

# České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní



Bakalářská práce

## Obrábění plazmou

**Autor:** Jiří Frýdl

**Studijní program:** Teoretický základ strojího inženýrství

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Praha, 2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Frýdl** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **482431**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Obrábění plazmou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Plasma Beam Machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metody
2. Oblasti využití technologie
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Novák, Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Pavel Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

.....

Jiří Frýdl

# Anotační list

Jméno autora: Jiří Frýdl  
Název bakalářské práce: Obrábění plazmou  
Název bakalářské práce anglicky: Plasma beam machining  
Akademický rok: 2020/2021  
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství  
Ústav: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran: 45  
počet obrázků: 29  
počet tabulek: 2

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá nekonvenční metodou obrábění plazmou. V práci jsem se nejdříve zabýval charakteristikou metody. Poté jsem popsal oblasti využití dané technologie. V poslední části práce srovnávám obrábění plazmou s dalšími metodami obrábění, jako jsou: vodní paprsek, laser, řezání kyslíkem a konvenční pily.

## Klíčová slova:

plazma; plazmový oblouk; řezání plazmou; dělení kovů; nekonvenční technologie; srovnání technologií

## Abstract

This bachelor thesis deals with an unconventional method of plasma beam machining. In my work I first focused on the characteristics of the method. Then I described the areas of use of the technology. In the last part of the work I compare plasma beam machining with other machining methods, such as: water jet, laser, oxygen cutting and conventional saws.

## Keywords:

plasma; plasma arc; plasma cutting; metal cutting; unconventional technology; comparison of technologies

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace poskytnuté během psaní této bakalářské práce.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
<b>c</b>	m	Šířka řezné spáry
<b>CNC</b>	-	Computer Numerical Control
<b>CO<sub>2</sub></b>	-	Oxid uhličitý
<b>Cu</b>	-	Měď
<b>h<sub>1</sub></b>	J/s	Energie
<b>H<sub>2</sub></b>	J/m <sup>3</sup>	Absorbovaný obsah tepla
<b>Hf</b>	-	Hafnium
<b>K</b>	-	Konstanta zahrnující ztráty
<b>L</b>	J/kg	Celková energie potřebná pro proces řezání na nastavení jednotkového množství
<b>N<sub>2</sub></b>	-	Didusík
<b>NC</b>	-	Numerical control
<b>PAM</b>	-	Plasma Arc Machining
<b>PAW</b>	-	Plasma Arc Welding
<b>PBM</b>	-	Plasma Beam Machining
<b>T</b>	K	Teplota
<b>t</b>	m	Tloušťka materiálu
<b>TIG</b>	-	Tungsten Inert Gas
<b>UV</b>	-	Ultraviolet
<b>v</b>	m <sup>3</sup> /s	Rychlost proudění plazmy
<b>v</b>	m/s	Rychlost řezání
<b>WJM</b>	-	Water Jet Machining
<b>Zr</b>	-	Zirkonium
<b>ρ</b>	kg/m <sup>3</sup>	Hustota

# Obsah

Prohlášení .....	3
Anotační list .....	4
Poděkování.....	5
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	6
Obsah .....	7
1 Úvod.....	10
2 Charakteristika metody .....	11
2.1 Vznik plazmy .....	11
2.2 Historie vývoje dělení plazmou .....	11
2.3 Typy plazmového oblouku.....	12
2.3.1 Transferovaný plazmový oblouk.....	12
2.3.2 Netransferovaný plazmový oblouk.....	12
2.4 Stav plazmy .....	13
2.5 Plazmové zařízení .....	13
2.5.1 Vliv opotřebenosti spotřebních dílců hořáku .....	14
2.5.2 Dvojitý oblouk .....	15
2.5.3 Chlazení hořáku .....	15
2.6 Stabilizace proudu plazmy .....	15
2.7 Metody dělení materiálu plazmovým paprskem .....	16
2.7.1 Konvenční řezání.....	16
2.7.2 Dvojplynové řezání .....	16
2.7.3 Řezání s vodní clonou .....	17
2.7.4 Plazmové řezání ve vodní lázni .....	17
2.7.5 Přesné dělení plazmovým obloukem.....	18
2.7.6 Plazmové řezání se stlačeným vzduchem.....	18
2.7.7 Hi-Definition plazmové systémy .....	19
2.8 Plyny používané při řezání plazmou .....	20
2.8.1 Vzduch.....	20
2.8.2 Dusík.....	21
2.8.3 Argon – Vodík.....	21
2.8.4 Kyslík .....	21
2.9 Volba plazmového a asistenčního plynu .....	22
2.10 Mechanismus plazmového řezání.....	22

2.11	Teoretické úvahy .....	23
3	Oblasti využití technologie .....	24
3.1	Řezání plazmovým obloukem .....	24
3.1.1	Základní pojmy charakterizující obrobek .....	24
3.1.2	Zařízení pro řezání plazmovým obloukem .....	25
3.1.3	Zkosení hran .....	27
3.1.4	Teplotní dopady na povrch .....	27
3.1.5	Vliv rychlosti posuvu hořáku na kvalitu obrobení .....	28
3.2	Soustružení paprskem plazmy .....	29
3.2.1	Soustružení s použitím paprsku plazmy pro lokální ohřev .....	29
3.2.2	Soustružení s použitím paprsku plazmy jako samostatný nástroj .....	29
3.3	Navařování plazmou .....	31
3.3.1	Princip navařování plazmou .....	32
3.3.2	Výhody plazmového navařování .....	32
3.3.3	Druhy přídavných materiálů .....	32
3.4	Svařování plazmou .....	33
3.4.1	Rozdíly svařování plazmou a TIG svařování .....	33
3.4.2	Typy svařování plazmou .....	34
3.4.3	Výhody a nevýhody svařování plazmou .....	34
3.4.4	Svařitelnost materiálů .....	34
4	Srovnání řezání plazmou s ostatními technologiemi .....	35
4.1	Řezání kyslíkem .....	35
4.2	Řezání laserem .....	35
4.3	Řezání vodním paprskem .....	35
4.4	Řezání pilou .....	35
4.5	Srovnání laseru, plazmy, vodního paprsku, pil a kyslíku .....	36
4.5.1	Srovnání technologií podle schopnosti obrobit materiál .....	36
4.5.2	Srovnání technologií podle schopnosti obrábět různé tloušťky .....	36
4.5.3	Srovnání technologií podle řezné rychlosti .....	37
4.5.4	Srovnání technologií podle pořizovacích a provozních nákladů .....	38
4.5.5	Srovnání technologií z ekologického úhlu .....	38
4.5.6	Ostatní aspekty .....	39
5	Závěr .....	41
6	Seznam použité literatury .....	42
7	Seznam obrázků .....	44



8 Seznam tabulek..... 45

# 1 Úvod

Obrábění plazmou (zkráceně PBM z angličtiny Plasma Beam Machining) se řadí mezi nekonvenční technologie obrábění. Tato technologie se začala používat v 50. letech 20. století. Rozdíl plazmového obrábění od konvenčních metod je takový, že k úběru materiálu nedochází kvůli mechanickému, ale tepelnému procesu. Jelikož nástroj plazmového obrábění není v přímém kontaktu s obrobkem, při obrábění nevznikají žádné řezné síly na rozdíl od konvenčních metod. K úběru materiálu dochází tak, že se odtaví obráběný materiál z místa řezu. K tavení materiálu je potřeba vysoká teplota, kterou zajišťuje vznik plazmy.

Ve své bakalářské práci jsem si stanovil tři základní cíle. Popsat technologii obrábění plazmou, ukázat možnosti využití této nekonvenční technologie a srovnat obrábění plazmou s podobnými metodami.

V první části své práce se zabývám charakteristikou metody, kde popisuji vznik plazmy a typy plazmového oblouku. Dále objasňuji základní metody dělení plazmovým paprskem a diskutuji použití plynů používaných při řezání plazmou, které řadím do tří skupin.

Obrábění plazmou se v současné době používá ve strojírenství dominantně k řezání ocele, nerezové ocele, hliníku a slitin hliníku. Tato technologie vytlačila řezání kyslíkem. Další použití plazmy je navařování a svařování.

V závěrečné části práce se věnuji srovnávání obrábění plazmou s dalšími technologiemi. Porovnávám metody na základě schopnosti obrobku různé materiály, řezné rychlosti, výsledné kvality povrchu a pořizovacích a provozních nákladů. Srovnávanými metodami jsou řezání laserem, vodním paprskem, kyslíkem a konvenčními pilami.

## 2 Charakteristika metody

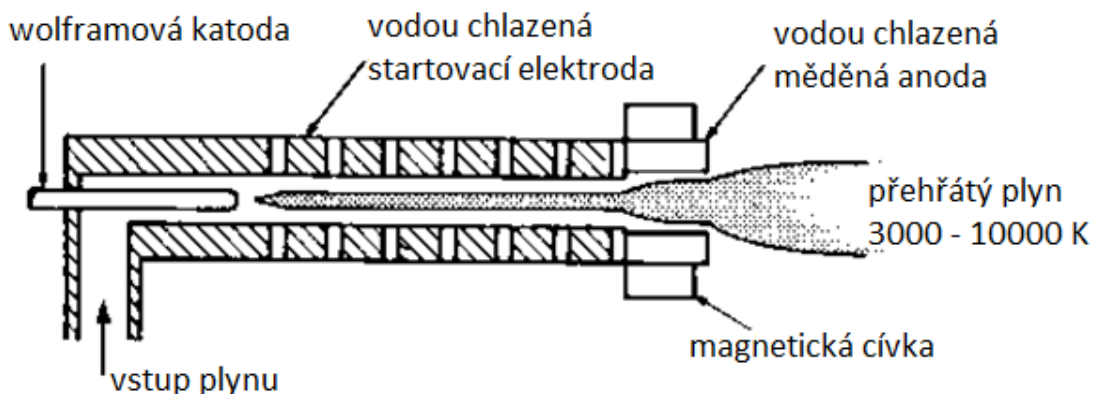
### 2.1 Vznik plazmy

Za pokojových teplot se plyn skládá z molekul, nejčastěji ze dvou a více atomů. Pokud teplota plynu vzroste přibližně na 2 000 °C, jeho molekuly se rozdělí na jednotlivé atomy. Při dalším zvětšení teploty, přibližně na 3 000 °C, jsou některým atomům odtrženy elektrony z elektronových obalů. To způsobuje jejich ionizaci, což znamená, že mají elektrický náboj. Plyn v těchto podmínkách se nazývá plazma.[13]

Plazma je 4. skupenství hmoty, které dokáže vést elektrický proud. Na Zemi se plazma vyskytuje velmi výjimečně, ale ve vesmíru tvoří až 99 % pozorované atomové hmoty. [13].

„Plazma je v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může být částečně anebo zcela ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy je 5 000 – 15 000 K, teplota úplně ionizované plazmy je přibližně 100 000 K.“ [11, str. 306]

Plazma se obvykle vytváří uvnitř stejnosměrného proudového plazmového generátoru (Obrázek 1). Horká wolframová katoda a měděná, vodou chlazená anoda, se používají pro udržení elektrického oblouku mezi nimi. Přívod plynu je zaveden ke katodě, odkud proudí ven přes anodu. Čím menší je otvor u katody, tím větší je teplota. Ta se může vyšplhat až na 28 000 °C. Proto je tak vysoká teplotní koncentrace plazmy na výstupu. Když plazma s takto vysokou teplotou dopadne na obráběné těleso, kov se velice rychle roztaví a vypaří. Veškeré zbytky materiálu jsou odstraněny proudem ionizovaného plynu.[13]



Obrázek 1 Stejnosměrný plazmový generátor [13]

### 2.2 Historie vývoje dělení plazmou

1957 – Konvenční dělení plazmovým obloukem

1962 – „Dual flow“ dělení plazmovým obloukem

1963 – Vzduchové dělení plazmovým obloukem

1968 – Dělení plazmovým obloukem se vstřikováním vody

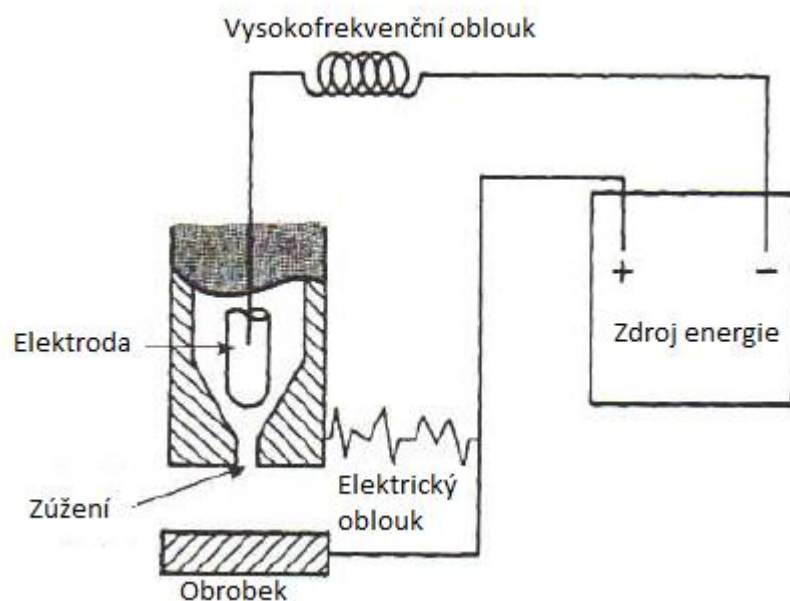
- 1972 – Dělení plazmovým obloukem s vodní clonou
- 1977 – Dělení plazmovým obloukem pod vodou
- 1980 – Nízko proudé vzduchové dělení plazmovým obloukem
- 1983 – Kyslíkové dělení plazmovým obloukem
- 1990 – „Hi-Definition“ dělení plazmovým obloukem[5, str. 97]

## 2.3 Typy plazmového oblouku

Plazmové zařízení se dělí na dva základní typy. Zařízení s přeneseným (transferovaným) a nepřeneseným (netransferovaným) obloukem.

### 2.3.1 Transferovaný plazmový oblouk

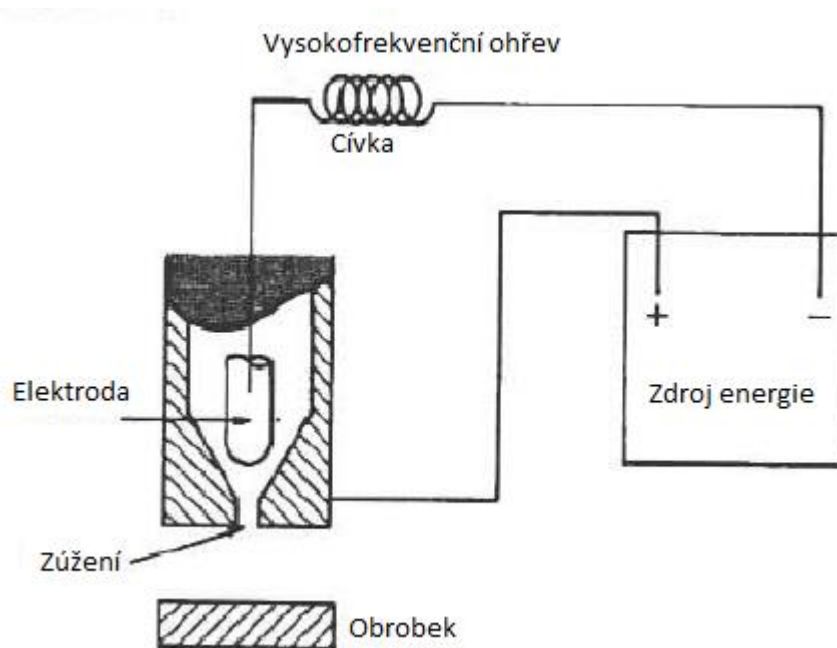
U tohoto typu zařízení (Obrázek 2) se elektrický oblouk vytváří mezi elektrodou uvnitř hořáku a obrobkem. Pro tento typ plazmového proudu se používá název plazmový oblouk. Nejčastější označení pro tento druh obrábění je PAM (Plasma Arc Machining). PAM můžeme uplatnit na vodivé materiály. V tomto druhu plazmového hořáku je tryska méně tepelně namáhaná. [11]



Obrázek 2 Transferovaný plazmový oblouk [11]

### 2.3.2 Netransferovaný plazmový oblouk

Netransferovaný plazmový oblouk (Obrázek 3) se vytváří přímo v plazmovém hořáku mezi dvěma elektrodami. Z trysky vychází pouze ionizovaný plyn nebo plazma. V tomto případě se používá označení plazmový proud. Zkratka pro obrábění plazmovým proudem je PBM (plasma beam machining). PBM se používá pro nevodivé materiály. [11]



Obrázek 3 Netransferovaný plazmový oblouk [11]

## 2.4 Stav plazmy

Pro ideální stav oblouku plazmy se používá název stabilizace oblouku. Stabilizace oblouku znamená udržení proudu plazmy v požadovaném tvaru. Tohoto tvaru se dosahuje pomocí:

- tvaru trysky
- proudícího plynu
- vody

Také je důležité sledovat technické parametry plazmy, které jsou:

- teplota a elektrická vodivost (navýšením proudu se zvýší teplota a elektrická vodivost plazmy)
- hustota proudu plazmy
- průměr proudu plazmy
- stupeň zaostření proudu po výstupu z trysky [11]

## 2.5 Plazmové zařízení

„Plazmové zařízení se skládá z několika komponent: zdroj energie, ionizátor, plazmový hořák (Obrázek 4) a řídicí jednotka. Řídicí jednotka je buď NC anebo CNC.

Nejdůležitější část plazmového zařízení je plazmový hořák, který plní několik funkcí:

- přivádí proud na elektrodu, nejčastěji wolframovou
- přivádí pracovní plyn
- určuje tvar plazmového oblouku
- směřuje proud na požadované místo řezání

Plazmové hořáky můžeme dělit podle:

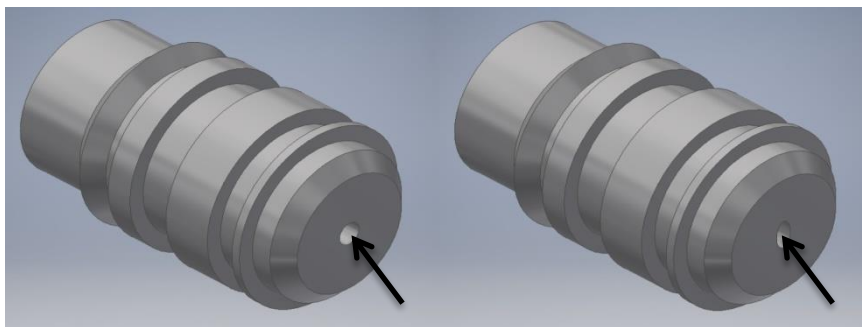
- způsobu chlazení (přímé/nepřímé chlazení vodou, chlazení plynem)
- výkonu (výkon je daný jako součin proudu a napětí oblouku)
- materiálu katody (wolfram, zirkon, hafnium)
- způsobu řezání (ruční, strojní)“ [11, str. 227-228]



Obrázek 4 Ukázka plazmového hořáku [12]

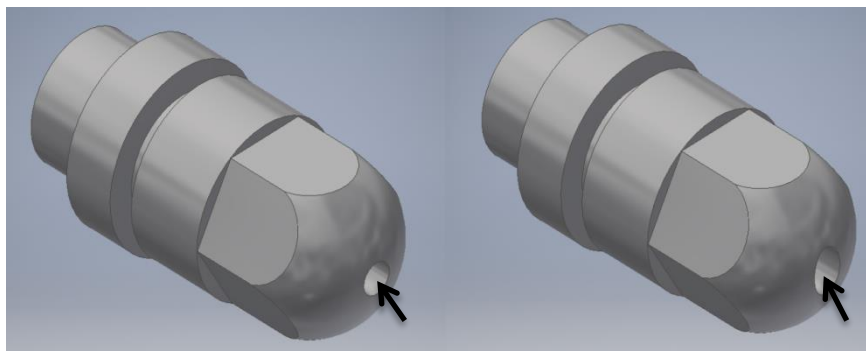
### 2.5.1 Vliv opotřebování spotřebních dílců hořáku

Kvalita obráběných ploch je značně závislá na stupni opotřebení elektrody a trysky. Při větším poškození je třeba tyto díly vyměnit za nové. Trysku je potřeba vyměnit pokud otvor nemá tvar kruhu ale elipsy (Obrázek 5b).



Obrázek 5 a) Nová tryska b) poškozená tryska (otvor ve tvaru elipsy) [5]

Elektroda se také musí vyměnit, pokud z ní ubyl materiál (Obrázek 6b). [5]



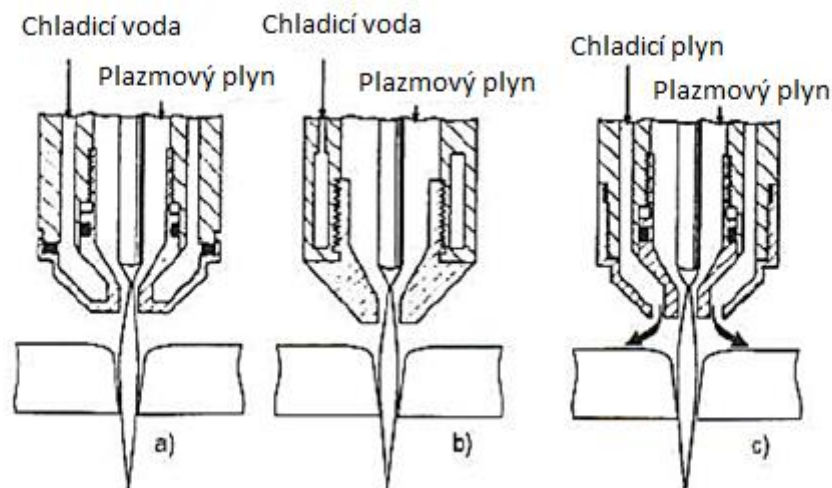
Obrázek 6 a) Nová elektroda b) poškozená elektroda (otvor je vytavený) [5]

## 2.5.2 Dvojitý oblouk

První trysky, které se používaly na začátku obrábění plazmou, měly vadu. Tyto trysky vytvářely dva oblouky. První vycházel z elektrody do trysky a druhý vycházel z trysky do obrobku. Tento dvojitý oblouk (double-arcing) způsoboval poškození elektrody a obráběného materiálu. Kvůli tomuto efektu, když se obrábělo více druhů kovů (například hliník, nerezová ocel a měkka ocel), různých tlouštěk, se musely používat drahé plyny, pro dosažení dostatečné kvality řezu [13]

## 2.5.3 Chlazení hořáku

Při obrábění plazmou je hořák tepelně namáhán během procesu. Proto je důležité chlazení, které je zabudované do konstrukce plazmového hořáku. Hořák je nejčastěji ochlazován chladicí kapalinou, (například vodou) anebo chladicím plynem (Obrázek 7). [11]



Obrázek 7 Druhy plazmových hořáků podle chlazení  
a) přímé chlazení vodou, b) nepřímé chlazení vodou, c) chlazení plynem [11]

## 2.6 Stabilizace proudu plazmy

Stabilizace proudu plazmy zajišťuje zlepšení vlastností výstupního paprsku. Pro stabilizaci se používá buď voda nebo směs ochranných plynů. Nejčastější stabilizační plyny jsou vyrobené ze směsi argonu, dusíku, vodíku a stlačeného vzduchu.

Nevýhody při používání plynu jsou, že se často vytváří škodlivý kouř, prach, hluk a UV záření. Vznikají například zdraví nebezpečné oxidy dusíku, které se musí odsávat z pracoviště. Důležité je zmínit, že tyto stabilizační plyny jsou z ekonomického hlediska nákladné, a proto se používají hlavně při řezání hliníku, korozivzdorných ocelí a neželezných kovů.

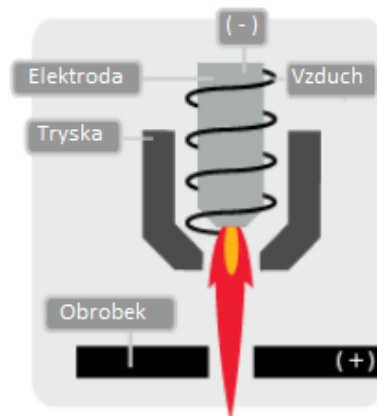
Pro řezání nízkolegovaných ocelí je mnohem vhodnější plazmové řezání se stlačeným vzduchem nebo vodou. Tyto metody jsou levnější než používání inertních plynů. [11]

## 2.7 Metody dělení materiálu plazmovým paprskem

Kvůli problému s dvojitým obloukem uvedenému výše (2.5.2) bylo třeba vyvinout více druhů dělení materiálu plazmou.

### 2.7.1 Konvenční řezání

Konvenční řezání plazmovým obloukem se nejčastěji využívá při ručním dělení. Používá se do tloušťky materiálu 16 mm. Jako plazmový plyn se užívá vzduch nebo dusík. [5]

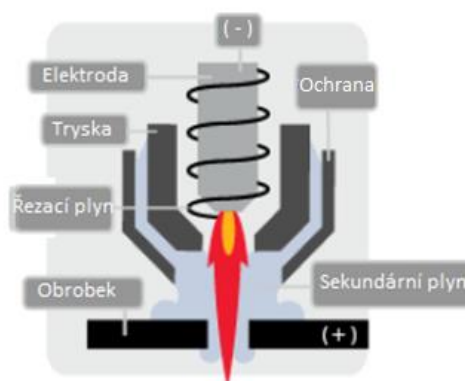


Obrázek 8 Konvenční řezání plazmovým obloukem [27]

### 2.7.2 Dvojplynové řezání

Zařízení tohoto typu má stejné základní charakteristiky jako konvenční řezání (2.7.1). Hlavním rozdílem je, že se využívají dva plyny, jak již je zmíněno v názvu kapitoly. Jeden plyn je aplikován jako medium pro vytvoření plazmy. Druhý slouží pro vytvoření ochranného štítu okolo trysky (Obrázek 9).

Nejčastější řezací plyny jsou argon nebo dusík. U ochranného plynu se výběr odvíjí od řezaného materiálu. Pro řezání nekovových materiálů, hliníku a nerezové oceli, se často používá vodík jako ochranný plyn. Pro měkké oceli se užívá vzduch nebo kyslík a pro železné a neželezné kovy je to oxid uhličitý.[13]

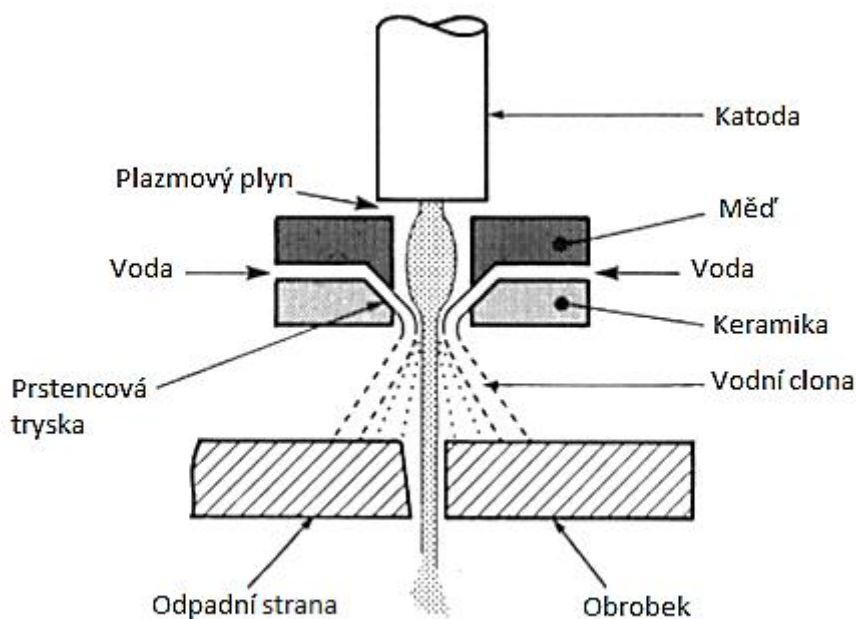


Obrázek 9 Dvojplynové řezání [27]



### 2.7.3 Řezání s vodní clonou

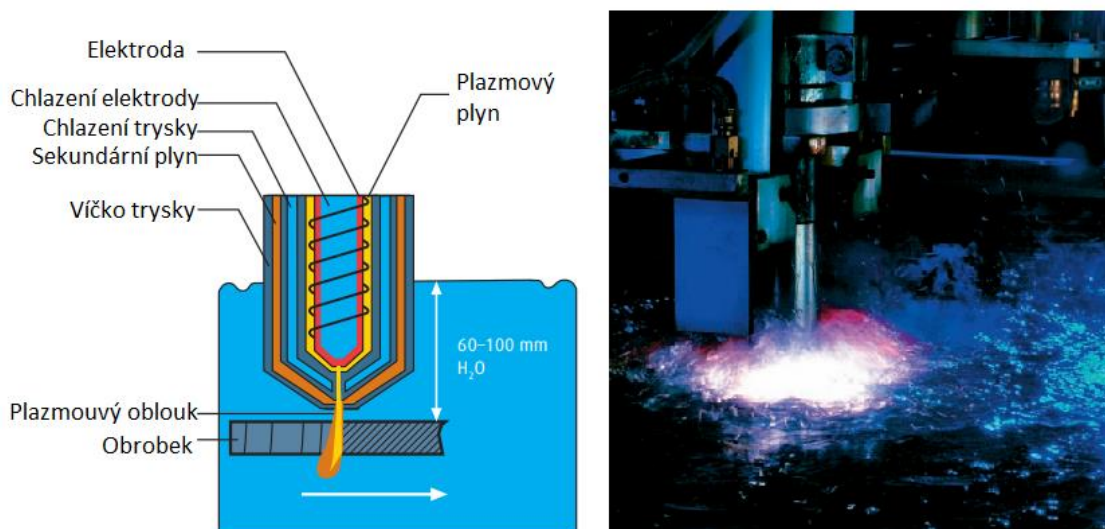
Tato technologie je velice podobná dvojplynovému dělení. Stále se upotřebí stejné řezací plyny, ale ochranný plyn je vyměněn za vodu. Vodní chlazení příznivě ovlivňuje šířku a kvalitu řezu. V některých konstrukcích hořáků této metody se používá vířivé vstřikování vody do oblouku plazmy. S plazmou vznikají vysoké teploty, které jsou odhadovány až na 50 000 K. Při takovýchto teplotách voda vytvoří tenkou vrstvu okolo oblouku plazmy, namísto úplného vypaření. Skoro lze říct, že voda „sedí“ přímo na oblouku plazmy. Odpaří se přibližně 10 % vody, zbývajících 90 % vytvoří kužel (Obrázek 10), který chladí povrch obráběného materiálu a předchází vytváření oxidů v místě řezu. [13] [11]



Obrázek 10 Dělení s vodní clonou [13]

### 2.7.4 Plazmové řezání ve vodní lázni

Pro tuto metodu je typické použití pouze plazmového plynu. Obráběný materiál je ponořen pod vodu do hloubky 60 až 100 mm. Voda vytváří ochranu před okolní atmosférou (Obrázek 11). Výhodou vodní lázně je, že brání vzniku prachu, škodlivých plynů, zmenšuje ultrafialové záření a intenzitu hluchnosti celého procesu pod 80 dB. Nevýhodou řezání plazmou pod vodou je pokles řezných rychlostí, který je způsoben potížemi s jehlovými elektrodami. [11] [13]



Obrázek 11 Plazmové řezání ve vodní lázni [4]

### 2.7.5 Přesné dělení plazmovým obloukem

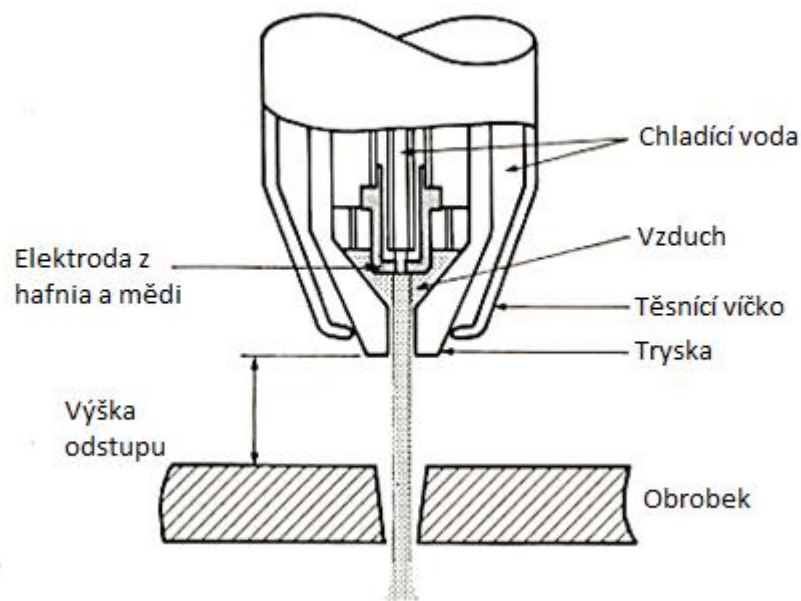
Tato metoda používá speciální trysku, kde dochází k vyrovnání tlaku plazmového plynu. „Magnetické pole okolo plazmového oblouku vytváří prudké víření a zúžení plazmového oblouku na konci elektrody. Vzniklý rotující proud plazmy vytváří úzký, přesný řez s kolmou hranou. Tato metoda dělení nachází široké uplatnění při dělení součástí složitých tvarů.“ [5, str. 98]

### 2.7.6 Plazmové řezání se stlačeným vzduchem

Plazmový plyn je v tomto případě stlačený vzduch. Stlačený vzduch se při vystavení vysokým teplotám v elektrickém oblouku začne rozkládat na základní složky. Kyslík, který je součástí stlačeného vzduchu, se v kontaktu s plazmou stává velice reaktivní, čímž se zvyšuje řezací rychlost o 25 %. Hlavní nevýhodou plazmového řezání se stlačeným vzduchem je silně oxidující povrch obráběného materiálu. Nejvíce náchylné materiály na oxidaci jsou nerezové oceli a hliník. Při použití kyslíku se musí použít i jiná elektroda než wolframová, protože wolfram chemicky reaguje s kyslíkem. Místo wolframu se používá hafnium měďná (Hf-Cu) anebo hafnium zirkoniová (Hf-Zr) elektroda (Obrázek 12). Nevýhodou těchto elektrod je jejich krátká životnost.

Nejpreferovanější obráběné materiály touto metodou jsou elektricky vodivé materiály, jako nerezová ocel, slitiny mědi a hliníku a chromniklové slitiny.

Protože stlačený plyn není ekonomicky nákladný, je tato metoda o polovinu levnější než řezání s vodní clonou nebo dvojplynové řezání. [13] [11] [3]



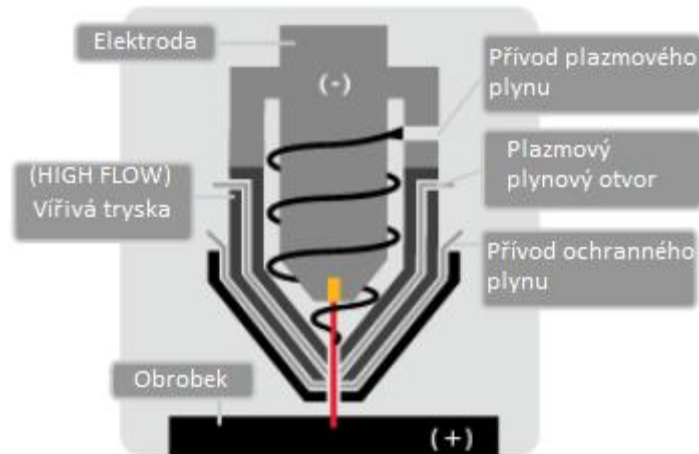
Obrázek 12 Plazmové řezání se stlačeným vzduchem [13]

### 2.7.7 Hi-Definition plazmové systémy

Tato technologie vyniká v dělení tenkých materiálů. Tryska má na sobě mosazný kryt, který je elektricky izolovaný. Kryt izoluje trysku od obráběného materiálu, což zvyšuje její životnost. Kryt dovoluje pracovat s hořákem v ruce takovým způsobem, že se lze dotýkat přímo řezaného plechu. Při dotyku hořáku s obráběným materiálem nedochází k nechtěnému dvojitému oblouku.

Tato technologie je řízená mikroprocesorem, který koriguje elektrický proud a plyn potřebný při obrábění. Zároveň zajišťuje minimalizaci teplotního a chemického šoku na každém začátku dělení. Také změnou parametrů zajišťuje změnu skupenství elektrody na tuhé, a to po ukončení řezání. Díky tomuto šetrnému startu a konci řezacích cyklů dochází ke zvýšení životnosti spotřebních dílců o 600 až 1200 startů, při neměnicí se kvalitě řezu.

Pro udržení přesného bodu styku plazmy a obrobku je důležité, aby se vytvořil vír plynu okolo elektrody. U metody Hi-Definition bylo těžké vytvořit dostatečný vír plynu okolo elektrody, a to kvůli malému otvoru trysky. Pro vyřešení tohoto problému byla vyvinuta vysoko přítoková vírová tryska (Obrázek 13). [5]



Obrázek 13 Vysoko přítoková vířivá tryska [5]

## 2.8 Plyny používané při řezání plazmou

Plyny, které se používají při řezání plazmou, se nejčastěji dělí podle jejich využití. Dělí se na:

- Plazmové plyny – jsou to plyny, které jsou určeny pro vytvoření plazmy. Tyto plyny se uvedou do elektrického oblouku, kde jsou následně ionizovány. Ovlivňují cenu procesu, kvalitu řezu, rychlost řezání a životnost trysek. Plyny, které můžeme použít jako plazmové, jsou vzduch, dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a jednoatomový argon.
- Fokusační plyny – plyny, které zaostřují paprsek plazmy po jeho výstupu z hořáku. U řezání plazmou se používají jen zřídka. Kde se s nimi můžeme setkat častěji, je při svařování plazmou, kde zlepšuje tvarovou charakteristiku paprsku. Jako fokusační plyny se používá argon, dusík nebo směs argonu a vodíku anebo argonu a dusíku.
- Asistenční/ochranné plyny – jejich úkolem je ochrana proudu plazmy a pracovní plochy obráběného materiálu před nepříznivými účinky okolní atmosféry. Používá se dusík a argon. [11] [5]

„Teplota plazmy je závislá na použitém plazmovém plynu. Pro jednotlivé plyny se uvádí tyto teploty:

- vodíková plazma do 8 000 K
- dusíková plazma 7 000 K
- argonová plazma 15 000 K
- héliová plazma 20 000 K“ [5, str. 92]

### 2.8.1 Vzduch

Vzduch je jeden z nejvíce používaných plazmových plynů, díky své vysoké dostupnosti, která značně snižuje náklady na plyn. Užívá se v dělicích zařízeních konvenčních (2.7.1)

a dvojplynových (2.7.2). Při používání vzduchu jako plazmového plynu je životnost spotřebních dílů přijatelná. Jejich životnost se uvádí mezi 100 až 200 spuštěními.

Kvalita řezu při použití vzduchu je dostačující i přes to, že dochází k oxidaci opracovaných hran u hliníku a nerezové oceli.

Zásadní je, aby užívaný vzduch neobsahoval žádný olej, vodu a další nečistoty. Proto je důležité vzduch před použitím filtrovat. Doporučuje se použít minimálně trojfázový filtrační systém, který propouští nečistoty do maximální velikost 0,01  $\mu\text{m}$ . Pro odstranění vody ze vzduchu se doporučuje vysušovač stlačeného vzduchu. [5]

## 2.8.2 Dusík

Dusíkové řezání materiálu je považované za nejlepší při kombinaci se vstřikováním vody. Tato kombinace umožňuje docílení vysoké kvality řezu hliníku a nerezové oceli. Dusík též slouží jako ochranná atmosféra. Třída čistoty dusíku 4.5 je nejpoužívanější. Jako sekundární plyn se s dusíkem používá  $\text{CO}_2$  a nebo vzduch. [5]

## 2.8.3 Argon – Vodík

Tento pár plynů se využívá v poměru 35 % vodíku a 65 % argonu. Používají se při dvojplynovém řezání (2.7.2), kde zlepšují kvalitu řezu. Nevhodné použití těchto plynů je na řezání železných materiálů, protože výsledná kvalita obrobených hran je nedostatečná. Směsí těchto plynů se dá dělit nerezová ocel až do hloubky 155 mm, za předpokladu, že je plyn použit ve vysokovýkonných zařízeních. Při této aplikaci je potřeba sekundárního plynu, buď  $\text{N}_2$  nebo  $\text{CO}_2$ . [5]

## 2.8.4 Kyslík

Kyslík se používá pro řezání uhlíkových ocelí. Při řezání kyslíkem nedochází k nasycení obrobených hran dusíkem (nitridace). Tyto hrany jsou poté lépe svařitelné, obrobitelné a tvárné. Při používání kyslíku je vyžadována třída čistoty 3.5. Také je potřeba umístit filtr se zpětnou klapkou mezi plazmový zdroj a zásobník kyslíku. Jako sekundární plyn se používá dusík nebo vzduch. [5]

Tabulka 1 Kvalita řezu pro různé materiály a plyny [5]

Typ plynu plazmový/ochranný	tloušťka materiálu	Typ materiálu		
		Uhlíková ocel	Nerezová ocel	Hliník a jeho slitiny
vzduch/vzduch	min až 50mm	B	B	B
Ar/H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> nebo CO <sub>2</sub>	6,5 až 12,5 mm	N	N	B
	12,5 až 50 mm	N	A	A - B
O <sub>2</sub> /vzduch	min až 9,5 mm	B	N	N
	9,5 až 50 mm	A	N	N

„Poznámky:

A – označuje minimální úhel dosažené dělené hrany, tj. od 0° do 4°, minimální šířka vzniklé mezery, tj. dvojnásobek průměru otvoru trysky, žádné, nebo zanedbatelné nataveniny na hranách výpalku, hladký povrch dělené plochy

B – označuje úhel dělené hrany od 0° do 10°, větší šířku vzniklé mezery, tj. 2,5 násobek průměru otvoru trysky, středně velké nataveniny na hranách výpalku, drsný povrch plochy, mírně zaoblená horní hrana.

N – znamená nepoužívat tuto kombinaci, kvůli horší kvalitě parametrů“ [5, str. 102]

## 2.9 Volba plazmového a asistenčního plynu

Volba plazmového a asistenčního plynu závisí na obráběném materiálu a jeho rozměrech. Někteří výrobci doporučují u svých zařízení používat oba plyny zároveň. Plazmový plyn se volí pro:

- konstrukční ocel – vzduch a kyslík
- kompozitní materiály - argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík
- vysoce legované oceli – argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík
- neželezné kovy – vzduch, argon/vodík [5]

## 2.10 Mechanismus plazmového řezání

Princip plazmového řezání spočívá v odtavení obráběného materiálu v místě řezu. K tavení je potřeba vysoká teplota, kterou zajišťuje vznik plazmy. Další důležitý parametr pro odtavení materiálu je vysoká intenzita přenosu tepla do materiálu (24,1 až 68,7 MW/m<sup>2</sup>).

Z místa řezu se látka odebírá několika způsoby. Materiál se může roztavit a následně je odfouknut plazmou jako jemné částice taveniny. Další způsob je vypařování. Vypařený materiál je odstraněn plazmovým paprskem. Tento jev se vyskytuje například při práci s grafitem. Materiál z místa řezu také může odtéct, nebo vysublimovat. [11] [13]

## 2.11 Teoretické úvahy

Jedna z používaných teorií jak dochází k úběru materiálu při obrábění plazmou je od *Moss a Sheward* (1970). Tito pánové zjednodušují úvahu předpokladem, že veškerá tepelná energie je vstřebaná materiálem obrobku. Tato tepelná energie je předána stykem plazmového paprsku a obráběného materiálu. Veškerá tepelná energie plazmového paprsku je použita na řezání. V praxi to tak není. Část energie je ztracena vedením a vyzářením z obráběného materiálu. [13]

„Intenzita přenosu energie  $E$  z plazmového oblouku do materiálu je dána rozdílem energie mezi dopadajícím paprskem plazmy a energií potřebnou na tavení materiálu. Pokud paprsek plazmy o teplotě  $T_1$  (K) má energii  $h_1$  (J/s), natavený a odtékající kov má teplotu  $T_2$  (K) a absorbovaný obsah tepla  $H_2$  (J/m<sup>3</sup>), potom intenzita přenosu energie se určí jako:“ [11, str. 232]

$$E = K * h_1 - H_2 * V \quad [1]$$

„kde  $K$  je konstanta menší než jedna, která zahrnuje ztráty a  $V$  je rychlost proudění plazmy. Z výše uvedeného vztahu *Moss a Sheward* odvodili vztah pro energii potřebnou na řezání/dělení materiálu:“ [11, str. 232]

$$E = c * t * v * \rho * L \quad [2]$$

„kde:  $c$  je šířka řezané spáry,  $t$  je tloušťka materiálu,  $v$  rychlost řezání,  $\rho$  hustota,  $L$  je celková energie potřebná pro proces řezání na natavení jednotkového množství materiálu.“ [11, str. 232]

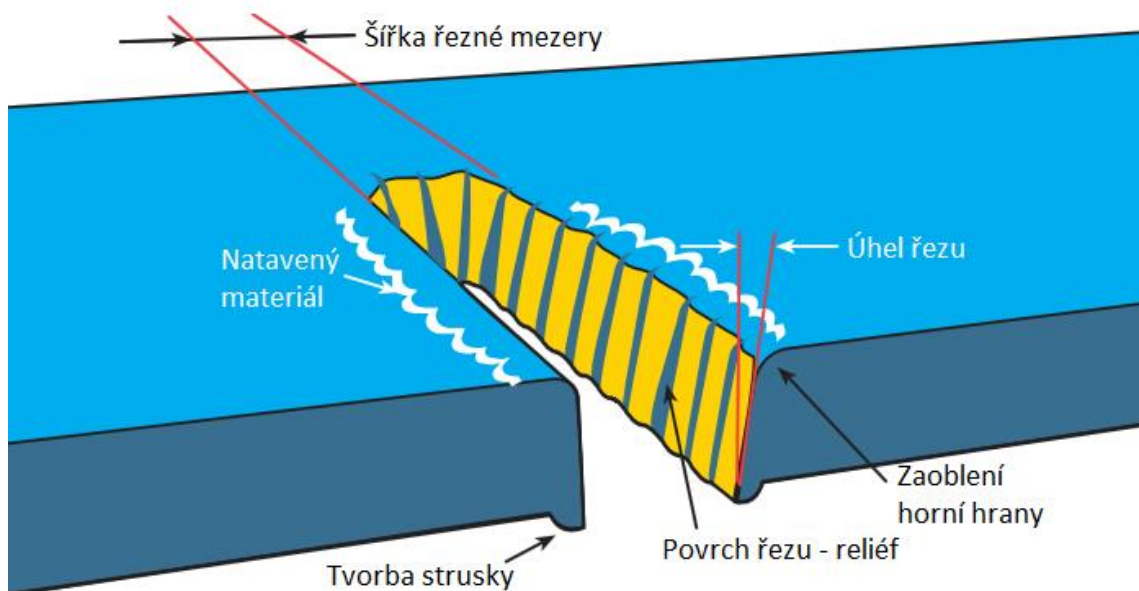
## 3 Oblasti využití technologie

### 3.1 Řezání plazmovým obloukem

Kvalitní řez je často popisován jako kolmý, hladký a bez natavenin na hranách obrobku.

#### 3.1.1 Základní pojmy charakterizující obrobek

- Šířka dělicí mezery – vzniká odstraněním materiálu z místa řezu. Tato hodnota se nejčastěji rovná dvojnásobku průměru otvoru trysky. S měnící se hodnotou rychlosti řezání se tato hodnota mění.
- Natavený materiál – materiál, který je nechtěně přichytnut na horní hraně obrobku. Vzniká při malých řezných rychlostech, při velkých tloušťkách materiálu, nebo při používání příliš poškozené trysky, která má zaoblené hrany.
- Roztavený materiál – materiál, který při obrábění nestihl uniknout z místa řezu a ztuhl na spodní hraně obrobku. Tento materiál je potřeba odstranit další operací.
- Zaoblení horní dělené hrany – způsobené prvotním stykem obrobku a plazmového oblouku
- Úhel řezu – úhel svírající svislou rovinou trysky a obrobenou hranou
- Reliéf děleného povrchu – prostor, kde začíná a končí dělení plazmovým obloukem. Obrobené hrany mohou být hladké nebo hrubé. Stejnou charakteristiku mohou mít i čárové kresby (Obrázek 15). Tento obrobený povrch může obsahovat nitridy, pokud jsme pro dělení použili dusík.
- Pruhy – stopa po oblouku plazmy [5, str. 105]



Obrázek 14 Základní pojmy charakterizující obrobek [4]





Obrázek 15 Reliéf dělené plochy [30]

### 3.1.2 Zařízení pro řezání plazmovým obloukem

Jako příklad pro popis zařízení pro řezání plazmovým obloukem jsem zvolil plazmové dělicí centrum ADVANCED HD 3070. Toto centrum se skládá z materiálového stolu italské firmy CR Elektronik a HiDefinition plazmového zdroje od firmy Hypertherm.

Tento přístroj (Obrázek 16) se skládá z částí popsaných v dalších podkapitolách. [5]



Obrázek 16 Plazmové centrum ADVANCED HD 3070 [19]

#### 3.1.2.1 Plazmový zdroj HD

Tento zdroj obsahuje invertor, který má rozsah dělicích proudů 15, 30, 50, 70, 100 a 200 A. Takovýto rozsah umožňuje řezat plechy do tloušťky 25 mm. Je zde možnost pro operátora tohoto stroje pracovat v automatickém režimu, ve kterém stačí nastavit pouze druh materiálu a jeho tloušťku. Ostatní parametry se nastaví automaticky samy. Druhá možnost je manuální režim, ve kterém se dá nastavit široký rozsah rychlostí.

Součástí plazmového zdroje je mikroprocesor, který ovládá celý proces řezání, připravuje plyny, ovládá proud a všechny funkce dělicího centra. Samozřejmě obsahuje chlazení, které chladí exponované části řezacího hořáku. [5]

### 3.1.2.2 Automatická plynová konzola

Automatická plynová konzola vytváří směsi plynů a koriguje jejich průtoky tak, aby byly dodrženy požadované parametry. Dále tyto plyny odvádí do dalších tří větví: plazmový plyn, ochranný plyn a předfuk. [5]

### 3.1.2.3 Blok výstupních ventilů

Nachází se blízko u plazmového hořáku. Jeho funkcí je přivést předfuk do hořáku během zapalování hořáku a proděrování materiálu. Po dokončení těchto operací mění přívod na plazmový a ochranný plyn do hořáku pro proces řezání. [5]

### 3.1.2.4 Zapalovací konzola

„Obsahuje vysokofrekvenční zapalovací obvod, který slouží na zapálení oblouku uvnitř hořáku, který je následně přenesený na dělený materiál“ [5, str. 85]

### 3.1.2.5 Plazmový hořák PAC 186

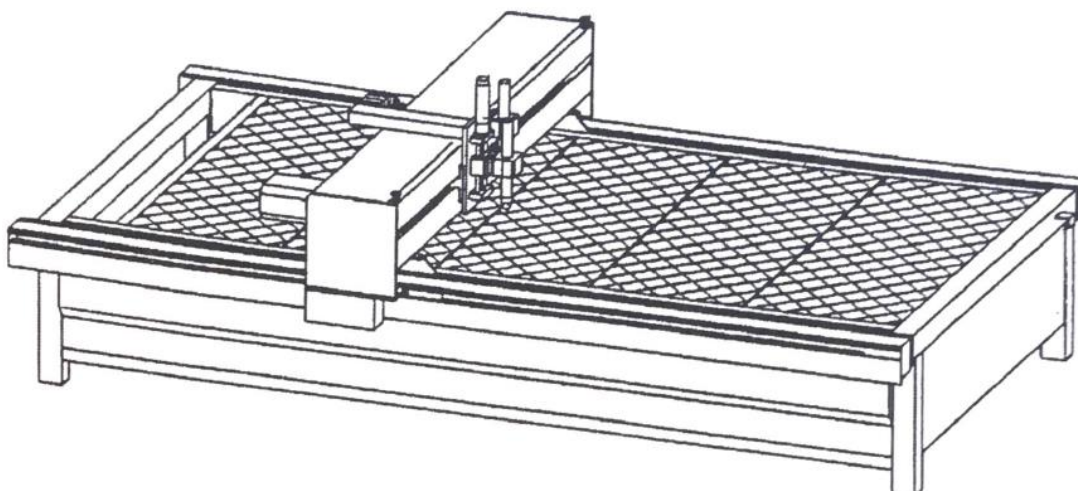
Tento hořák je používán pro dělení na X-Y stolech. Skládá se z tělesa hořáku, které je chlazené vodou, a několika spotřebních dílců. Tyto díly jsou přesně definované pro jednotlivé dělené materiály a jmenovité hodnoty proudu. Mikroprocesor v plazmovém zdroji zajišťuje vyšší životnost jednotlivých spotřebních dílců, jako jsou elektrody a trysky.

V ose Z se pohybuje pálicí hlava, která zajišťuje správnou vzdálenost hořáku od obráběného materiálu. Hořák je nástroj, který vykonává samotné dělení. Hořák se pohybuje po nosníku (osa Y). (Obrázek 4) [5]

### 3.1.2.6 Plazmový stroj HD Plasma

„Tento stroj provádí mechanický pohyb plazmového hořáku ve třech kartézských souřadnicích. Příčník je uložený na dvou nosnících, které jsou propojeny na koncích příčkami. Pohybuje se na dvou lineárních vedeních prostřednictvím ozubených hřebenů a pastorků, poháněných bezkartáčovým střídavým motorem. Suport na příčníku je uložený na dvou lineárních vedeních a pohybuje se pomocí kuličkového šroubu, taktéž poháněného bezkartáčovým střídavým motorem.

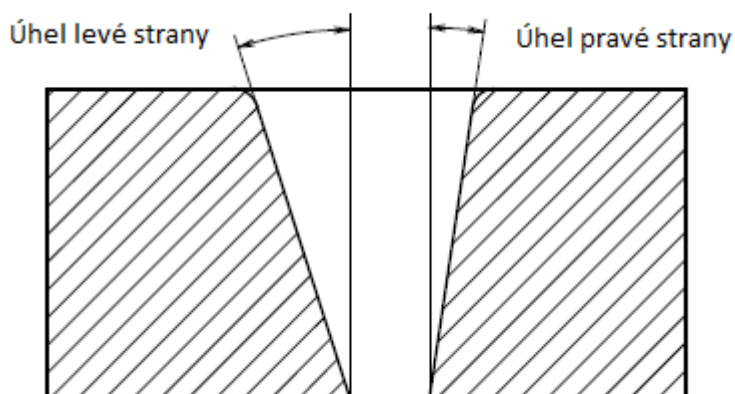
Suport, unášející jeden plazmový hořák, je vybavený řízením, zabezpečujícím prvotní hledání plechu, a systémem řízení výšky oblouku, zabezpečujícím konstantní výšku hořáku od plechu při dělení. Dále je vybavený protikolizní ochranou plazmového hořáku. Materiálový stůl je dimenzovaný pro rozměr 4x2 m. Sběr odpadu a odsávání škodlivin, vznikajících při dělení, zabezpečuje odsávání, které se pohybuje současně s příčníkem a plazmovým hořákem.“ [5, str. 86]



Obrázek 17 Materiálový stůl [5]

### 3.1.3 Zkosení hran

Zkosené hrany vznikají nedostatečnou kontrolou plazmového proudu u konvenčního dělení (2.7.1). Jev nastává při větších tloušťkách materiálu (6 mm a více). Pravá strana je strana, která je napravo od plazmového oblouku vzhledem ke směru posuvu trysky. Pravá strana je uříznuta do pravého úhlu s přesností  $\pm 3^\circ$ . Zatímco levá strana je zkosená o přibližně  $15^\circ$ . Tento efekt je způsoben vířením řezacího plynu ve směru hodinových ručiček. Tento jev je obzvláště důležité kontrolovat u řezání mezikružích, kde vnější obvod se musí dělit po směru hodinových ručiček a vnitřní obvod se musí dělit proti směru hodinových ručiček. [13]



Obrázek 18 Vliv směru pohybu hořáku na úhel dělené hrany [5]

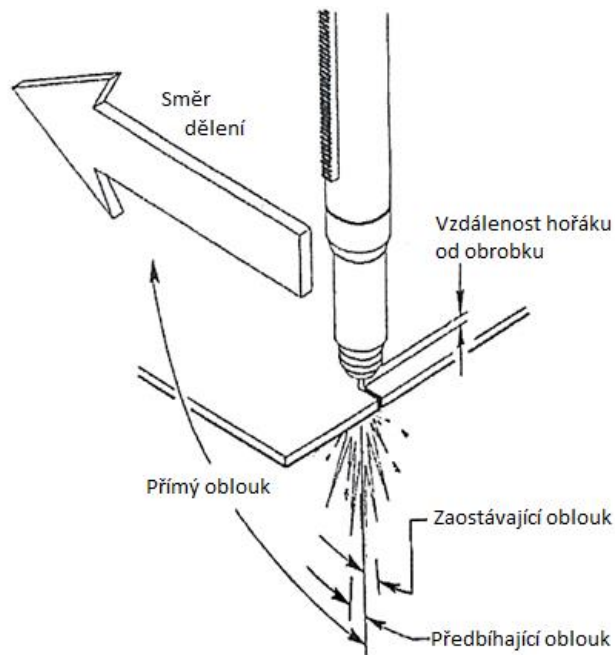
### 3.1.4 Teplotní dopady na povrch

Jak již bylo uvedeno (2.10), roztavený materiál se z místa řezu odstraní vysokorychlostním paprskem plynu. Jenomže při předávání tepelné energie z oblouku

do místa řezu, se vedením přeneše teplo i do obrobku. Zde se vytvoří roztavený materiál obrobku do hloubky přibližně 0,15 mm pod povrchem. Pod touto vrstvou se nachází další tepelně ovlivněná zóna. Tato zóna je široká přibližně 0,25 až 1,25 mm. Při rychlém ochlazení obrobku se mohou vyskytnout jemné praskliny pod tepelně ovlivněnou zónou až do hloubky 1,6 mm pod povrchem. [13]

### 3.1.5 Vliv rychlosti posuvu hořáku na kvalitu obrobení

Rychlost posuvu hořáku výrazně určuje kvalitu obrobené plochy. Jestli máme nastavenou správnou rychlost posuvu, zjistíme pozorováním oblouku plazmy pod obrobkem. Zde můžeme vyzpozorovat 3 typy oblouku. Oblouk plazmy svírá pravý úhel s povrchem obráběné desky a jde skrz materiál přímo dolů (Straight Arc). Tento typ oblouku je nejpoužívanější na dělení, nejčastěji pro dělení nízkolegovaných nerezových ocelí a hliníku. Druhý typ oblouku zaostává za hořákem (Trailing arc), ale rychlost je nastavena tak, aby úhel mezi obloukem plazmy a osou trysky nebyl větší než 5°. Nejčastější použití je při dělení dusíkem. Třetí a poslední typ plazmového oblouku předbíhá hořák (Leading Arc) ve směru jeho pohybu. Opět je vhodné nastavit rychlost posuvu hořáku tak, aby úhel mezi obloukem plazmy a osou trysky nebyl větší než 5°. Používá se na dělení konstrukční oceli vzduchem a pro dělení tenkých materiálů (Obrázek 19). [5]



Obrázek 19 Vliv rychlosti posuvu plazmového hořáku na oblouk plazmy [5]

Pro dosažení ideálně hladkých povrchů v místě řezu by měla být rychlost dělení nastavená tak, aby dělení probíhalo jen na náběžné straně oblouku plazmy. Pokud bude rychlost posuvu hořáku malá, povrch bude drsný, protože oblouk plazmy se hýbe ze strany na stranu, jelikož vyhledává kovový povrch na přenos proudu. [5]

## 3.2 Soustružení paprskem plazmy

Paprsek plazmy se aplikuje při soustružení ve dvou základních konfiguracích:

1. jako zdroj lokálního ohřevu povrchu obráběného materiálu pro snazší obrobitelnost a lepší lámání třísky
2. jako samostatný nástroj na úběr materiálu [11]

### 3.2.1 Soustružení s použitím paprsku plazmy pro lokální ohřev

Paprsek plazmy se v tomto případě používá pro podporu řezného procesu a na zvýšení účinnosti procesu. Tímto způsobem se ulehčuje obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou manganové austenitické ocele, žáruvzdorné ocele a slitiny.

Ohřev paprskem plazmy má ty výhody, že je snadno regulovatelný a nastavitelný. Nastavuje se do oblasti před řeznou hranu nástroje (Obrázek 20). Tím se omezí vliv tepla na obrobek a jeho případné strukturální změny v povrchu.



Obrázek 20 Soustružení s přidavným ohřevem [11]

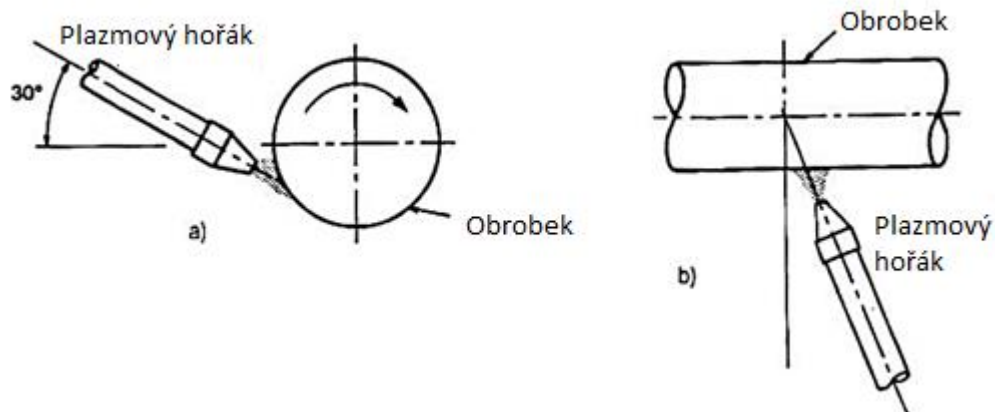
Lokální ohřev při soustružení má určité přínosy. Jeden ze základních je vyšší trvanlivost nástroje, která se udává, že je až o 400 % vyšší. Díky ohřevu se také zvýší rychlost úběru materiálu až o 60 %. Jako nástroj na soustružení se používají nože s vyměnitelnými destičkami z řezné keramiky na bázi oxidů hliníku.

Nevýhody lokálního ohřevu jsou, že vzniká dlouhá plynulá tříska, která může poškodit obrobek nebo zranit pracovníka a je nevhodná pro zautomatizování procesu. [11]

### 3.2.2 Soustružení s použitím paprsku plazmy jako samostatný nástroj

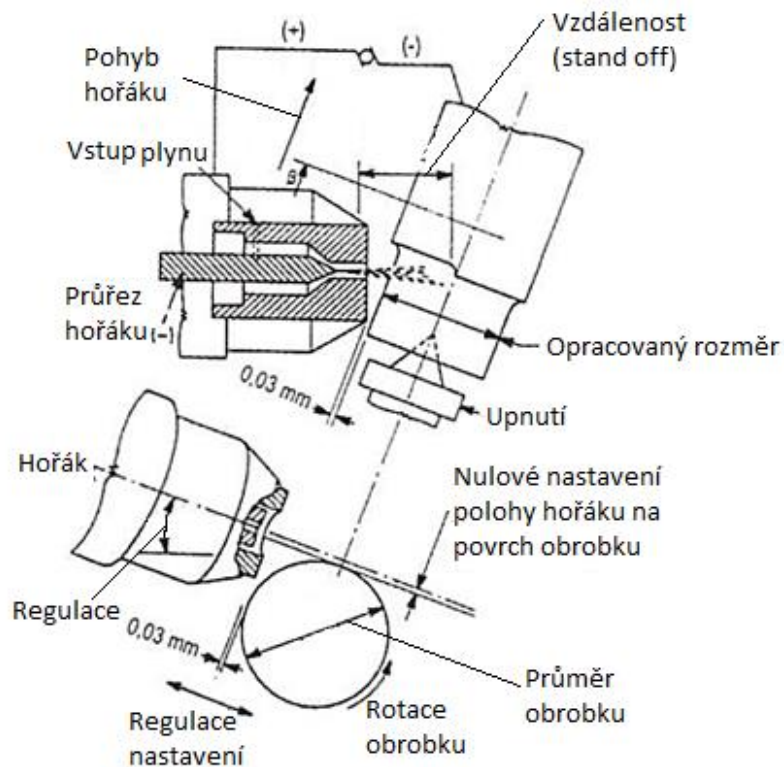
V tomto případě samotný paprsek plazmy odstraňuje materiál bez přítomnosti konvenčních soustružnických nožů. Používá se pro obrábění rotačních ploch. Proces je

velmi podobný konvenčnímu soustružení. Zatímco se obrobek točí, plazmový hořák vykonává paralelní posuv vůči ose obrobku (Obrázek 21). [11]



Obrázek 21 Soustružení plazmovým paprskem a) bokorys, b) nárys [11]

Paprsek plazmy dopadá na povrch v tangenciálním směru a ubírá povrchovou vrstvu materiálu. Obrobek koná stejný pohyb jako při konvenčním soustružení. Obrázek 22 ukazuje polohu hořáku vůči obrobku. Důležité je odvádět natavený materiál z místa řezu tak, aby neovlivnil výslednou kvalitu povrchu. [11]



Obrázek 22 Soustružení paprskem plazmy [11]

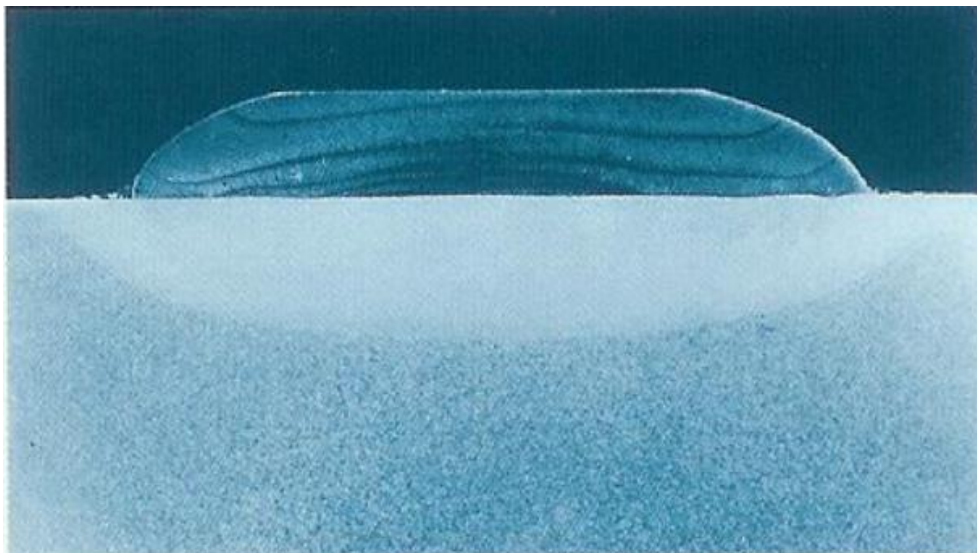
Soustružit plazmovým paprskem se dají všechny druhy kovových materiálů. Ekonomicky dává smysl používat tuto technologii pouze pro těžkoobrobitelné materiály, jako jsou žáruvzdorné oceli, precipitačně tvrzené korozivzdorné ocele, ocele typu Inconel a Hastelloy. Soustružení paprskem plazmy je pouze proces hrubovací. Po soustružení plazmovým paprskem ještě musíme obrobek obrobít načisto a dokončit povrch. Hloubka odebírané vrstvy se dá nastavit pomocí výkonu plazmového hořáku nebo rychlostí rotace obrobku.

Mezi výhody soustružení paprskem plazmy patří až 10x rychlejší úběr materiálu při hrubování těžkoobrobitelných materiálů, při porovnání s konvenčním soustružením s destičkami ze slinutých karbidů. Tato metoda není omezená mechanickými vlastnostmi materiálu, jako jsou tvrdost a houževnatost. Díky tomu, že na obrobek nepůsobí žádné řezné síly, tak se obrobek mechanicky nedeformuje.

Mezi nevýhodami se zmiňují tepelně vzniklé metalurgické změny v povrchové vrstvě obrobku. Takto ovlivněná plocha je zpevněná až do 0,7 mm. Profil opracovaného povrchu je závislý na rychlosti posuvu hořáku. Takto vytvořený profil může mít výrazné stopy po proudu plazmy. Povrch může oxidovat. Pro zamezení oxidace povrchu je třeba použít správnou ochrannou atmosféru. [11] [13]

### 3.3 Navařování plazmou

Navařování plazmou je charakteristické svým penízkovitým vzhledem návaru (Obrázek 23). Navařená vrstva má vysokou čistotu a je velmi hladká. Vrstva promísení více jak 10 % je maximálně do hloubky 0,5 mm od hranice mezi základním materiálem a návarem. Očekávané vlastnosti návaru, které jsou výše uvedeny, se vyskytují od tloušťky návaru přibližně 1 mm. [8]



Obrázek 23 Řez návaru plazmou [8]

### 3.3.1 Princip navařování plasmou

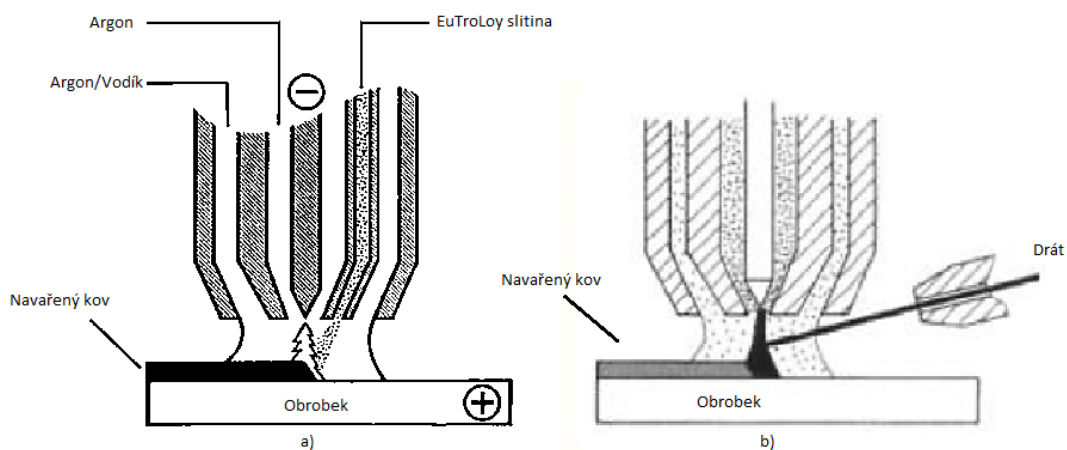
Princip navařování plazmou je velmi podobný ostatním navařovacím technologiím. Přídavný materiál je dodáván do proudu plazmy, odkud následně dopadá do svarové lázně, která je na navařované součásti nebo podložce. Návar následně krystalizuje a vzniká ochranný povlak na součásti. Tento povlak je metalurgicky spojený s materiálem součásti. [16]

### 3.3.2 Výhody plazmového navařování

Metalurgické spojení je jedna z nejhlavnějších výhod navařování, díky svojí pevnosti součásti s návarem. Další výhodou je, že lze navařit téměř jakoukoli tloušťku při minimálním promísení. Při navařování dochází jenom k minimální deformaci součásti, díky nízkému tepelnému ovlivnění. Navařování plazmou snižuje náklady na opracování návarů díky rovnoměrnosti a přesnosti navařené vrstvy. Při potřebě zvýšení odtavovacího výkonu jako přídavný materiál uijeme místo prášku drát nebo lze užít metodu „horký drát“. Tato metoda predehřívá přídavný materiál dalším zdrojem elektrické energie.[8] [16]

### 3.3.3 Druhy přídavných materiálů

Jako přídavný materiál se používá prášek, drát nebo trubička. Trubička bývá velmi často plněna karbidy wolframu nebo chromu. Nejčastější přídavné materiály jsou slitiny na bázi kobaltu, niklu a vysokolegovaných ocelí s tvrdostí od 250 HB do 70 HRC (FeCrNbVSiMnBC) a tepelnou odolností vybraných superslitin (CoCrNiMoC) do 900 °C. [8]



Obrázek 24 Navařování plazmou a) přídavný materiál prášek, b) přídavný materiál drát [8]

Materiály na bázi kobaltu je výhodné navařovat ve formě prášku. Při navařování materiálu na bázi železa se používá navařování plazmou se studeným drátem. Tento způsob sice využívá výhodu levného přídavného materiálu, ale pro nízký výkon je ekonomicky výhodný jen pro menší návary, nebo opravu stávajících návarů. Tuto



nevýhodu odstraňuje technologie plazmového navařování horkým drátem s širokým rozsahem výkonu natavení 0,5 – 6 kg/hod. [8]

Navařování plazmou se využívá u dosedacích ploch výfukových ventilů navařených STELLITEM, pro dopravní šneky (Obrázek 25), formy nebo tvářecí stroje. [8]



Obrázek 25 Návar na šroubovici dopravního šneku [16]

### 3.4 Svařování plazmou

V cizojazyčné literatuře se můžeme setkat s označením PAW (Plasma Arc Welding) pro tuto metodu. Při svařování plazmou je vytvořen oblouk mezi wolframovou elektrodou a obrobkem. Elektroda je umístěna v těle hořáku, aby oblouk plazmy mohl být oddělen od obalu ochranného plynu. Plazma je poté nucená ven skrze měděnou trysku, která omezuje oblouk. Výsledkem je plazma vystupující při velkých rychlostech, která dosahuje až 28 000 °C. [14]

Plyny, které se používají pro svařování, jsou totožné jako plyny pro plazmové řezání. Jediné, na co se musí dbát, je kontrola množství plazmového plynu. Při vysoké dodávce plazmového plynu by mohlo dojít k dělení materiálu. [14]

#### 3.4.1 Rozdíly svařování plazmou a TIG svařováním

Svařování plazmou je odvozeno od metody svařování TIG. Při svařování plazmou se oblouk omezuje měděnou, vodou chlazenou tryskou, což značně zvyšuje hustotu energie oblouku oproti svařování TIG. U svařování plazmou také používáme wolframovou elektrodu. [14]

### 3.4.2 Typy svařování plazmou

Svařování plazmou se dělí na tři hlavní typy. Nejmarkantnější rozdíl mezi těmito typy je množství použitého proudu.

1. Svařování mikroplazmou – proud je mezi 0,02 až 15 A
2. Svařování „melt in technikou“ – svařovací proces je podobný svařování TIG metodou, proud je mezi 15 až 100 A.
3. Svařování „keyhole technikou“ – proud se pohybuje mezi 15 až 350 A. [14]

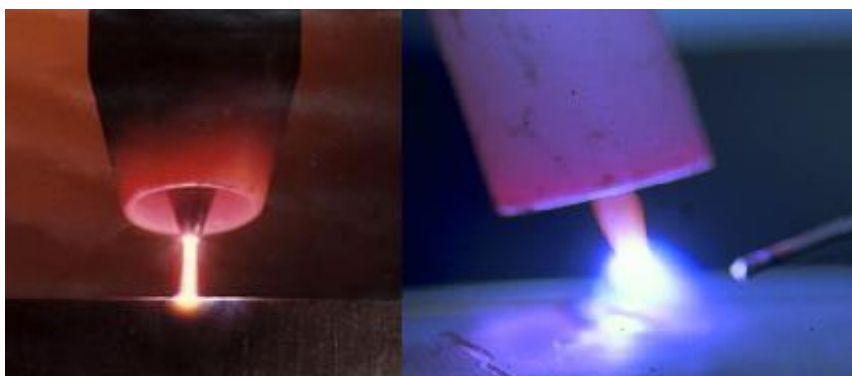
### 3.4.3 Výhody a nevýhody svařování plazmou

Oproti metodě TIG se při svařování plazmou snáze svařují tenké materiály. Oblouk metody TIG je méně stabilní na stejné úrovni proudu. PAW dokáže materiál lépe penetrovat, což například umožňuje svařování T-svarů do hloubky až 10 mm. Protože wolframová elektroda je v těle hořáku, šance příměsi wolframu v natavené lázni je velmi malá. Zároveň životnost elektrody je větší než u TIG. Díky menšímu proudu při svařování plazmou je tepelně ovlivněná oblast menší a tím jsou i menší tepelné deformace. Svařování plazmou je velmi snadné na automatizaci. [14]

Nevýhody PAW jsou, že je zapotřebí přesně nastavit tlak plazmového plynu a poměr mezi ochranným a plazmovým plynem. Kvůli velkému hořáku má PAW horší přístupnost do menších prostor. Při ručním sváření plazmou musí mít svářeč ruku naprosto v klidu, každý jeho pohyb rukou je vidět. [14]

### 3.4.4 Svařitelnost materiálů

Svařitelnost a parametry svařování jsou opět podobné jako u metody TIG. PAW však dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, spolehlivé provaření kořene. PAW metodou lze svářet všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl, molybden a jejich slitiny. [9]



Obrázek 26 Plazmový paprsek - vlevo, elektrický oblouk TIG – vpravo [25] [26]

## 4 Srovnání řezání plazmou s ostatními technologiemi

Řezat materiál lze mnoha způsoby. Kromě řezání plazmou se materiál dá řezat pomocí tepelných řezacích procesů, jako jsou laserové a kyslíkové řezání, nebo pomocí vodního paprsku, popřípadě pilou. Každý z těchto procesů má své výhody a nevýhody, které se nyní pokusím popsat.

### 4.1 Řezání kyslíkem

Řezání kyslíkem je jedna z nejstarších metod používaných pro řezání oceli. Princip metody je takový, že kov je nejprve zahříván plamenem, dokud se nedosáhne teploty hoření. Po přehřevu se přivede do oblasti kyslík, který začne s kovem reagovat, a vznikne oxid železa s exotermickým teplem. Exotermická reakce nadále ohřívá místo řezu, kde kov mění své skupenství na kapalné a odtéká z místa řezu. [20]

### 4.2 Řezání laserem

Slovo laser je zkratka anglických slov „light amplification by stimulated emission“, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Vysoce kolimovaný, monochromatický a soudržný světelný paprsek je generován a zaostřen na malé místo. Díky tomuto zaostření je získána vysoká hustota výkonu. Řezání probíhá tak, že neodražené světlo je absorbované, čímž se zahřeje povrch obrobku. Při dostatečně velkém zahřátí se obrobek v místě řezu začne tavit a buď odpařovat, anebo častěji, natavený materiál je vyfukovaný pryč z místa řezu. [3]

### 4.3 Řezání vodním paprskem

Princip metody řezání vodním paprskem je stejný jako proces vodní eroze. Rozdíl je v tom, že je zrychlený a je soustředěn do jednoho bodu. Často se do vodního paprsku přidává abrazivo, které zvyšuje abrazivní účinek. Obrobek je obrušován paprskem vody, který může procházet tryskou až 900 m/s. Při styku paprsku vody s povrchem obrobku erozivní síla rychle odstraní materiál. Voda v tomto případě funguje jako pila, která řeže úzkou drážku do obrobku. [3]

### 4.4 Řezání pilou

Princip metody řezání pilou je takový, že při úběru materiálu vnikají břity nástroje do obrobku. Z místa řezu odchází obrobený materiál ve formě třísek. Nástroj při řezání může konat několik pohybů: přímočarý vratný, plynulý přímočarý anebo otáčivý. Obrobek koná pouze přísuv, kromě rámových pil, kde přísuv koná nástroj. Nástrojů pro řezání je více druhů. Dělí se na pilové listy, pilové kotouče a pilové pásy. [17]

## 4.5 Srovnání laseru, plazmy, vodního paprsku, pil a kyslíku

### 4.5.1 Srovnání technologií podle schopnosti obrobít materiál

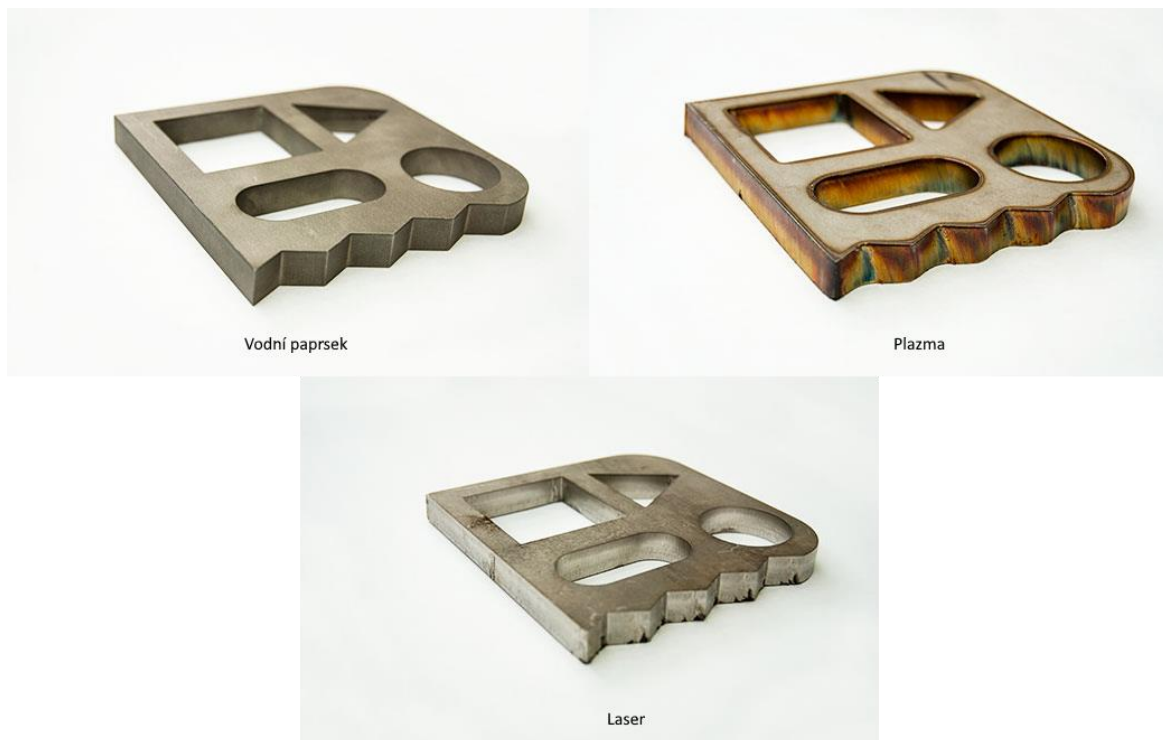
Prvním kritériem, podle kterého bych metody porovnal, je rozsah materiálů, které jsou metody schopny řezat. Plazma se používá především na ocel, nerezovou ocel, hliník a jeho slitiny. Laser zvládne ty samé materiály a k tomu ještě keramiku, sklo, dřevo, pryž, kůži, textil, křemík a plasty. Jediné materiály, které laser nedělí jsou ty, které mají vysokou světelnou odrazivost. Laser také nezvládne obrobít materiály nalakované nebo zkorodované. Řezání kyslíkem nezvládne dělit takové množství materiálů jako ostatní technologie. To je zapříčiněno samotným principem metody. Musí být splněny podmínky: zápalná teplota obrobku musí být menší než teplota tavení, tavicí teplota oxidů musí být menší než tavicí teplota řezaného materiálu, při hoření kovu se musí díky exotermické reakci uvolnit dostatek tepla. Tyto podmínky omezují metodu řezání kyslíkem na nelegované oceli. Vodní paprsek je schopen dělit téměř jakýkoliv materiál. Ať už se jedná o tvrzenou ocel nebo o měkké materiály, jako dřevo či, plast. Paprsek vody se používá i na dělení jídel, jako jsou chléb a dort. Pily se používají na dřevo, kovy a ocele. [10] [23] [24] [15] [29] [17] [22] [3] [7]



Obrázek 27 Ukázka řezání plamenem - obrázek vlevo a řezání plazmou - obrázek vpravo [1] [21]

### 4.5.2 Srovnání technologií podle schopnosti obrábět různé tloušťky

Dalším kritériem pro srovnání metod je tloušťka materiálu, které jednotlivé metody řežou. Řezání kyslíkem zvládne tloušťky i více než 1000 mm, ale dosahuje dobré kvality řezu jen do 300 mm tloušťky. Zatímco plazma se používá ve středních tloušťkách materiálů, okolo 50 mm. Čím bude materiál tlustší, tím méně bude řez přesný, protože plazma začne mít potíže protavit skrz všechny materiál bez produkce nechtěné strusky. Laser se používá na malé tloušťky až do 20 mm. Při větších tloušťkách ztrácí přesnost řezu. Vodní paprsek se používá ve velkém rozmezí, od 5 až do 250 mm. Takovéto tloušťky se jím však nedělí, protože by proces zabral mnoho času. U pil záleží na velikosti stroje nebo nástroje. U rámových pil je limitující faktor zdvih rámu, který se pohybuje mezi 140 až 300 mm. Kotoučová pila prořízne maximálně takovou tloušťku, podle vyčnívající části kotouče ze stroje. [10] [23] [24] [15] [29] [17] [22] [3] [7]

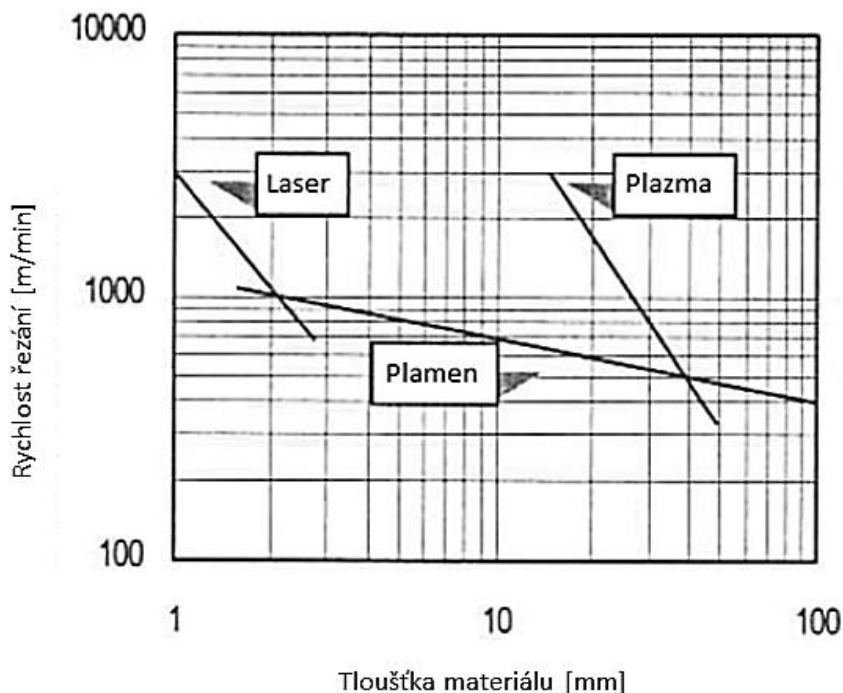


Obrázek 28 Ukázka dílu obrobeným plazmou, laserem a vodním paprskem[23]

#### 4.5.3 Srovnání technologií podle řezné rychlosti

Další důležitý faktor při řezání je rychlost. Rychlost řezání laserového řezacího stroje je vyšší u tenkých desek. Tato rychlost může být až 40 000 mm/min. Rychlost řezání kyslíkem může být až 800 mm/min při optimálních podmínkách, což je ve srovnání s plazmou rychlost velice pomalá, jejíž rychlost se pohybuje mezi 50 až 6000 mm/min. Rychlost řezání vodního paprsku se pohybuje v rozmezí mezi 15 až 1500 mm/min. Rychlost u vodního paprsku může být upravena tak, aby se zlepšila kvalita povrchu. U pil se řezné rychlosti pohybují mezi 20 000 až 80 000 mm/min, záleží na typu nástroje. Řezné rychlosti se samozřejmě zmenšují zároveň s tloušťkou a tvrdostí materiálu.

S rychlostí je úzce spjatá kvalita řezu. Dělení materiálu laserem je velice přesné. Při dělení vzniká velice úzký řez, díky kterému lze obrobit velice přesně a precizně kontury a malé otvory. Laser dokáže obrábět drsnosti povrchu mezi 3 až 6  $\mu\text{m Ra}$ . Drsnost povrchu po řezání plazmou je v rozmezí 12 až 50  $\mu\text{m Ra}$ . Tloušťka řezné spáry vznikající při dělení je u plazmy v rozsahu 1 až 8 milimetrů a závisí na tloušťce desky. Řezání vodním paprskem vytváří po řezání plochu o drsnosti 2,5 až 12  $\mu\text{m Ra}$  a řeže s tolerancí  $\pm 0,12$  mm. Řezání kyslíkem nepatří k přesným metodám. Řezná spára je větší než u plazmy. Řezání pilou je určeno na dělení polotovaru a obrobená hrana se po řezu ještě opracovává. Řezná spára je u pil daná šířkou nástroje, která se liší podle druhu nástroje. [10] [23] [24] [15] [29] [17] [22] [3] [7]



Obrázek 29 Porovnání závislosti rychlosti řezání na tloušťce materiálu pro různé technologie řezání, materiál St 37 [11]

#### 4.5.4 Srovnání technologií podle pořizovacích a provozních nákladů

Velmi důležitá je pořizovací cena a náklady na údržbu strojů. Laser má vysokou počáteční investici. Pořizovací cena se pohybuje v řádu desítek miliónů korun. Výhodou laseru je, že nedochází k téměř žádnému opotřebování náčiní. Pokud však nastane moment, kdy je u laseru potřeba vyměnit čočky nebo zrcadla, provoz se může značně prodražit. Čočky a zrcadla jsou finančně nákladné a prostoje při jejich výměně jsou velké. Co se týče řezání kyslíkem, jsou vybavení i spotřební materiály levné. Pořizovací náklady na plazmové systémy jsou menší než pro laser přibližně o jeden řád. Velké provozní náklady se utratí za opotřebené díly, které se u plazmy pravidelně vyměňují. Vodní paprsek má podobné kapitálové investice jako plazma. Paprsek vody vyžaduje konstantní údržbu a používá nemalé množství spotřebních materiálů. Protože díly jsou pod konstantním tlakem, jejich poruchovost je vysoká. Náhradní díly jsou nutnost a nejsou levné. Nádrž na vodu musí být pravidelně celá vyprázdněna, protože se po čase naplní abrazivem. Pořizovací ceny pil se pohybují v desítkách až stovkách tisíc korun, což záleží hlavně na velikosti stroje. U pil se musí měnit nástroje: pilové pásy, pilové kotouče a pilové listy. [10] [23] [24] [15] [29] [17] [22] [3] [7]

#### 4.5.5 Srovnání technologií z ekologického úhlu

Při řezání plazmou vznikají škodlivé výpary nebezpečných a rizikových látek, které jsou ve formě plynu anebo jemně rozptýlených částic. Metoda řezání plazmou je také velmi hlučná. Hladina hluku roste se zvyšováním elektrického proudu. Hlučnost metody se pohybuje mezi 90 a 115 dB. Během procesu řezání vzniká velmi silné ultrafialové světlo, které poškozuje kůži a zrak. Před tímto světlem se operátor musí chránit

ochranným oděvem a brýlemi. Řezání paprskem vody nevytváří žádné škodlivé plyny nebo částice. Řezný proces je velice hlučný. Hladina hluku dosahuje až 120 dB a je závislá na řezaném materiálu. Metoda řezání laserem není zdaleka tak hlučná jako předchozí dvě metody, ovšem ochrana zraku je zde velice důležitá. Při řezání laserem se mohou vytvořit toxické plyny. Tvorba těchto plynů závisí na řezaném materiálu. Během řezání kyslíkem vznikají škodlivé látky. Při procesu je zvýšená hladina hluku. Pracovník se musí chránit proti infračervenému a ultrafialovému záření a proti popálení rozžhaveným kovem ochrannými pomůckami. Při řezání konvenčními pilami vznikají částice různých velikostí, před kterými je třeba se chránit. Ochranné pomůcky pro řezání pilami jsou ochranné brýle a respirátor proti částicím ve vzduchu. Při dlouhodobé činnosti je dobré mít i ochranná sluchátka, kvůli zvýšené hlučnosti během procesu. [11] [3] [2] [28]

#### 4.5.6 Ostatní aspekty

Při řezání plazmou, kyslíkem a laserem vzniká tepelně ovlivněná oblast, která je nežádoucí na finálním obrobku. Největší tepelné ovlivnění vytváří řezání kyslíkem, což vychází z principu technologie. Od tepelně ovlivněných zón se odvíjí i množství otřepů na obrobku. Při procesu řezání se vytvářejí otřepy, které se během procesu taví a tuhnou a přivařují se k povrchu. Čím více je povrch zahřátý, tím snáze se přichytí, a proto najdeme více otřepů u řezání kyslíkem. Druhou největší tepelně ovlivněnou oblast má řezání plazmou, která se pohybuje v rozmezí 500 až 800  $\mu\text{m}$ . Nejmenší oblast vzniká při řezání laserem, který má tepelně ovlivněnou hloubku do přibližně 100  $\mu\text{m}$ .

Po řezání je u některých technologiích potřeba dokončovacích operací. U laseru může být řezná plocha rovnou použita pro svařování, bez dalšího opracování. Někdy se obrobená hrana opracovává tak, že se odstraní zoxidovaná část a tepelně ovlivněná oblast. Obrobky opracované plazmou se obvykle opracovávají po dokončení dělení. Obrušuje se struska v tepelně ovlivněných oblastech. Po řezání kyslíkem jsou vždy potřebné dokončovací operace. Po dokončení řezání vodním paprskem nebývá potřeba dokončovacích technologií. U pil se také používají dokončovací technologie. Například po odříznutí tyčoviny se srazí čelo na soustruhu. [10] [23] [24] [15] [29] [17] [22] [3] [7]

Tabulka 2 Shrnutí porovnání metod

	PBM	WJM	Laser	Kyslík	Pily
Rozsah materiálů	3	1	2	5	3
Rozsah tloušťek	3	1	3	2	2
Řezná rychlost	2	3	1	4	1
Kvalita řezu	3	2	1	5	4
Pořizovací náklady	3	3	5	2	2
Tepelně ovlivněná oblast	4	1	3	5	2
Ekologičnost	3	1	3	4	2

Poznámky: Čísla známkují dané schopnosti metody. Od 1 - nejlepší po 5 – nejhorší.  
Známky jsem vyvodil z kapitoly 4.



## 5 Závěr

Základním cílem této bakalářské práce bylo popsat metodu obrábění plazmou. Další cíl byl uvést oblasti využití technologie a třetí cíl byl porovnat obrábění plazmou s dalšími technologiemi.

Obrábění plazmou je nekonvenční metoda, která se od 50. let minulého století vyvíjí a technologie se stále zdokonaluje.

Plazmou se nejenom řeže, ale používá se na navařování, svařování a soustružení. Touto metodou se nejvíce řeže ocel, nerezová ocel, hliník a jeho slitiny. Navařování plazmou se využívá u dosedacích ploch výfukových ventilů, pro dopravní šneky, formy nebo tvářecí stroje. Paprsek plazmy se používá pro soustružení buď jako zdroj lokálního ohřevu povrchu obráběného materiálu pro snazší obrobiteľnost a lepší lámání třísky nebo jako samostatný nástroj na úběr materiálu.

Obrábění plazmou jsem porovnal s laserem, vodním paprskem, řezáním kyslíkem a s konvenčními pilami.

Výhodou této metody jsou menší náklady na pořízení i na provoz oproti laseru a vodnímu paprsku. Obrábění plazmou má dobrou rychlost řezání a při tloušťce materiálu 10 až 50 mm je pravděpodobně ideální metodou. Velké řezné rychlosti jsou na úkor kvality řezu.

Nevýhodou je menší přesnost řezání, obráběný materiál okolo místa řezu je tepelně ovlivněn a často potřebuje dokončovací proces. Při řezání plazmou mohou vzniknout škodlivé plyny, které nutno odstraňovat odvětráváním. Technologie je hlučná, což je možno eliminovat řezáním ve vodní lázni.

Ačkoli tato metoda není v žádném porovnávaném parametru jednoznačně nejlepší, je zlatý střed všech řezných metod.

## 6 Seznam použité literatury

1. Autogenní řezání plamenem, Westfalen, [online] 2016 [cit. 4. 5. 2021]  
Dostupné z: <http://www.westfalen.cz/technicke-plyny/svarovani-a-rezani/rezani-a-deleni/autogenni-rezani-plamenem.html>
2. Bezpečnost práce s autogenem, Bezpečnostpráce.info, [online] 2016 [cit. 29. 6. 2021] Dostupné z: <https://www.bezpecnostprace.info/pracovni-urazy/bezpecnost-prace-s-autogenem-pri-svarovani-a-rezani-plamenem-rizika-a-zasady/>
3. EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill, c2005. ISBN 00-714-6694-0
4. Facts about plasma technology and plasma cutting, BOC [online] 2018 [cit. 29. 6. 2021] Dostupné z: [https://www.boc-gas.co.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology\\_tcm435-68107.pdf](https://www.boc-gas.co.nz/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology_tcm435-68107.pdf)
5. HÍŘEŠ, Ondrej, HATALA, Michal, HLOCH, Sergej. *Delenie kovových materiálů okružnou pilou, vodným proudem a plazmovým oblúkom*. Ostrava: Poruba, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6
6. Choosing Between Plasma Cutting and Oxy-fuel Systems, Millerwelds, [online] 2016 [cit. 4. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/choosing-between-oxy-fuel-and-plasma-cutting-systems>
7. Jak nejlépe řezat ocelové plechy, ESAB, [online] 2018 [cit. 3. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>
8. KUBÍČEK, Jaroslav, Renovace [online] 2018 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: <https://docplayer.cz/105436675-Renovace-jaroslav-kubicek-2018-fsi-brno.html>
9. KUBÍČEK, Jaroslav, Speciální metody tavného svařování [online] 2006 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te technologie 2 specialni metody svarovani kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te%20technologie%20specialni%20metody%20svarovani%20kubicek.pdf) [specialni metody][13. 4. 2021]
10. LIU, Eric, Difference between laser cutting and plasma, Acmetubecut, [online] 2017 [cit. 3. 5. 2021] Dostupné z: <http://cz.acmetubecut.com/info/difference-between-laser-cutting-and-plasma-23009984.html>
11. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-709-9430-4
12. MAXPRO200 plasma cutting systém, Hypertherm [online]. 2021 [cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/hypertherm/longlife/maxpro200/>
13. MCGEOUGH, Joseph. *Advanced methods of Machining*. New York: Chapman and Hall, 1988.
14. Plasma Welding, Welding Academy [online] 2020 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: <https://weldingacademy.online/test/2019/11/14/plasma-welding-an-overview/>
15. Plazma autogen nebo laser, Technika a trh, [online] 2010 [cit. 3. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/aktuality/plazma-autogen-nebo-laser>

16. ROHAN, Pavel, KOLAŘÍK, Ladislav, KRAMÁR, Tomáš, Navařování plazmatem, *MM průmyslové spektrum* [online] 2015 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/navarovani-plazmatem-ochranne-povlaky-ve-vyrobe-i-vyzkumu.html> [Digitovarna][13. 4. 2021]
17. ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3
18. ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana, Nekonvenční metody obrábění – 8. díl, *MM průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 20. 3. 2021] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
19. Řezačka plazmová, Sbazar, [online]. [cit. 20. 3. 2021] Dostupné z: <https://www.sbazar.cz/roman.bazar/detail/76643937-rezacka-plazmova-hypertherm-hd-novy-cena>
20. Řezání plamenem, Ssab, [online] 2021 [cit. 28. 4. 2021] Dostupné z: <https://www.ssab.cz/services/processing-services/flame-cutting>
21. Řezání plazmou plamenem, Shinkmann, [online] 2016 [cit. 4. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/rezani-plazmou-plamenem>
22. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
23. Srovnání řezání, Flow, [online] 2021 [cit. 3. 5. 2021] Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Srovnavaci-Rezani.aspx#waterjet>
24. Tepelné dělení materiálů, Technický týdeník, [online] 2014 [cit. 4. 5. 2021] Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/tepelne-deleni-materialu-kyslikem-porovnaní-s-ostatními-metodami-a-praktické-aplikace\\_25452.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/tepelne-deleni-materialu-kyslikem-porovnaní-s-ostatními-metodami-a-praktické-aplikace_25452.html)
25. The plasma arc welding proces, Pro-fusion, [online] 2015 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: <http://www.pro-fusiononline.com/welding/plasma.htm>
26. Tig welding proces, Saf-fro [online] 2021 [cit. 13. 4. 2021] Dostupné z: <https://www.saf-fro.com/processes/tig-welding-process>
27. Types of plasma, Hypertherm [online] 2021 [cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/>
28. Vodní paprsek s CNC řízením, MM průmyslové spektrum [online] 2014 [cit. 6. 6. 2021] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodni-paprsek-s-cnc-rizenim>
29. Water jet vs plasma cutting, Randrmanufacturing [online] 2018 [cit. 5. 5. 2021] Dostupné z: <https://randrmanufacturing.com/blog/water-jet-vs-plasma-cutting/>
30. XPR300 plasma cutting system, Hypertherm [online]. 2021 [cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/hypertherm/xpr/xpr300/>

## 7 Seznam obrázků

Obrázek 1 Stejnoseměrný plazmový generátor [13] .....	11
Obrázek 2 Transferovaný plazmový oblouk [11] .....	12
Obrázek 3 Netransferovaný plazmový oblouk [11] .....	13
Obrázek 4 Ukázka plazmového hořáku [12] .....	14
Obrázek 5 a) Nová tryska b) poškozená tryska (otvor ve tvaru elipsy) [5].....	14
Obrázek 6 a) Nová elektroda b) poškozená elektroda (otvor je vytavený) [5] .....	14
Obrázek 7 Druhy plazmových hořáků podle chlazení a) přímé chlazení vodou, b) nepřímé chlazení vodou, c) chlazení plynem [11] .....	15
Obrázek 8 Konvenční řezání plazmovým obloukem [27].....	16
Obrázek 9 Dvojplynové řezání [27] .....	16
Obrázek 10 Dělení s vodní clonou [13] .....	17
Obrázek 11 Plazmové řezání ve vodní lázni [4].....	18
Obrázek 12 Plazmové řezání se stlačeným vzduchem [13] .....	19
Obrázek 13 Vysoko přítoková vírová tryska [5] .....	20
Obrázek 14 Základní pojmy charakterizující obrobek [4] .....	24
Obrázek 15 Reliéf dělené plochy [30] .....	25
Obrázek 16 Plazmové centrum ADVANCED HD 3070 [19].....	25
Obrázek 17 Materiálový stůl [5] .....	27
Obrázek 18 Vliv směru pohybu hořáku na úhel dělené hrany [5] .....	27
Obrázek 19 Vliv rychlosti posuvu plazmového hořáku na oblouk plazmy [5].....	28
Obrázek 20 Soustružení s přídavným ohřevem [11].....	29
Obrázek 21 Soustružení plazmovým paprskem a) bokorys, b) nárys [11] .....	30
Obrázek 22 Soustružení paprskem plazmy [11].....	30
Obrázek 23 Řez návaru plazmou [8] .....	31
Obrázek 24 Navařování plazmou a) přídavný materiál prášek, b) přídavný materiál drát [8].....	32
Obrázek 25 Návar na šroubovici dopravního šneku [16].....	33
Obrázek 26 Plazmový paprsek - vlevo, elektrický oblouk TIG – vpravo [25] [26] .....	34
Obrázek 27 Ukázka řezání plamenem - obrázek vlevo a řezání plazmou - obrázek vpravo [1] [21].....	36
Obrázek 28 Ukázka dílu obroběným plazmou, laserem a vodním paprskem[23] .....	37
Obrázek 29 Porovnání závislosti rychlosti řezání na tloušťce materiálu pro různé technologie řezání, materiál St 37 [11] .....	38

## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1 Kvalita řezu pro různé materiály a plyny [5].....	22
Tabulka 2 Shrnutí porovnání metod .....	40