонизовано гасно стање. У таквом стању материја се понаша по законима карактеристичним за гасове, висока температура, енергетска нестабилност, електропроводљивост, велика брзина кретања честица.

Плазма се састоји од позитивно и негативно наелектрисаних честица. Пропуштањем гасова као што су A_r , H , O , преко електричног лука, створеног између аноде и катоде, формира се буктиња/плазма (слика 2). Тако формирана супстанца – материја садржи молекуле, атоме, јоне, електроне. Јонизација (слика 3) је резултат губитка једног или више електрона из спољашње љуске атома гасова. Губитак настаје као резултат дејства спољашњих сила изазваних високом температуром или jakim електричним пољем.



Слика 2. Формирање буктиње/плазме



Слика 3. Процес јонизације аргона као плазма гаса, [2]

Услед високог степена загревања катоде долази до емисије електрона и јонизације плазма гаса. Између електрода долази до стварања честица јона и електрона различитих наелектрисања. Усмереним кретањем долази до међусобног судара наелектрисаних честица и судара са неутралним атомима и молекулама, чиме се повећава степен јонизације.

Формирање плазме може бити зависно и независно. Код зависног пражњења електрични лук настаје између електроде и предмета обраде, а код независног између аноде и катоде унутар плазма горионика. У условима зависног пражњења предмету се предаје знатно већа количина топлоте, што је значајно код производних операција које захтевају одговарајуће загревање предмета обраде, нпр. сечење. Независни лук обезбеђује за 30% веће температуре лука плазме, али је интензитет топлотног флукса знатно нижи [2].

2.2 Карактеристике плазме

Неке од основних карактеристика плазме су: брзина јонизованих честица, температура лука плазме, степен јонизације, енталпија.

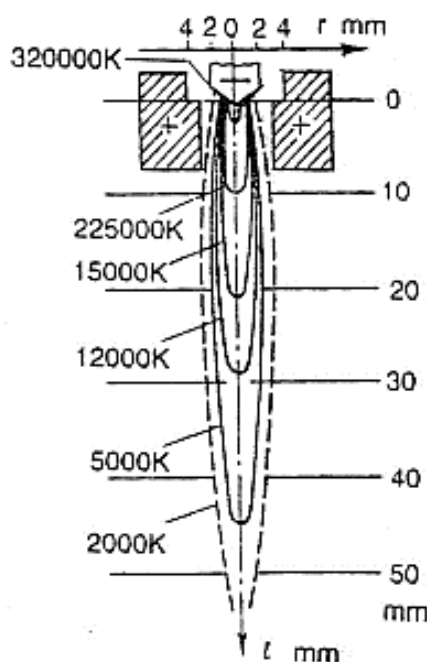
Брзина кретања јонизованих честица у струји плазме представља се формулом:

$$V = \frac{0,8 * I * \sqrt{\rho}}{r} \text{ [m/s]},$$

где је:

- I [A] - јачина електричне струје;
- ρ [бр. атома / cm^3] - густина плазме гаса;
- r [cm] – полупречник активне површине катоде.

Температурно поље снопа лука плазме (слика 4) карактерише висока температура појединих зона. Сноп лука плазме се смањује у млазници услед топлотног „PINCH“ ефекта. Сабијањем плазма гаса у млазници, сноп плазме се одваја од зидова чиме се смањују топлотни губици и постиже стабилизација плазме. Неуједначеност температура у луку плазме је неповољно, с обзиром да битно утиче на квалитет и тачност обраде.

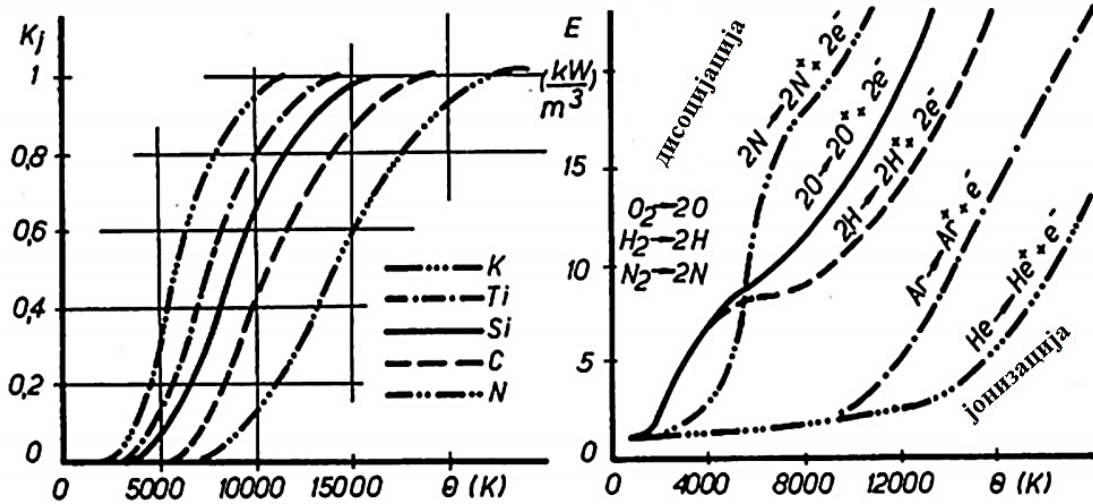


Слика 4. Расподела температура у струји плазме (r -радијус, l -дужина), [2]

Јонизација је процес у коме при судару два атома или молекула долази до откидања електрона из електронског омотача једног од њих што резултује стварањем позитивног јона и слободног електрона. За појаву јонизације је потребно да енергија бар једне од честица буде већа од енергије јонизације, за већину атома енергија јонизације износи око 10 eV (аргона 15.8 eV). Степен јонизације (слика 5) је однос количина

наелектрисаних (n_j) и неутралних (n_n) честица. Зависи од мноштва параметара, код ниско температурне плазме креће се у границама од 0 – 100 %:

$$K_j = \frac{n_j}{N_n} 100 = 0 - 100\%,$$



Слика 5. Зависност степена јонизације и енталпије плазме од температуре, [2]

Једначина стања, карактеристична за обраду плазмом, има облик:

$$p = nR\theta / N [\text{Pa}],$$

где је:

- $n = n_e + n_j + n_n$ - укупан број наелектрисаних електрона, јона и неутралних честица,
- $R=8,31$ [J/mol] универзална гасна константа;
- θ [K]- температура;
- $N = 6,02 \cdot 10^{23}$ [1/mol] – Авогадов број.

Енталпија плазме највише зависи од температуре и врсте примењеног плазма гаса. Код молекуларних гасова долази до оштрог раста енталпије услед дисоцијације молекула, да би након тога раст био резултат јонизације гаса. Из тих разлога, код технолошких операција код којих нису потребне температуре изнад 10000 K користе се гасови азот, водоник, кисеоник, ваздух као плазма гасови. Док се за веће температуре користе гасови као што су аргон, хелијум [2].

3. ОБРАДА ПЛАЗМОМ

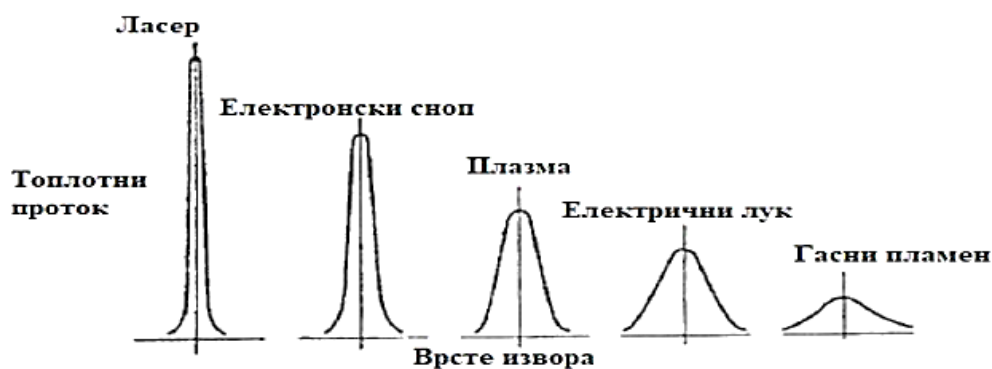
Обрада плазмом се користи за реализацију производних операција које захтевају високу концентрацију топлотне енергије као што су заваривање, загревање, сечење. Деловањем топлотне и кинетичке енергије лука плазме, при удару о површину предмета обраде долази до развоја врло високих температура које изазивају интензивно растапање, а делимично и испаравање материјала предмета обраде. Растопљени материјал се уклања експлозивним деловањем унутрашњих хидродинамичких сила, као и јаком струјом гаса плазме. Постоје и поступци који користе такозвану нискотемпературну плазму као што је поступак наношења превлака.

3.1 Заваривање плазмом

Заваривање плазмом у поређењу са другим поступцима, обезбеђује већу дубину уваривања, мању ширину шави, мању зону термичког утицаја, већу брзину заваривања и побољшање квалитета шави.

Плазменим заваривањем могу се једним пролазом заварити елементи дебљине и до 20 mm. На тај начин се обезбеђује суштинско повећање производности, смањење деформација и повећање поузданости завареног споја. Плазмом се могу заваривати и елементи веома мале дебљине од 0,025 до 1 mm, при чему јачина струје не прелази 20 А, поступак се онда назива заваривање микроплазмом.

На слици 6 дат је приказ плазменог лука у односу на друге изворе.



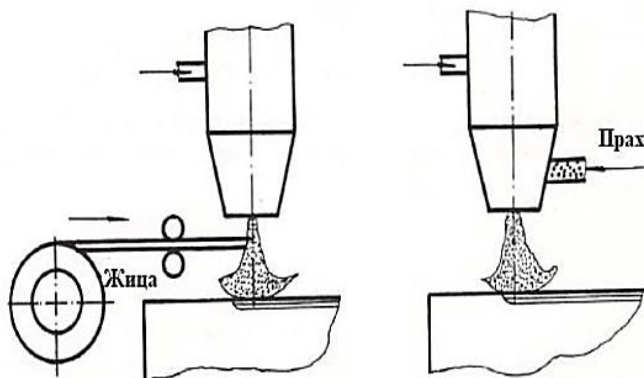
Слика 6. Концентрација заваривачких извора топлоте, [2]

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 конструкциони челици, легирани челици, нерђајући челици, ватроотпорне легуре, легуре бакра и никла итд.

3.2 Наношење превлака плазма поступком

Плазменом обрадом површина врши се уједно и уклањање површинских нечистоћа и побољшање структуре површинског слоја. Резултат обраде је повећана отпорност на хабање, повећана тврдоћа, отпорност на корозију и лепши естетски изглед површине дела. При наношењу превлака додатни материјал се у специјално обликовани плазма горионик доводи у виду праха или жице (слика 7). Материјал се у струји плазме претвара у течну стању и пада у виду капљица на предмет обраде и формира превлаку одговарајућих карактеристика [2].



Слика 7. Поступак наношења превлака плазма поступком, [2]

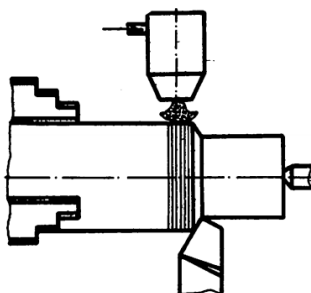
Плазмом се могу модификовати како метални делови тако и делови од полимерних материјала, гуме, композитна влакна, стакло. Као материјал превлаке користе се различити оксидни материјали, тешко топљиви метали, као и интерметална једињења и слични материјали.

Плазмени поступци који се највише примењују у индустрији су:

- обрада плазмом на атмосферском притиску,
- обрада плазмом на ниском притиску и
- нитрирање металних делова помоћу плазме.

3.3 Загревање плазмом

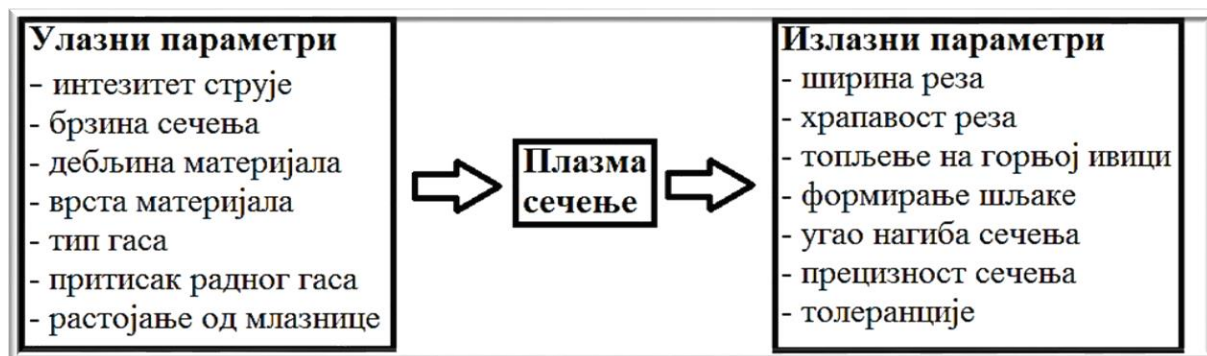
Метода се састоји у постављању плазма горионика испред резног алата и загревању зоне релативно мале ширине. Загревањем предмета обраде до температура нижих од тачке топљења, снижава се чврстоћа и повећава пластичност материјала, чиме се повећава обрадивост. Посебан значај поступка загревања плазмом (слика 8) је при обради тешко обрадивих материјала.



Слика 8. Пламено-механичка обрада, [2]

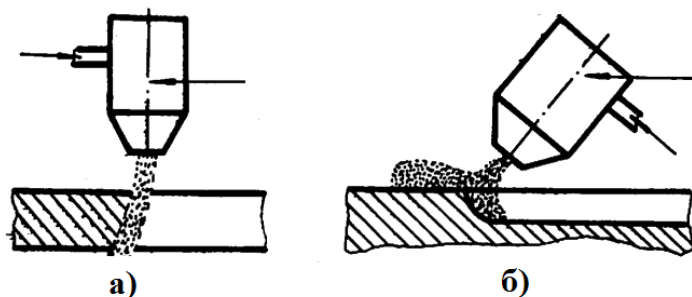
3.4 Сечење плазмом

Као и у случају других метода обраде метала, код сечења плазмом, у циљу добијања потребног квалитета веома је битно добро познавати процес, односно параметре који су укључени у процес и њихов утицај.



Слика 9. Улазно/ излазни параметри при процесу резања плазмом

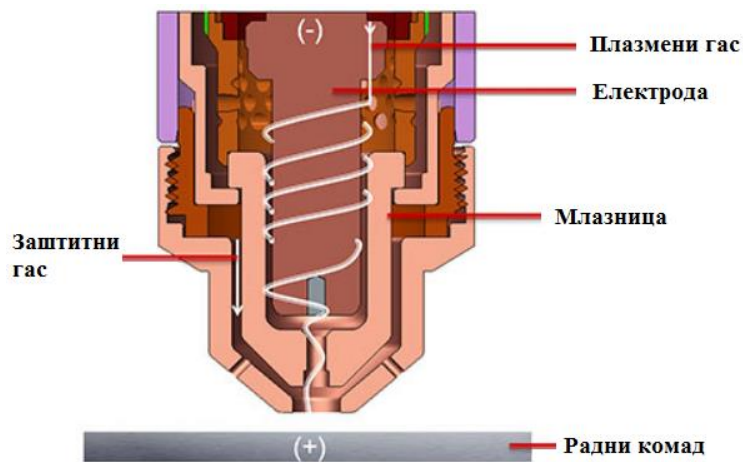
Плазма лук обезбеђује сечење материјала велике дебљине, формирање реза било које конфигурације, високу производност. Плазма поступком могуће је сечење материјала дебљине и до 250 – 300 mm. У основи процеса сечења је локално топлеење метала и уклањање растопљеног материјала под дејством хидродинамичких сила формираних струјом плазме. Разликују се два основна поступка: раздвајање и површинско сечење (усецање) (слика 10) [2].



Слика 10. Поступци сечења плазмом; а) раздвајање, б) усецање, [2]

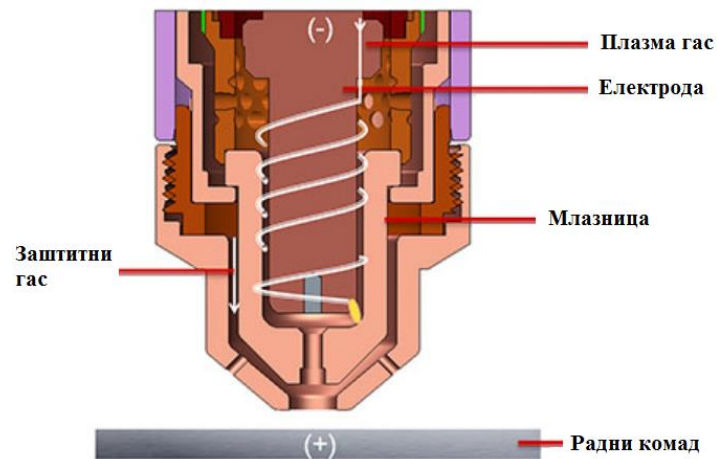
3.4.1 Процес сечења плазмом

Унутар горионика, електрода и унутрашња млазница се не додирују, већ су међусобно одвојене дистантним прстеном који садржи рупице на себи, чиме се остварује вртложно струјање плазменог гаса. Процес почиње стварањем разлике потенцијала уз истовремено пуштање гаса.



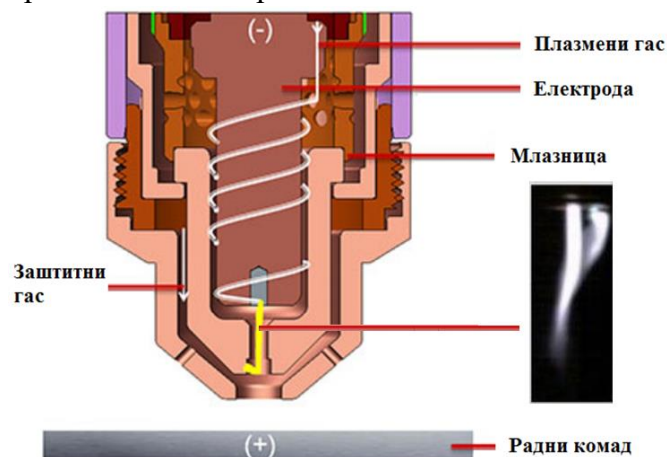
Слика 11. Почетак формирања плазме, [3]

Потом, укључује се пилот лук мале снаге, који се ствара између електроде и предмета обраде. Такође ствара се иницијални плазмени млаз.



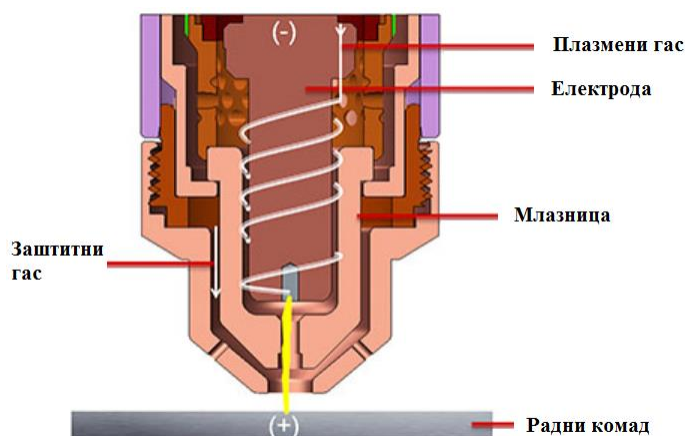
Слика 12. Почетак јонизације плазменог гаса, [3]

У тренутку када пилот лук дође у контакт са предметом обраде који је уземљен, струја прелази са електроде на радни комад. Високофреквентни модул се искључује, струјни круг се затвара и почиње стварање главног плазменог млаза.



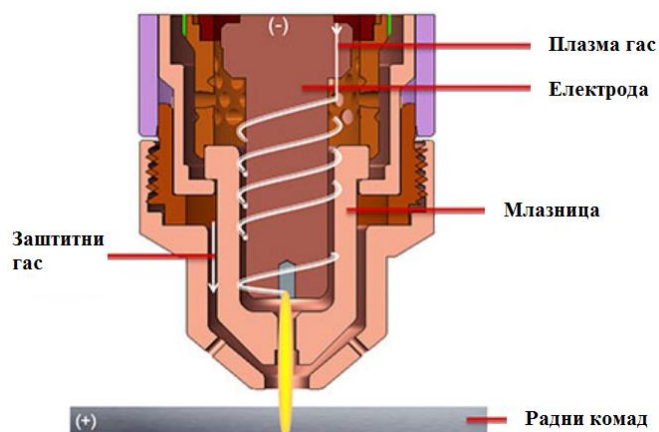
Слика 13. Стварање главног плазменог млаза, [3]

Након тога, извор једносмерне струје генерише износ ампераже потребне за резање коју задаје оператер. Када плазмени млаз додирне предмет обраде долази до пробијања и почетка сечења. Заштитни гас пролази кроз горионик, окружује млаз и на тај начин штити и горионик и површину која се сече.



Слика 14. Путања плазменог лука до радног комада, [3]

Облик горионика и пречник отвора кроз који пролази плазмени гас сужавају млаз плазме, такође заштитни гас додатно сужава млаз плазме, резултујући тиме да рез буде чистији са мањим углом савијања и без треске [3].



Слика 15. Процес сечења плазмом, [3]

3.4.2 Системи 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 заштитног гаса или течности, конструктивно решење плазма горионика и систем контроле одвијања процеса обраде и управљања.

Циљ система је да задовољи што је могуће економичније сечење у што краћем временском року. Зато је неопходно познавати предности и недостатке система, гасове и мешавине које се користе као плазма гасови, а такође треба познавати и својства материјала који се обрађује.

Постоје различите врсте плазма секача, од малих ручних који се могу користити у мањим радионицама до великих аутоматизованих ЦНЦ секача (слика 16) које користе различите индустрије. Данас није неуобичајено наћи огромне плазма резаче који раде преко роботских руку да би се направили прецизни резови на комплексним деловима. Без обзира колико велике или сложене, машине за обраду плазмом функционишу на истом принципу и сви су у основи направљени око истог дизајна [4].



Слика 16. Voortman CNC системи за обраду плазмом, [5]

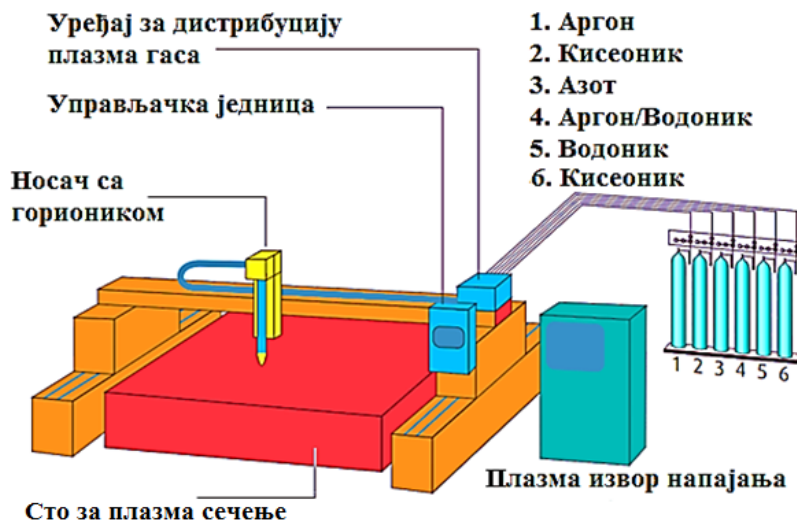
Најважније компоненте CNC систем за сечење плазмом су:

- радни сто,
- управљачка јединица система,
- уређај за контролу висине горионика,
- плазма извор напајања и
- горионик.

Радни сто је лимено корито које се састоји од неколико сегмената. Кроз радни сто пролази вентилациона цев, она има улогу да одведе гасове који настају као продукт сечења у облику дима, прашине и троске. На постољу су монтирана попречна ребра која имају носећу улогу предмета обраде. Носећу структуру машине најчешће представљају двострано постављена два “Г” профила, на којима се налази зупчаста летва спрегнута са зупчаником погоњеним АС мотором. На тај начин се омогућује кретање по X осе попречног моста заједно са гориоником. На попречном мосту налази се зупчаста летва са зупчаником, и на тај начин омогућено је кретање горионика дуж Y осе.

Управљачка јединица, садржи сигурносни прекидач, велики екран, тастере за дефинисање одређених функција, прекидаче, USB порт и прикључке каблова. Помоћу командне табле може се извршити читавање, верификација, визуелни приказ програма, подешавање параметара обраде, контрола програма, а новији системи могу садржати и самопрограмирање једноставних облика сечења.

Уређај за контролу висине служи за контролу Z осе и свих параметара који зависе од ње. И ако је машина покретна и по Z осе то је само помоћно кретање, које служи за подизање горионика до сигурносне равни пре ступања у празан ход. У литератури овакве машине се дефинишу као 2.5D машина.



Слика 17. CNC систем за плазма сечење, [6]

Могућност сечења CNC плазмом може се поделити на:

- 2D сечење плазмом;
- 3D сечење плазмом;
- сечење цеви плазмом;
- преносно сечење плазмом.

Lone Star Ranger I

CNC машина за сечење плазмом Ranger I (слика 18), америчког произвођача Lone Star. Одликује се високом прецизношћу система, са Hyperterm XPR300 системом извора чини јединствену целину са најбољим перформансама. Неке од карактеристика система су: тачност позиционирања $\pm 0,007 \text{ mm}$, прецизност $\pm 0,002 \text{ mm}$, брзина кретања система 38000 mm/min . Такође, систем има могућност одлагање старта и прикључак за два плазма горионика [7].



Слика 18. Ranger CNC машина за обраду плазмом, [7]

Voortman Steel Machinery

Voortman машине за сечење плазмом опремљене су технологијама које омогућавају брже и ефикасније сечење плазмом:

- Технологија тренутног сечења, обезбеђује брзо кретање горионика при успостави новог почетка сечења, нарочито код сечења производа са већим бројем отвора.
- Корекција одступања угла, обезбеђује правилан рез плазмом, чиме се смањује потреба за додатном обрадом.
- Инхибитор нечистоћа, приликом завршетка сечења распршује флуид на врх горионика у циљу спречавања стварања шљаке и нечистоћа на горионику, чиме продужава век трајања горионика.
- Voortman уређај за контролу висине, уређај за аутоматску контролу Z осе са брзином 365 mm/s и убрзањем од 2000 mm/s².
- Voortman's Xtensive, обезбеђује прецизно сечење отвора и унутрашњих контура како би се добили резултати слични сечењу ласером.
- Voortman машине могу радити са два горионика истовремено чиме се убрзава процес сечења.
- Када се горионик судари са исеченим предметом обраде, поновно постављање горионика може трајати неко време. Систем Voortman 3D смањује време застоја једноставним постављање горионика у лежиште.
- Системи могу бити опремљени и инкјет системом за обележавање или обележавањем плазмом.

Све машине су опремљене VACAM софтвером што значајно смањује време потребно за учење и олакшава успостављање процеса производње. Софтвер је умрежен са главним сервером што омогућава праћење производног процеса у целој компанији. Када се рез прекине, наставак сечења се може лако наставити, плазма се искључује враћа се на почетни положај прати линију реза и у тренутку када дође до места где је рез прекинут аутоматски се активира формирање плазме и сечење наставља по програму. Софтвер нуди приказ процеса у реалном ремену, као и анализу производног процеса, аутоматски предлаже најбоље решење за све предвидљиве проблеме [5].

Voortman V304

V304 CNC машина (слика 19) за сечење погодна је за сечење широког спектра материјала, укључујући конструкциони челик, нерђајући челик и алуминијум. Систем позиционирања са управљачком јединицом је одвојен од радног стола и погоњен је двоструким серво мотором. Радна ширина стола 6 m, радна дужина стола до 24 m, брзина позиционирања система по X оси 20 m/min.



Слика 19. CNC машина Voortman V304, [5]

Voortman V320

Специјално дизајнирана машина за бушење, нарезивање навоја, гасно сечење и сечење плазмом. V320 машина (слика 20) је опремљена десетоструким аутоматским мењачем алата за бушење и нарезивање. Могу се бушити отвори од 5 до 40 mm и нарезивати навоји од M6 до M36. Систем подржава плазма изворе до 400 А. Радна ширина 3 m, радна дужина 12 m. Систем има велики степен аутоматизације, радни сто са попречним ребрима замењен је системом ваљкастих транспортера у чијем склопу се налази систем за позиционирања радног комада. Испод стола за обраду налази се покретна трака која исечене делове транспортује даље у кутију, оваквим системом потреба за оператером се минимализује.



Слика 20. CNC машина Voortman V320, [5]

Voortman V325

Додатно унапређен систем за бушење, нарезивање навоја, гасно и плазма сечење. CNC машина V325 (слика 21) је опремљена са 20 различитих алата за бушење и нарезивање. Бушењем се могу добити отвори пречника од 5 до 70 mm, а нарезивање навоја од M6 до M36. Подржава извор плазме до 400 А. Радна ширина 3 m, радна дужина у зависности од потреба наручиоца може бити 6, 9 или 12 m. Систем садржи и Voortman 3D сечење под углом.



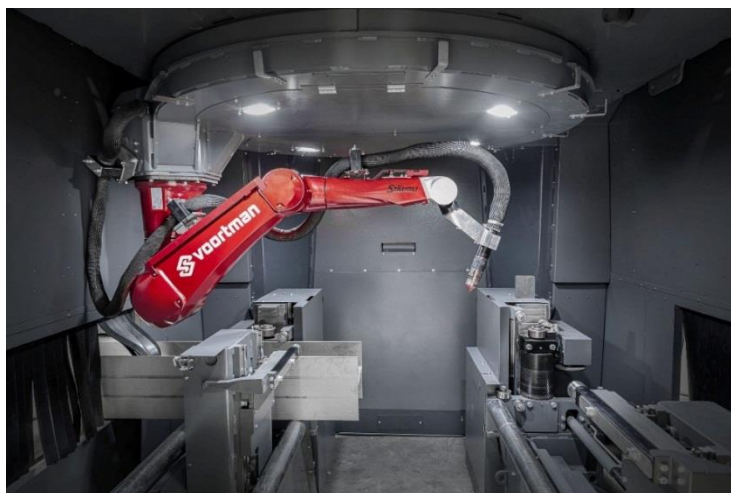
Слика 21. CNC машина Voortman V325, [5]

Voortman V807

Роботска машина антропоморфне конфигурације за сечење плазмом, може користити за сечење разних профила. Роботска рука садржи мерни сензор, током процеса сечења разлика између стварних и теоријских димензија се аутоматски компензује преко софтвера како би се осигурало најтачније сечење. V807 систем (слика 22) је опремљен окретним роботом Stäubli TX90L (слика 23) са 6 + 1 оса, што омогућава обраду радног комада са свих страна. Радна ширина система 1 m, радна висина 0,46 m, ширина машине 3,7 m, висина машине 2,7 m, дужина машине 3,1 m, тежина 8,6 t, максимална брзина померања робота 11,6 m/s.



Слика 22. CNC машина Voortman V807, [5]



Слика 23. Унутрашњост CNC машине Voortman V807, [5]

За сечење цеви плазмом потребна је велика тачност у ту сврху постоји специјална опрема за сечење разних цевастих профила. Постоји велики број модификација опреме за овакву обраду али је свима исто да поседују централизаторе цеви. Савремени системи користи све потребне технологије за квалитетно сечење како цеви мањих тако и цеви великог пречника. Разлика у односу на старије системе је прецизнија обрада, припрема површине, обрада ивица, прецизни погони за кретање.

Vanad Miron

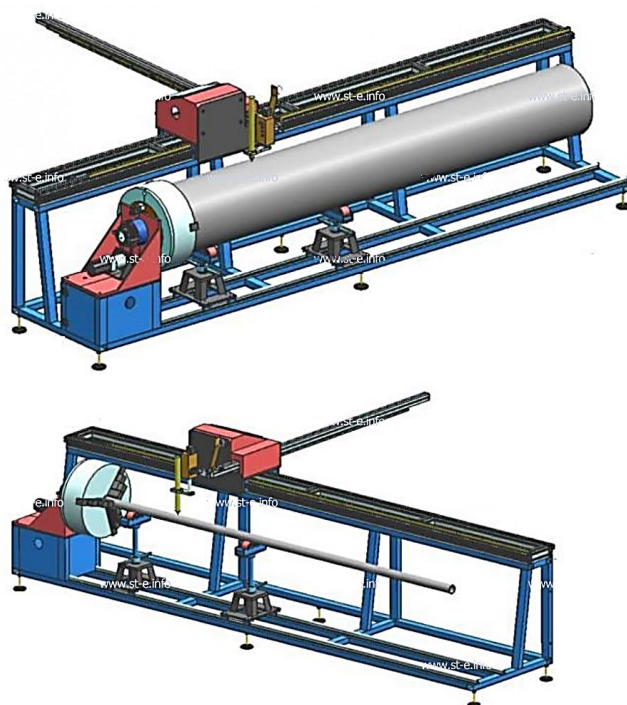
CNC машина за сечење Vanad Miron (слика 24) је уређај једноставне конструкције веома погодан за обраду цеви разних профила. Машина се може користити и за дводимензионално сечење, померањем система централизатора цеви и постављањем радног стола. Померање система се врши преко линеарних водилица по X, Y и Z оси. Bernecker & Rainer систем контроле омогућава надгледање и управљање процесом, а контрола висине се врши преко ИНТ сензора висине. Радна ширина 1,6 m, радна дужина 3 m, максимална брзина кретања 24 m/min, сечење цеви пречника 60 – 600 mm, тачност позиционирања $\pm 0,3$ mm, прецизност $\pm 0,005$ mm [8].



Слика 24. CNC машина за сечење цеви, [8]

ST-1

ST-1 машина (слика 25) је портабилна CNC машина искоришћена за сечење цеви. Машина је постављена на конструкцији где се са једне стране налази систем са тространом стезном главом за позиционирање цеви, чија је ротација омогућена је преко АС мотора. У склопу система за сечење цеви налази се и додатни држачи цеви ради боље стабилизације. Могућност система при сечењу цеви су: сечење цеви пречника 60 – 426 mm, дужина цеви максимално 6 m, брзина ротације 60 – 2000 mm/min, плазма извор напајања до 220 V [9].



Слика 25. *Машина за сечење цеви ST-1, [9]*

WURTH WSC 1

Портабилна WSC 1 CNC машина (слика 26) за плазма и гасно сечење. Одликује се брзом и једноставном заменом горioniка. Дисплеј од 7" омогућава оператеру јасан преглед функција које задаје у процесу сечења. Уношење дефинисаних цртежа се врши преко USB порта. Техничке карактеристике машине WSC 1 су: брзина позиционирања до 6000 mm/min, брзина сечења од 6 до 750 mm/min, дужна руке 2000 mm, дужина водећих шина 2500 mm. Компатабилна са Hypertherm Powermax изворима плазме [10].



Слика 26. *Портабилна ЦНЦ јединица WURTH WSC 1, [10]*

3.4.2.1 Плазма извор напајања

Извор за плазма резање је најбитнији део плазма система. Извор за плазма резање одређује врсту плазменог и заштитног гаса који се може користити при резању. Како је квалитет реза пресудан при производњи неког производа, потребно је проверити који се гасови и њихове мешавине могу користити са одређеним извором за плазма резање. Уколико постоји проблем са променом јачине струје приликом обраде или проблем са протоком гаса, век трајања система, као и квалитет реза биће смањен. Извори плазма резања који се контролишу помоћу микропроцесорског контролора имају могућност повећања јачине струје и протока гаса на почетку резања, као и могућност смањења тих параметара у току или на крају резања, чиме се продужава век трајања потрошних делова система.

Hypertherm XPR300

Hypertherm XPR300 извор за сечење плазмом представља значајнији напредак у технологији плазма сечења. Систем нуди висок квалитет сечења челика, нерђајућег челика и алуминијума, повећану брзину сечења, побољшану продуктивност и до 50% смањење оперативних трошкова. Једноставност употребе система XPR300 (слика 27) истовремено обезбеђује оптималне перформансе и велику поузданост.

У току обраде струјама велике ампераже сензорска технологија у систему може детектовати када се догоди оштећење и одмах прекинути даљи рад система. Још једна од предности је брже детектовања краја предмета обраде и тренутног прекида даљег рада, чиме се продужава век горионика и спречава оштећење предмета обраде.

Извор напајања има могућност Wi-Fi повезивања са телефоном. Помоћу ове везе оператер може надзирати рад уређаја и на даљину, а ако дође до грешке уређај шаље све податке на телефон чиме омогућава да оператер реши проблеме и без присуства [11].



Слика 27. XPR300 плазма извор, [11]

Техничке карактеристике извора плазме представљене су у табели 1.

Табела 1 - Техничке карактеристике XPR300 система

Напон отвореног кола	360 V DC
Излазна струја	300 A
Снага	66,5 kW
Излазни напон	50 – 210 V DC
Опсег радне температуре	-10°C до +40°C

Неизоставне компоненте за правилно функционисање целог система са XPR300 извором су, уређај за дистрибуцију гаса и прикључна конзола.

Контрола и регулација гасова је веома битна како би се добио квалитетан и економичан рез. Неправилни притисци могу оштетити или скратити радни век горионика и његових делова. Главни циљ уређаја за дистрибуцију гаса (слика 28) је да обезбеди оптималну контролу снабдевања оперативним гасовима. Уређај омогућава континуирано надгледање притиска гасова. Кућиште има више отвора за довод гаса, сваки улазни отвор прилагођен је за пријем одређеног гаса. Електромагнетни вентили који се налазе унутар кућишта реагује на сигнале микропроцесора и регулишу проток гаса. Када оператер подеси одговарајуће захтеве микропроцесор реагује на сигнал из управљачке јединице CNC-а, и покрећу се сви неопходни процеси за почетак обраде. Постоје три различита уређаја за дистрибуцију гаса Core, Vented Water Injection (VWI) и OptiMix.

Уређај за дистрибуцију гаса није потребно конфигурисати, сва подешавања се уређују преко управљачке јединице. Ово елиминише људски фактор и омогућава употребу процеса TrueHole.

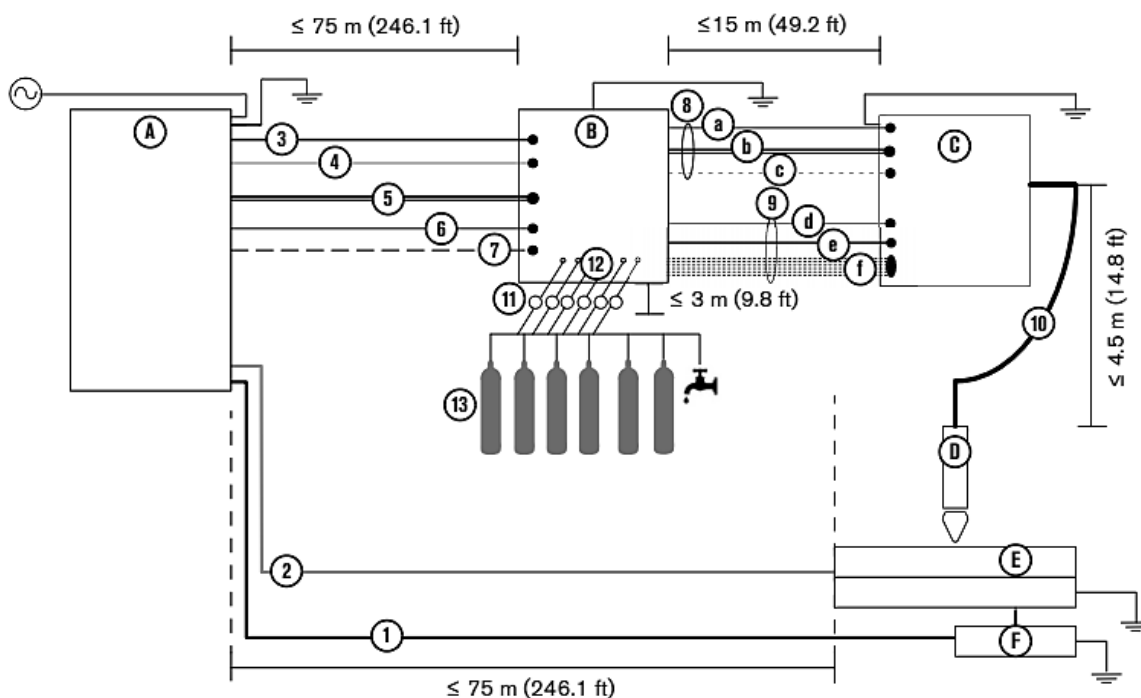


Слика 28. Уређај за дистрибуцију гаса; а) Core, б) VWI, в) OptiMix, [11]

У зависности од потреба сваки систем пружа различит скуп могућности прикључења на гас:

- Core: O₂, N₂, ваздух;
- VWI: O₂, N₂, Ar, F5, ваздух, вода;
- OptiMix: O₂, N₂, Ar, F5, H₂, ваздух и вода.

Шема повезивања XPR300 извора на CNC систем приказана је на слици 29.



Слика 29. Принципијелна шема повезивања са OptiMix конзолом, [11]

A	плазма извор напајања
B	уређај за дистрибуцију гаса
C	прикључна конзола
D	горионик
E	радни сто
F	CNC управљачка јединица

- 1) Веза између контролне јединице и извора;
- 2) Веза између радног стола и извора (катода);
- 3) CAN кабл;
- 4) Напајање;
- 5) Црево за расхладно средство (1 довод, 1 одвод);
- 6) Пилот лук;
- 7) Негативан пол;
- 8) а) пилот лук, б) црево за расхладно средство, ц) довод за воду;
- 9) д) напајање, е) CAN кабл, ф) довод за плазма гасове;
- 10) Црево са склопом каблова за прикључење на горионик;
- 11) Регулатори на боцама за гасове;
- 12) Прикључак за гасове;
- 13) Боце са гасовима.

Вода која се користи као заштита приликом обраде мора задовољавати минималне спецификације чистоће у супротном може проузроковати прекомерне насlage на малазници, што може утицати на даљу обраду и створити нестабилан лук. Регулатор притиска воде је уграђен у VWI i OptiMix конзоле, максимални притисак воде 7,9 bar.

Прикључна конзола преноси податке између уређаја за дистрибуцију гаса и горионика, одговорна је за избор гаса, дозирање гаса и надгледање притиска. Дизајн система за контролу и спајање горионика пружа вишеструке могућности уградње, на системе са више алата. Кабл горионика спаја се са конзолом преко једног EasyConnect прикључка.

Када се сече конструкциони челик дебљине 50 mm онда се као плазма гас користи аргон, уколико се користи као плазма гас кисеоник онда је максималан дебљина сечења конструкционог челика 45 mm. Систем може сећи нерђајући челик и алуминијум до 38 mm. XPR300 системом може се добити правилан рез конструкционог челика до 80 mm, нерђајућег челика до 75 mm и алуминијума до 50 mm уколико процес сечења започиње од ивице [11].

У табелама 2, 3 и 4 дате су брзине резања у зависности од дебљине материјала који се обрађује, флуида који се користе као плазма гас и заштита и јачине струје.

Табела 2 - Техничке карактеристике сечења конструкционог челика

Регулатор гаса	Плазма гас	Заштитни гас	Струја, А	Дебљина материјала, mm	Брзина сечења, mm/min
Core, VWI, OptiMix	Кисеоник	Кисеоник	30	0,5 – 5	5348 – 726
	Кисеоник	Ваздух	80	3 – 12	5582 – 1405
	Кисеоник	Ваздух	170	6 - 60	5080 – 152
	Кисеоник	Ваздух	300	12 – 25	3940 – 1950
	Кисеоник	Азот	300	50 – 80	560 - 165

Табела 3 - Техничке карактеристике сечења нерђајућег челика

Регулатор гаса	Плазма гас	Заштитни гас	Струја, А	Дебљина материјала, mm	Брзина сечења, mm/min
Core, VWI, OptiMix	Азот	Азот	40	0,8 – 6	6100 – 918
VWI, OptiMix	F5 (мешавина)	Азот	80	3 – 12	4248 - 864
OptiMix	H ₂ -Ar-N ₂	Азот	170	10 – 38	1975 – 256
	H ₂ -Ar-N ₂	Азот	300	12 - 75	2038 – 162
VWI, OptiMix	Азот	Вода	300	12 – 50	2159 - 403

Табела 4 - Техничке карактеристике сечења алуминијума

Регулатор гаса	Плазма гас	Заштитни гас	Струја, А	Дебљина материјала, mm	Брзина сечења, mm/min
Core, VWI, OptiMix	Ваздух	Ваздух	40	1.5 – 6	4799 – 911
VWI, OptiMix	Азот	Вода	80	3 – 10	3820 – 956
	Азот	Вода	130	6 – 20	2413 – 870
	Азот	Вода	300	12 – 50	2286 – 524

Преносни плазма извори

Данашњи, преносни плазма извори, већином су конструисани са инвертерском технологијом и имају одличне могућности сечења. Неки од најбољих преносних плазма извора су Hyperterm Powermax поред ових система постоји још доста извора плазме различитих произвођача али су у суштини сви системи сличних карактеристика.

POWERMAX

Група powermax преносних извора састоји се од седам преносивих система израђених да издрже велико оптерећење и у захтевним индустријским постројењима. У зависности од потреба на располагању су извори капацитета од 30 А до 125 А, којима се могу сећи материјали и преко 50 mm.

Powermax 45XP

Powermax 45XP (слика 30) опремљен је најновијом IGBT технологијом која омогућава несметан рад при великим варијацијама напона. Аутоматско подешавање притиска ваздуха технологијом Smart Sense осигурава се правилан рад уређаја. Подешавање јачине струје је лако и једноставно помоћу дигиталног дисплеја и потенциометра на кућишту апарата. Систем садржи fast onnect прикључак за брзу промену горионика. Могу се користити горионици Duramax Lock 15°, Duramax Lock 75° или Duramax Lock 180° уколико се систем користи за сечење преко CNC машина. Системом се могу сећи од ивице конструкциони челици дебљине до 29 mm или дебљине 12 mm уколико је сечење на пробој. Као плазма гасови за сечење могу се користити ваздух, азот и F5.



Слика 30. Плазма извор Powermax 45XP, [11]

Техничке карактеристике система приказане су у табели 5.

Табела 5 - Техничке карактеристике плазма извора Powermax 45XP

Напон отвореног кола	265 VDC
Излазна струја	10 – 45 А
Излазни напон	145 VDC
Препоручени радни проток ваздуха	188 L/min
Препоручени радни притисак	5,9 bar
Максимални притисак	9,3 bar
Снага	10 kW

Powermax 125

Најјачи у својој класи преносивих powermax плазма извора. Систем направљен да пружи сигурност у раду и при најзахтевнијим сечењима, интермитенца при 40 °C је 100% за струју од 125 А. При прекомерној употреби, систем за детекцију исправности електроде аутоматски зауставља напајање и тиме штити уређај, горионик и предмет обраде од оштећења. Eleven Duramax Hyamp горионици пружају разноврсност употребе система, Powermax 125 (слика 31) систем у зависности од горионика може користити за ручно сечење, портабилну аутоматизацију и роботизовано сечење. Системом се могу сећи од ивице конструкциони челици дебљине до 45 mm или дебљине 25 mm уколико је сечење на пробој. За сечење као плазма гасови се могу користити азот и ваздух [11].



Слика 31. Плазма извор Powermax 125, [11]

Техничке карактеристике система приказане су у табели 6.

Табела 6 - Техничке карактеристике плазма извора Powermax 125

Напон отвореног кола	305 VDC
Излазна струја	30 – 125 А
Излазни напон	175 VDC
Препоручени радни проток гаса	260 L/min
Препоручени радни притисак	5,9 bar
Максимални притисак	9 bar
Снага	40 kW

3.4.2.2 Плазма горионици

За реализацију производних операција обраде плазмом развијено је мноштво различитих конструктивних решења плазма горионика. Они могу бити ручно вођени или механизовано управљани. Горионици засновани на електрично лучном пражњењу могу бити са пренесеним и непренесеним луком. Детаљније о електро лучном успостављају плазма лука објашњено је у поглављу 4. Старији горионици су били засновани и на безелектродном високо-фреквентном индуктивном пражњењу. Веома високи напони потребни за успостављање лука (15000 V) често су доводили до кварова па су такви горионици скоро у потпуности избачени. Постоје и микроталасни горионици, плазма бакље овог типа заснивају се на микроталасном пражњењу, обично у резонатору, кроз који се пушта гас који ствара плазму. У овом раду су описани горионици са електро лучним пражњењем.

Електро лучни горионици могу радити у режимима једносмерне или ређе наизменичне струје. Горионик за сечење плазмом конструисан је на начин да струја и гасови који су потребни за обраду могу истовремено пролазити кроз цео систем без утицаја једне величине на другу. Главни делови горионика за сечење плазмом су: вртложни прстен, електрода, млазница, заштитна навлака млазнице, врх горионика [12].

Вртложни прстен - креира вртлог плазменог гаса и одржава га центричним. Висок интензитет гасног вртлога сужава пламени лук, повећава притисак и доприноси бољем квалитету обраде. Гасни вртлог нижег интензитета омогућава дужи век трајања електроде али и слабији квалитет обраде. Смер вртложења гаса указује на коју страну ће бити нагнут рез. Најчешће је направљен од високотемпературног полимера. На слици 32 приказан је вртложни прстен који се користи на Duramax горионцима.



Слика 32. Hypertherm Duramax вртложни прстен, [11]

Електрода - намена електроде (слика 33) је да обезбеди путању за електричну енергију из извора електричне енергије и створи резни лук. Најчешће је направљена од бакра са уметком од хафнијума или волфрама. Притисак плазменог гаса утиче на век трајања електроде, високи притисци проузрокују брже трошење, али се остварује бољи квалитет реза. Нижи притисци продужавају век електроде уз нижи квалитет реза. До истрошености електроде долази када се електрода истроши толико да се електрични лук почне одбијати од окружујуће навлаке. У тренутку када електрични лук дође у контакт с том навлаком (бакар или сребро) може доћи до уништења целе електроде.



Слика 33. Електрода хафнијум-сребром, [11]

Млазница - конструисана је тако да је њен отвор мало већи од плазменог млаза. То омогућава млазници (слика 34) да фокусира пламени млаз без неповољног утицаја. Оштећења млазнице могу бити унутрашња и спољашња. Унутрашња оштећења могу бити проузрокована прегревањем електроде, неодговарајућим протоком гасова, пуштањем превисоке или прениске струје. Оштећења спољашњег дела млазнице настају најчешће због прскања растопљеног метала приликом обраде на малој удаљености горионика од предмета обраде, спољашња оштећења могу настати и приликом успостављања електричног лука између електроде и предмета обраде. Због могућих

оштећења млазница се облаже заштитном навлаком (слика 35) како би се умањила могућност оштећења и продужио век трајања, истовремено усмерава проток расхладног флуида. Поред тога улога заштитне навлаке је и да све делове држи чврсто на месту.



Слика 34. Млазница за плазма сечење, [13]



Слика 35. Заштитна навлака, [11]

Врх горионика (дефлектор) - има улогу додатног фокусирања плазменог млаза. Сужавањем лука повећава густину, брзину и енергију плазме. Врх горионика (слика 36) је направљен од бабра са отвором у средини различитог пречника, који ће се дефлектор користити зависи од јачине струје која се користи при обради [14].



Слика 36. Врх горионика, [15]

Hypertherm XPR X-Definition

Hypertherm унапредио горионик са неколико инжењерских иновација. Једно од побољшања је дводелна млазница Vortex која фокусира лук плазме повећавајући стабилност лука и густину енергије при сечењу. Конфигурација горионика омогућава да се апсорбује флукутације притиска на нижим струјама чиме се елиминише неправилан рез. Хлађење горионика у коме се флуид доводи до свих делова продужава трајање потрошног материјала.

Горионик X-Definition (слика 37) може сећи под углом до 52° без губљења на квалитету реза. За овај горионик препоручује коришћење уређаја за контролу висине са брзином кретања од 50,8 m/min. У зависности од јачине струје, одређено је и који ће се делови користити. Сви делови су слични, разлика је само у димензијама. Веома је битно користити врх и све остале компоненте за препоручену јачину струје. Уколико се користе компоненте од 80А, за сечење на струју од 40А, плазма лук се неће довољно ограничити, што ће створити лош рез. А ко се користе мањи врх на већој јачини струје доћи ће до смањења радног века делова и њихових оштећења.



Слика 37. Горионик за XPR300 систем, [11]

1 - монтажна чаура, 2 – вишеканални конектор, 3 – тело горионика, 4 – дизна за воду, 5 – електрода, 6 – вртложни прстен, 7 – млазница, 8 – заштитна навлака, 9 – врх горионика, 10 – заштитна капа.

Монтажна чаура - омогућава постављање на уређај за контролу висине и служи као додатна заштита за све доводне прикључке.

Вишеканални конектор - служи за спајање свих неопходних инсталација из прикључне конзоле у једну целину као што су: одвод расхладне течности, извор напајања, пилот лук, регулациони сензор, довод расхладне течности, заштитни флуид, секундарни плазма гас, примарни плазма гас.

Тело горионика - држи све потрошне делове у једну целину. Омогућава доток плазма гасова и заштитних флуида, доводи струју на електроду.

Дизна за воду – постављена у тело електроде има намену да омогући бржи проток флуида за хлађење [11].

Приликом обраде ручним плазма горионцима, оператер мора бити адекватно заштићен, и горионик мора имати сигурносне механизме од случајног укључивања. Такође, ергономија рукохвата треба да омогућава максималну контролу и прецизност приликом обраде. Горионик EGROCUT A 101 (слика 38 и 39) предвиђен је за плазма изворе до 140 А, при чему је интермитенца на 100 А 60%, као плазма се користи ваздух са протоком од 180 l/min. Млазница је израђена од бакра, а електрода од хафнија [16].



Слика 38. Ручни плазма горионик EGROCUT A 101, [16]



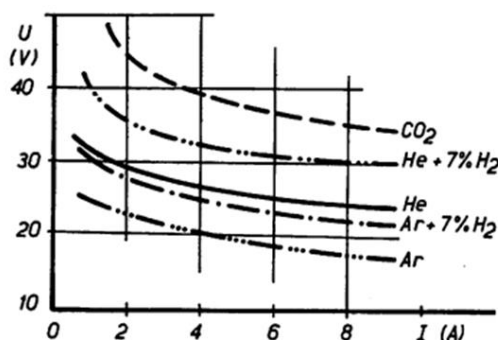
Слика 39. Пресек плазма горионика EGROCUT A 101, [16]

3.4.3 Плазма гасови

Избор гаса игра одговарајућу улогу у квалитету и економској ефикасности процеса сечења плазмом. Различити материјали и различита дебљина материјала захтевају различите гасове за настанак плазме. Да би се избегла даља обрада реза након сечења плазмом, за дати материјал треба користити одговарајући гас. Да би се постигла велика брзина сечења и добар квалитет реза, плазма млаз мора да има висок енергетски садржај и добре проводљиве особине за пренос топлоте на метал, као и велику кинетичку енергију.

Као радни плазма гасови користе се чисти гасови као што су: аргон, хелијум, азот, водоник или њихове међусобне смеше. Као стабилизирајући гасови користе се кисеоник или водоник. У пракси се најчешће користи смеша аргона и водоника, с обзиром да се постиже висока енергетска моћ плазме и са релативно ниским вредностима струје и напона. Применом снажнијих генератора, све се више користе смеше азота и водоника, азота и кисеоника или ваздуха, јер се значајно повећава моћ плазме, а снижавају се и трошкови обраде.

На слици 40. приказан је утицај електричне струје на вредност радног напона, при различитим врстама плазма гасова [2].



Слика 40. Утицај јачине ел. струје на вредност радног напона, [2]

Ваздух

Често се користи као плазмени гас, зато што је релативно лако доступан. Његовим коришћењем као плазма гас добија се добар квалитет реза на конструкционом челику, нерђајућем челику и алуминијуму. И као је веома доступан, ваздух се мора очистити од честица прашине, влаге и других контаминација. Због неадекватног квалитета чистоће, код конструкционих челика може доћи до појаве нитрације, а код алуминијума и нерђајућег челика може доћи до оксидације.

Кисеоник

Кисеоник је постао индустријски стандард за резање конструкционог челика, јер омогућава најбољи квалитет реза и најбољу брзину сечења. Недостатак кисеоника су трошкови гаса и животни век делова. Савременији кисеонички плазма системи користе се са додатком азота као стабилизатором, чиме се продужава век радних делова. Због грубљег реза на нерђајућем челику и алуминијуму препоручује се коришћење кисеоника као плазма гаса само уколико постоји додатна обрада.

Азот

Добија се веома добар квалитет реза на алуминијуму и нерђајућем челику. Квалитет реза на већини конструкционих челика је лошег квалитета због појаве нитрирања на површини као и формирања шљаке. Азот захтева већи напон код преласка у стање плазме. Може се користити у комбинацији са кисеоником или ваздухом.

Аргон – водоник

Мешавина се користи ради побољшања квалитета реза на нерђајућим челицима и алуминијуму. Не препоручује се сечење конструкционог челика. Веома је важна прецизна количина водоника у мешавини, у случају мање количине водоника добија се грубља површина реза и заобљен горњи руб реза, а у случају превише водоника на доњем рубу остаје део растопљеног метала [6].

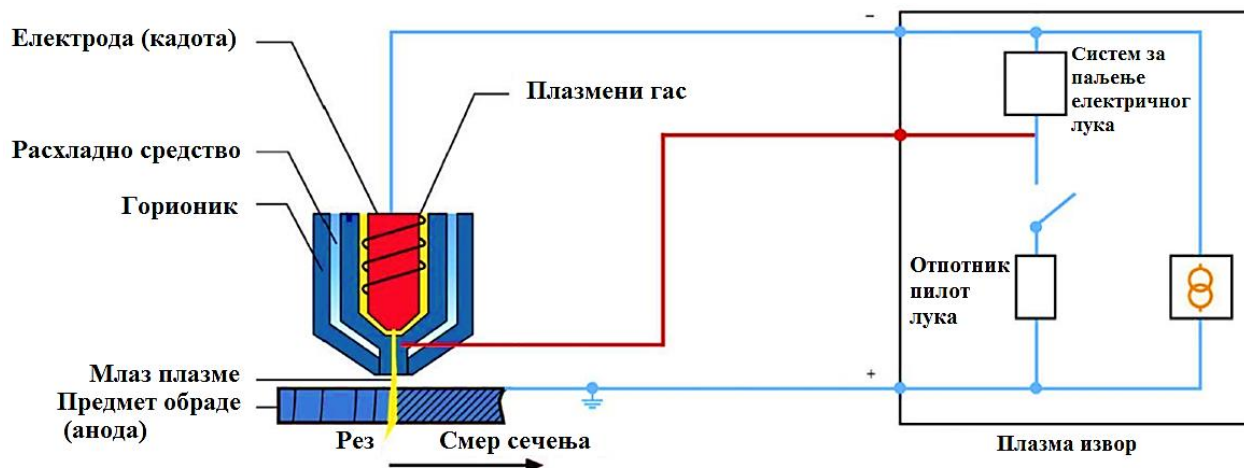
У табели 7. дата су физичка својства гасова који се најчешће користе као плазма гас.

Табела 7 - Физичка својства плазма гасова

Гас	Азот	Водоник	Кисеоник	Аргон	Ваздух
Енергија јонизације, eV	14,5	13,5	13,6	15,8	34
Енергија дисоцијације, eV	9,8	4,4	5,1	-	-
Маса атома, u	14	1	16	40	14,4
Топлотна проводљивост на 0 °C	24,5	168	24,7	16,6	24,5

4. ПОСТУПЦИ ПЛАЗМА СЕЧЕЊА

Лук плазме се успоставља између електроде спојене на негативни пол извора струје и радног комада или млазнице уређаја. У зависности на који је од ова два начина је успостављен лук плазме он се назива пренесени лук или непренесени лук (слика 41). За сечење се најчешће користи пренесени лук, којим се могу сећи сви електропроводљиви материјали.



Слика 41. Пренесени и непренесени плазмени лук, [6]

Непренесени лук

Плазмени лук се формира између електроде која је негативан пол и млазнице која је позитиван пола. Ова врста лука углавном се користи за наношење плазма превлака, загревање предмета обраде, за заваривање керамике и мање дебљих лимова и сечење лимова дебљина до 1 mm. И ако има мањи учинак прикладнији је начин за ручно сечење. Због тога што предмет обраде није укључен у струјни круг па оператер може без опасности да се наслони на предмет обраде.

Пренесени лук

Уклањањем диелектрика добијају се већа поља, честице које ударају у електропроводљиву површину предмета обраде могу избијати нове електроне који даље учествују у пражњењу. Струја се преноси преко врха електроде која представља негативан пола па све до предмета обраде који представља позитиван пол и враћа назад до извора струје. Прво се пали пилот лук чија је струја ограничена на око 50 А, која се успоставља између млазнице и електроде. Након што дотакне предмет обраде, струја протиче између електроде и предмета обраде и тада се успоставља пренесени лук. Пренесени лук има велику густину енергије и велику брзину плазменог млаза. Температура која се може постићи у плазми пренесеним луком може бити и до 25000 °C. Недостатак је теже прилагођавање ручном сечењу.

Обрада материјала плазмом може се вршити на више различитих начина у зависности од онога што желимо да добијемо као крајњи производ. Данас су у свету на располагању следеће варијанте поступка за обраду сечењем плазмом:

- сечење плазмом без додатног гаса;
- сечење плазмом са додатним гасом у атмосферским условима или води;
- плазма сечење са убризганом водом;
- плазма сечење са воденом заштитом;
- сечење плазмом са суженим плазменим луком.

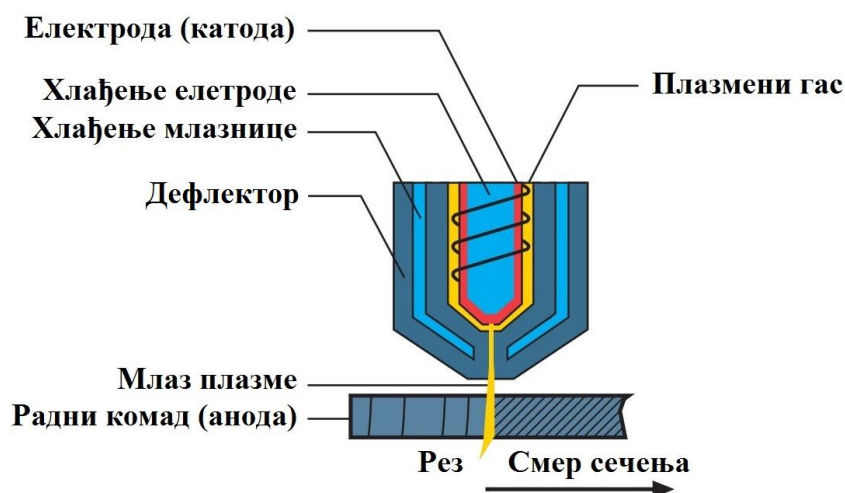
4.1 Плазма сечење без додатног гаса

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

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

За ову варијанту плазма сечења постоје многобројни случајеви примене са CNC управљаним системима за вођење плазма пиштоља, нпр. код производње панела у бродоградњи, где је сечење плазмом непосредна припрема за заваривање, затим код завршне обраде и паковања лимова у челичанама као и код роботизованог сечења цеви, I - профила и плоснатих профила са избочинама. Код плазма сечења без секундарног гаса користи се само једна врста гаса, најчешће је то ваздух, азот или кисеоник. Овај поступак углавном се користи код ручних поступака сечења и то за материјале чија дебљина мања од 16 mm и јачина струје до 100 A [6].

На слици 42. приказан је стандардни поступак плазма сечења са једним гасом.



Слика 42. Поступак обраде плазмом без додатног гаса, [6]

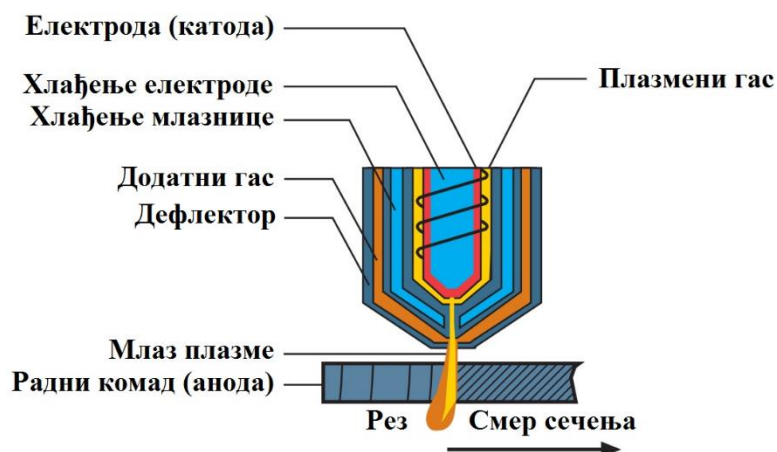
4.2 Плазма сечење са додатним гасом

Употреба плазма горионика са секундарним гасом, има предности код:

- производње мањих делова,
- честог бушења, односно започињања сечења,
- потребног високог квалитета реза, посебно код Cr-Ni челика и код алуминијума,
- сечења решетака, односно резова с прекидима,
- подводног сечења плазмом.

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

Код одређених дебљина лима бушење се изводи док пиштољ стоји, па је тако могуће сечење малих контура без почетног, односно улазног реза. сечење плазмом са секундарним односно додатним гасом приказано је на слици 43.

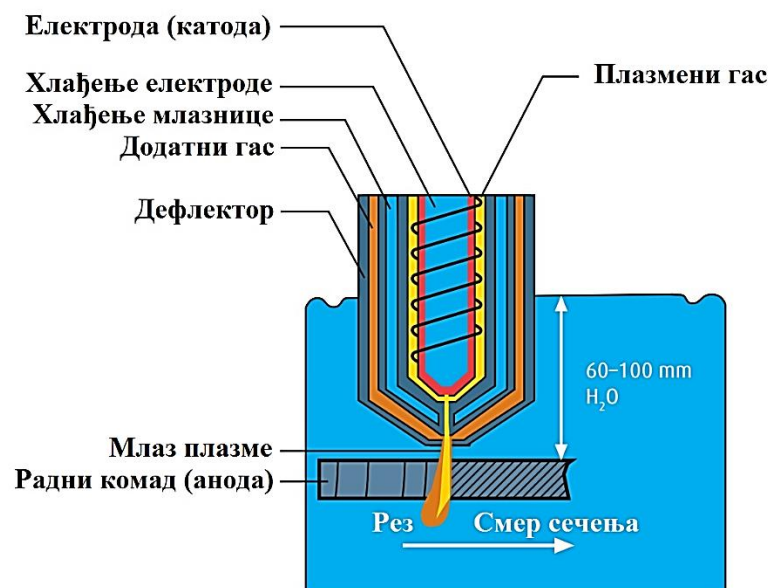


Слика 43. Плазма сечење са додатним гасом, [6]

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

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

Слика 44. приказује шему плазма резања са секундарним гасом у води. Насупрот сувом резању плазмом, код подводног резања је значајно редукована бука као и појава прашине, а ултра љубичасто зрачење лука се додатно филтрира у води.



Слика 44. Плазма резање са додатним гасом у води, [6]

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

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

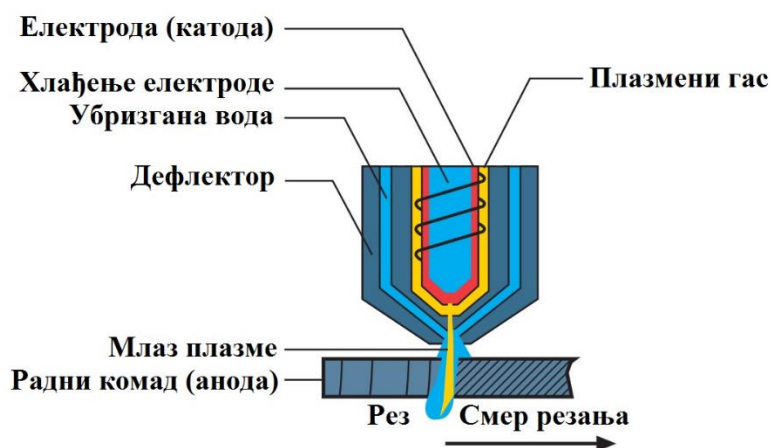
С друге стране, недостатак сечења плазмом под водом је да радни комад није видљив за време сечења и не може се видети да ли се остварује квалитетан и тражени рез, брзине сечења су смањене за 10 – 20%, а и смањена је могућност сечења већих дебљина радног комада.

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

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.

4.3 Плазма сечења 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 убризгане воде. Заштитна својства парног слоја омогућила су да цели доњи део млазнице буде израђен од керамике. Као последица тога, појава стварања двоструког електричног лука, узрочника уништења млазнице је елиминисана. На слици 45. је приказана шема поступка плазма резања са убризганом водом.



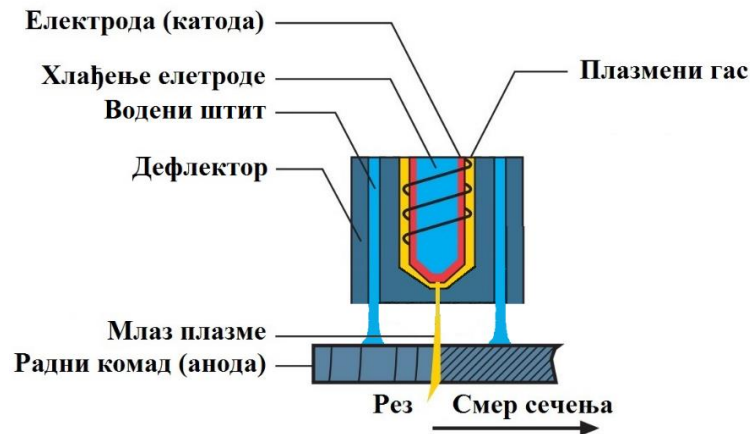
Слика 45. Поступак плазма резања са убризганом водом, [6]

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, као пламени гас може се користити и ваздух. Азот је најповољнији за коришћење због своје способности преноса топлоте из електричног лука у радни комад. Упркос високим температурама на месту где се вода убризгава у електрични лук, мање од 10% воде испарава. Остатак воде, осим из наведених разлога, служи и захлађење горње површине радног комада. Исто тако, ово додатно хлађење спречава настајање оксида на површини реза и доприноси у великој мери ефикаснијем хлађењу млазнице на месту највећег топлотног оптерећења [6].

4.4 Поступак сечења плазмом са воденом заштитом

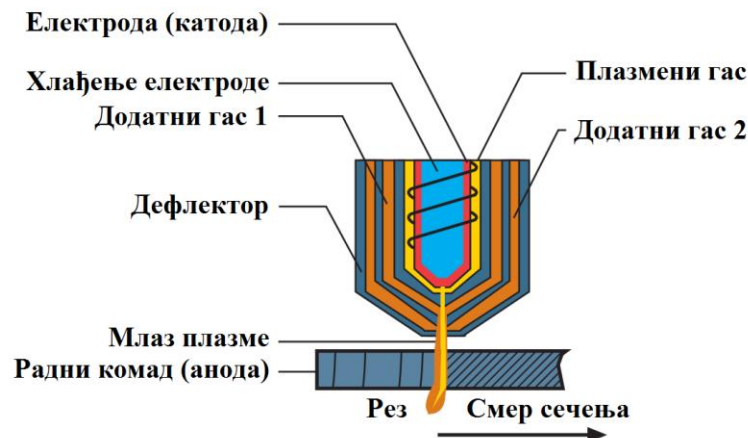
Плазма резање под заштитом воде је врста плазма резања са секундарним гасом, где се уместо заштитног гаса користи вода која пружа боље хлађење млазнице и предмета обраде као и бољи квалитет реза код резања нерђајућих челика. Поступак се користи само код машинског механизованог резања. На слици представљен је поступак плазма резања са воденом заштитом [17].



Слика 46. Поступак плазма резања под заштитом воде, [17]

4.5 Поступак сечења плазмом са повећаним сужењем плазменог лука

Овим поступком добија се високо квалитетан рез код резања тањих материјала дебљина до 12 mm при мањим брзинама. Побољшани квалитет реза је резултат коришћења технологије повећаног сужавања лука, односно повећања густине енергије електричног лука, док су мање брзине резања потребне како би се остварили прецизнији помаци код резања. На слици 47. приказан је поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука.



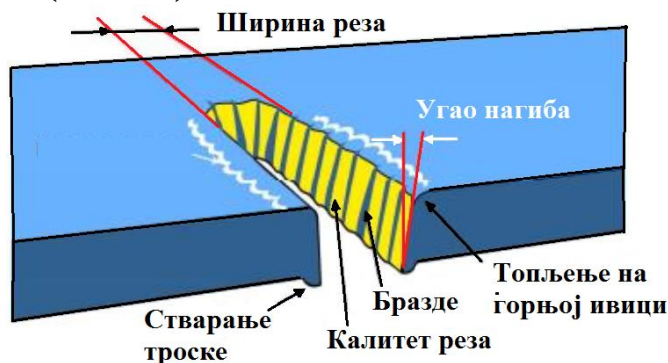
Слика 47. Поступак плазма резања са повећаним сужењем плазменог лука, [6]

Коришћењем ново развијеног поступка прецизног резања плазмом са повећаним сужењем плазменог лука одступање од правог угла значајно се редукује. Технологија омогућује добијање приближно вертикалних површина реза за дебљине лимова од 0,8 до 12 mm и тиме постизање значајно веће тачности. Тачност 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 капљицама растопљеног метала које настају због штрцања приликом бушења рупа. За многе примене, висок квалитет реза и прецизности, која се постиже овом технологијом, представља што се трошкова тиче повољнију алтернативу у односу на резање ласером. Могућност одржавања толеранција радног комада могу бити и до $\pm 0,2$ mm [6].

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

5.1 Утицајни фактори на квалитет реза

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 48).



Слика 48. Параметри квалитета код сечења плазмом, [18]

Стандард "ЕН ИСО 9013" дефинише квалитет површине преко следећих параметара:

- Одступање управности и угластости (u);
- Средња висина неравнина –храпавост ($Rz5$, Ra);
- Закошеност линија реза (n);
- Топљење на горњој ивици (r);
- Могуће формирање неравнина или шљака на дну површине реза.

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 [18].

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 технологије са повећаним вртложењем гасова, нагиб реза на левој страни материјала износи од 3° до 9° , а 1° до 3° на десној страни радног материјала. Код ламинарног струјања гасова, нагиб на обе стране радног материјала износи од 3° до 10° . 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.

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. Применом заштитне атмосфере (гас, вода) закривљеност се може свести на минимум.

Троска углавном настаје на дну реза, а зависи од брзине сечења, јачине струје као и од врсте и дебљине материјала. И превелика и премала брзина резања могу узроковати настајање троске, а тиме и додатне трошкове уклањања, због чега је нужно наместити оптималне параметре сечења. 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 [18].

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

- јачина струје,
- притисак гаса,
- брзина сечења,
- висина горионика,
- истрошеност електроде и млазнице.

Јачина струје зависи од материјала који се сече 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 А, док ће млазница пречника од 6 mm моћи подносити струју од 1000 А. 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 сечења која је премала или превелика узрок је лошег квалитета реза. Код сечења различитих материјала постоје оптимални услови који ће осигурати раван и чист рез без стварања троске. Ако је брзина сечења превелика лук ће заостајати и осциловати што ће узроковати степеничaste бразде у облику слова S, 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 истопљени материјал неће бити издубан гасом него

ће се накупљати на дну реза као троска коју је лако уклонити за разлику од троске која настаје код превелике брзине сечења.

Најбољи начин процене брзине сечења 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 [18].

За постизање доброг квалитета реза битно је и правилна регулација висине горионика од предмета обраде. Регулација висине осигурава да се горионика налази увек на истој висини од предмета обраде за време процеса сечења. Дефинисање висине сечења одвија на начин да се прво горионик приближава предмету обраде све док сензор не додирне његову површину. У тренутку када сензор додирне површину радног комада, затвара се електрични круг и контролна јединица добија сигнал да је горионик постављен на висини за пробијање. Када се заврши пробијање, горионик се помера на висину за сечење и започиње обраду.

5.2 Опрема за сечење

Сечење челика је извршено на CNC машини FlameCut-2513 (слика 49). Машина је намењена првенствено криволинијском сечењу готово свих материјала. Кретање дуж X, Y и Z оса се остварује преко високо каљених вођица rail типа. Погонски део машине састоји се од AC серво мотора и механичког преносног система. Техничка спецификација машине: ход по X оси 2500 mm, ход по Y оси 1200 mm, ход по Z оси 150 mm. Максимална брзина кретања алата 20000 mm/min, напајање 400 V.



Слика 49. CNC машина FlameCut-2513, [18]

Као плазма извор коришћен је LG 100 IGBT преносни плазма извор, посебно је погодан за сечење високо легираног челика и обојених метала, дебљина од 0,3 mm до 55 mm. Може се користити за механизовано или ручно сечење, са аутоматским подешавањем пилот лука. Као гас за сечење користи се компримовани ваздух. На слици 50. приказан је плазма извор и компресор са интегрисаним пречишћивачем и исушивачем ваздуха. Техничке карактеристике приказане су у табели 8.



Слика 50. Плазма извор и компресор SCK5 200 PLU, [18]

Табела 8. Техничке карактеристике плазма извора LG 100 IGBT

Напон отвореног кола	380 VDC
Излазна струја	30 - 100 A
Препоручени радни притисак	4 - 6bar
Максимални притисак	10 bar
Снага	5,5 kW

5.3 Радни материјал

Због немогућности да се ураде експериментална испитивања специјалних челика (Weldox, Hardox, Protac) у експерименту је коришћен само челик St 52-3 (Č0563), за остале челике дате су препоруке сечења плазмом и нека сазнања ранијих испитивања.

Weldox 700

Weldox 700 је општи структурални челик са минималном чврстоћом од 650 до 700 МПа у зависности од дебљине. Механичке карактеристике челика за одређену дебљину, представљене су у табели 9., [19].

Табела 9 – Механичке карактеристике челика Weldox 700

Дебљина, mm	R _{p0,2} MPa]	R _m , MPa	A ₅ , %	Тврдоћа по Бринелу НВ
4 – 53	700	780 – 930	14	260 - 310
53 – 100	650	780 – 930	14	260 - 310

Сечење плазмом препоручује се за лимове дебљине до 40 mm, са брзином сечења 1200 – 6000 mm/min у зависност од дебљине, при чему ширина реза може бити од 2 – 4 mm. Површина сечења је доброг квалитета, али ивице имају тенденцију скошења [20].

Hardox 400

Hardox удовољава строгим захтевима за чврстином, квалитетом, равномерношћу и стању површине. Јединствена комбинација високе тврдоће, високе чврстоће и одличне

отпорности на ударце чини hardox врло погодним материјалом за широк спектар примене. Основна механичка својства према произвођачи представљена су у табели 10, [20].

Табела 10 – Механичке карактеристике челика Hardox 400

Жилавост, $R_{p0,2}$	1000 МПа
Затезна чврстоћа R_m	1250 МПа
Издужење A_5	10 %
Тврдоћа	370 – 430 НВ

Према истраживању Subbarao Chamarthi на челичном лиму дебљине 12 mm и употребом кисеоника као плазма гаса, најбољи квалитет реза се постиже при брзини сечења од 2100 mm/min, са напоном од 125 A [21].

Protac 500

Панцирни челик PROTAC 500 легиран је са силицијумом, хромом, молибденом, титаном и бором. Садржај угљеника је ограничен на 0,3% C. Због својих механичких својстава Protac 500 се сврстао међу висококвалитетне материјале у опсегу тврдоће 480 – 540 НВ. Основна механичка својства према произвођачи представљена су у табели 11,.

Табела 11 - Механичке карактеристике челика Protac 500

Жилавост, $R_{p0,2}$	1400 МПа
Затезна чврстоћа R_m	1800 МПа
Издужење A_5	10 %
Тврдоћа	470 – 540 НВ

Сечење челика Ptorac 500 када се као плазма гас користи кисеоник, може се остварити добар квалитет реза до 50 mm, струјама од 400 A. Могу се сећи и плоче дебљине до 80 mm, али је квалитет реза знатно лошији. Ширина реза се креће у границама од 2 mm до 6,5 mm [22].

Ћ0563 (ST 52-3)

Спада у групу конструкционих челика и користи се за одговорне заварене конструкције изложене динамичким оптерећењима и ниским температурама, до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Челик ST 52-3 је челик са ниским садржајем угљеника који може бити легиран, углавном са манганом, силицијумом, хромом, никлом. Са својим ниским еквивалентом угљеника, поседује добра својства хладног обликовања. Микроструктура је феритно – перлитна, зрно ће бити ситније ако је челик након топлотног обликовања нормализован, ситнозрнастост се побољшава уз додатак алуминијума који ствара алуминијум нитрид и спречава раст зрна при каснијим загревањима. У табели 12. дат је хемијски састав на основу произвођача.

Табела 12 - Хемијски састав Ћ0563 у процентима (%)

Хемијски елемент	C	Si	Mn	S	Cr	P
Масени удео max %	0,20	0,5	1,6	0,035	0,035	0,035
Масени удео min %		0,15	0,8			0,013

Хемијски елемент	Al	Cu	Ni	Mo	V	Nb	Ti
Масени удео max %	0,20	0,5	0,55	0,13	0,005	0,028	0,01
Масени удео min %	0,015			0,004			

Испоручује се у шипкама у нормализованом или контролно ваљаном стању. Примењује се за делове машина за које је потребан челик за заваривање, покретну опрему, дизалице, носаче, шасије, сидрене вијке, клипњаче, мостове, као и грађевинарству. У табели 13. дате су механичке карактеристике челика. [23].

Табела 13 - Механичке карактеристике челика Č0563

Жилавост, $R_{p0,2}$	345 MPa
Затезна чврстоћа R_m	490 MPa
Издужење A_5	20 %
Тврдоћа	380 - 490

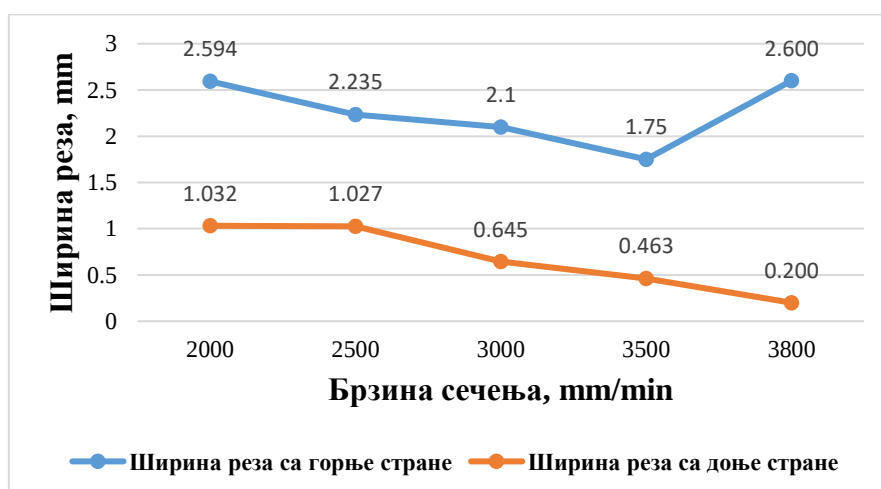
5.4 План испитивања

У оквиру овог експерименталног испитивања приказани су резултати ширене реза, храпавости и угла нагиба страница у зависности од брзине сечења и јачине струје за 60А, 80А и 100А. За струју јачине 80А урађени су додатни експерименти са променом висине горионика при обради и варијацијом притиска. Као материјал коришћен је челик St 52-3 (Č0563), 6 mm дебљине.

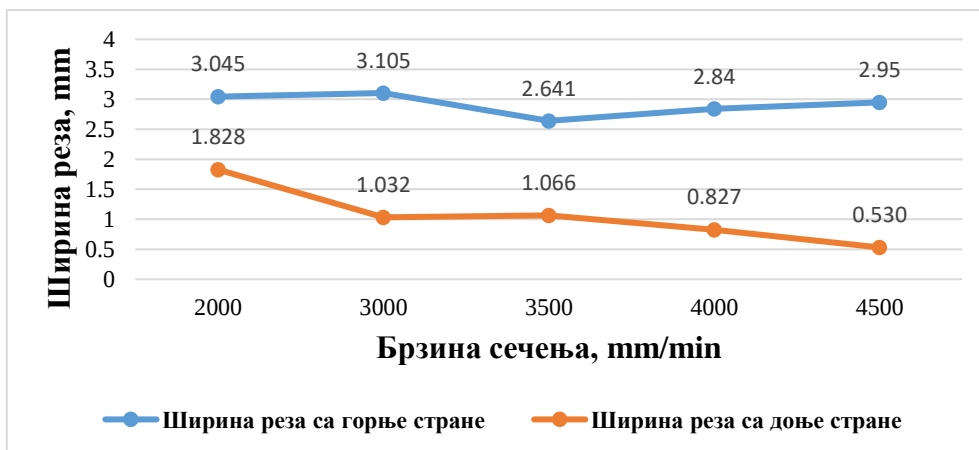
Испитивања храпавости реза извршена су на уређају Talysurf, где је добијено средње аритметичко одступање профила од средње линије профила (R_a) и збир највише висине и најниже дубине неравнине профила (R_{tm}).

5.4.1 Резултати експерименталних испитивања ширине реза

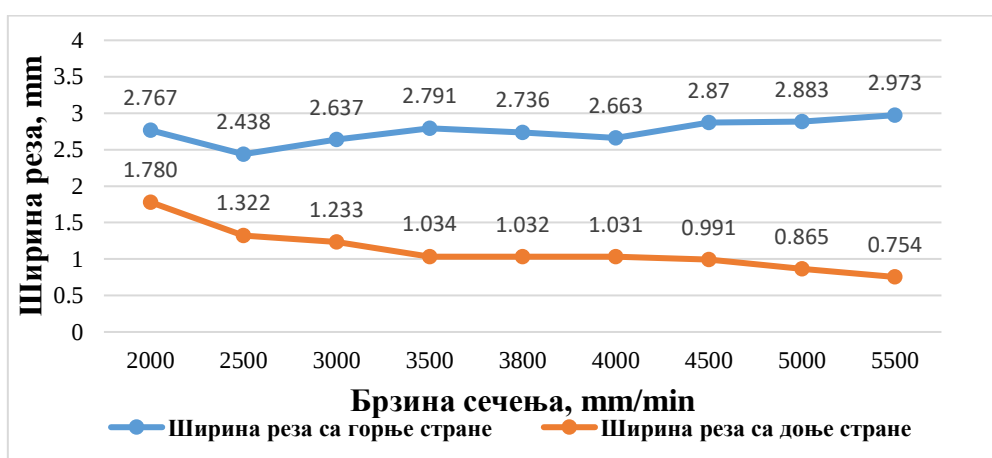
Дијаграми ширине реза при различитим брзинама сечења за јачину струје од 60А, 80А и 100А.



Дијаграм 1 - Ширина реза при $I = 60$ А, $p = 6$ bar и $H = 1,5$ mm

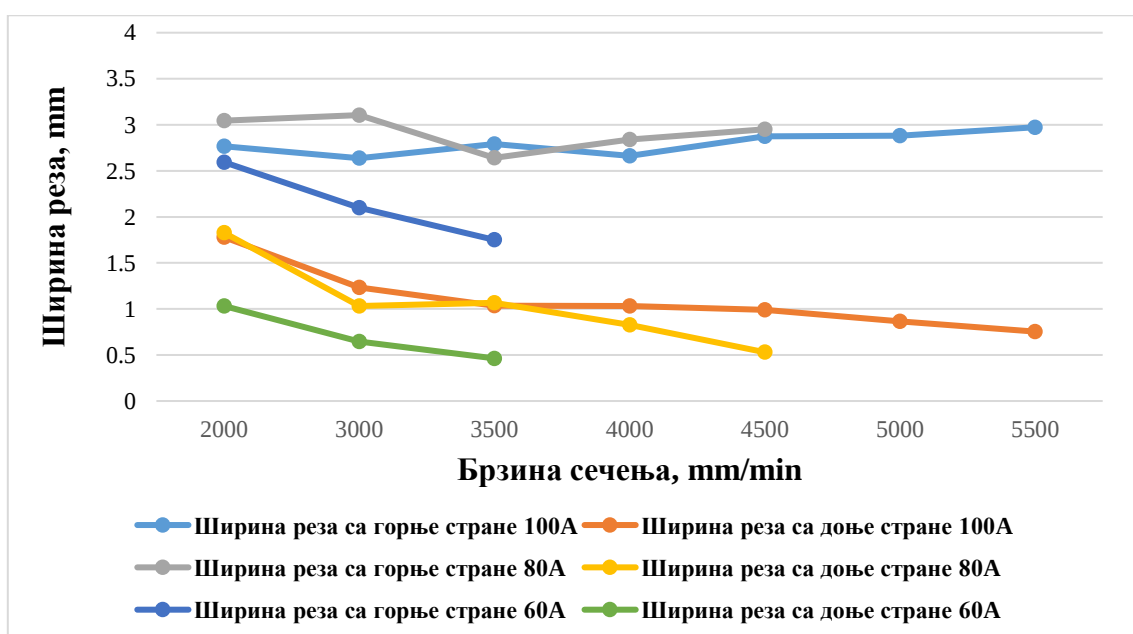


Дијаграм 2 - Ширина реза при $I = 80 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$



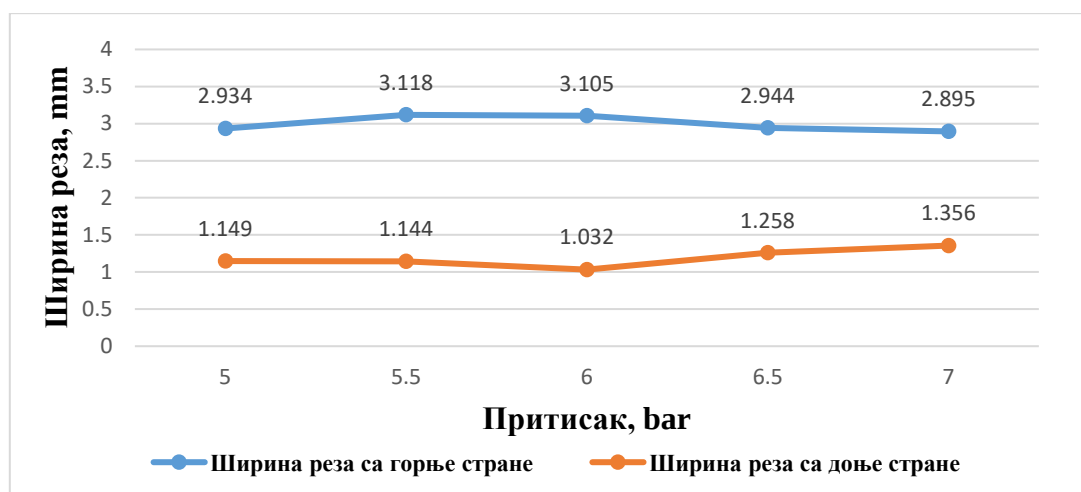
Дијаграм 3 - Ширина реза при $I = 100 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

Укупна графичка интерпретација ширине реза за струје 60А, 80А и 100А при различитим брзинама сечења.



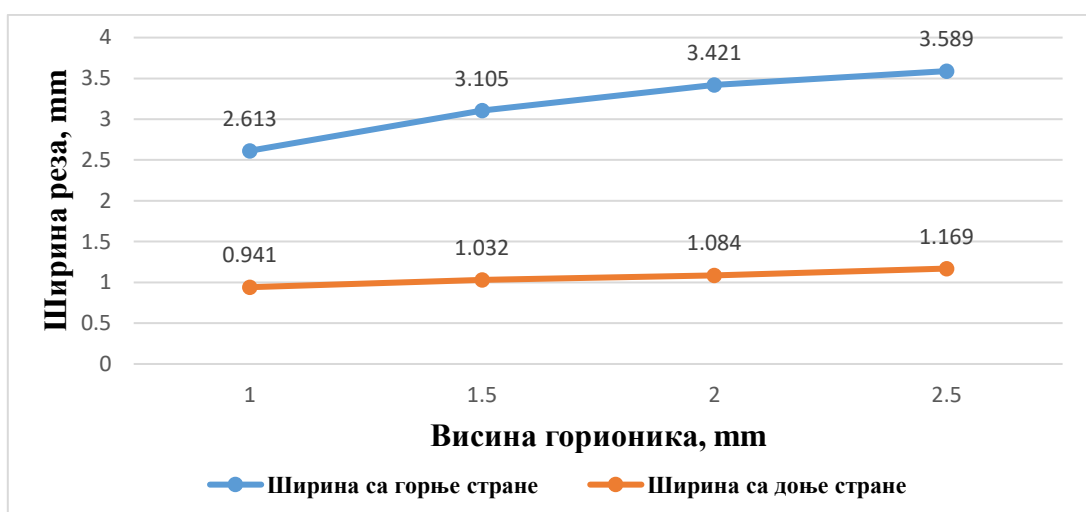
Дијаграм 4 – Ширина реза при $I = 60 \text{ A}$, $I = 80 \text{ A}$, $I = 100 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

Дијаграм ширине реза са варирањем притиска при константној јачини струје (80 А) и брзини сечења.



Дијаграм 5 - Ширина реза при $I = 80 \text{ A}$, $v = 3000 \text{ mm/min}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

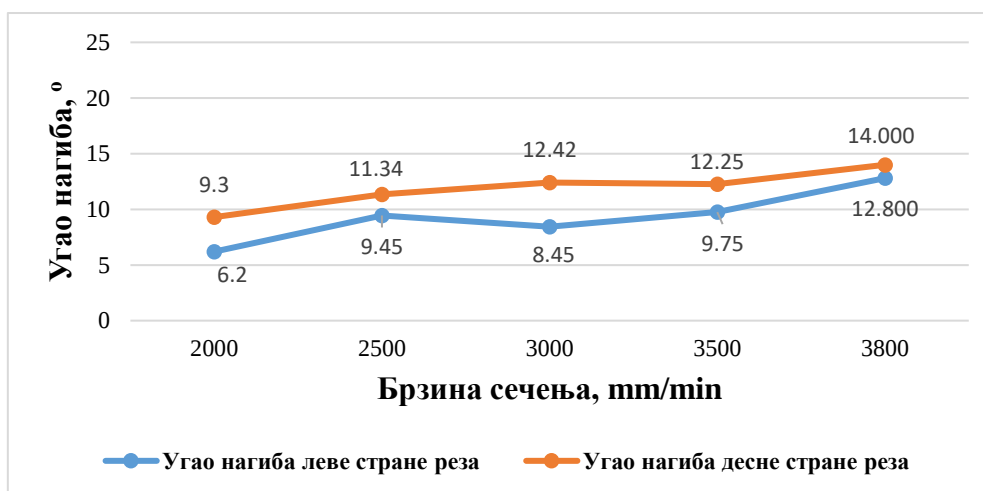
Дијаграм ширине реза са варирањем висине горионика при константној јачини струје (80 А) и брзини сечења.



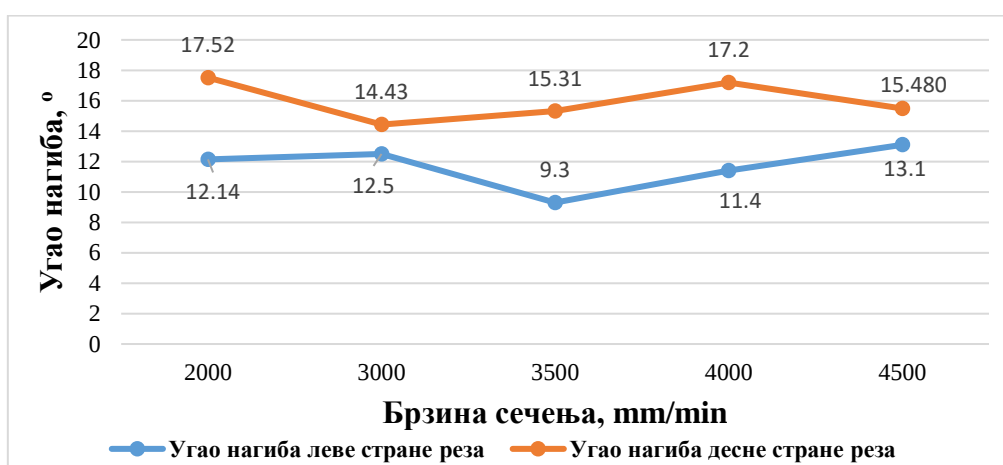
Дијаграм 6 - Ширина реза при $I = 80 \text{ A}$, $v = 3000 \text{ mm/min}$ и $p = 6 \text{ bar}$

5.4.2 Резултати експерименталних испитивања угла нагиба страница реза

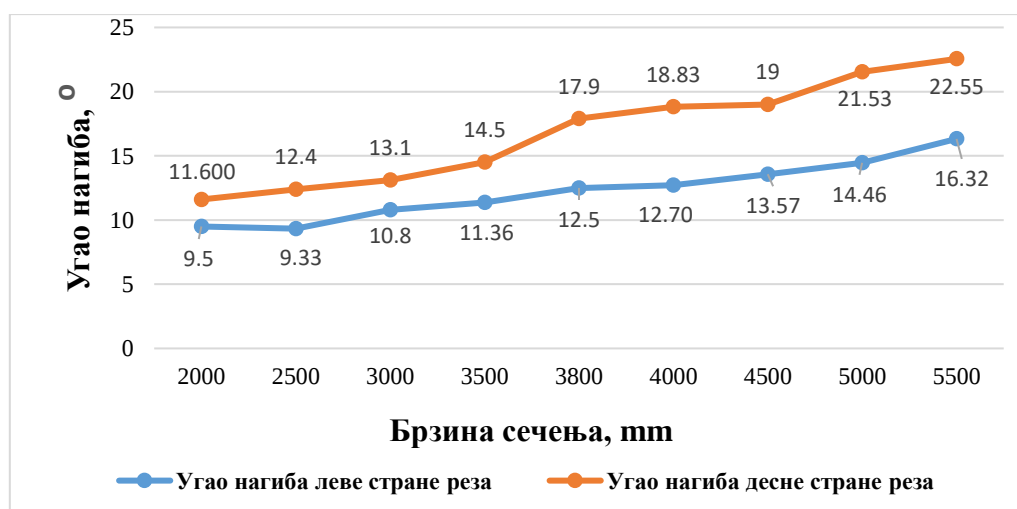
Дијаграми угла нагиба страница при различитим брзинама сечења за јачину струје од 60А, 80А и 100А.



Дијаграм 7 – Угао нагиба леве и десне стране реза при $I = 60$ A, $p = 6$ bar и $H = 1,5$ mm

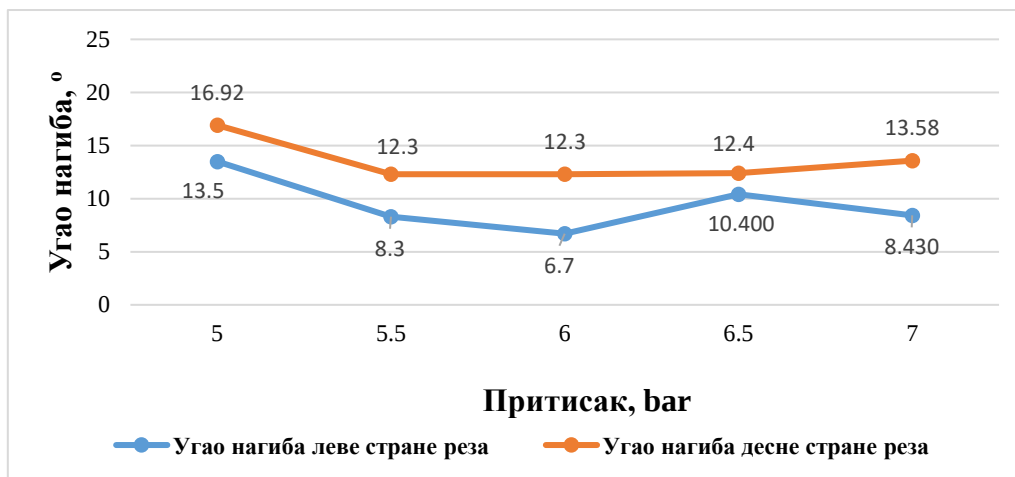


Дијаграм 8 – Угао нагиба леве и десне стране реза при $I = 80$ A, $p = 6$ bar и $H = 1,5$ mm



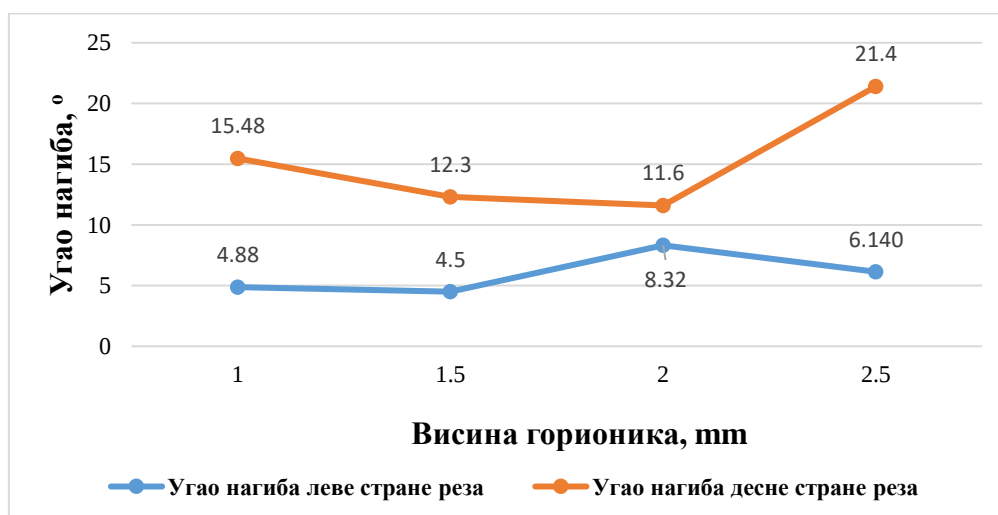
Дијаграм 9 – Угао нагиба леве и десне стране реза при $I = 100$ A, $p = 6$ bar и $H = 1,5$ mm

Дијаграм угла нагиба страница са варирањем притиска при константној јачини струје (80 A) и брзини сечења.



Дијаграм 10 – Угао нагиба десне и леве стране реза при $I = 80 \text{ A}$, $v = 3000 \text{ mm/min}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

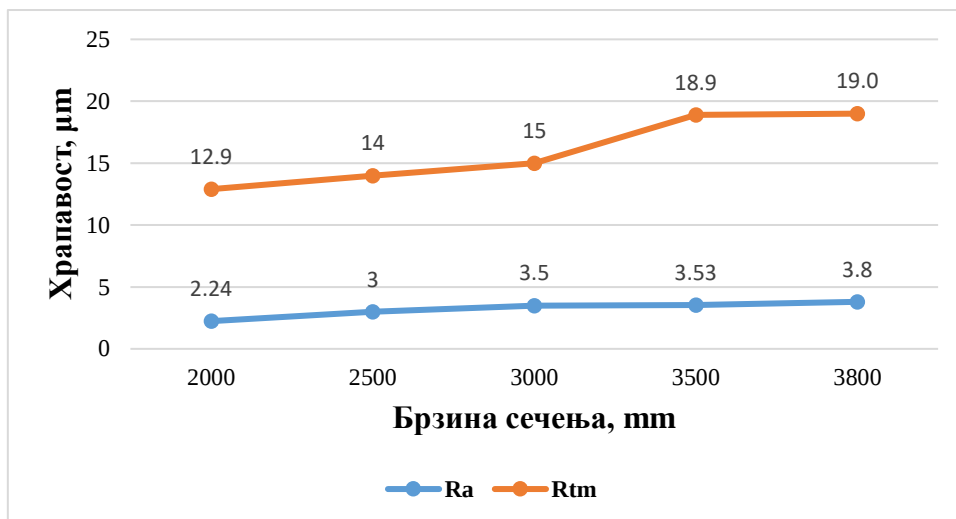
Дијаграм угла нагиба страница реза са варирањем висине горионика при константној јачини струје (80 A) и брзини сечења.



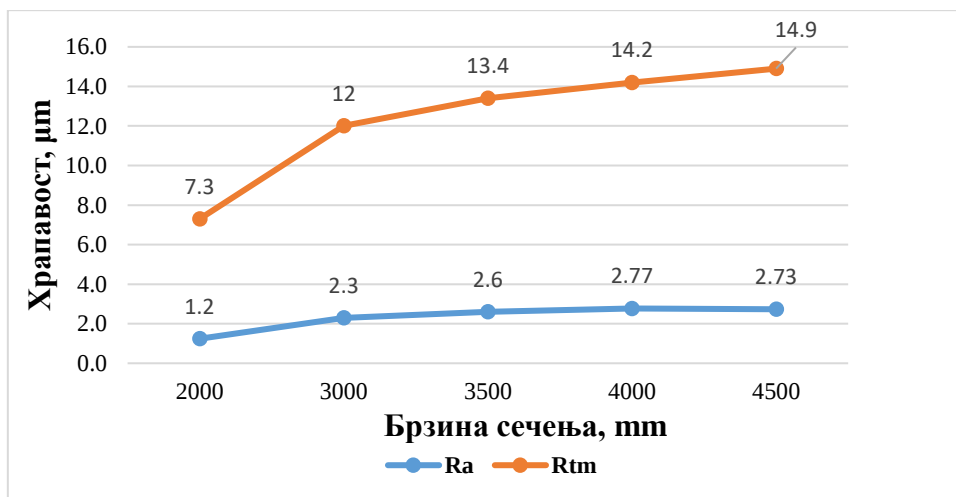
Дијаграм 11 - Угао нагиба десне и леве стране реза при $I = 80 \text{ A}$, $v = 3000 \text{ mm/min}$ и $p = 6 \text{ bar}$

5.4.3 Резултати експерименталних испитивања храпавости реза

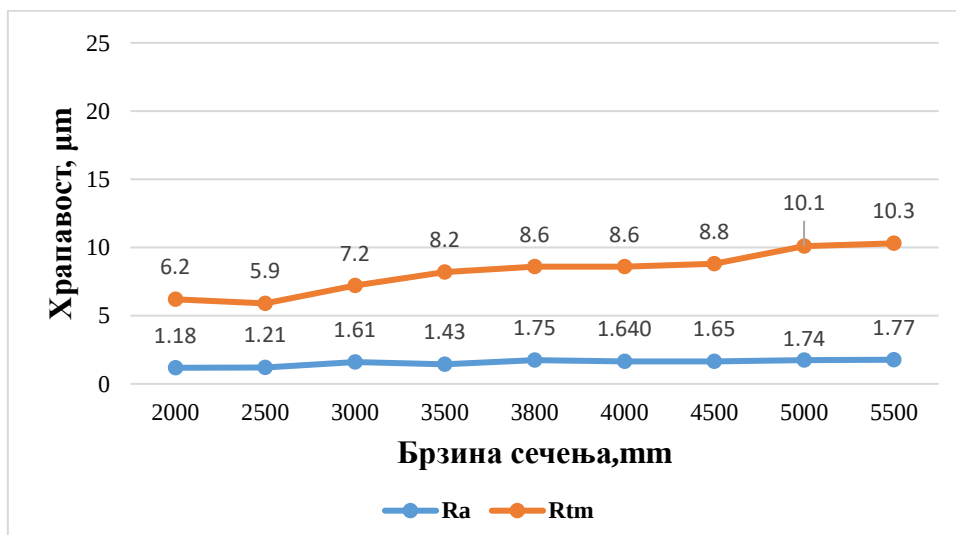
Дијаграми храпавости површине реза при различитим брзинама сечења за јачину струје од 60A, 80A и 100A.



Дијаграм 12 – Храпавост реза при $I = 60 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

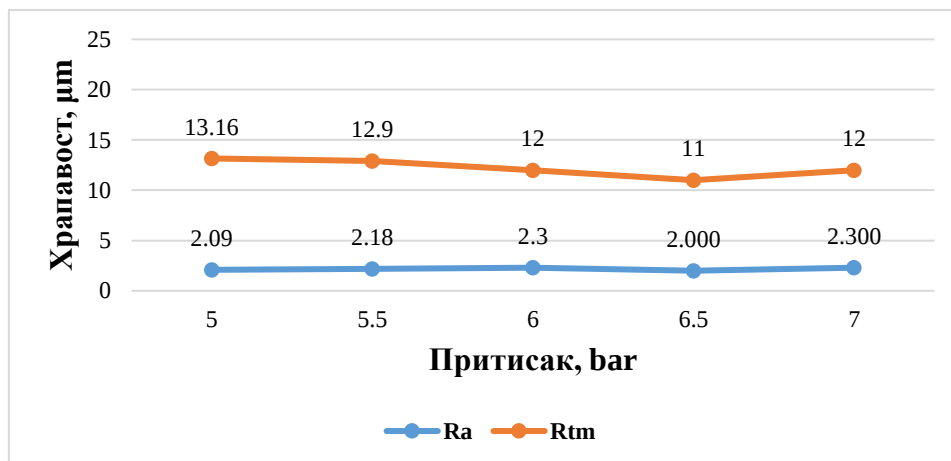


Дијаграм 13 – Храпавост реза при $I = 80 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$



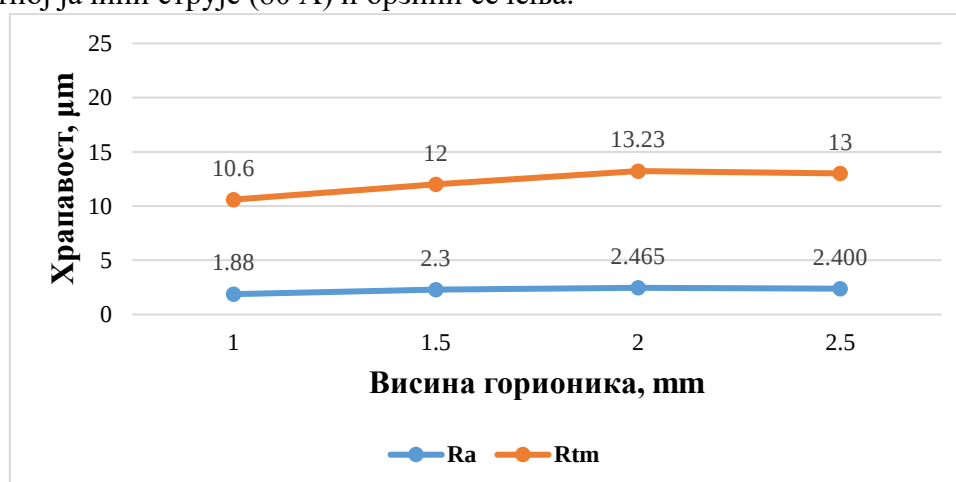
Дијаграм 14 – Храпавост реза при $I = 100 \text{ A}$, $p = 6 \text{ bar}$ и $H = 1,5 \text{ mm}$

Дијаграм храпавости површине реза са варирањем притиска при константној јачини струје (80 A) и брзини сечења.



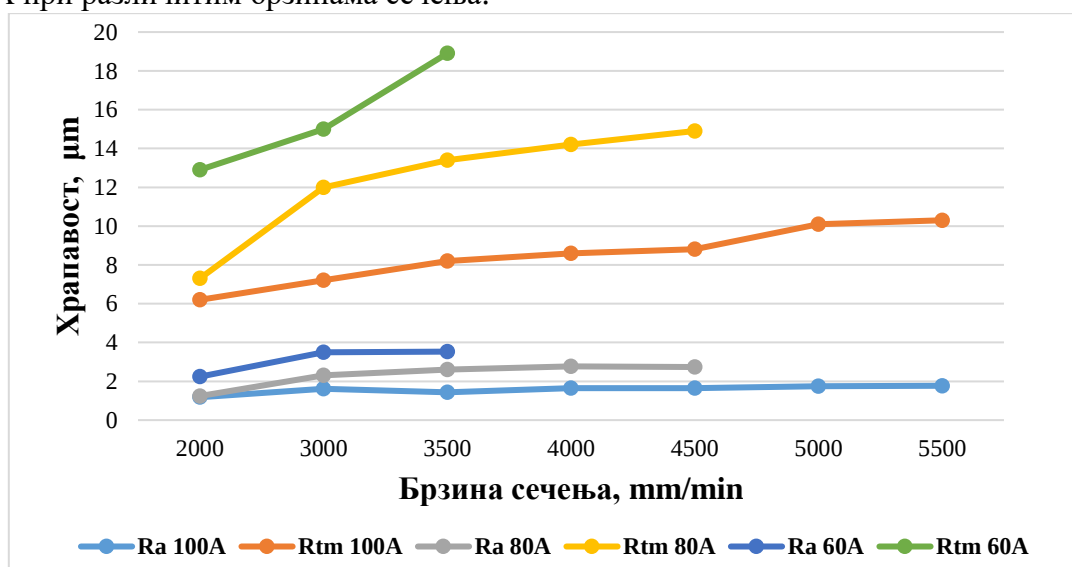
Дијаграм 15 – Храпавост реза при $I = 80 A$, $v = 3000 mm/min$ и $H = 1.5 mm$

Дијаграм храпавости површине реза са варирањем висине горионика при константној јачини струје (80 A) и брзини сечења.



Дијаграм 16 – Храпавост реза при $I = 80 A$, $v = 3000 mm/min$ и $p = 6 bar$

Укупна графичка интерпретација храпавости површине реза за струје 60A, 80A и 100A при различитим брзинама сечења.



Дијаграм 17 – Храпавост реза при $I = 60 A$, $I = 80 A$, $I = 100 A$, $p = 6 bar$ и $H = 1.5 mm$

6. ЗАКЉУЧАК

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

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

Повећањем брзине сечења и смањењем јачине струје смањује се ширина реза до одређене границе. Превелика брзина резултира заостајањем, осцилацијама и нестабилнијим млазом плазме што може довести до тога да млаз не пробије у потпуност материјал што је случај са струјом од 60А и брзинама преко 3500 mm/min. Струјом од 80А, при брзини од 2500 mm/min постиже се најбољи однос горње и доње стране реза, а даљим повећањем брзине приметан је већи пад ширине на доњој страни. Струјом од 100А при брзини од 2500 mm/min долази до пада ширине реза, даљим повећањем брзине ширина реза расте, при брзинама већим од 5500 mm/min не долази до потпуног пробоја. Превелика или премала брзина доводи до стварања троске на излазу премета обраде, при чему је троску која настане при већим брзинама теже уклонити.

Када се користи технологија са повећаним вртложењем гаса, нагиб реза ће бити већи на једној страни. У зависности да ли је вртложење у смеру казаљке на сату или супротно одређена страна ће имати већи угао нагиба. Приликом обраде долази и до знатног утицаја топлоте на предмет обраде, чиме се ствара већи позитивни угао.

Анализом површине реза уочено је да премала или превелика брзина имају за последицу лош квалитет реза. Као што је већ речено превелика брзина може имати и за последицу да млаз не пробије предмет обраде. Ако је брзина сечења мала, ширина реза ће бити већа, а истопљени метал неће бити одуван гасом већ ће се накупљати на дну реза, у овом случају троску је тада лакше уклонити.

Из резултата храпавости при струји од 100 А и брзини сечења 2500 mm/min вредности храпавости Ra и Rtm су најоптималније. Варирањем притиска при струји од 80 А, најбољи резултат храпавости се постиже при притиску од 6,5 bar. Висина горионика такође има значајан утицај на храпавост, повећањем висине горионика вредности Ra и Rtm расту.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Недић М., Лазић М.: Производне технологије-обрада метала резањем, предавања, Факултет инжењерских наука Крагујевац, 2007.
- [2] Лазић, М. (1990). Неконвенционални поступци обраде. Београд: Научна књига.
- [3] How a Plasma Cutter Works. [Интернет] Доступно на: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx> [приступљено 17. јун 2020].
- [4] manufacturingnetwork. What is CNC Plasma Cutting. [Интернет] Доступно на: <https://www.manufacturingnetwork.com/knowledgebase/view/36> [приступљено 27. јун 2020].
- [5] Voortman CNC machinery. Plasma cutting. [Интернет] Доступно на: <https://www.voortman.net/en/products/machinery/plasma-cutting> [приступљено 27. јун 2020].
- [6] Chuck L. Plasma Arc Cutting, Tips for optimising cut quality. Welding Design and Fabrication, September 1997. [Интернет] Доступно на: <https://www.boc-gas.co.nz/en/legacy/attachment?files=tcm:y435-68107,tcm:435-68107,tcm:35-68107> [приступљено 10. јул 2020].
- [7] Lone Star, Ranger CNC Plasma Table with the Hypertherm XPR300 Plasma Cutter. [Интернет] Доступно на: <https://lonestarcuttingsolutions.com/products/hypertherm-xpr300-high-definition-plasma-cutter.html> [приступљено 15. јул 2020].
- [8] Gem trade, CNC машина Vanad MIRON. [Интернет] Доступно на: <http://www.gemtradedoo.com/cnc-masina-vanad-miron> [приступљено 15. јул 2020].
- [9] Сварочные технологии, АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕЗКИ ТРУБ С ЧПУ ST-1. [Интернет] Доступно на: <https://st-e.info/svarochnoe-oborudovanie/oborudovanie-dlya-plazmennoy-rezki/ustanovka-dlya-rezki-trub/?pos=10373677> [приступљено 20. јул 2020].
- [10] Wurth, CNC plazma sistemi. [Интернет] Доступно на <https://cnc.wurth.rs/sr/proizvodi/cnc-plazma> [приступљено 27. јул 2020].
- [11] Hypertherm [Интернет] Доступно на: <https://www.hypertherm.com/> [приступљено 20. јун 2020].
- [12] Plasmainfo, Плазмотрон: принцип работы и конструкция. [Интернет] Доступно на: <https://plasmainfo.ru/technology/416/> [приступљено 01. август 2020].
- [13] r-techwelding, 0.9mm Cutting Tips - Plasma Cutter VP-P100. [Интернет] Доступно на: <https://www.r-techwelding.co.uk/0-9mm-cutting-tips-plasma-cutter-vp-p100/> [приступљено 05. август 2020].
- [14] Thefabricator, Plasma arc cutting basics and operator guidelines. [Интернет] Доступно на: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/plasmacutting/starting-from-scratch> [приступљено 29. јун 2020].

- [15] Westweld, Shield Cap 420000 for Powermax 125 Plasma Cutting Torch Consumables. [Интернет] Доступно на: <https://www.westweld.com/shield-cap-420000-for-powermax-125-plasma-cutting-torch-consumables.html> [приступљено 05. август 2020].
- [16] Trafimet, ergocut torch. [Интернет] Доступно на: <http://www.trafimet.com/plasma-cutting-torches/ergocut-a-plasma-cutting-torch-with-hf-function/> [приступљено 25. јул 2020].
- [17] Lucas, B., Hilton. D. Cutting processes – plasma arc cutting – process and equipment considerations. [Интернет] Доступно на: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051> [приступљено 05. јун 2020].
- [18] Peko, I. (2018). Utjecaj faktora procesa rezanja plazmenim mlazom na kvalitet reza kod aluminijumskih legura. Doktorska disertacija, Split: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje.
- [19] М. Јовановић, В. Лазић, П. Маринковић, Б. Недељковић, С. Александровић, Д. Милосављевић. (н.д.) Оцена заварљивости и избор најповољнијег поступка и технологије заваривања челика повишене јачине Weldom 700. Доступно на: <https://izdanja.smeits.rs/index.php/ptk/article/download/2457/2491/> [приступљено 17. јун 2020].
- [20] А. Живковић. (2003). Међународна конференција „Заваривање 2003“, Србија, Београд, (2003). Weldom i Hardox челици: Особине, препоруке за резање и заваривање
- [21] Subbarao Chamarthi, N.Sinivasa Reddy, (2013). Investigation Analysis of Plasma arc cutting Parameters on the Unevenness surface of Hardox-400 material. International Conference On DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM 2013
- [22] Чабрило, А. (2018). Механичке особине и брзина раста заморне прслине у завареном споју панцирног челика. Докторска дисертација, Нови Сад: Факултет техничких наука
- [23] Лазић, В., Арсић Д., Александровић С. (2018). Qualification of the welding technology of the structural steel S355J2G3. Доступно на: https://www.researchgate.net/publication/327787605_Qualification_of_the_welding_technology_of_the_structural_steel_S355J2G3 [26. јун 2020].