

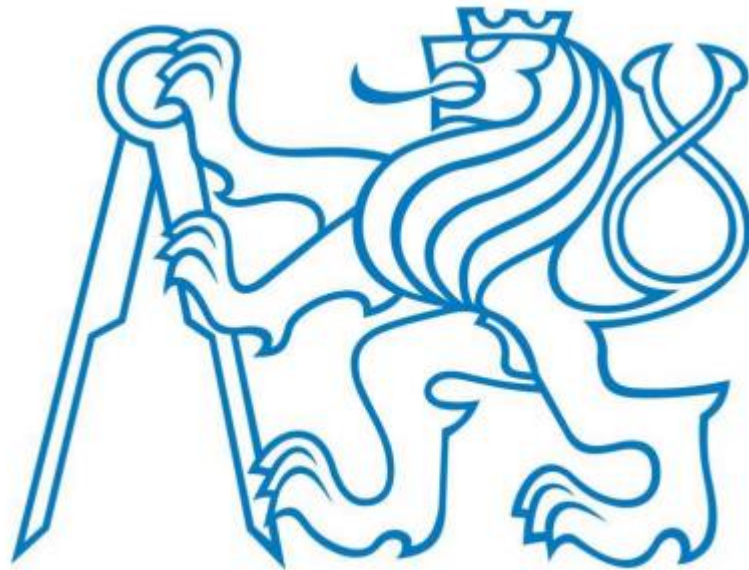
**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

Ústav strojírenské technologie Ú12133

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Porovnání standardních procesů plazmového řezání  
s procesem Silent cut**



Vypracoval: Bc. Martin Bílý

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Praha 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bilý** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **419857**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Porovnání standardních procesů plazmového řezání s procesem Silent cut**

Název diplomové práce anglicky:

**The comparison of standard plasma cutting processes with Silent cut process**

Pokyny pro vypracování:

Rozbor problematiky plazmového řezání  
Popis jednotlivých variant řezných procesů u moderních řezacích zařízení  
Návrh experimentu – porovnání standardních režimů řezání a režimu silent cut z hlediska kvality řezu, hygieny pracovního prostředí a životnosti spotřebních dílů  
Vyhodnocení dosažených výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Minařík, V.: Tepelné dělení materiálu, Vydavatelství ČVUT, Praha 1993
- [2] Dolejský, T.: Tepelné dělení materiálů. Řezání plazmou. Zeross, 2018
- [3] Roubíček, M.: Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení, Airlíquide, 2008
- [4] Firemní materiály firmy Kjellberg, Vanad apod.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

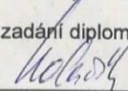
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

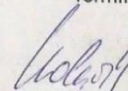
**Ing. Tomáš Panáček, IWE, ústav strojírenské technologie FS**

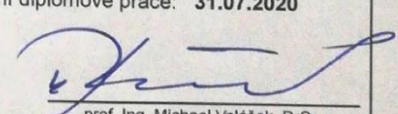
Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

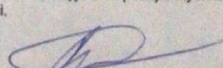
  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**30.6.2020**  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Abstrakt

**Název diplomové práce:** Porovnání standardních procesů plazmového řezání s procesem Silent cut

**Autor:** Bc. Martin Bilý

**Vedoucí diplomové práce:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Pracoviště:** Ústav strojírenské technologie, U12133

**Akademický rok:** 2019/2020

**Počet stran:** 83

**Počet obrázků:** 64

**Počet tabulek:** 22

**Anotace:** Diplomová práce se věnuje problematice tepelného dělení plazmou. V práci jsou popsány technologie tepelného dělení – řezání kyslíkem, laserem a plazmou. Blíže je rozepsána technologie plazmového řezání. Je zde popsána fyzikální teorie plazmy, technologie řezání plazmou, používané plazmové zařízení, řezné procesy, jednotlivé fáze plazmového řezání, konstrukce řezného hořáku.

Praktická část zkoumá vliv řezné rychlosti a režimu plazmového řezání na ovlivnění vlastností řezné hrany a hlučnosti samotného procesu řezání. Pro experiment byly zvoleny pracovní režimy Silent Cut a Contour Cut a pro každý režim tři řezné rychlosti. Pro každý vzorek byly hodnoceny vlastnosti řezné hrany po procesu plazmového řezání.

**Klíčová slova:** plazmové řezání, řezná hrana, dělení materiálu, plazmové zařízení, řezná rychlost, hlučnost, Silent Cut, Contour Cut, plazmový hořák

## Abstract

**Title of thesis:** The comparison of standard plasma cutting processes with Silent cut process

**Author:** Bc. Martin Bilý

**Leader of thesis:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Workplace:** Department of Manufacturing Technology, U12133

**Academic year:** 2019/2020

**Number of pages:** 83

**Number of pictures:** 64

**Number of tables:** 22

**Annotation:** The diploma thesis deals with the issue of thermal plasma cutting. The thesis describes the technologies of thermal cutting technologies – gas cutting, laser cutting and plasma cutting. There are written informations about plasma cutting. There are written informations about plasma cutting, technology of plasma, used equipment, cutting processes, all phases of plasma cutting and construction of cutting torch.

In the main part of the thesis experiment, there are examined influence of cutting speed and plasma cutting mode on the features of cutting edge and noise during the cutting. For experiment are chosen cutting modes Silent Cut and Contour Cut and there are three cutting speeds for each mode. There are evaluated cutting edge properties after plasma cutting proces.

**Keywords:** plasma cutting, cutting edge, material cutting, plasma cutting unit, cutting speed, noise, Silent Cut, Contour Cut, plasma torch

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Porovnání standardních procesů plazmového řezání s procesem Silent cut vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....  
Jméno, Příjmení

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi, Ph.D., IWE za ochotný přístup, čas a cenné rady ohledně psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat dalším zaměstnancům ústavu Strojírenské technologie za jejich čas, a pomoc při praktické části této diplomové práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat pracovníkům Ústavu techniky životního prostředí za poskytnutí vybavení a provedení měření hlučnosti jednotlivých procesů. Dále bych chtěl taky poděkovat své rodině za cenné rady, trpělivost a podporu při mém studiu.

## Obsah

1	Úvod.....	9
1.1	Cíl práce .....	10
2	Technologie dělení materiálu.....	11
2.1	Dělení materiálu s úběrem materiálu .....	11
2.1.1	Dělení materiálu řezáním.....	11
2.1.2	Dělení materiálu rozbrušováním.....	11
2.1.3	Dělení materiálu upichováním.....	12
2.2	Nekonvenční metody dělení materiálu.....	12
2.2.1	Dělení materiálu vodním paprskem.....	12
2.2.2	Ultrazvukové dělení materiálu.....	12
2.2.3	Dělení materiálu paprskem elektronů.....	12
2.3	Dělení materiálu plastickou deformací .....	13
2.3.1	Dělení materiálu sekáním .....	13
2.3.2	Dělení materiálu stříháním.....	13
2.3.3	Dělení materiálu lámáním.....	13
2.3.4	Dělení materiálu vystřihováním.....	14
2.4	Tepelné dělení materiálu .....	14
2.4.1	Dělení materiálu laserem .....	15
2.4.2	Řezání kyslíkem.....	17
2.4.3	Dělení materiálu plazmou.....	20
3	Technologie dělení materiálu plazmou.....	21
3.1	Fyzikální teorie plazmy.....	21
3.2	Princip plazmového řezání.....	22
3.3	Plazmové zařízení .....	22
3.3.1	Závislé zapojení hořáku .....	24
3.3.2	Nezávislé zapojení hořáku .....	24
3.3.3	Kombinovaně zapojený hořák .....	25
3.3.4	Druhy plynů v plazmových zařízeních .....	25
3.3.5	Stabilizace plazmového oblouku .....	27
3.4	Jednotlivé fáze řezání plazmou .....	29
3.5	Technologické parametry plazmových řezacích zařízení .....	31
3.5.1	Optimální parametry řezání .....	31
3.6	Bezpečnost práce při řezání plazmou.....	33
3.7	Plazmový zdroj Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo .....	34
3.7.1	HiFocus Contour Cut.....	37
3.7.2	HiFocus Contour Cut Speed .....	37

3.7.3	Silent Cut .....	37
3.7.4	Technické údaje zařízení pro řezání plazmou.....	38
3.8	Strojní hořák pro plazmové řezání PeCut 451 .....	38
4	Experimentální část.....	41
4.1	Vzorky vytvořené pomocí metody Contour Cut.....	41
4.2	Vzorky vytvořené pomocí metody Silent Cut.....	43
4.3	Hodnocení kvality řezu .....	45
4.3.1	Průběh řezu a vznik okují .....	46
4.3.2	Drsnost řezné plochy .....	47
4.3.3	Tvrдость řezné plochy .....	50
4.3.4	Příprava metalografických vzorků.....	54
4.3.5	Tepelně ovlivněná oblast .....	56
4.3.6	Tvar řezné hrany .....	64
4.4	Hodnocení metod řezání z hlediska hlučnosti.....	67
4.4.1	Definice hluku.....	67
4.4.2	Popis dílčí části experimentu – měření hluku.....	68
4.4.3	Vyhodnocení experimentu .....	69
5	Závěr .....	76
	Seznam obrázků.....	78
	Seznam tabulek .....	80
	Bibliografie .....	81



# 1 Úvod

Průmyslově se plazma začala využívat v 50. letech dvacátého století. Poté se plazma začala využívat jako jedna z forem tepelného dělení materiálu a postupně se tato metoda vyvíjí. Přední výrobci plazmových zdrojů neustále zdokonalují metodu plazmového řezání v různých oblastech. Neustále se zdokonalují i samotné režimy plazmového řezání z hlediska kvality řezu, produktivity práce, životnosti příslušeností a taky s ohledem na snižování hygienických nároků na proces. Technologie dělení materiálu plazmou se dnes velmi často používá pro přípravu a dělení materiálu. V mojí práci se zaměřím na samotný proces plazmového řezání a zmapování jednotlivých metod plazmového řezání s ohledem na výše zmíněné kritéria. V práci se budu věnovat porovnání metod plazmového řezání Silent Cut a Contour Cut.

Tato diplomová práce byla řešena v období koronavirové pandemie, která způsobuje nemoc COVID-19. Z toho důvodu platila omezení pohybu osob, což se dotklo i vstupu do laboratoří Fakulty strojní. Z tohoto důvodu byla praktická část diplomové práce značně ovlivněna. Praktická část tak byla částečně omezena a z původně plánovaných experimentů byly provedeny pouze základní experimenty.

## 1.1 Cíl práce

Cílem mojí diplomové práce je provést experiment plazmového řezání. Součástí experimentu bude plazmové řezání metodami Contour Cut a Silent Cut při různých řezných rychlostech. Následně dojde k hodnocení fyzikálních vlastností řezné hrany a k porovnání procesů plazmového řezání Contour Cut a Silent Cut s hlediska hlučnosti.

V první části mojí práce se budu věnovat metodám dělení materiálu, jejich rozdělení a využití.

V druhé části se zaměřím na konkrétní metody tepelného dělení materiálu a to dělení materiálu laserem a řezání materiálu kyslíkem, kde budou tyto metody podrobně popsány.

Ve třetí části se budu věnovat metodě plazmového dělení. Postupně bude popsán princip plazmového dělení, plazmové zařízení, jednotlivé fáze řezného procesu, metody plazmového dělení materiálu. V této části bude popsáno i plazmové zařízení Vanad Proxima s plazmovým zdrojem Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo a strojní hořák pro plazmové řezání PerCut 451.

V praktické části se budu věnovat hodnocení jednotlivých procesů plazmového dělení materiálu. V první části experimentu budou vzorky vyhotovené metodami Contour Cut a Silent Cut hodnoceny z hlediska kvality řezu. Budou porovnány vlastnosti řezné hrany a to: průběh řezu a vznik okují, drsnost, tvrdost, tepelně ovlivněná oblast a tvar řezné hrany. V druhé části experimentu bude potom měřena hlučnost jednotlivých metod plazmového dělení při různých řezných rychlostech.

## 2 Technologie dělení materiálu

Samotné technologie dělení materiálu se dají rozdělit do skupin podle způsobu, jakým se daný materiál dělí na: [23]

- Dělení materiálu s úběrem materiálu
- Dělení materiálu plastickou deformací
- Nekonvenční metody dělení materiálu
- Tepelné dělení materiálu

### 2.1 Dělení materiálu s úběrem materiálu

#### 2.1.1 Dělení materiálu řezáním

##### 2.1.1.1 Řezání ruční pilkou

Jedná se o jeden ze základních druhů ručního obrábění, kde se tříska odděluje pomocí pilového listu. Při ručním provedení je pilový list pevný, upevněný v rámu pilky. Na pilovém listu jsou jednotlivé zuby obvykle střídavě vyhnuté, případně může být řezná část listu zvlněná. [23]

##### 2.1.1.2 Strojní řezání

Řezání na strojních pilách patří mezi nejpoužívanější konvenční způsob dělení materiálu. Při řezání se do materiálu postupně zařezávají zuby nástroje. K tomuto způsobu dělení se používají rámové, kotoučové nebo pásové pily. V závislosti na pile se jako nástroj používá pilový pás, list nebo kotouč. Kotouč koná při řezu rotační pohyb a je pevně upnutý. Při pilovém listu koná list vratný kmitavý pohyb a tím vniká do materiálu. U pilového pásu je pás upnutý mezi dvěma rotujícími kladkami. Pás je uzavřený a koná kontinuální pohyb, při kterém je k pilovému pásu materiál plynule přiváděný. [23] [28]

#### 2.1.2 Dělení materiálu rozbrušováním

Používá se při dělení polotovarů menších rozměrů. Nástrojem jsou rozbrušovací brusné kotouče, které se rotací dostávají do řezu. Rozbrušovací brusné kotouče jsou buď nevyztužené, nebo vyztužené sklotextilními vlákny. Jako brusivo se používají karbidy křemíku SiC nebo umělý korund  $Al_2O_3$ . Pro tvrdé materiály se používají vhodné diamantové kotouče. Nevýhodou je možnost použití řezného kotouče jen do určitého

průměru. V důsledku vysoké obvodové rychlosti, by při větším průměru mohlo dojít k destrukci nástroje. Další nevýhoda je rychlé opotřebenování nástroje v porovnání s pilovým kotoučem. [23] [28]

### 2.1.3 Dělení materiálu upichováním

Tímto způsobem je možné dělit rotační polotovary. Jedná se o běžně používanou metodu při obrábění na soustruhu. Jako nástroj se používá upichovací nůž. Tato technologie je náročná na přesnost vzhledem k výrazné změně řezné rychlosti v průběhu řezu. [4] [23]

## 2.2 Nekonenční metody dělení materiálu

### 2.2.1 Dělení materiálu vodním paprskem

Metoda řezání materiálu kapalinovým paprskem spočívá v přeměně kinetické energie molekul kapaliny vysoké rychlosti na mechanickou práci a tím dochází k oddělování jednotlivých částic materiálu bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu a tudíž bez vzniku tepelně ovlivněné oblasti (na rozdíl od metod tepelného dělení materiálu – viz kapitola 2.4). Pro řezání se používají čisté kapaliny například voda, olej, nebo taky kapaliny s přidáním abraziva jako písek, granát nebo kubický nitrid bóru. Tato technologie se používá tam, kde obrábění s mechanickým úběrem materiálu ani tepelné obrábění není vhodné a nedosahuje uspokojivé kvalitativní výsledky. Vodním paprskem se dají dělit materiály tvrdých a těžkoobrobitelných materiálu jako titan, tantal či wolfram, dělení kompozitu, dřeva, plastu, kamene a skla bez ovlivnění teplem. [2] [22]

### 2.2.2 Ultrazvukové dělení materiálu

Jedná se o mechanické odebrání materiálu. Nástroj je rozkmitán na vysokou frekvenci. Mezi nástroj a obrobek je přivedena kapalina s brusnými zrny. Tato metoda se více používá pro obrábění jak pro samotné dělení materiálu. [2] [22]

### 2.2.3 Dělení materiálu paprskem elektronů

Technologie dělení materiálu paprskem elektronů spočívá ve využití tepelné a kinetické energie kapalného média (dielektrika). Elektrickým dělem je elektronový paprsek pomocí elektromagnetického zaostřovacího systému soustředěn na velmi malou plochu

10 až 100 $\mu$ m. V pracovní prostředí dochází k dopadu elektronů na materiál a k proměně kinetické energie na tepelnou a tak dochází k tavení materiálu. Páry roztaveného materiálu se pomocí vysokého tlaku pohybují vysokou rychlostí ven z otvoru. Následně se opětovně zaostřuje paprsek elektronů do místa řezu. [2] [22]

## 2.3 Dělení materiálu plastickou deformací

Způsob dělení materiálu založený na mechanickém porušení materiálu působením nástroje na materiál. Tento typ dělení se vyznačuje vysokou mírou plastické deformace, která vede k dělení materiálu. Jedná se o dělení za tepla, nebo za studena. [23]

### 2.3.1 Dělení materiálu sekáním

Jedná se o jeden z nejstarších způsobů dělení materiálu. Jeho využití upadá. V dnešní době se sekání využívá hlavně tam, kde není možné využít jiný způsob. Na nástroj se působí rázovou silou a ostří ve tvaru klínu vniká do materiálu. Tato metoda se používá k dělení materiálu, ale také k vytváření drážek nebo otvorů. [23]

### 2.3.2 Dělení materiálu stříháním

Při dělení se materiál odděluje působením smykového působení dvou střížných hran. V případě, že chceme, dosáhnout přesného řezu je nutné dodržovat podmínky pro tvar ostří řezacích střížných nástrojů a použít vhodnou vůli pro daný materiál. Rozdělením materiálu dochází k značné míře přetvoření. Používá se k dělení měkkých materiálu a tenkých plechů do tloušťky 4 mm. Tato technologie dělení se používá jak ve strojním tak ručním provedení. Při ručním nástroji na stříhání (nůžky na stříhání plechu) se stříhají plechy do 1,5 mm. Kromě plechů se dají stříhat i další typy polotovarů jako tenkostěnné trubky, dráty a otevřené profily tvaru L, T, U, I. [23]

### 2.3.3 Dělení materiálu lámáním

Pro dělení materiálu lámáním se využívá soustruh- pro rotační součásti nebo lis pro součásti ploché. Na součásti se vytvoří vrub (zápich) a na konec materiálu se působí silou. Vlivem střídavého pohybu dochází k únavové trhlině a oddělení materiálu. Lomová plocha je členitá a zlepšuje se s křehkostí materiálu. [23]

### 2.3.4 Dělení materiálu vystřihováním

Tato metoda se využívá ve velkosériové výrobě pro výstřižky z plechu. Jedná se o metodu přesného vystřížení dílů z plechového polotovaru. Pro co nejlepší účinnost se používá materiál z nízkouhlíkové nelegované oceli. V případě legovaných materiálů dochází k značné neefektivitě využití trvanlivosti nástroje a tím se i zhoršuje kvalita výstřižku. [23]

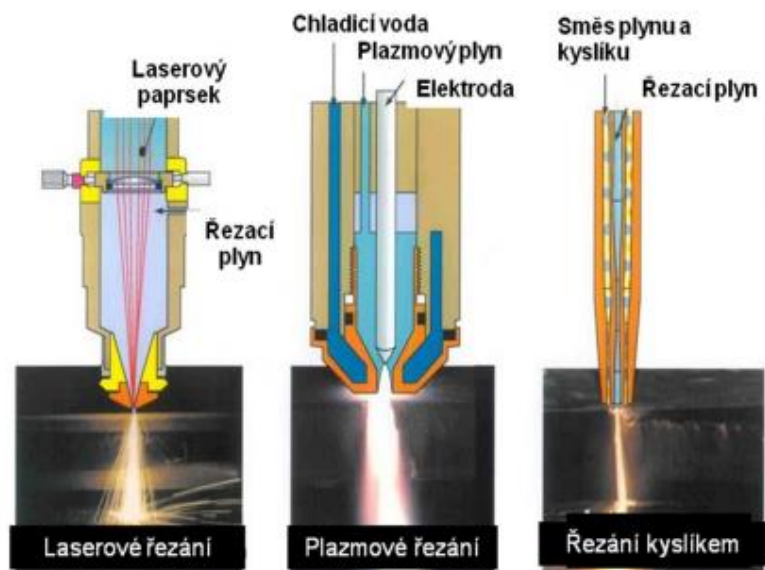
## 2.4 Tepelné dělení materiálu

Tato diplomová práce je věnována především technologii plazmového řezání, která patří do této kategorie metod, proto bude této části věnována větší pozornost. Zejména plazmové řezání bude popsáno podrobně v kapitole 3.

Pojmem tepelné dělení materiálu se rozumí technologie řezání, která pracuje na principu lokálního natavení, spalování a odpařování materiálu. Na rozdíl od mechanického úběru materiálu se odpadový materiál neodděluje ve formě třísky, ale odpadový materiál je ve formě strusky. Energie potřebná na vyvolání jevu dělení materiálu teplem musí být vyvolaná tepelným zdroji, a to např.: laserem, plamenem nebo plazmou. V závislosti na použité technologii tepelného dělení je možné dělit konstrukční oceli a jejich slitiny, litiny, neželezné kovy a jejich slitiny, až po nekovové materiály. [1] [4] [8]

Tabulka 1 - Porovnání vlastností metod tepelného dělení [3]

Vlastnost	Plazmové řezání	Kyslíkové řezání	Laserové řezání
Tloušťka řezaného materiálu	tenké plechy a materiály do 180 mm	Od 5 do 1000 mm	tenké plechy do 40 mm
Řezané materiály	elektricky vodivé materiály	Uhlíková a nízkolegovaná ocel	elektricky vodivé i nevodivé materiály
TOO	do 1 mm	několik mm	desetiny mm
Rychlost řezání	střední	nízká	vysoká
Přesnost	0,1 mm	1 mm	0,01 mm

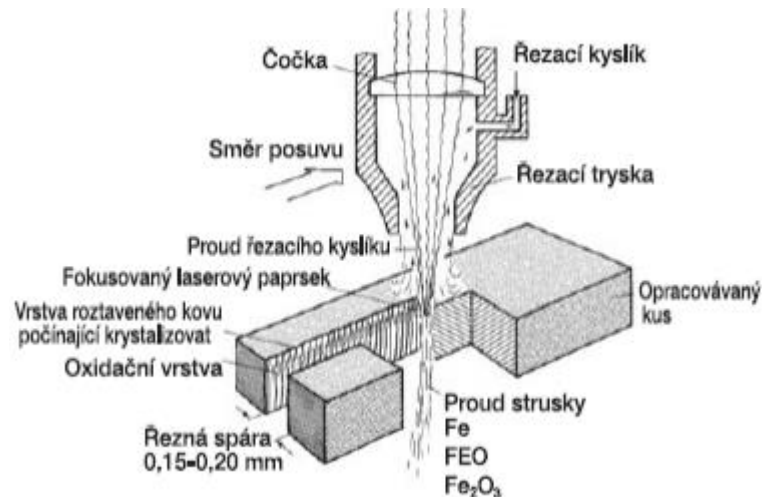


Obrázek 1 - Typy tepelného řezání

#### 2.4.1 Dělení materiálu laserem

Jedná se o nejrozšířenější využití (aplikaci) průmyslových laserů ve strojírenství. Tato technologie umožňuje dělit všechny druhy materiálu, nezávisle na jejich fyzikálních a chemických vlastnostech. Oproti ostatním technologiím dělení materiálu se vyznačuje výrazně vyšší řeznou rychlostí, v metrech až desítkách metrů za sekundu. Přesnost řezu je 0,05 až 1mm na metr řezu, při drsnosti dělené plochy Ra 1,6. [1]

Samotný princip metody spočívá v proměně elektrické energie na vysokoenergetický paprsek elektromagnetického záření. Vzniká svazek světla vyzařovaný v úzkém svazku paprsku. Při řezání materiálu laserem, je paprsek laseru přivedený k místu řezu, pomocí soustavy zrcadel a v pracovní hlavě je zaostřený čočkou. Dnes u některých typů laserů se soustava zrcadel nahrazuje optickými vlákny. Samotný laserový paprsek je doprovázen prouděním pracovního plynu v okolí laserového paprsku. Tento plyn zabezpečuje odstranění vznikající taveniny a výparů kovů. [1] [27]



Obrázek 2 - Schematické znázornění principu řezání laserovým paprskem

Laserové dělení materiálu se může dělit na sublimační, tavné, oxidační a metodu Microjet. Jednotlivé metody se navzájem liší výkonem paprsku, řeznou rychlostí a použitým pracovním plynem. [1] [4]

#### 2.4.1.1 Sublimační řezání

Tato metoda využívá pulsní laserový paprsek o vysoké energetické hustotě, kde se materiál ohřívá na teplotu varu a dochází k intenzivnímu odpařování materiálu. Kovové páry jsou odstraněny slabým proudem pracovního plynu. Kovové páry jsou odstraňovány v době mezi jednotlivými pulzy. Jako plyny se používají dusík nebo argon, které zabraňují oxidaci děleného materiálu.

Metoda se nejvíce využívá na dělení tenkých plechů tam, kde jsou vysoké požadavky na kvalitu řezu, dělení materiálu, které se nemohou tavit jako dřevo a keramika. Hlavní výhodou je, že materiál se netaví, ale přímo odpařuje, čímž se dosáhne rovná a hladká hrana řezu. Na druhé straně to znamená vyšší energetickou náročnost. [1] [27]

#### 2.4.1.2 Tavné řezání

V případě tavného dělení je materiál ohříván na teplotu tání kontinuálním laserovým paprskem. Řezný materiál je natavený a vzniklá tavenina je vyfukována proudem pracovního plynu. Použitý pracovní plyn je inertní, tedy nepodléhá chemickým reakcím a zabraňuje tak oxidaci povrchu řezné hrany. Nejvíce se používá dusík pod vysokým tlakem 1-2 MPa. Vysoký tlak zabrání zachycení taveniny na spodní hraně řezu. [1]

V porovnání s ostatními metodami laserového řezání je rychlost řezu poměrně nižší. Čím je vyšší výkon laseru, tím je vyšší řezná rychlost. Výhodou této metody je lesklý



povrch řezných ploch. Tyto plochy nevyžadují dokončovací úpravy. Tato metoda se používá na dělení vysokolegovaných ocelí, slitin niklu, mědi a hliníku, ale taky materiálu jako dřevo, plasty a keramika. Ohnisková vzdálenost laserového paprsku se při této metodě nastavuje blízko spodní hrany řezaného materiálu. [1]

#### **2.4.1.3 Oxidační řezání**

Oproti tavnému dělení se liší použitím kyslíku jako pracovního plynu. Kyslík podporuje hoření. Při vstupu kyslíku do procesu nastane exotermická reakce materiálu s kyslíkem, při dané zápalné teplotě. V praxi se teplo vzniklé touto reakcí využívá jako přehřev okolí a ohřev vzniklé taveniny. [1] [27]

Oxidační dělení se využívá hlavně na dělení nízkolegovaných a nelegovaných ocelí. Kyslík dodává této metodě nízkou energetickou náročnost, vyšší řeznou rychlost a možnost dělit materiály větší tloušťky. Řezné plochy jsou však méně kvalitní s vysokou drsností a velkou tepelně ovlivněnou oblastí. Další nevýhodou je vrstva oxidů na řezné ploše. Tato metoda se nehodí na dělení geometricky přesných tvarů a na řezání malých otvorů. Ohnisková vzdálenost laserového paprsku nastavujeme těsně pod horní hranou povrchu řezaného materiálu. [1] [27]

#### **2.4.1.4 Microjet řezání**

Tato technologie se od ostatních metod laserového řezání odlišuje tím, že nepoužívá pracovní plyn, ale ten je nahrazen vodou. Voda proudí v okolí laserového paprsku a odplavuje natavený materiál. Voda také chladí okolí řezu, čímž výrazně zmenšuje tepelně ovlivněnou oblast. Touto metodou je možné dosahovat velmi kvalitní a rovné řezné hrany, proto se využívá na dělení malých součástí. [27]

### **2.4.2 Řezání kyslíkem**

Řezání kyslíkem je nejstarší metodou tepelného dělení materiálu. Nejvíce se používá pro dělení uhlíkových ocelí větších tloušťek, kde nejde použít plazmové nebo laserové řezání. Touto metodou můžeme dělit oceli do tloušťky až 1000mm.

Podstatou technologie dělení materiálu plamenem je proces přehřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu (1150°C) a následně probíhá intenzivní oxidická reakce důsledkem přivedení čistého řezného kyslíku. Zdrojem energie pro proces řezání je jednak nahřívací plamen tvořený spalováním hořlavého plynu v kyslíku a exotermická reakce mezi prvky obsaženými v oceli a kyslíkem. Hořlavý plyn je zdrojem podstatné

části energie procesu. Rozhodujícími vlastnostmi hořlavého plynu jsou: rychlost hoření, výkon v primárním pásmu spalování a teplota plamene. Tyto vlastnosti ovlivňují dobu ohřevu na zápalnou teplotu. Jako topný plyn se používá acetylen, vodík, propan, zemní plyn. Doprovodným jevem oxidické reakce je spalování řezaného materiálu v proudu kyslíku za vzniku oxidů železa a strusky. [1] [17]

Aby byl materiál (kov) řezatelný kyslíkem, musí splňovat určité podmínky řezatelnosti kyslíkem:

- Při hoření musí kovy vyvinout dostatečné množství tepla, aby se eliminovali ztráty tepla zářením, sáláním a ohříváním zplodin hoření. Tím se udržuje teplota a proces může samočinně pokračovat.
- Zápalná teplota musí být nižší, nebo rovna jako teplota tavení materiálu. Jinak by došlo jenom k lokálnímu natavení
- Tavicí teplota oxidů musí být menší nebo rovna tavicí teplotě řezaného kovu. Zápalná teplota železa je asi 1150°C a s rostoucím obsahem uhlíku roste i zápalná teplota
- Zplodiny hoření – struska musí být natolik tekutá, aby ji proud kyslíku odstránil z řezné spáry. Této podmínce nevyhovují korozivzdorné a vysocelegované oceli, kterých struska ulpíná v řezné spáře.
- Při řezání musí vznikat dostatečně vysoká teplota, ale odvod tepla do materiálu by měl být co nejpomalejší.

Celý proces řezání kyslíkem je možné rozdělit do tří fází:

- **Fáze 1** je ohřev materiálu na zápalnou teplotu. Zápalnou teplotou se rozumí teplota, při které nastává intenzivní reakce kovu s kyslíkem. V časové jednotce je množství uvolněného tepla vyšší než množství přivedeného tepla. Zápalná teplota oceli se pohybuje mezi 1050 až 1250°C. Tato teplota je závislá na obsahu uhlíku v oceli. S rostoucí obsahem uhlíku se zápalná teplota zvyšuje. Teplo se získává z reakce hoření hořlavého plynu s kyslíkem (tzv. nahřívací plamen). Jako hořlavé plyny se používají acetylen, propan, svítiplyn, zemní plyn, vodík a další. Nejvíce využívaný je acetylen. Předností acetylénu je rychlý a vydatný ohřev, ostatní plyny jsou naopak cenově výhodnější a dosahuje se s nimi čistší řez. V případě použití jiného plynu než acetylénu se značně prodlouží

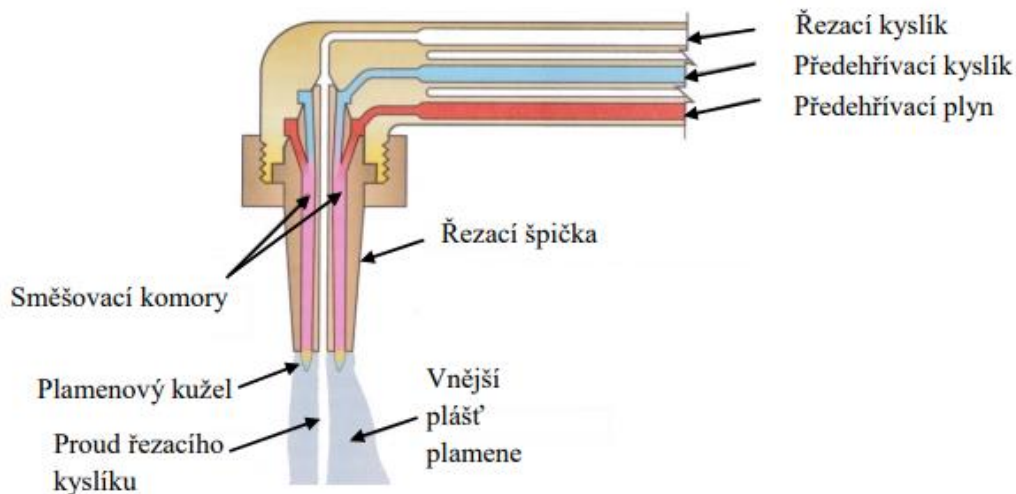
čas nahřívání a zvětší spotřeba kyslíku. Teplota plamene směsi acetylénu s kyslíkem je 3160°C. [1] [17]

- **Fáze 2** je fáze oxidace kovu. Po ohřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu, musí být do místa řezu přiveden čistý řezací kyslík. Vzniká tak prudká oxidická reakce, která vytváří velké množství tepla a dochází k spalování ocele. Tím dochází ke vzniku řezné spáry a tím i k samotnému dělení materiálu. Proces probíhá až do chvíle, kdy se zastaví přívod řezného kyslíku. [1] [17]
- **Fáze 3** je vyfukování roztaveného kovu z řezné spáry pomocí působení velkého tlaku kyslíku, který dodává kinetickou energii produktům spalování z předchozí fáze procesu a ty jsou odstraněny z řezné spáry. [1] [17]

Hlavní nevýhodou kyslíkového řezání je jeho metalurgický efekt na řezaný materiál. U nízkouhlíkových ocelí není příliš důležitý. Naopak u vysokolegovaných ocelí a slitin dochází k obohacení řezné hrany uhlíkem. Z toho vyplývá, že dochází k selektivnímu spalování železa. U slitinových ocelí s obsahem niklu se na povrchu řezu může vyskytnout zvýšený obsah niklu. Výskyt niklu nebo uhlíku na povrchu se přičítá selektivní oxidaci. Tyto prvky nemají stejnou schopnost oxidace jako železo. U vysokolegovaných ocelí mají řezné hrany vyšší tvrdost jako základní materiál. Zvýšení tvrdosti může následně vést k vzniku trhlin. Proto se vhodnost této metody pro daný materiál určuje podmínkami řezatelnosti kyslíkem uvedenými v této kapitole. [17]

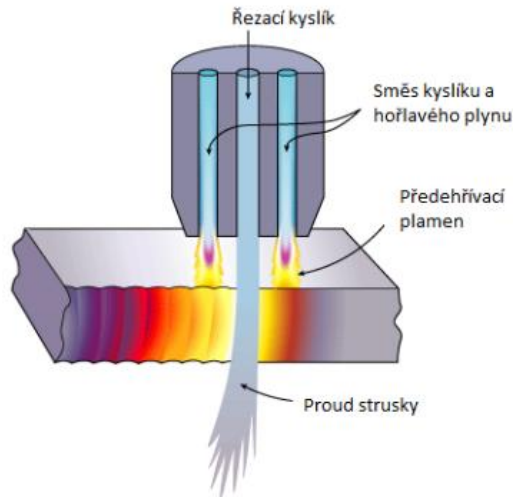
Metodu řezání kyslíkem lze rozdělit na dvě základní skupiny a to strojní a ruční řezání. Každý z těchto procesů má své specifické využití. Nejdůležitější částí řezacího zařízení je řezací tryska. V případě ručního řezání se řezací hořák skládá z těla hořáku, do kterého je umístěna nahřívací a řezací hubice. Hořák je připojen k přívodům řezacího plynu a kyslíku. [17]

Strojní způsob řezání plamenem se provádí na stacionárních řezacích strojích. Používá se pro přesné výpalky a složité tvary. Strojní řezák se skládá z válcového těla řezáku, na němž je upevněn přívod pro kyslík a hořlavý plyn. Směs se vytváří ve směšovací komoře hořáku. [17]



Obrázek 3 - Konstrukce hořáku pro ruční řezání

Strojní způsob řezání plamenem se provádí na stacionárních řezacích strojích. Používá se pro přesné výpalky a složité tvary. Strojní řezák se skládá z válcového těla řezáku, na němž je upevněn přívod pro kyslík a hořlavý plyn. Směs se vytváří ve směšovací komoře hořáku. [17]



Obrázek 4 – Princip řezání kyslíkem

### 2.4.3 Dělení materiálu plazmou

Technologii dělení materiálu plazmou bude věnovaná následující kapitola 3, protože hlavním cílem této diplomové práce je popis a porovnání metod technologií plazmového řezání.

### 3 Technologie dělení materiálu plazmou

Počátky objevení a výzkumu využití plazmatu sahají do dvacátých let 20. století. Plazma je definována jako čtvrté skupenství látek. Fyzikální pojem plazma zavedl v roce 1923 americký fyzik a chemik Langmuir. První poznatky o plazmě vytvořené elektrickým obloukem byly zveřejněné v roce 1922 vědci Gerdien a Lotz. Průmyslově se plazma začíná využívat v 50. letech 20. století. Samotná technologie plazmového řezání od té doby prochází technologickou modernizací. [1] [4] [17]

#### 3.1 Fyzikální teorie plazmy

Plazmatem se nazývá zvláštní stav plynu, kdy se látka stává elektricky vodivou. Když plynu dodáme energii, zvyšuje se kinetická energie jeho molekul a atomů a tím i jeho teplota. Se stoupající teplotou roste pohyb molekul, až do stavu kdy vzájemné srážky způsobují to, že nárazová energie je větší jak vazebná energie a dochází k štěpení atomů. Tento proces se nazývá disociace plynu. [4] [17]

Společně s disociací dochází i k ionizaci plynu. S rostoucí teplotou roste intenzita srážek. Při určité energetické hladině dojde k odštěpení valenčního elektronu z obalu atomu. Vzniká tak záporný volný elektron a kladný iont. V závislosti na počtu odštěpených elektronů se určí stupeň ionizace, závisí na druhu plynu a teplotě. Podle stupně ionizace, může být plazma částečně nebo úplně ionizovaná. [4] [17]

Opakem ionizace je rekombinace. Důsledkem snižování energie a tím i intenzity srážek dochází k spojení vyraženého elektronu s iontem v neutrální atom. K rekombinaci nedochází jenom v samotné plazmě, ale také při kontaktu horkého plazmového plynu s chladným okolím a materiálem. [4] [17]

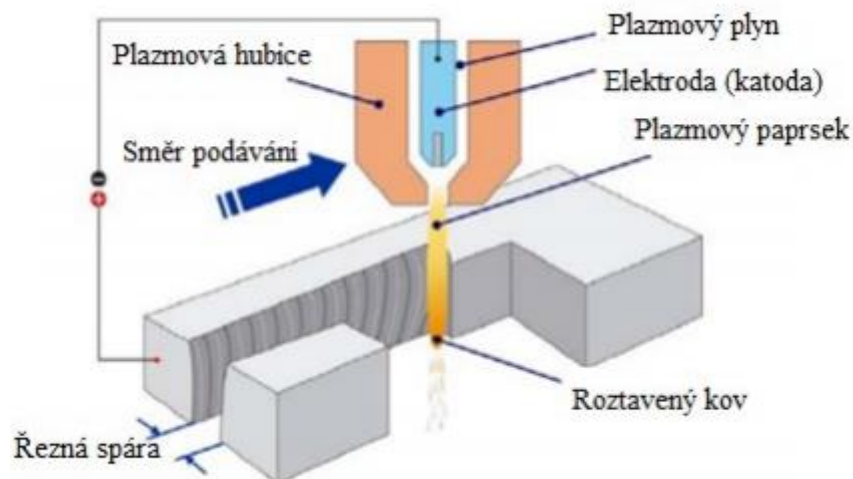
Některé typy plynů nazývané netečné plyny mají uzavřenou valenční sféru, proto u nich dochází k jednodušší ionizaci za potřeby menší energie. Jedná se o plyny jako helium, argon (rozvedeno v kapitole 3.3.4.). [4] [17]

Plazma je tedy definována jako soustava kladně a záporně nabitých částic a částic neutrálních v různých stavech a formách, která na sebe navzájem působí. Důležité při plazmě je dodržení rovnováhy mezi kladně a záporně nabitými částicemi. To znamená, že v jednotce objemu se nachází stejný počet kladně a záporně nabitých částic (tzv. kvázineutrální stav). Plazma se tedy v okolí chová jako elektromagneticky neutrální.

Disociací a následnou ionizací tedy vzniká velké množství částic (elektronů, kladných iontů), které jsou schopné nést elektrický náboj. Tím mění vlastnosti prostředí a z původně nevodivého plynného prostředí se stává vodivá plazma. [17]

### 3.2 Princip plazmového řezání

Princip plazmového řezání spočívá v tom, že mezi řezaný materiál a trysku je přiváděn elektrický proud, kde napětí vytvoří plazmový oblouk. Oblouk vzniká mezi netavící se katodou vyrobenou z materiálu s vysokou emisivitou a vysokou teplotou tavení a anodou, kterou může být řezaný materiál nebo těleso plazmového hořáku. Katoda je nejčastěji vyrobená z wolframu nebo hafnia. Dochází k lokálnímu ohřevu materiálu nad tavící teplotu a odstranění tohoto roztaveného materiálu ionizovaným plynem vysoké teploty. Na materiál tak působí kombinace tepelného a dynamického účinku proudícího plazmatu. Rychlost plazmy na výstupu z trysky může dosahovat rychlosti 1000 až 2000 m/s a teploty od 7000°C do 35000°. Tyto hodnoty jsou závislé na typu použitého plynu. Tryska je chlazená okolo proudící vodou, případně se může jednat o dělení pod vodou. Nejvíce používanými plazmovými plyny jsou argon, dusík, kyslík, případně jejich směsi. [1] [3] [4] [21]



Obrázek 5 - Schéma principu plazmového dělení [1]

### 3.3 Plazmové zařízení

Plazmové zařízení se obecně skládá z plazmového hořáku, zdroje elektrického proudu, tlakové láhve s pracovním plynem a řídicí jednotky. Samotné provádění řezu je

programovatelné pomocí řídicí jednotky a je předem definované. Provedení plazmového řezání může být manuální nebo strojně automatizováno. [1] [3]

Za základní část plazmového zařízení se považuje plazmový hořák. Samotný plazmový hořák se skládá z několika vyměnitelných částí a to: těleso hořáku, rozvod plynu, katoda, tryska, kryt sekundárního plynu, kryt trysky a ochranný kryt. V praktické části této diplomové práce bude použitý plazmový hořák popsán v kapitole 3.8.



Obrázek 6 - Rozbor plazmového hořáku

Nejdůležitější části hořáku jsou elektroda a tryska. Elektroda je nejdůležitější a tepelně nejvíce namáhána součást hořáku. Bývá zapojena jako katoda. Tvoří jakýsi izolační mezičlánek mezi horkým plazmatem a ostatními částmi elektrického obvodu oblouku. Zpravidla je chlazená kvůli vysoké teplotě. Elektroda je nejčastěji vyrobena z mědi nebo slitiny mědi, ve které je nalisovaná vložka z materiálu s vysokou teplotou tavení. Při použití neaktivních plazmových plynů je to wolfram. V případě použití aktivních plynů se jako vložka používá materiál z hafnia. Tento materiál odolává vysokým teplotám i při působení aktivního plynu. [1] [3] [4]

Tryskou se rozumí zařízení, které dokáže zúžit svazek vysoce koncentrovaného plazmového oblouku. Tryska je většinou z mědi a na povrchu je plátovaná niklem pro delší životnost. V závislosti na řezacím proudu se tryska dotýká řezaného materiálu (do 30A), nebo je od materiálu v určité vzdálenosti při použití většího proudu. Tryska je tepelně namáhána, proto je intenzivně chlazená. Hlavním parametrem trysky je její výstupní průměr. Čím menší průměr tím užší plazmový oblouk. [1] [3] [4]

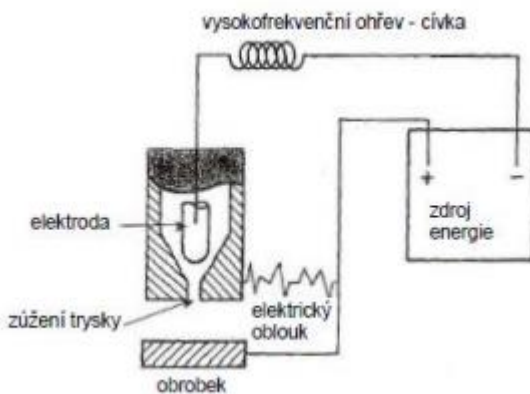
Ochranný kroužek je konstruován k primárnímu chlazení plynu v blízkosti trysky. Prispívá taky k fokusaci oblouku. Je vyroben z odolného materiálu, který zabraňuje jeho

poškození. Při vyšších řezacích proudech může pomoci v dodržení bezpečné vzdálenosti trysky od řezaného materiálu. [1] [3] [4]

Plazmová řezací zařízení jsou zdroje stejnosměrného proudu zapojené na přímou polaritu. Samotná konstrukce hořáku je závislá na mnoha faktorech. Zejména na druhu stabilizace, způsobu chlazení a způsobu jeho využití. Hořáky se dále rozdělují v závislosti na zapojení a to jako hořáky se závislým zapojením a hořáky s nezávislým zapojením, případně jejich kombinací. [1] [3] [4]

### 3.3.1 Závislé zapojení hořáku

Hlavní řezací oblouk hoří mezi záporně zapojenou elektrodou v hořáku (katodou) a řezaným materiálem, který je zapojen kladně jako anoda. Zapálení oblouku vzniká za pomoci přídavného oblouku (tzv. pilotní oblouk) mezi elektrodou a materiálem. Proud plazmy je pomocným obloukem ionizován a následně naskočí plazmový oblouk na řezaný materiál a dochází k řezu. Tryska je v tomto případě méně tepelně namáhána a má delší životnost. Tento typ hořáku má taky lepší účinnost. Využívá se pro řezání, svařování a navařování elektricky vodivých pevných materiálu – kovů. [3]



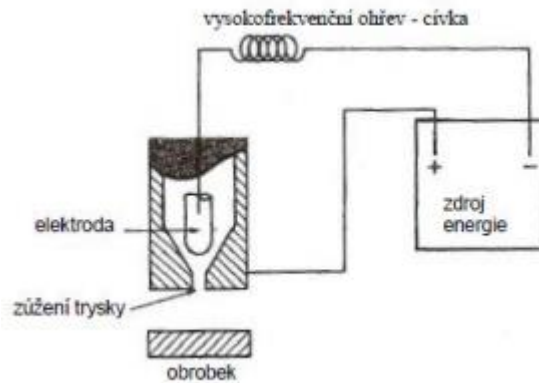
Obrázek 7 - Schéma závislého zapojení plazmového hořáku [4]

### 3.3.2 Nezávislé zapojení hořáku

Označuje se taky jako zapojení s nepřeneseným obloukem. Plazmový oblouk hoří jenom v hořáku. Vzniká mezi elektrodou (katodou) a měděnou tryskou (anodou). Tento typ oblouku je zcela nezávislý na řezaném materiálu. Z hořáku vychází pouze proud plazmatu o vysoké teplotě. Tryska je extrémně tepelně namáhána, proto je ve většině případů chlazená. Z důvodu nízké životnosti trysky se používají inertní plyny, které zabraňují reakcím na povrchu trysky. V případě aktivních plynů by byla životnost



trysky ještě nižší. Tento typ zapojení se používá pro řezání nevodivých materiálu jako keramika a nekovové materiály častěji se ale tato metoda používá na nástřik plazmatem. [3]



Obrázek 8 - Schéma nezávislého zapojení plazmového hořáku [4]

### 3.3.3 Kombinovaně zapojený hořák

Využívá se zde obou typů oblouku. K zažehnutí oblouku se používá nezávisle zapojený oblouk a pro samotné řezání se pak používá závisle zapojený plazmový oblouk. Tento způsob se používá kvůli nízkému opotřebením součástí hořáku. [3]

### 3.3.4 Druhy plynů v plazmových zařízeních

Plyny, které jsou používány v plazmových zařízeních, jsou dány konstrukčním řešením daného plazmového zařízení a druhem řezaného materiálu. Plyny v plazmových zařízeních dělíme na *plazmové plyny*, *fokusační plyny* a *asistenční plyny*. [1] [3]

- *Asistenční plyny* – jsou plyny, které napomáhají tvorbě řezu. Obklopují paprsek plazmatu a pracovní místo na obrobku a chrání je před účinky atmosféry. Asistenční plyny jsou argon, dusík.
- *Fokusační plyny* - zužují a zaostřují proud plazmy vystupující z hořáku. Používají se zejména při svařování plazmou. Jako plyny se používají argon, helium a dusík, nebo směsi plynů argon + vodík, argon + dusík
- *Plazmové plyny* - jsou plyny, které se přivádí do elektrického oblouku, kde ionizuje a následně jsou přeskupeny do plazmatického skupenství a použity jako řezný prostředek. Jako plyny se používají argon, vodík, dusík, kyslík, nebo směsi argon + dusík, dusík a vodík, případně vzduch. [1] [3]

Tabulka 2 - Použití plynu podle materiálu

<b>Materiál</b>	<b>Plazmový a asistenční plyn</b>
Konstrukční ocel	Kyslík, vzduch
Vysoce legovaná ocel	Argon + vodík, argon + vodík + dusík, argon + dusík, vzduch, dusík,
Neželezné kovy	Argon + vodík, vzduch
Kompozitní materiály	Argon + vodík, argon + vodík + dusík, vzduch, kyslík

Použití plazmových plynů se také odráží na maximální teplotě plazmového oblouku. Ten může v závislosti na použitém plynu dosahovat hodnoty uvedené v tabulce 3. [1] [8] [29]

Tabulka 3 - Maximální teplota plazmového oblouku v závislosti na použitém plynu

Dusík N <sub>2</sub>	9 000 K
Vodík H <sub>2</sub>	10 000K
Argon	16 000 K
Helium	20 000 K
Vodou stabilizovaná plazma	35 000 K

V následující části popíšu vlastnosti používaných plynů. Rozhodujícím faktorem je jejich ionizační energie. [29] [30]

- Vodík – Je plyn, který se používá hlavně ve směsích s argonem nebo dusíkem. Vzhledem k jeho nízké atomové hmotnosti v kombinaci se zmíněným argonem tvoří ideální plazmový plyn pro řezání materiálu z CrNi , Al, slitin Al velkých tlouštěk
- Argon – je jednoatomový plyn bez barvy a zápachu, využívá se při svařování a dělení kovových, ale i nekovových materiálů. Je inertní čímž je vhodný při dělení a svařování reaktivních kovů jako titan, zirkon, molybden.
- Dusík – je plyn o vysoké ionizační energii a s vysokou tepelnou vodivostí. Je velmi vhodný pro plazmové řezání. Používá se k řezání nelegovaných ocelí o

menších tloušťkách. Dusík se ve směsi s vodíkem používá taky na řezání oceli CrNi a na řezání hliníkových slitin

- Kyslík – se používá hlavně k řezání nelegovaných ocelí o menších tloušťkách. Účinkem kyslíku na tavený materiál se na získaném řezu netvoří struska. Výhodou čistého kyslíku oproti dusíku a stlačenému vzduchu je to, že na řezné hraně nezůstává dusík. Při následném svařování tak nehrozí tvorba pórů.
- Stlačený vzduch – se používá zejména při řezání tenkých plechů. Stlačený vzduch však nesmí obsahovat vlhkost a zbytky olejů. Stlačený vzduch kombinuje výhody kyslíku dusíku.

Tabulka 4 – Přehled používaných plazmových plynů a jejich vlastnosti

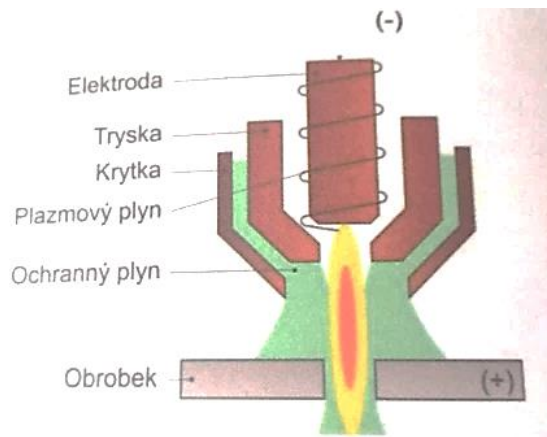
<b>Plyn</b>	<b>Rel. Hustota (vzduch=1)</b>	<b>Ionizační energie (eV)</b>	<b>Chemická aktivita</b>
Vodík	0,06	13,59	Redukční
Argon	1,38	15,76	Inertní
Dusík	0,91	14,55	Neredukční
Kyslík	1,04	13,62	Oxidační

### 3.3.5 Stabilizace plazmového oblouku

Elektrický oblouk musí být v plazmovém hořáku stabilizován plynem, vodou případně jeho kombinací. [1] [3] [4]

#### 3.3.5.1 Stabilizace plynem (argon, dusík, vodík a jejich směsi)

Jedná se o v minulosti velmi používaný způsob řezání plazmou. Argon díky své nízké ionizační energii zajišťuje dobré podmínky pro zapalování a stabilitu oblouku. Vysoká atomová hmotnost argonu dodává plazmovému oblouku vystupujícímu z hořáku vysokou měrnou hmotnost. To se projevuje pozitivně při vyfukování roztaveného materiálu z řezné spáry. Vodík má vysokou tepelnou vodivost, což se příznivě projevuje na přenosu tepla na řezaný materiál. Kombinací argonu a vodíku lze dosáhnout optimálních výsledků z hlediska teploty plazmatu, rychlosti řezu a kvalitou řezu. Dusíková plazma se používá nejvhodněji pro řezání vysokolegované oceli velkých tloušťek. Při použití dusíku s argonem není uspokojivá kvalita řezu, protože struska je vlivem absence kyslíku málo tekutá a těžko se odstraňuje z řezné spáry. [1] [3]



Obrázek 9 - Schéma plazmového hořáku s plynovou stabilizací [3]

### 3.3.5.2 Stabilizace oblouku stlačeným vzduchem

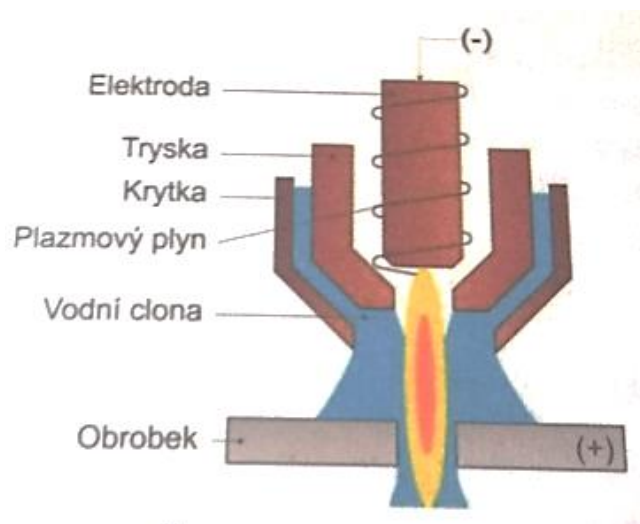
V současnosti se jedná o nejběžněji používanou koncepci plazmového řezání. Schematicky se stabilizace oblouku stlačeným vzduchem podobá na stabilizaci plynem. Používá se pro všechny materiály, především uhlíkové oceli do tloušťky 40 mm. Část kyslíku ze vzduchu se účastní exotermické reakce a zlepšuje se tak proces řezání při vyšší řezné rychlosti. Určité zvýšení rychlosti řezání u stabilizace stlačeným vzduchem oproti směsi argonu a vodíku lze přičíst příznivým vlastnostem dvouatomových plynů, kdy dochází k uvolňování tepla rekombinací atomu v molekuly a současně vyššímu tepelnému obsahu vzduchového plazmatu ( $N_2 + O_2$ ). K stabilizaci se používá tlak vzduchu 0,4 až 0,8 MPa při vysokém průtočném množství až 130 l/m. Zvyšování průtoku vzduchu je ekonomicky únosné a způsobuje intenzivnější zúžení sloupce oblouku. Při větším průtoku vzduchu se snižuje teplota povrchových vrstev sloupce plazmatu díky čemu je rychlost řezání větší, řezná spára je užší a kvalita ploch lepší. Hlavní nevýhodou vzduchové plazmy je rychlé opotřebení dílů vystavených oxidací. Díky oxidaci na chladnější hraně řezu se na spodní hraně netvoří krápníky z nataveného kovu. [1] [3]

### 3.3.5.3 Stabilizace vodou, případně kombinací plynu a vody

U některých plazmových hořáků se používá pro stabilizaci oblouku voda. Hořáky jsou v tomto případě větších rozměrů a obtížně se s nimi manipuluje. Hořák s vodní stabilizací se osvědčuje pro stříkání plazmatem. Někdy se používá řezání hořákem s vodní sprchou. Jedná se o kombinaci stabilizace vody a plynu. Hořák je upraven prstencem, který přivádí vodu okolo plazmového oblouku a tvoří tak sprchový plášť. Přívod vody se dostává k okrajovým vrstvám plazmového oblouku a tím se díky

ochlazení dosáhne jeho zúžení a navíc se disociací vody ve vodík a kyslík vytváří vhodná plynová směs. Touto technologií dochází k zlepšení povrchu řezných ploch a lze dosáhnout vyšší řezné rychlosti. Řezaný materiál je umístěn na pracovním stole tak, že spodní strana se dotýká vodní hladiny (tzv. vodní lůžko). Výhoda této metody je hlavně v oblasti hygieny práce. Vodní clona odvádí vznikající škodlivé toxické plyny a snižuje i hlučnost zařízení. Z technologického hlediska je výhodné, že řezaný materiál zůstává studený, což se příznivě projevuje v tepelně ovlivněné oblasti. [1] [3]

Úpravou hořáku lze tuto metodu použít i pod vodou. Hořák musí být vodotěsně izolován. Výhody jsou obdobné jako v případě stabilizace vodou. Lze řezat pod vodou do hloubky asi 10m. [1] [3]



Obrázek 10 - Schéma plazmového hořáku s vodní stabilizací [3]

### 3.4 Jednotlivé fáze řezání plazmou

#### 1. Předfuk

Pod pojmem předfuk se rozumí spuštění plazmového plynu. Plazmový plyn je směřován dvěma směry. V prvním případě je plyn veden vnitřní tryskou kolem elektrody ven z hořáku. Toto proudění plynu tvoří vysoce objemový cirkulující oblak. Ten je ionizován elektrickým proudem a tvoří samotný plazmový svazek. Druhým případem proudění plynu je vnější chladicí oblast hořáku. V tomto případě je plyn využíván jako chladicí médium. Odvádí teplo, které vzniká v plazmovém hořáku a tím zvyšuje životnost hořáku. Předfuk trvá obvykle 2 sekundy. [1] [3]

## **2. Pomocný oblouk**

Po uplynutí doby předfuku je zapálen pomocný oblouk, označován taky jako pilotní oblouk (Pilot Arc). Ten je zapálen pomocí vysokého napětí s vysokou frekvencí (napětí 5 až 10 kV a proud do 10A) mezi tryskou a elektrodou. Pomocný oblouk usnadňuje startování samotného hlavního řezacího oblouku. Trvá do 10 sekund. Jeho nevýhodou je vysoké tepelné namáhání trysky. Její životnost je omezená kromě jiného i počtem startů a délkou hoření pomocného oblouku. [1] [3]

## **3. Startování**

K nastartování plazmového oblouku dochází po přiblížení hořáku k elektricky uzemněnému řezanému materiálu. Při přiblížení dojde k automatickému propojení pomocným obloukem a přenesení oblouku na řezaný materiál. Startování je třeba provádět v ideální poloze. Při velkém přiblížení může dojít k spálení trysky hořáku, naopak při velké vzdálenosti dochází ke kaskádovému oblouku. Dochází relativně ke snížení napětí (do 250V) a zvýšení proudů (do 1000A). [1] [3]

## **4. Hlavní řezací oblouk**

Probíhá po ustálení výšky hořáku nad materiálem. Pro dosažení požadované kvality řezu je důležitá konstantní řezná rychlost. Toto má zásadní vliv na životnost plazmového hořáku, resp. Jeho příslušenství. Na základě praktických zkušeností, lze konstatovat, že vhodná rychlost je taková, kde je plazmový oblouk odkloněn o 5° až 10° dozadu za pohybujícím se hořákem. Při této rychlosti je kov nejen taven, ale i odstraňován z místa řezu. V případě startu uprostřed materiálu (tzv. propalování) je vhodné mít hořák umístěn pod úhlem 45°. Dojde tak k preventivnímu zabránění poškození hořáku před kapkami roztaveného kovu. [1] [3]

## **5. Dofuk**

Při ukončení řezání dochází k proudění plazmového plynu přes plazmový hořák. Dochází k chlazení hořáku, elektrody a trysky. Účelem dofuku je dochlazení dílu pro delší životnost. Dofuk trvá cca 20 sekund. [1] [3]

### 3.5 Technologické parametry plazmových řezacích zařízení

Parametry pro plazmové řezání lze rozdělit do tří kategorií. První kategorií jsou uživatelem neovlivnitelné nebo těžko ovlivnitelné vnitřní parametry zařízení. Jedná se o konstrukční charakteristiky zařízení.

Druhou skupinou jsou parametry řezaného materiálu. Materiál je charakterizován vstupními parametry a to jsou druh materiálu, chemické složení, tloušťka a tvarová složitost řezu, fyzikální a jiné vlastnosti. Na druhé straně je materiál charakterizován i výstupními parametry a to vlastnostmi materiálu po samotném procesu plazmového dělení. Opět se jedná o parametry: tvar a rozměr součástí, velikost tepelně ovlivněné oblasti, drsnost řezné hrany, tvrdost, změna chemického složení, nerovnost povrchu a vznik okujů na povrchu.

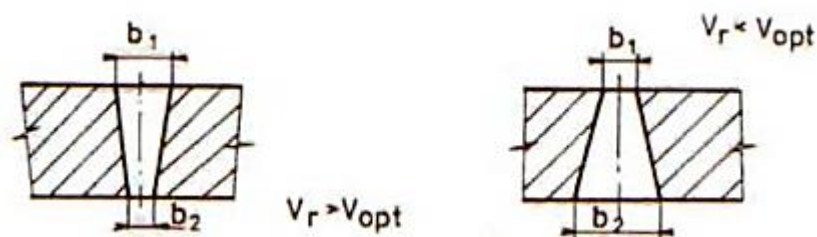
Třetí kategorií jsou technologické parametry zařízení, které je možné pohotově uživatelem zaměnit. Patří mezi ně:

- Výstupní výkon – možnost plynule měnit výkon od nuly po maximum. U plazmových zařízení je nastavitelné proudové zatížení.
- Vzdálenost – vzdálenost mezi výstupní tryskou a děleným materiálem. Volí se s ohledem na materiál co možno minimální, aby nedocházelo k rozptylu plazmového oblouku. Minimální vzdálenost trysky od materiálu je volená s ohledem na ochranu trysky před roztaveným kovem.
- Rychlost posuvu hořáku – rychlost řezání, která je závislá na děleném materiálu, jeho tloušťce a požadované kvalitě řezu. Optimální rychlost posuvu se získává z experimentálních hodnot
- Tlak plazmového plynu
- Objemový průtok plynu – závislí na průměru trysky a hodnotě tlaku plynu. [3]  
[4]

#### 3.5.1 Optimální parametry řezání

Optimálními řeznými parametry nazýváme parametry, které vedou k uspokojení požadavků uživatele. Jako hlavní požadavky jsou kvalita řezných ploch, geometrická přesnost řezu, úzká řezná spára, co nejmenší tepelně ovlivněná oblast řezaného materiálu, rychlost řezání a vysoká produktivita práce. Sekundárně potom i životnost příslušenství řezacího hořáku. Uspokojivá kvalita řezu se dosáhne rovnoměrným

přívodem tepla po celé tloušťce materiálu. Optimální kvalita řezné plochy a kolmé hrany bez otřepů se docílí, když se anodová skvrna nachází na spodním okraji řezu. Hlavní vliv na správném rozložení tepla má řezná rychlost. Optimální rychlost je obvykle určována experimentálně. V případě vysoké řezné rychlosti se materiál nedokáže zahřát v celé ploše řezu a tak je v horní části řezu odevzdáváno více tepla. To způsobuje širokou řeznou spáru na horním okraji a tvar řezné spáry je do tvaru písmene V (viz obr. 11). Při příliš nízké rychlosti dochází k přehřívání materiálu, zejména u spodní hrany. Dochází k zvětšování tepelně ovlivněné oblasti a řezná spára je rozšířená u dolního okraje řezu. [1] [21] [24]



Obrázek 11 - Tvar řezné spáry při rozdílných řezných rychlostech  $v_r$  – rychlost řezání,  $b$  – šířka řezné spáry [1]

Dalším důležitým faktorem při optimalizaci parametrů řezu je vzdálenost trysky od materiálu při řezání, hlavně v případě použití větších řezacích výkonů. Z hlediska dodržení fokusace paprsku je tendence snižovat tuto vzdálenost. Při větších řezacích výkonech je nutnost držet hořák v určité minimální výšce, kvůli ochraně trysky před rozstříkem nataveného materiálu. Naopak s rostoucí vzdáleností klesá hloubka protavení, a proto může při špatně zvolené vzdálenosti dojít k nedořezání. Optimální výška se pohybuje od 2,5 do 7 mm. Hořák vyžaduje přesné vedení v určené výšce. I nejmenší změna ideálního stavu vyvolá změnu napětí na hořáku a tím změnu výsledků řezání. Konstantní kvalitu řezu zajišťuje systém kontroly pohybu hořáku ve vertikální ose na základě údajů pocházejících ze zařízení. Způsobů kontroly je více, nejčastěji je využíván jev změny napětí na hořáku v nelineární závislosti výšky hořáku nad materiálem. [1] [21] [24]

Dalším důležitým parametrem je šířka řezné spáry. Ta je závislá na řezné rychlosti, výstupním průměru trysky a vzdálenosti trysky od materiálu. Optimální šířka řezné spáry je 1,5 až dvojnásobek průměru trysky. [1] [21]



Šířka tepelně ovlivněné oblasti je závislá především na rychlosti řezání a tím na množství vneseného tepla do materiálu. U plazmového řezání tvoří tepelně ovlivněná oblast poměrně přijatelné hodnoty oproti řezání kyslíkem, nicméně bude větší jak v případě řezání laserem. U moderních plazmových zařízení se v závislosti na materiálu pohybuje tepelně ovlivněná oblast od 1 do 4 mm. [1] [3] [21]

Hlavní nevýhodou plazmového řezání je, že při větších tloušťkách dochází k určité nepřesnosti řezné plochy – nepřesnosti kolmosti. Díky samotné tendenci plazmy podřezávat vznikají při vypalování podseknuté oblasti, kde je výpalek na spodní straně menší než na horní (viz. obr 11). Další kvalitativní problémy přináší body zapálení a ukončení řezu. Při zapálení oblouku dochází k natavení materiálu, které je větší než řezná spára. Tento problém se dá vyřešit umístěním zápalného a ukončovacího bodu mimo finální produkt. [1] [3] [21]

### 3.6 Bezpečnost práce při řezání plazmou

Provoz a zacházení s plazmovým řezacím zařízením s sebou nese i rizika nebezpečí úrazu pracovníka. Dochází při něm k vícenásobnému souběhu pracovních rizik. Při procesu plazmového řezání se vzhledem k vysokým teplotám a přítomnosti hořlavých látek na pracovišti zvyšuje riziko požáru. Proto je řezání plazmou zařazeno mezi zvláštní procesy, které mohou provádět jenom operátoři, kteří by měli být proškolení dodavatelem plazmového zařízení. Existují pravidla a metody pro minimalizaci nebo zcela eliminaci rizika poškození zařízení, pracoviště a zdraví pracovníka. [1] [3] [4]

Hlavní zdravotní rizika při řezání plazmou:

- Popálení – například odstříkujícími kapkami kovu nebo kontaktem s horkými částmi nástroje nebo řezaného materiálu
- Přiotrávení – zejména se jedná o vdechování aerosolu, kovových par, plynů a prachových částic, které vznikají při metalurgických a fyzikálně chemických procesech za vysokých teplot.
- Hlučnost – při řezání plazmou může být hlučnost až kolem 110 dB. Při dlouhé době vystavení hluku může dojít k trvalému poškození sluchu. Blíže bude tato problematika rozebrána v kapitole 4.4.1.

- Úrazy elektrickým proudem – při dotyku těla s řezanou konstrukcí, používáním poškozených zdrojů, kabelů nebo hořáku může dojít k úrazu elektrickým proudem.
- Ultrafialové a infračervené záření – se vyskytuje ve všech typech obloukového svařování a plazmového řezání. Viditelné světlo může poškodit sítnici, ultrafialové vyzařování může způsobit tzv. nablýskání v očích, které způsobí zánět spojivek, případně potom další zdravotní komplikace spojené s poškozením zraku.
- Ozón – působením oblouku vzniká ozón, který je velmi nebezpečný a může způsobit snížení imunity, podráždění očí, nosu a krku. Při řezání plazmou dochází k reakci kyslíku s párami kovů. Vzniklé pevné oxidy železa, manganu, chromu a niklu jsou nebezpečné pro lidský organizmus. Proto musí být pracoviště vybaveno kvalitním odsáváním škodlivin. [1] [3] [4]

### 3.7 Plazmový zdroj Kjellberg Firsenwalde HiFocus 280i neo



Obrázek 12 - CNC plazmový řezací zařízení Vanad Proxima

Pro experimentální část této diplomové práce bylo použito vybavení laboratoře Ústavu strojírenské technologie, FS, ČVUT v Praze, skládající se z plazmového zdroje Kjellberg Firsenwalde HiFocus 280i neo, automatického CNC řezacího stroje Vanad Proxima se sekčnou odsávaným pracovním stolem a odsávacím a filtračním zařízením od firmy Kemper.

Samotný plazmový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo je jednou z nejflexibilnějších a nejvýkonnějších vysoko přesných plazmových řezacích zařízení. Rozsah řezání je od 0,5mm do 70mm u konstrukčních ocelí. Moderní inverterová technologie umožňuje nejvyšší kvalitu a funkčnost. HiFocus 280i neo je ideální pro výrobce a distributory ocele. Samotný plazmový zdroj je kombinovaný s 2D případně 3D CNC - řídicími systémy. Uživatel má díky HiFocus neo v porovnání s konkurencí možnost vyšší rychlosti řezání elektricky vodivých materiálů, což zároveň zaručuje výbornou kvalitu a nízké náklady na proces řezání. Díky optimalizované technologii dochází k šetrnému zacházení s materiálem a proces řezání je efektivnější. Existuje i varianta pro řezání pod vodou. Standardní využívání HiFocus 280i neo je k dispozici s technologií ContourCut Technology. Jako další vývoj technologie ContourCut je technologie Silent Cut. Ta snižuje hladinu akustického tlaku až o 15 dB v průběhu řezání s proudy mezi 60 a 160 A. [9] [15] [20]

Konstrukční prvky proudových zdrojů jsou umístěny v robustních skříních, které jsou lehce pojízdné a mohou být podle potřeby snadno transportovány jeřábem. Ovládací a ukazovací prvky jsou umístěny na čelní straně skříně. Chlazení probíhá pomocí otvorů na čelní a bočních stranách skříně. Rozhraní a veškeré přípojky jsou umístěny na zadní straně skříně. Na zadní straně se také nachází filtr pro externí oběhové chlazení. Průtočné množství, tlak a teplota chladicí kapaliny je kontrolováno plazmovým zdrojem. [9] [15] [20]



Obrázek 13 - Plazmový zdroj Kjellberg Firsenwalde HiFocus 280i neo

Pomocí aplikace plazmového FineFocus principu s extrémním zúžením plazmového oblouku s mimořádně vysokou hustotou energie napomáhá k zlepšení technologických předností. Dochází k minimalizaci spotřeby plynů a energie. Kvalitativně se plazmové řezy přibližují k laserovým řezům v širokém rozsahu tloušťek materiálu. Z ekonomického hlediska jsou pořizovací náklady na plazmové zařízení třetinové v porovnání s laserovým zařízením. Řezané plochy dosahují vysoké kvality, což výrazně snižuje náklady na zpracovávaný kus.

Pomocí zařízení HiFocus 280i neo je možno řezat pomocí hned několika řezných režimů:

- HiFocus Contour Cut
- HiFocus Contour Cut speed
- HiFocus
- HiFocus plus
- HiFocus F
- HiFocus F plus
- HiFinox
- Silent Cut

Pro řezání konstrukčních ocelí, které byly použity i v rámci této práce se běžně používají technologie Contour Cut, Contour Cut Speed a Silent cut. [9] [13] [15] [20]

### 3.7.1 HiFocus Contour Cut

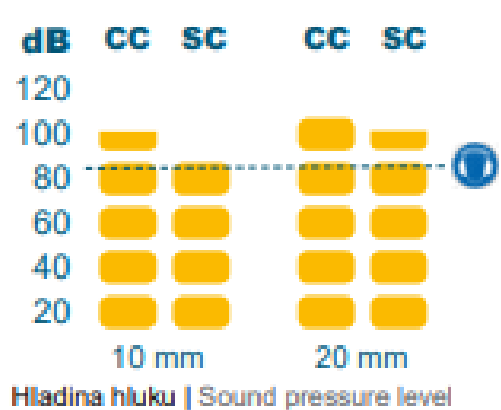
Contour Cut je jedna z moderních patentových technologií plazmového řezání konstrukčních oceli. Používá se na řezání malých kontur, úzkých pásů a malých otvorů z konstrukční oceli. Při řezání děr s poměrem průměr/tloušťka materiálu 1:1 jsou výsledky o poznání lepší oproti konkurenci. I tady však při tloušťce materiálu 10 mm je tento proces poměrně obtížný. Pomocí této technologie lze řezat přímo bez nutnosti vyjíždění v oblasti ostrých hran. Řezná hrana dosahuje uspokojivých výsledků, což má významný vliv na zvýšení produktivity a poklesu nákladů. Z dostupných metod plazmového řezání se pomocí Contour Cut dosahuje nejlepší kvality s ohledem na přesnost obrysů, kolmosti a kvality povrchu. V případě opakování je velmi dobrá přesnost rozměrů. [5] [14] [20]

### 3.7.2 HiFocus Contour Cut Speed

HiFocus Contour Cut Speed je optimalizovaná technologie plazmového řezání, používána pro rychlé řezání vnějších obrysů. Rychlost řezání může být až o 50 % větší než v případě HiFocus Contour Cut a výsledek je porovnatelný s jinými technologiemi. Optimalizací technologie Contour Cut na Contour Cut Speed došlo ke snížení nákladů na řezaný metr použitím vyšších rychlostí řezání. Pomocí této technologie lze dosahovat kvalitních řezů bez otřepů při vysoké řezné rychlosti. Vysokou rychlostí řezání dochází k nižší spotřebě plynu. Řezaný materiál má velmi malou tepelně ovlivněnou oblast. [6] [20]

### 3.7.3 Silent Cut

Při vysoce kvalitním řezáním plazmou vzniká důsledkem vysoké hustoty energie a rychlosti toku plazmy v průběhu plazmového řezání dochází k tomu, že hladina zvuku může dosahovat více než 100 dB. Technologie Silent Cut je optimalizovaná technologie Contour Cut, která nabízí řešení na výrazné snížení hluku v průběhu řezání. Technologie Silent Cut snižuje hladinu akustického tlaku až o 15 dB v průběhu řezání materiálu mezi tloušťkami materiálu 4 až 30 mm v proudovém rozsahu mezi 60 až 160 A. Snížení hladiny zvuku o 10 decibelů je lidským uchem vnímaný jako poloviční hodnota hlasitosti. Silent Cut je tak považovaný za technologii, která je kvalitou řezu podobná jako metoda Contour Cut a významně přispívá k ochraně zdraví a bezpečnosti při práci s vysokou kvalitou řezu. [7] [12] [16]



Obrázek 14 – Výrobce uváděné porovnání hlučnosti Silent Cut - SC a Contour Cut - CC [12]

### 3.7.4 Technické údaje zařízení pro řezání plazmou

Tabulka 5 - Technické údaje o plazmovém zařízení [15]

Síťové napětí	3x 400V
Maximální příkon	67 kVA
Síťový kabel	4x 35 mm <sup>2</sup>
Účinnost	0,91
Řezací proud	10 – 280 A
Řezací napětí ( při 100%)	200V
Řezací výkon	56 kW
Hmotnost	422 kg
Rozměry	1030 x 680 x 1450 mm
Metoda zapalování	Zapalování pomocí vysokonapět'ové zapalovací jednotky
Chlazení hořáku	Externí cirkulační chlazení
Chladicí prostředek	Kjellfrost -15° nebo Kjellfrost -25° (směs chladicího prostředku s integrovanou ochranou proti korozi).

### 3.8 Strojní hořák pro plazmové řezání PeCut 451

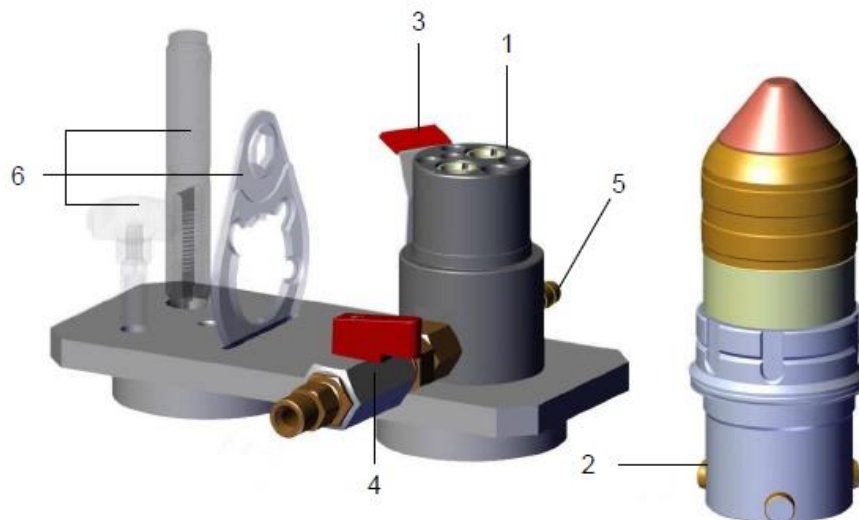
Plazmové hořáky typu PerCut 451 od firmy Kjellberg Finsterwalde jsou podle normy EN 60974-1 určeny pro použití se zdroji plazmového proudu HiFocus. Tyto plazmové hořáky tvoří s uvedenými proudovými zdroji bezpečný technický celek. [9] [16] [20]



*Obrázek 15- plazmový hořák PerCut 451*

Strojní hořáky pro plazmové řezání se skládají z hlavy hořáku, násady hořáku, svazku hadic a spotřebních dílů. Hořáky lze používat s plazmovými plyny jako vzduch, kyslík, argon, dusík, vodík a jejich směsi. Jako fokusační plyny se používají vzduch, kyslík a dusík nebo jejich směsi. Tryska je v držáku trysky upevněna vyšroubovatelnou krytkou. Mezi tryskou a krytkou trysky cirkuluje chladicí prostředek, který zároveň chladicí trubicou protéká i katodou. Tím se provádí účinné chlazení vysoce tepelně namáhaných součástí plazmového hořáku. [9] [16] [20]

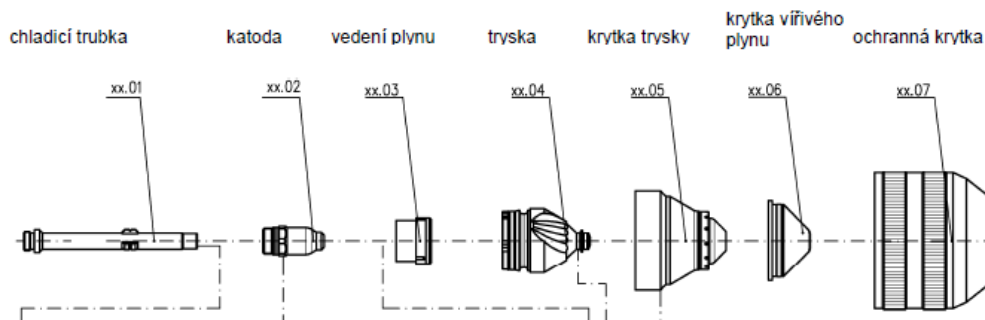
V závislosti na parametrech řezu a metodě řezání dochází k výměně spotřebních dílů uváděných v provozním manuálu. Před zahájením provozu plazmového zařízení se musí zkontrolovat, zda se v hlavě hořáku nachází spotřební díly pro příslušnou metodu řezání. Na strojním hořáku PerCut 451 se kontrola a montáž spotřebních dílů provádí umístěním výměnné hlavy do parkovací stanice pro výměnnou hlavu (viz obr. 16). Výměnná hlava se musí nasadit na parkovací stanici správně. Pomocí stlačeného vzduchu se z hlavy odstraní zbylý chladicí prostředek. Podle provozního návodu bude provedena výměna spotřebních dílů. Po ukončení výměny spotřebních dílů se výměnná hlava sejme tak, že se uvolní držák 3 (na obr. 16) a hlava se vytáhne kolmo nahoru. Výměnná hlava se po složení následně opět nasadí na hořák. [9] [16] [20]



Obrázek 16 – Parkovací stanice a výměnná plazmová hlava [20]

Mezi základní vyměnitelných součástí strojních hořáku patří: chladicí trubka, katoda, vedení plynu, tryska, krytka trysky, krytka vířivého plynu a ochranná krytka (blíže popsáno v kapitole 3.3 a obr. 6). Z hlediska kvality řezu je nejdůležitější součástí katoda. V případě použití příliš opotřebované katody, může vzniknout závada na plazmovém hořáku. Pro různé metody plazmového řezání jsou určeny jiné součásti.

V rámci této práce se u experimentu používalo stále stejných hodnot proudu 90 A při metodách Silent cut a Contour cut. Skladba strojního hořáku se v těchto případech lišila jenom v jiném typu trysky. Pro metodu Contour Cut byla použita tryska G2010Y a pro metodu Silent Cut byla použita tryska G 2010S. Rozdíl mezi tryskami je především v tvaru drážek pro chlazení. Jedná se o trysky ThermaCut. Oproti originálním tryskám se tyto trysky vyznačují maximálním chlazením povrchu trysky a účinným odvodem tepla. Toto řešení teda prodlužuje životnost spotřebních dílů. [16] [20]



Obrázek 17 - Rozebraný plazmový hořák [20]



## 4 Experimentální část

V praktické, experimentální části mé diplomové práce jsem se věnoval konkrétnímu experimentu na zadaném materiálu konstrukční oceli S 235 JR. Úkolem praktické části diplomové práce bylo vyhodnotit vliv různých parametrů řezání (které byly reprezentovány změnou řezných rychlostí) a porovnání dvou základních režimů použitelných u plazmových zdrojů značky Kjellberg – Contour cut a Silent cut (popsané v kapitolách 3.7.1 a 3.7.3). Porovnání bylo hodnoceno z hlediska kvality realizovaných rovinných řezů (měřením drsnosti řezné plochy, kolmosti řezu a ovlivnění tvrdosti řezné hrany) a u obou režimů řezání byla vyhodnocena i hlučnost plazmového zařízení při použití různých rychlostí řezání.

### 4.1 Vzorky vytvořené pomocí metody Contour Cut

Experiment probíhal na plazmovém zařízení Vanad Proxima s plazmovým zdrojem Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo. Jako řezaný materiál byl použitý ocelový plech S 235JR o tloušťce 10mm.

Ocel S 235 JR se řadí mezi nelegované konstrukční oceli obvyklých jakosti. Tato ocel je vhodná především ke svařování a to všemi obvyklými způsoby. Tyto oceli jsou využívány pro tenkostěnné konstrukce strojů a méně namáhaná svařovaná konstrukce. Garantovaná hodnota rázové práce je 27 J při 20 °C. Mez kluzu této oceli je  $R_e = 235$  MPa, mez pevnosti je v rozmezí od  $R_m = 360$  až 440 MPa. Minimální tažnost je potom 23%. Na zkušebních vzorcích byla experimentálně změřena tvrdost základního materiálu. Pro každý vzorek bylo změřených pět hodnot tvrdosti. Průměrné hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tabulce 6. Průměrná hodnota tvrdost základního materiálu je potom 211 HV 1. K technologickým vlastnostem oceli S 235 patří dobrá svařitelnost, tváření za tepla, tváření za studena, tento materiál je vhodný k ohýbání, lisování a tažení. Chemické složení konstrukční oceli S 235 v maximálních hodnotách je: C= 0,17 %, Mn= 1,40%, P=0,035%, S=0,035%, N=0,012, Cu= 0,55%.

Tabulka 6 - Průměrné hodnoty tvrdosti základního materiálu

	CC 1,6	CC 2,1	CC 1,1	SC 2,5	SC 1,7	SC 2,1
HV 1	208,16	212,6	228,0	202,57	203,56	210,76

V první části experimentu bylo vyhotovených celkem 6 vzorků vždy při jiných řezných rychlostech a použitím metody Contour Cut a Silent Cut. Parametry řezání byly určeny pomocí provozního manuálu (doporučení výrobce plazmového zdroje). V prvním případě byla použita metoda řezání Contour Cut (viz kapitola 3.7.1). Na základě manuálu byla sestavena výměnná hlava plazmového hořáku pomocí použití konkrétních dílů pro danou sestavu (pro proudové zatížení 90A) Toto je sestava použitelná pro tloušťky řezaných materiálů od 5 do 15 mm, tedy optimální pro zvolenou tloušťku 10 mm.

Pro řezací režim Contour Cut se sestava hořáku skládá z následujících dílů: chladicí trubka G902Y, katoda G015Y, vedení plynu G101C, trysku G2010Y, krytku trysky G3028, krytku vířivého plynu G4030 a ochranní trysku G502 (viz obr. 17). [5] [11] [20]



Obrázek 18 - Vstupní údaje pro řezání metodou Contour Cut při 90 A

Pro tloušťku materiálu 10mm je na stroji předurčen řezací proud 90A. Napětí plazmy při řezání je 134V. Zadáním materiálu stroj určil i potřebný plazmový a doplňkový plyn pro řezání. Jako plazmový plyn byl použitý kyslík a jako vířivý plyn vzduch. Po zadání typu materiálu a metody řezání samotný stroj na základě zadaných parametrů a provozních dat určil optimální rychlost řezu. V případě Contour Cut byla optimální rychlost řezu stanovena na 1,6 m.min<sup>-1</sup>.

Následně byl vyhotovený první výpalek. Zvolen byl jednoduchý tvar obdélníku o rozměrech 200 x 50mm. Pro metodu Contour Cut byly vyhotoveny další dva vzorky při stejném řezném proudu a jiných upravených řezných rychlostech. Jako další rychlosti byly zvoleny rychlosti o cca 30 % nižší než rychlost optimální a to  $1,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a o cca 30 % vyšší než rychlost optimální a to  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

#### 4.2 Vzorky vytvořené pomocí metody Silent Cut

Po vyhotovení vzorků pomocí metody řezání Contour Cut došlo k nastavení řezacího zdroje na metodu Silent Cut (viz kapitola 3.7.3). Na základě manuálu byla sestavena výměnná hlava plazmového hořáku pomocí použití konkrétních dílů pro danou sestavu (pro proudové zatížení 90A). Toto je sestava použitelná pro tloušťky řezaných materiálů od 5 do 15 mm, tedy optimální pro zvolenou tloušťku 10 mm.

Pro řezací režim Silent Cut se sestava hořáku skládá z následujících dílů: chladicí trubka G902Y, katoda G015Y, vedení plynu G101C, trysku G2010S, krytku trysky G3028, krytku vířivého plynu G4030 a ochranní trysku G502 (viz obr. 17). [7] [20]

Na rozdíl od metody řezání Contour Cut došlo k výměně trysky za jinou s typovým označením G2010S.



Obrázek 19 - Vstupní údaje pro řezání metodou Silent Cut při 90 A

Pro tloušťku materiálu 10 mm byl opět vybrán řezací proud 90A. Na rozdíl od Contour Cut bylo napětí plazmy nižší, a to 119 V. Jako plazmový plyn byl použit stejný jako při metodě Contour Cut, tedy kyslík a jako vířivý plyn vzduch. Na základě provozních

dat a zadaného materiálu byla určena optimální rychlost řezu. Optimální rychlost byla zařízením stanovena na  $2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tvar výpalku byl stejný jako v případě Contour Cut a to obdélník o rozměrech  $200 \times 50 \text{ mm}$ . Po vyhotovení vzorku optimální rychlosti, byly opět změněny řezné rychlosti. Stejně jako v případě Contour Cut byly rychlosti propočteny procentuálně. V pořadí 5. vzorek byl vyhotoven o cca 30 % nižší rychlost řezání než rychlost optimální a to  $1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Při posledním vzorku byla snaha použít řeznou rychlost o cca 30 % vyšší než rychlost optimální a teda  $3,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Při tomto nastavení však došlo k tomu, že rychlost řezání byla natolik vysoká, že nedošlo k proříznutí materiálu. Proto se zadaná hodnota rychlosti musela snížit. Další pokus spočíval v použití řezné rychlosti  $2,9 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , ale ani v tomto případě se materiál nepodařilo přeréztat.



*Obrázek 20 - Pokus o výpalek příliš vysokou rychlostí (pohled na horní hranu plechu)*

Usoudili jsme, že zařízením nabízená optimální hodnota řezné rychlosti bude v tomto případě i nejvyšší možná řezná rychlost. Proto byl poslední vzorek vytvořen řeznou rychlosti  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a teda o cca 15 % nižší než rychlost optimální určena zařízením.

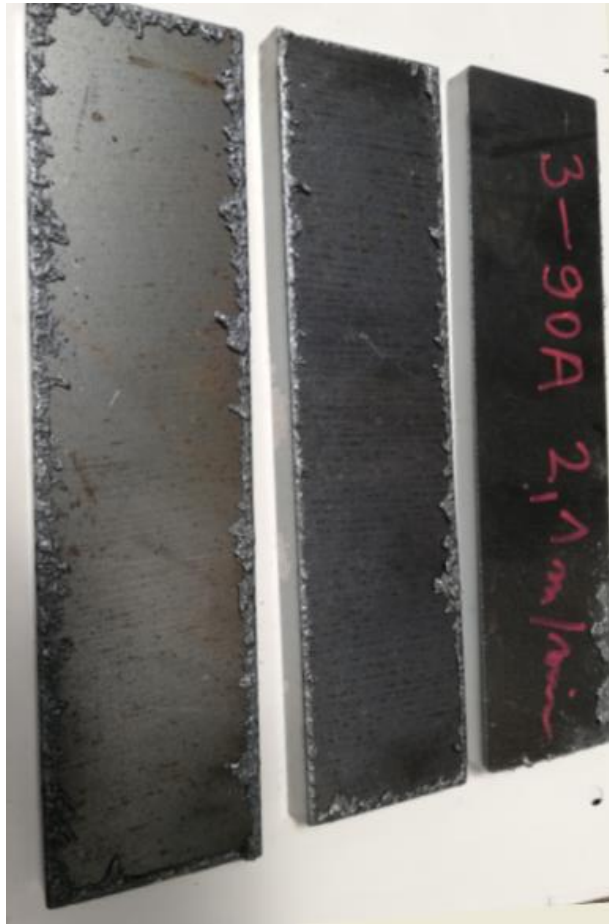
Tabulka 7 - Tabulka vzorků

Označení vzorku	Režim plazmového řezání	Řezná rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]
1. CC 1,6	Contour Cut (CC)	1,6
2. CC 2,1	Contour Cut (CC)	2,1
3. CC 1,1	Contour Cut (CC)	1,1
4. SC 2,5	Silent Cut (SC)	2,5
5. SC 1,7	Silent Cut (SC)	1,7
6. SC 2,1	Silent Cut (SC)	2,1

### 4.3 Hodnocení kvality řezu

Bylo vyhotovených celkem 6 vzorků (3 pro režim CC a 3 pro režim SC), na kterých byla následně hodnoceny kvalita řezu a ovlivnění mechanických vlastností materiálu po řezání. Byla hodnocena tvrdost řezné hrany, drsnost povrchu řezné hrany, tvar řezné hrany, vznik okují a velikost tepelně ovlivněné oblasti.

#### 4.3.1 Průběh řezu a vznik okují



Obrázek 21 - Okuje na vzorcích 1, 2, 3

Při použití metody plazmového řezání Contour Cut se okuje tvoří na spodní straně řezaného materiálu. Okuje nejsou pevně spojeny se základním materiálem a jsou lehce odstranitelné. Při rychlostech řezání  $1,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $1,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  mají okuje rovnoměrný průběh v celé oblasti řezu stejný tvar. Při použití vyšší řezné rychlosti než je rychlost optimální udávaná výrobcem zařízení se okuje na řezaném materiálu téměř netvořily. Viditelné okuje se objevily jenom v poslední části řezu.



Obrázek 22 - Okuje na vzorcích 4, 5, 6

Při metodě řezání Silent Cut se okuje na povrchu výrazně lišily. Na rozdíl od metody řezání Contour Cut mají okuje jiný tvar. Jsou výrazně menší, ale jsou hůře odstranitelné. Na dolní hraně řezu zůstaly kapičky nataveného materiálu. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při řezání rychlosti  $1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , kde se netvořily okuje vůbec. Při vzorcích vytvořených řeznými rychlostmi  $2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  mají okuje podobný průběh. Jsou pevně spojeny se základním materiálem na spodní hraně řezu.

#### 4.3.2 Drsnost řezné plochy

Dále byla vyhodnocována drsnost řezné plochy. Způsob a místo měření byl stanoven v souladu s normou ČSN EN 1090-2 příloha D: *Postup pro kontrolu schopnosti procesu automatizovaného tepelného řezání*. Drsnost byla měřena kolmo ke směru řezu vždy na vzdálenosti maximálně 40mm. Na každém vzorku bylo provedených 5 po sobě jdoucích měření drsnosti. Byla hodnocena největší výška profilu **Rz** a střední aritmetická odchylka profilu **Ra**. Drsnost byla měřena pomocí drsnoměru Mitutoyo SJ-301. [18] [19]



Obrázek 23 – Drsnomer Mitotuyo SJ-301

Tabulka 8- Naměřené hodnoty drsnosti  $R_a[\mu\text{m}]$

$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	CC 1,6	CC 2,1	CC 1,1	SC 2,5	SC 1,7	SC 2,1
1. měření	1,62	1,30	0,68	0,73	0,57	1,18
2. měření	1,55	2,00	0,49	0,83	0,64	0,94
3. měření	1,48	1,49	0,74	0,65	0,73	1,03
4. měření	1,67	1,84	0,69	0,67	0,45	0,91
5. měření	1,32	1,56	0,72	0,69	0,52	0,97
<b>průměr <math>[\mu\text{m}]</math></b>	<b>1,528</b>	<b>1,638</b>	<b>0,664</b>	<b>0,714</b>	<b>0,582</b>	<b>1,006</b>

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty drsnosti  $R_z[\mu\text{m}]$

$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$	CC 1,6	CC 2,1	CC 1,1	SC 2,5	SC 1,7	SC 2,1
1. měření	8,61	7,65	4,57	4,12	3,89	5,94
2. měření	8,86	11,64	3,16	4,55	5,00	5,33
3. měření	9,70	9,23	5,39	3,62	4,23	5,53
4. měření	8,72	12,68	4,72	3,66	3,28	4,95
5. měření	7,95	11,68	4,59	3,83	3,28	4,88
<b>průměr <math>[\mu\text{m}]</math></b>	<b>8,768</b>	<b>10,576</b>	<b>4,486</b>	<b>3,956</b>	<b>3,936</b>	<b>5,326</b>

Po naměření hodnot drsnosti, byly tyto hodnoty vyneseny a zaznamenány v tabulkách 8 a 9. Pro každý vzorek byla vypočtena průměrná hodnota  $R_a$  a  $R_z$ . Na základě výsledků



je možné určit, které nastavení plazmového zařízení je pro hodnotu drsnosti nejlepší. Z naměřených hodnot Rz je vidět, že v případě řezání metodou Silent Cut dochází k lepšímu výsledku z hlediska drsnosti. Hodnoty Rz jsou v případě Contour Cut 2x vyšší a teda povrch řezu je horší.

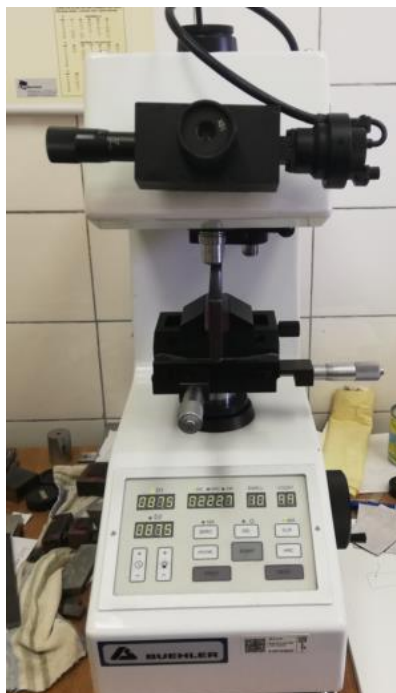


*Obrázek 24 – Ukázka měření drsnosti*

Vliv rychlosti řezání na drsnost je taktéž viditelný. Čím byla rychlost řezání nižší, tím byla kvalita povrchu a hodnota Ra i Rz lepší. Nejnižších hodnot drsnosti bylo dosaženo při použití metody plazmového řezání Silent Cut a řezné rychlosti  $1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . V tomto případě se jednalo o rychlost nižší, než byla rychlost optimální stanovená plazmovým zařízením. Naopak drsnost u vzorku při řezné rychlosti  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  byla drsnost nejvyšší. To mohlo být ovlivněno nesprávným provedením měření. V tomto případě se jednalo o rychlost nižší, než byla rychlost optimální stanovená plazmovým zařízením. V případě použití metody plazmového řezání Contour Cut bylo nejlepšího výsledku dosaženo opět při použití nižší řezné rychlosti, než rychlost optimální stanovená plazmovým zařízením. Při metodě Contour Cut byly hodnoty drsnosti po snížení rychlosti řezu o 100% lepší. V případě Silent Cut nebyl rozdíl ve snížení rychlosti až tak znatelný a rozdíl v drsnosti povrchu byl jenom v desetínách mikrometrů (mimo jednoho už zmíněného vzorku SC 2,1).

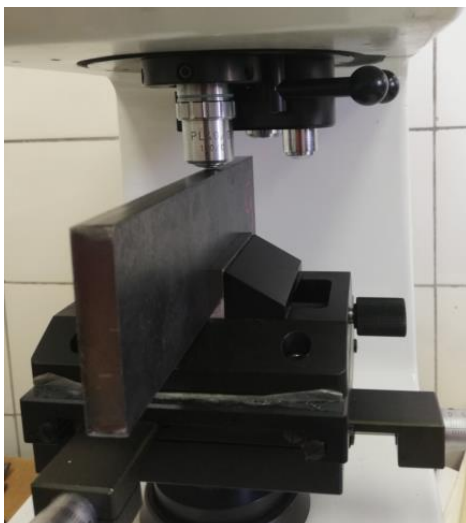
### 4.3.3 Tvrdost řezné plochy

Další vlastnost řezné plochy, která byla hodnocena mikrotvrdost (HV 1). Zkouška tvrdosti byla provedena v souladu s normou EN ISO 6507-1 - *Kovové materiály. Zkouška tvrdosti podle Vickerse. Část 1: Zkušební metoda*. Norma předepisuje použití metody měření tvrdosti HV 10. Z důvodu nedostupnosti zařízení pro měření tvrdosti HV 10 byla měřená mikrotvrdost HV 1. U této metody měření nebude rozdíl v hodnotách zásadní. Navíc nás bude zajímat porovnání hodnot a to lze provést bez problémů. Zkouška tvrdosti na řezné hraně byla provedena v závislosti na tloušťce materiálu pomocí 15 měření, které jsou rozloženy na řezu. Měření bylo provedeno 5 krát v blízkosti horního okraje plechu, 5 krát ve středu tloušťky plechy a 5 krát v blízkosti dolního okraje plechu tedy opět v souladu s doporučením normy EN 1090-2 příloha D. Zkušební kusy na měření tvrdosti musí mít rovnoběžné hrany. [18] [19]

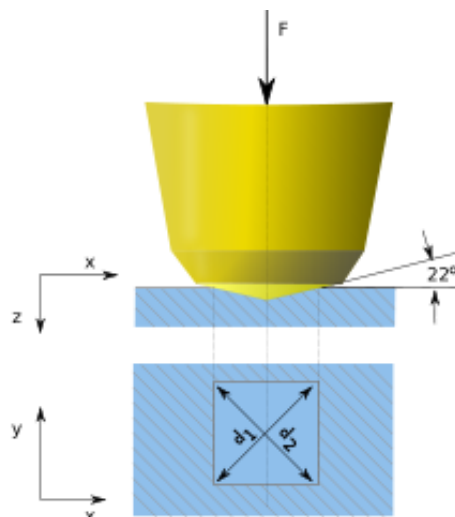


Obrázek 25 – měřicí zařízení - tvrdoměr BuehlerIndentamet 1100

Měření bylo prováděno na poloautomatickém (mikro)tvrdoměru Buehler. Po upevnění vzorku do svěráku a nastavení místa měření, byl spuštěn proces zatížení. Zatížení trvalo vždy 10 sekund. Po zatížení byly změřeny velikosti uhlopříček a tvrdoměr automaticky vypočítal tvrdost povrchové vrstvy materiálu HV 1. Tvrdost řezné hrany by dle normy neměla převyšovat hodnotu 450 HV10. [19]



Obrázek 26 – ukázka měření vzorku na tvrdoměru



Obrázek 27 - Schéma měření tvrdosti podle Vickerse

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 1 - CC 1,6

CC 1,6	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	285,5	379,5	369,6	351,3	331,4	<b>343,5</b>
<b>Střed</b>	458,4	348,9	392,3	426,4	356,7	<b>396,5</b>
<b>Horní hrana</b>	348,4	361,2	398,7	354,8	355,2	<b>363,7</b>

U vzorku číslo 1, který byl vypálen metodou Contour Cut a řeznou rychlostí  $1,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  byly experimentálně zjištěny hodnoty tvrdosti. U tohoto vzorku byli nejvyšší hodnoty tvrdosti ve střední části vzorku. Nejnižší hodnoty potom nabývaly na dolní hraně řezu. Všechny průměrné hodnoty tvrdosti byly v toleranci (pouze jedna samostatná naměřená hodnota nevyhověla).

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 2 – CC 2,1

CC 2,1	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	496,4	335,9	530,9	427	366,8	<b>431,4</b>
<b>Střed</b>	376,9	581,6	530,9	411	406,4	<b>461,4</b>
<b>Horní hrana</b>	447,8	492,7	326,5	460	327,5	<b>410,9</b>

U vzorku číslo 2, který byl vyhotoven metodou Contour Cut a řeznou rychlostí  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  byly hodnoty tvrdosti vyšší, než určuje tolerance v normě. Opět se potvrdilo, že nejvyšší hodnoty tvrdosti jsou uprostřed vzorku. Na rozdíl od prvního vzorku byla tvrdost na dolní hraně vyšší než u horní hrany.

Tabulka 12 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 3 – CC 1,1

<b>CC 1,1</b>	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	418,6	440,3	512,6	427,7	518,6	<b>463,6</b>
<b>Střed</b>	395,8	368,4	426,4	362,7	430,9	<b>396,8</b>
<b>Horní hrana</b>	341,4	377,4	340	345,1	340,1	<b>348,8</b>

U vzorku číslo 3, vyhotoveného metodou Contour Cut a řeznou rychlostí 1,1 m.min<sup>-1</sup> byly hodnoty opět nevyhovující na dolní hraně řezu. Vlivem nízké rychlosti řezání došlo k výraznému zvýšení tvrdosti na dolní hraně. Nejnižší tvrdost byla na horní hraně vzorku.

Tabulka 13 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 4 – SC 2,5

<b>SC 2,5</b>	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	398,1	452	380,2	398,7	389,7	<b>403,7</b>
<b>Střed</b>	483,7	512,5	511,4	475,3	347	<b>465,9</b>
<b>Horní hrana</b>	418,7	423,8	459,9	357,7	356,7	<b>403,4</b>

Vzorek číslo 4 byl vyhotoven metodou řezání Silent Cut a rychlostí řezání 2,5 m.min<sup>-1</sup>. Tady se podobně jako u vzorku 1 a 2 potvrdilo, že největší tvrdost je ve střední části vzorku. Průměrná hodnota tady dosahuje výrazně větší tvrdosti, než dovoluje tolerance.

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 5 – SC 1,7

<b>SC 1,7</b>	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	415,1	401,6	450,3	386,7	453,6	<b>421,5</b>
<b>Střed</b>	360,7	441,3	445,7	424,4	391,8	<b>412,8</b>
<b>Horní hrana</b>	346,6	345,1	447,1	416,6	398,1	<b>390,7</b>

Vzorek číslo 5, vyhotoven metodou řezání Silent Cut při rychlosti 1,7 m.min<sup>-1</sup>, měl tvrdost na vzorku vzestupnou od horní k spodní hraně. Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou v toleranci.

Tabulka 15 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 6 – SC 2,1

SC 2,1	HV 1	HV1	HV1	HV1	HV1	průměr
<b>Dolní hrana</b>	325,3	340,2	362,7	364,3	335,5	<b>345,6</b>
<b>Střed</b>	401	403,4	421,3	399,9	412,5	<b>407,6</b>
<b>Horní hrana</b>	339,1	432,2	358,2	443,7	363,2	<b>387,3</b>

Vzorek číslo 6, byl vyhotovený metodou řezání Silent Cut a rychlosti řezání 2,1 m.min<sup>-1</sup>. Ukázalo se, že tvrdost je nejvyšší opět v střední části vzorku. Nejnižší tvrdost je naopak na spodní hraně řezu. Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou v toleranci do 450 HV.

Po provedení zkoušky tvrdosti je možné vyhodnotit, která metoda a rychlost řezání je z hlediska ovlivnění tvrdosti řezné hrany nejvýhodnější. Při použití metody řezání Contour Cut a optimálních parametrech řezné rychlosti byla tvrdost vyhovující. Při zvýšení řezné rychlosti, došlo k výraznému zvýšení hodnot tvrdosti v celém rozsahu řezu. Při snížení rychlosti řezání se hodnota tvrdosti zvýšila oproti optimálním parametrům na dolní hraně řezu. Pro metodu řezání Contour Cut se jako nejlepší varianta jeví variant optimální řezné rychlosti 1,6 m.min<sup>-1</sup>.

Při použití metody Silent Cut se při volbě optimální rychlosti 2,5 m.min<sup>-1</sup> ukázala tvrdost nejhorší. Snížením řezné rychlosti při vzorcích 5 a 6 se tvrdost snížila. Při vzorku 5 kde byla řezná rychlost oproti optimální snižená o 30 %, došlo podobně jako v případě Contour Cut k značnému zvýšení tvrdosti na spodní hraně.

U standardního režimu řezání (CC) se potvrdilo, že vliv procesu řezání na zvýšení tvrdosti řezné hrany vyhovující (nová aktualizace normy EN 1090-2 také nevyžaduje zkoušení běžných konstrukčních ocelí do pevnosti 420 MPa). Zatímco u režimu SC, který využívá vyšších řezných rychlostí, dochází ke zvýšenému ovlivnění tvrdosti řezných hran. Z výše uvedeného vyplývá, že tvrdost nejvíce ovlivňují především parametry: rychlost řezání a tím i velikost vneseného tepla a rychlost ochlazování materiálu.

V každém případě z toho vyplývá, že tvrdost nejvíce ovlivňují především parametry – rychlost řezání a tím i velikost vneseného tepla a rychlost ochlazování materiálu.

#### 4.3.4 Příprava metalografických vzorků

Pro zkoumání tepelně ovlivněné oblasti a tvaru řezné hrany bylo zapotřebí připravit vzorky pro metalurgický výbrus. Vzorky byly vytvářeny postupně v metalografické laboratoři Ústavu strojírenské technologie.

Jako první byla z každého vzorku 1 až 6 vyříznuta část materiálu, na kterém byla tepelně ovlivněná oblast. Řezání proběhlo pomocí metalografické pily Struers *LABOTOM-3*. Na řezání byl použit metalografický řezný kotouč označení *46A25*. Byly nařezány vzorky o velikosti přibližně 10 x 10 x 10 mm.



Obrázek 28 - Metalografická pila LABOTOM -3

Pro lepší manipulaci byly vzorky následně zalisovány pomocí metalografického lisu *CiToPress-1* od firmy Struers. Jako lisovací hmota byla použita kombinace hmot *Multifast* (černá) a *Clarofast* (bíla).



Obrázek 29 - Metalografický lis CiToPress-1



Obrázek 30 - Metalografický vzorek připravený na broušení

Samotné lisování probíhalo za tepla. Vzorky se vložily do metalografického lisu a byly zasypány hmotou. Následně proběhl proces lisování za tepla. Při tlaku 250 MPa probíhal ohřev na teplotu 180°C po dobu 4 minut. Následně proběhlo chlazení 3,5 minuty. Takto připravené vzorky byly připravené na další broušení a leštění.

Na takto připravených vzorcích není nic vidět, proto muselo proběhnout broušení a leštění. Oba tyto procesy probíhaly na brusce/ leštičce Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector od firmy Buehler.

Broušení probíhalo mokrým broušením s přístupem chladicího média vody. Prvním krokem bylo broušení brusným papírem SiC 180. Broušení trvalo 1 minutu při otáčkách 300 min<sup>-1</sup>. Přítlak působící na každý vzorek je 30 N. Ve druhém kroku byl brusný papír nahrazen jemnějším SiC 1200. Broušení trvalo 1 minutu při nezměněných otáčkách 300 min<sup>-1</sup> a přítlačné síle 30 N na vzorek. V posledním kroku broušení byl použitý nejjemnější brusný papír 2000 SiC. Broušení opět trvalo 1 minutu při otáčkách 300 min<sup>-1</sup> a přítlačnou silou na vzorek 30 N.

Aby byl materiál dokonale hladký a bylo na něm vidět strukturu kovu, je potřebné ho ještě vyleštit. Leštění proběhlo na stejném zařízení jako broušení. Místo brusného papíru bylo použito leštící plátno MD dur. V prvním kroku byla použita diamantová suspenze s velikostí částic 1 μm. Proces trval 3,5 minuty při otáčkách 150 min<sup>-1</sup>. Přítlak na jednotlivé vzorky činil 30 N na vzorek. V druhém kroku byla použita diamantová suspenze s velikostí částic 0,5 μm. Čas leštění byl 4,5 minuty při otáčkách 150 min<sup>-1</sup>. Přítlak na vzorek byl nezměněný 30 N. Po procesu leštění je důležité vzorky důkladně opláchnout vodou a vysušit.



Obrázek 31 - Brousící stroj Phoenix - Beta

Jako poslední krok přípravy metalografických vzorků je leptání povrchu. Na leptání bylo použito leptadlo Nital- 4 % roztok kyseliny dusičné v alkoholu. Leptání trvá jenom několik sekund. Po leptání následuje důkladný oplach a sušení.



Obrázek 32 - Vyleštěné a naleptané metalografické vzorky

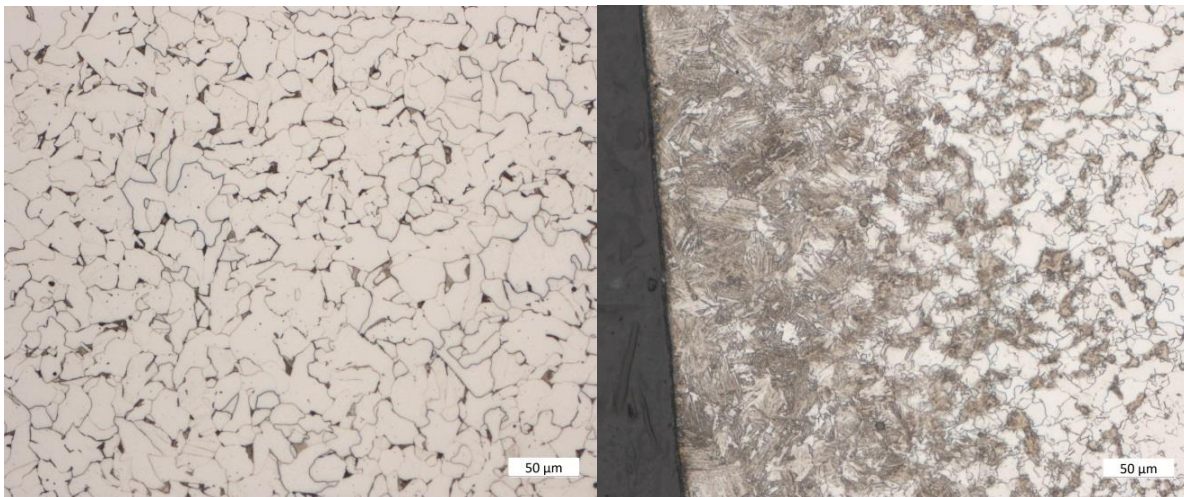
Takto připravené vzorky byly připraveny na hodnocení dalších vlastností materiálu po dělení plazmou.

#### 4.3.5 Tepelně ovlivněná oblast

Na připravených metalografických vzorcích bylo zkoumáno, jak plazmové řezání ovlivnilo povrchovou vrstvu a do jaké hloubky je základní materiál tepelně ovlivněn. Hodnocení probíhalo za pomoci mikroskopu ZEISS Axio OBSEVER D1.m. Vzorky byly hodnoceny v programu ZEISS Zen Core. Metalografický vzorek byl pomocí mikroskopu 100 x zvětšen. Na základě mikroskopického snímku a znalostí o materiálu je jasné, že základní materiál má feriticko-perlitickou strukturu. Po řezání je tepelně ovlivněná povrchová vrstva kovu při hraně řezu tepelně ovlivněna a vzniká tam



Martenzit. Vrstva martenzitu je v závislosti na řezné rychlosti rozdílná a tepelně ovlivněná oblast se tak může díky řezné rychlosti lišit.



Obrázek 34 - Mikroskopická struktura feritu

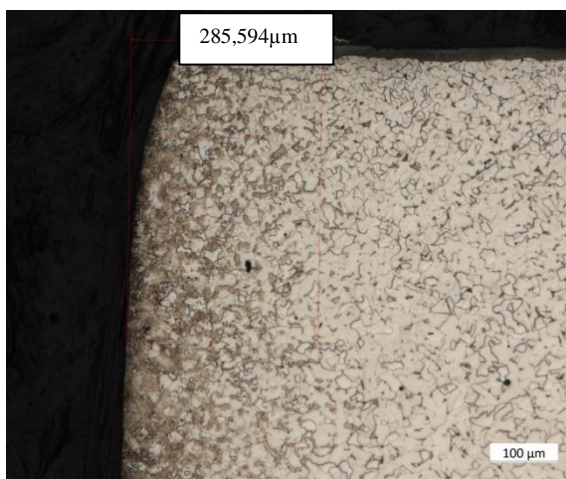
Obrázek 33 - Mikroskopická struktura TOO - martenzit

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty tepelně ovlivněné oblasti na jednotlivých vzorcích. Tepelně ovlivněná oblast byla měřena vždy při horní hraně řezu, uprostřed a při dolní hraně řezu.

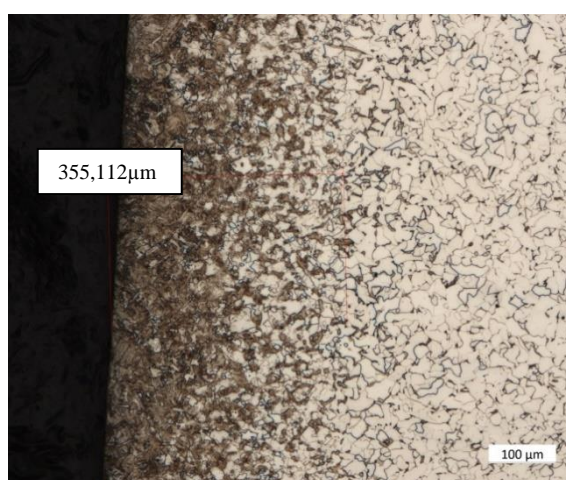
Tabulka 16 - Tabulka naměřených rozměrů tepelně ovlivněné oblasti

	<b>CC 1,6</b>	<b>CC 2,1</b>	<b>CC 1,1</b>	<b>SC 2,5</b>	<b>SC 1,7</b>	<b>SC 2,1</b>
<b>TOO horní roh [µm]</b>	285,594	364,755	301,941	241,845	281,111	292,283
<b>TOO střed [µm]</b>	355,112	360,609	305,176	273,93	322,223	287,05
<b>TOO dolní roh [µm]</b>	479,408	583,249	454,077	394,583	338,424	281,679

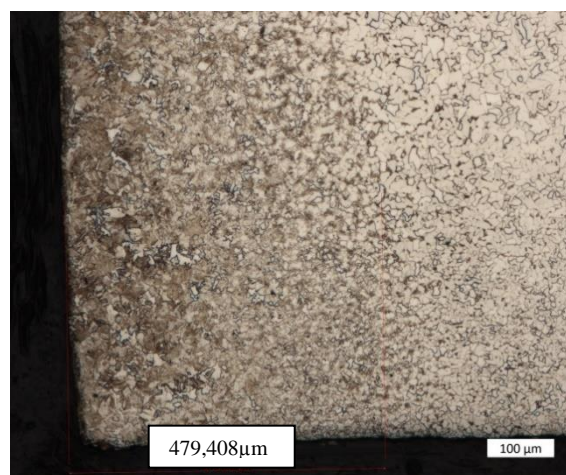
Na základě naměřených hodnot je jasné, že v případě použití metody plazmového řezání Silent Cut je tepelně ovlivněná oblast menší jak v případě použití metody Contour Cut. Nejmenších maximálních hodnot rozměrů tepelně ovlivněných oblastí bylo dosaženo u vzorků 5 a 6 a teda u vzorků kde byla rychlost řezání nižší než optimální. V případě těchto dvou vzorků je průběh tepelně ovlivněné oblasti v celé ploše řezu rovnoměrný. U ostatních vzorků je výrazně větší tepelně ovlivněná oblast při spodní hraně řezu.



Obrázek 35 - Vzorek 1: TOO - horní část

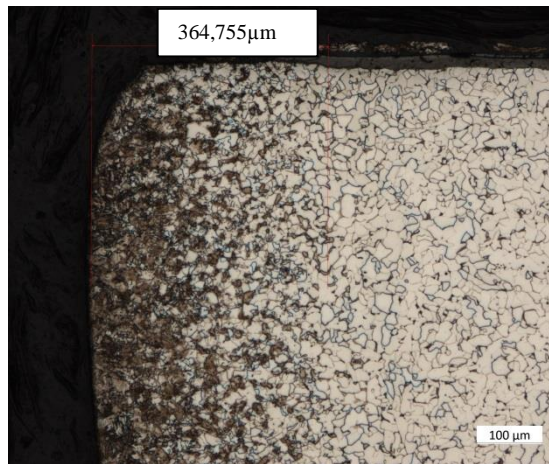


Obrázek 36 - Vzorek 1: TOO - střed

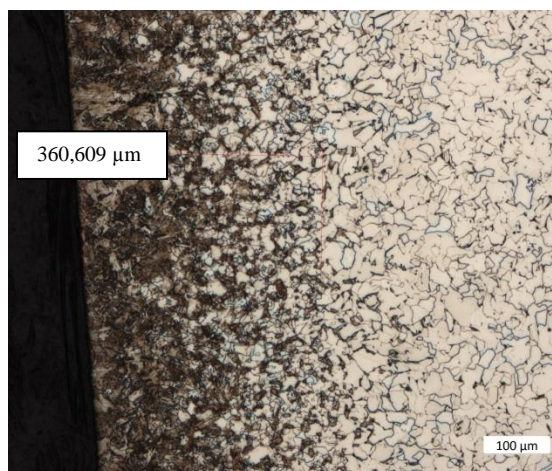


Obrázek 37 - Vzorek 1: TOO - dolní část

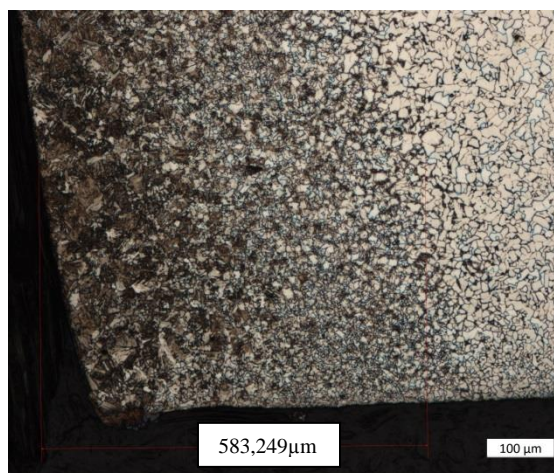
Vzorek 1 vytvořený metodou plazmového řezání Contour cut a řeznou rychlostí  $1,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  má průběh tepelně ovlivněné oblasti rovnoměrně rostoucí od horní hrany směrem k dolní. Při horní hraně je tepelně ovlivněná oblast  $285 \text{ }\mu\text{m}$ , ve střední části potom  $355 \text{ }\mu\text{m}$  a na dolní hraně  $479 \text{ }\mu\text{m}$ .



Obrázek 38 - Vzorek 2: TOO - horní část

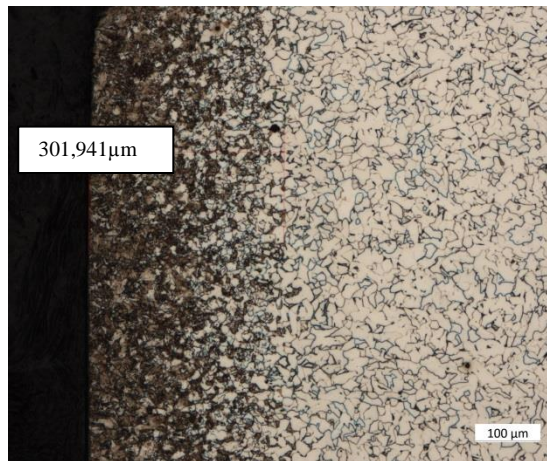


Obrázek 39 - Vzorek 2: TOO - střed



Obrázek 40 - Vzorek 2: TOO- dolní část

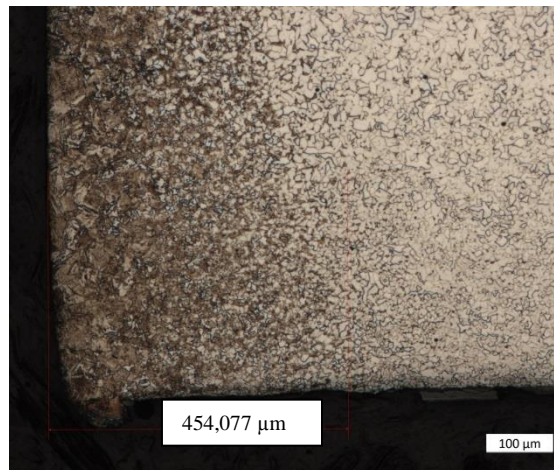
U vzorku 2, který byl vytvořen metodou Contour Cut a řeznou rychlostí  $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  se průběh tepelně ovlivněné oblasti podle trendu. V horní a prostřední části je tepelně ovlivněná oblast přibližně stejně velká  $360 \mu\text{m}$  a  $364 \mu\text{m}$ . Značný nárůst velikosti tepelně ovlivněné oblasti je viditelný v dolní části. Tam je velikost tepelně ovlivněné oblasti až  $583 \mu\text{m}$ .



Obrázek 41 - Vzorek 3: TOO - horní část



Obrázek 42 - Vzorek 3: TOO - střed



Obrázek 43 - Vzorek 3: TOO - dolní část

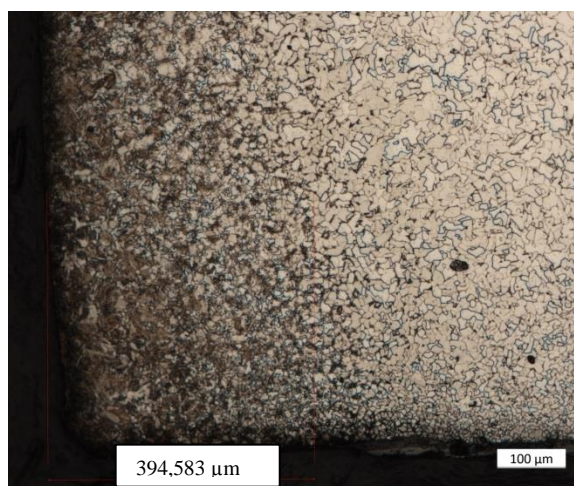
U vzorku 3 při nejnižší řezné rychlosti  $1,1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  pro metodu Contour Cut se průběh tepelně ovlivněné oblasti shodoval se vzorkem 2. Hodnoty v střední a horní části byli  $301 \mu\text{m}$  a  $305 \mu\text{m}$ . Velikost tepelně ovlivněné oblasti se opět zvětšovala při spodní hraně a to na  $454 \mu\text{m}$ .



Obrázek 44 - Vzorek 4: TOO - horní část



Obrázek 45 - Vzorek 4: TOO - střed

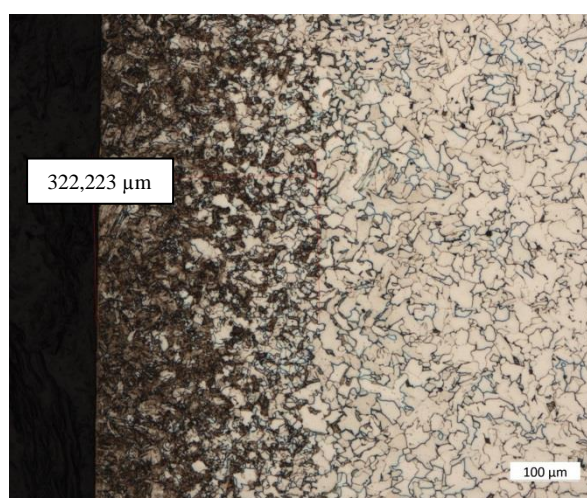


Obrázek 46 - Vzorek 4: TOO - dolní část

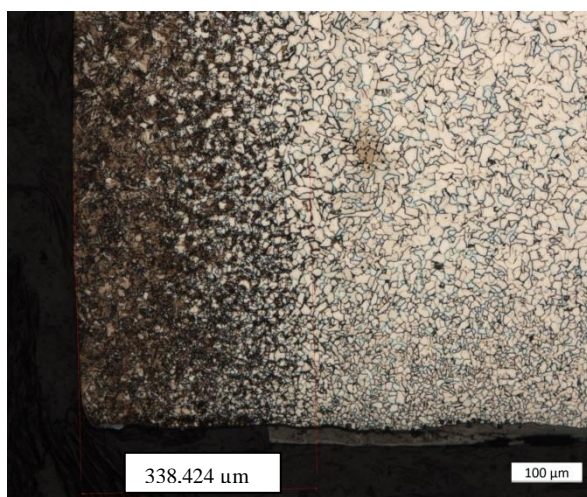
Vzorek 4 vytvořený metodou řezání Silent Cut při řezné rychlosti  $2,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  se průběh tepelně ovlivněné oblasti zvětšuje z horní části směrem k dolní. V horní části je velikost TOO  $241 \mu\text{m}$ , uprostřed  $273 \mu\text{m}$  a v dolní části potom  $394 \mu\text{m}$ . Podle naměřených hodnot je vidět, že tepelně ovlivněná oblast je pro metodu Silent Cut menší než pro Contour Cut.



Obrázek 47 - Vzorek 5: TOO

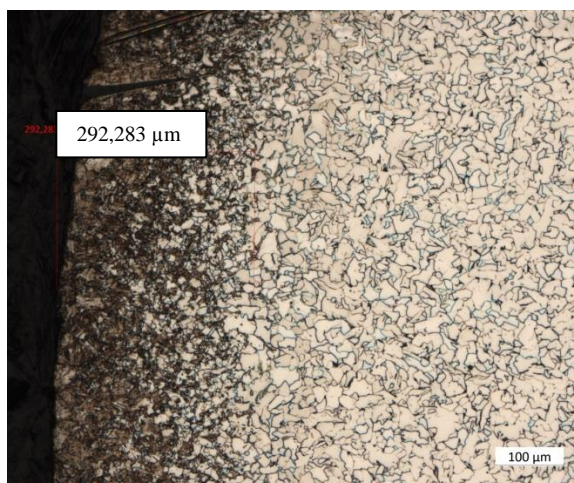


Obrázek 48 - Vzorek 5: TOO - střed



Obrázek 49 - Vzorek 5: TOO - dolní část

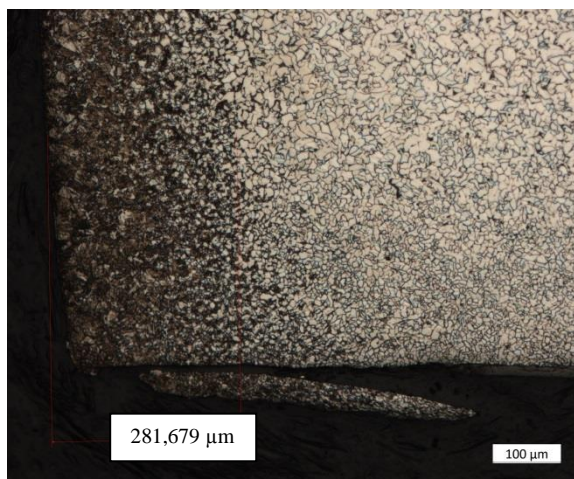
Vzorek 5 vytvořený metodou řezání Silent Cut při řezné rychlosti  $1,7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  se průběh tepelně ovlivněné oblasti zvětšuje z horní části směrem k dolní. V horní části je velikost TOO  $281 \mu\text{m}$ , uprostřed  $322 \mu\text{m}$  a v dolní části potom  $338 \mu\text{m}$ . Rozdíl oproti vzorku 4 není v průběhu řezu tak výrazný.



*Obrázek 50 - Vzorek 6: TOO - horní část*



*Obrázek 51 - Vzorek 6: TOO - střed*



*Obrázek 52 - Vzorek 6: TOO - dolní část*

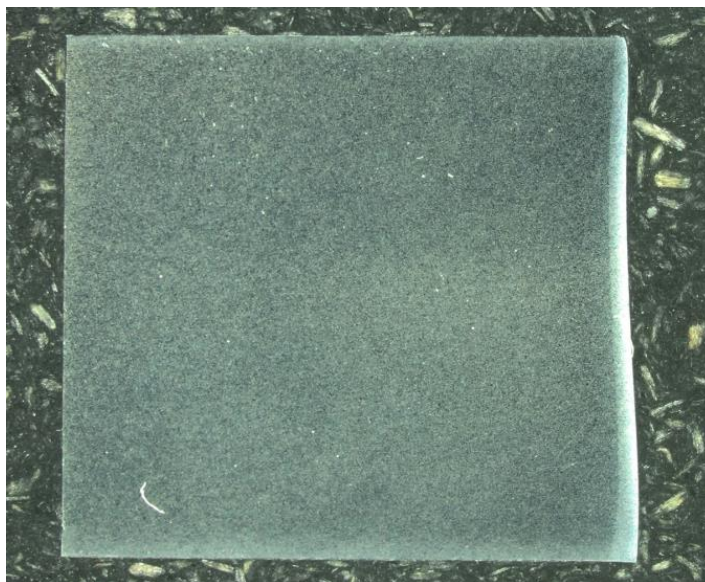
U posledního vzorku 6 je tepelně ovlivněná oblast téměř rovnoměrná v celé ploše řezu. Rozdíl v celém rozsahu řezu je  $11\mu\text{m}$ . V horní části je tepelně ovlivněná oblast  $292\mu\text{m}$ , ve střední části  $287\mu\text{m}$  a v horní části  $281\mu\text{m}$ .

#### 4.3.6 Tvar řezné hrany

Pomocí metalurgických vzorků, které byly vytvořeny z každého jednoho vzorku, byly kromě změření tepelně ovlivněné oblasti vyhodnocen i tvar řezné hrany. Tvar řezné hrany byl zaznamenán pomocí Makroskopu Stemi 508 od firmy ZEISS. Pomocí makroskopu byly vytvořeny makroskopické snímky se zvětšením 0,63x. Na těchto snímcích je vidět jak je řeznou rychlostí ovlivněn tvar řezné hrany. Byla zde změřena odchylka kolmosti.

Tabulka 17 - Přehled kolmosti řezné hrany měřených vzorků

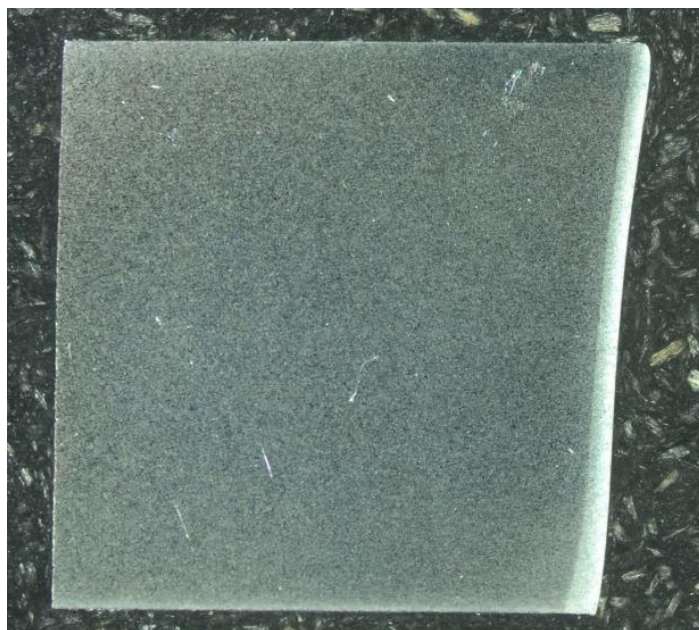
	CC 1,6	CC 1,1	CC 2,1	SC 2,5	SC 1,7	SC 2,1
Odchylka kolmosti	Pozitivní 2°	Negativní 6,5°	Pozitivní 4°	Pozitivní 1,5°	Pozitivní 1°	Negativní 2°



Obrázek 53 - tvar řezné hrany vzorku 1

U vzorku 1 je řezná spára viditelně širší v horní části řezu než v dolní části. Úhel zkosení není velký, činí 2°.





*Obrázek 54 - Tvar řezné hrany vzorku 2*

U vzorku 2 je řezná spára výrazně širší v spodní části. Řezná spára je podkosená až o  $6,5^\circ$ . Vzhledem k tomu, že řezná rychlost je tu vyšší jak optimální, odpovídá tvar řezné hrany teoretickému předpokladu tvaru.



*Obrázek 55 - Tvar řezné hrany vzorku 3*

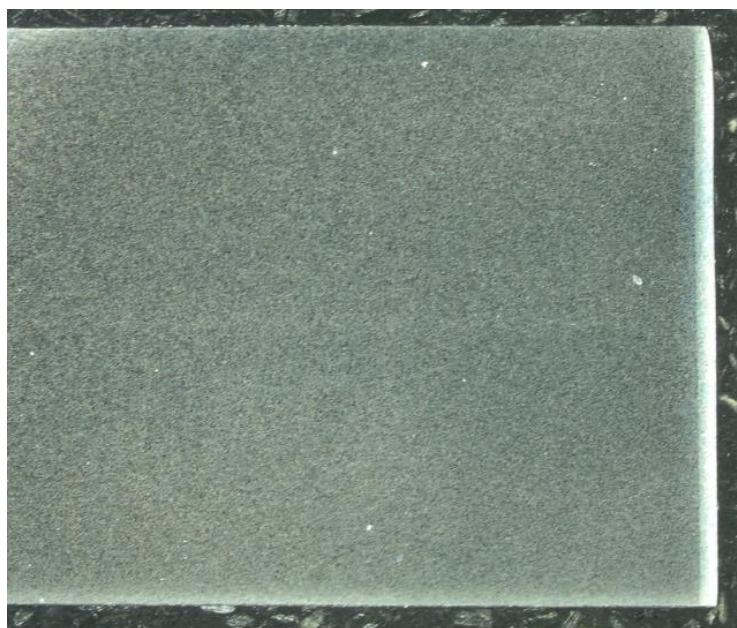
U vzorku 3 je řezná hrana do písmena V a teda v horní části řezu byla řezná spára širší než v dolní části, což opět odpovídá teoretickému předpokladu ( viz kapitola 3.5.1 – obr.7). Úhel zkosení řezné hrany na tomto vzorku činí  $4^\circ$ .

S ohledem na tvar řezné hrany je možné usoudit, že optimální hodnota řezné rychlosti při metodě řezání Contour Cut by měla být o něco vyšší oproti optimální hodnotě určené výrobcem plazmového zařízení.



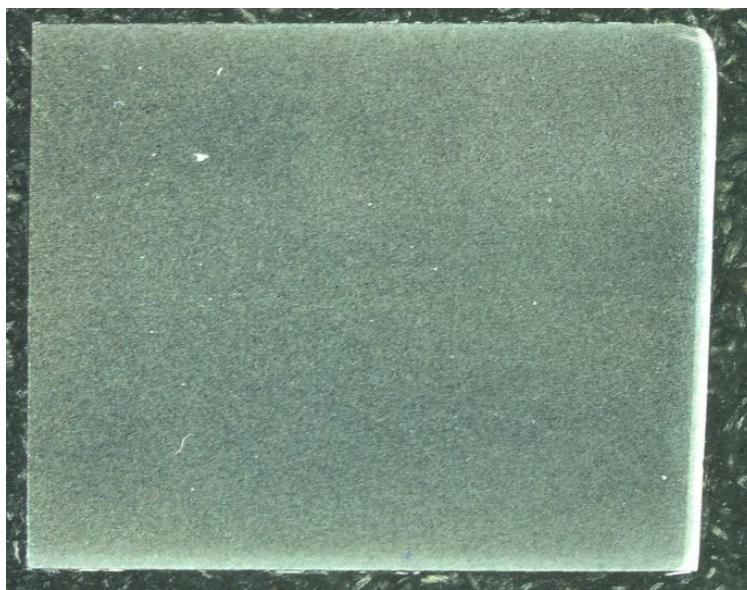
*Obrázek 56 - Tvar řezné hrany vzorku 4*

V případě použití metody řezání Silent Cut je vidět na vzorcích 4, 5 a 6 výraznější náběh řezu, kde je vidět na horní hraně zaoblení. U vzorku 4, který byl vypálen optimální řeznou rychlostí, byla řezná spára v horní části širší než v dolní části. Úhel zkosení řezné hrany je  $1,5^\circ$ .



*Obrázek 57 - Tvar řezné hrany vzorku 5*

U vzorku 5 bylo dosaženo nejlepšího výsledku řezné hrany. Řezná spára byla nevýrazně širší v horní části. V horní části je stejně jako při vzorku 4 vidět výraznější zaoblení horní hrany. Úhel zkosení je jenom  $1^\circ$ .



Obrázek 58 - Tvar řezné hrany vzorku 6

U vzorku 6 je řezná hrana opět zaoblená v horní části. Řezná spára byla širší v dolní části řezu. Úhel zkosení řezné hrany je  $2^\circ$ .

Při použití metody Řezání Silent Cut bylo nejlepšího výsledku řezné hrany dosaženo u vzorku 5 a tedy při nejnižší řezné rychlosti  $1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ . U všech vzorků řezaných metodou Silent Cut je viditelné zaoblení horní hrany řezu.

#### 4.4 Hodnocení metod řezání z hlediska hlučnosti

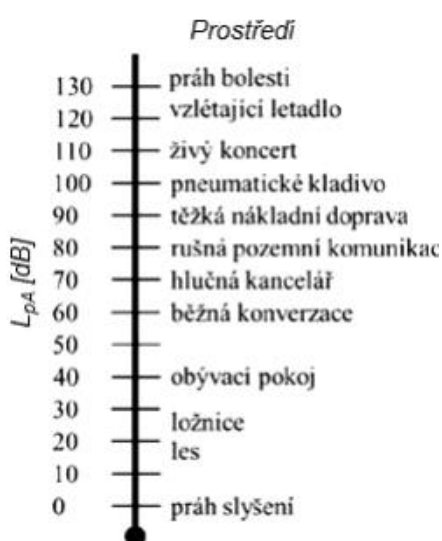
V druhé části experimentu došlo k měření hlučnosti plazmového zařízení při různých metodách plazmového řezání a různých rychlostech řezání. Experiment probíhal v spolupráci s Ústavem životního prostředí, který poskytl potřebné akustické vybavení na měření hluku, a ve spolupráci s jeho pracovníky bylo realizováno vlastní měření.

##### 4.4.1 Definice hluku

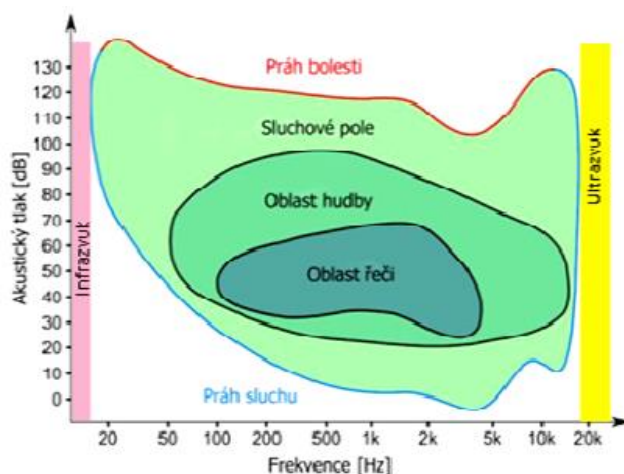
Hlukem se nazývá veškerý nežádoucí zvuk, který působí rušivě nebo škodlivě. V technické praxi se proto snažíme o jeho eliminaci. Technická akustika se zabývá frekvenčním rozsahem akustického vlnění, které odpovídá kmitočtovému rozsahu lidského ucha nazývaného slyšitelné pásmo. Z pohledu akustiky existují tři pásma zvuku: infrazvuk ( $0,7 - 16 \text{ Hz}$ ), slyšitelné pásmo ( $16 - 20\,000 \text{ Hz}$ ) a ultrazvuk ( $20 - 50 \text{ kHz}$ ). Vznik zvuku vlastně spočívá ve změně statického tlaku vzduchu. Jeho hodnota se skládá ze součtu barometrického a akustického tlaku. Akustický tlak je slyšitelný lidským uchem v rozmezí  $20 \mu\text{Pa}$  až  $100 \text{ Pa}$ . Vzhledem k velkému rozsahu akustického

tlaku, který je lidský organizmus schopen zaznamenat, byl zaveden logaritmus hodnot tlaků. Ten se označuje jako hladina akustického tlaku  $L_p$  [dB], který rozsah akustického tlaku 20  $\mu\text{Pa}$  až 100 Pa převádí do rozsahu 0 – 140 dB. Jednotka akustického tlaku decibel [dB] je logaritmická. To znamená, že zvětšení hladiny o 20 dB odpovídá desetinásobné hodnotě akustického tlaku. [26]

V našem experimentu byly jako výsledné hodnoty brány hodnoty hladiny akustického tlaku  $L_p$  a hodnoty hladiny akustického tlaku korigované váhovým filtrem A -  $L_{pA}$ . Jedná se tedy o hodnoty akustického tlaku slyšitelné lidským uchem – viz obr. 53-54. [26]



Obrázek 59 - Hladiny akustického tlaku v prostředí [26]



Obrázek 60 - Oblasti lidského sluchu

#### 4.4.2 Popis dílčí části experimentu – měření hluku

Experiment probíhal opět na zařízení pro plazmové řezání Vanad Proxima v laboratoři ústavu strojírenské technologie. Experiment musel proběhnout ve večerních hodinách, aby se eliminoval hluk od dalších zařízení nacházejících se v laboratoři. Zařízení na zaznamenávání zvuku sestávalo z 5 mikrofónů rozmístěných 2 m od místa řezu, ve výšce 1,5 m – viz obr. 55.



Obrázek 61 - Měření hlučnosti plazmového zařízení

U každého řezaného vzorku byla vyhodnocena každá zvuková stopa ze všech 5 mikrofonů. Jako výsledná hodnota hlučnosti se potom brala průměrná hodnota ze všech záznamových zařízení. Pro přesnější výsledky bylo nutné eliminovat všechny jiné zvukové stopy, které by mohli výsledek měření ovlivnit. Proto v prvním kroku došlo k měření hlučnosti pozadí při vypnutém plazmovém zařízení. Jako další potom měření se zapnutým plazmovým zařízením bez zapnutého odsávání. V posledním kroku měření se zapnutým plazmovým zařízením a odsáváním. Tyto naměřené hodnoty byly použity pro korekci jednotlivých zvukových stop zaznamenaných při řezání vzorků.

Jako řezaný vzorek byl stejně jako v první části experimentu použit jednoduchý tvar a to obdélník o rozměrech 500 x 50 mm a hlučnost byla vyhodnocena při ustáleném procesu řezání rovinného řezu. Byly vyhotoveny vzorky metodou plazmového řezání Contour Cut s třemi řeznými rychlostmi: s optimálními parametry řezání podle výrobce zařízení, tzn. s rychlosti řezání  $1,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , další vzorek o cca 30 % vyšší rychlostí ( $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a s o cca 30% nižší rychlostí ( $1,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Další vzorky byly vyhotoveny metodou plazmového řezání Silent Cut. U metody Silent Cut byla optimální rychlost  $2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ , o cca 15 % nižší než rychlost optimální ( $2,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a o cca 30% nižší než rychlost optimální ( $1,7 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

#### 4.4.3 Vyhodnocení experimentu

Celkově teda bylo zaznamenaných 9 zvukových stop vždy na 5 mikrofonech. Každá zvuková stopa byla zaznamenána v třetinooktávových pásmech v rozsahu 125 až 20 000 Hz. Z těchto hodnot pro každou zvukovou stopu byla vyhodnocena výsledná hodnota

hladiny akustického zvuku  $L_p$ . Tato hodnota byla vypočtena jako součet logaritmu hodnot  $10^{(0,1*x)}$ , kde  $x$  je vždy hodnota zvukové stopy v třetinoktávovém pásmu. Byla vyhodnocena také hodnota hladiny akustického zvuku korigované váhovým filtrem A  $L_{pA}$ . Tato hodnota byla vypočtena jako součet logaritmu hodnot  $10^{(0,1*(x+K_y))}$ , kde  $x$  je hodnota zvukové stopy v třetinoktávovém pásmu a  $K_y$  je hodnota váhového filtru A. Jako hodnoty pro hodnocení byly použity vždy průměry hodnot ze všech pěti mikrofonů. Bylo tedy naměřeno 9 hodnot akustického zvuku bez korekce pro všechny řezné rychlosti, pozadí, hlučnost stroje a hlučnost stroje s odsáváním.

$$L_p = 10 \times \log_{10} 10^{(0,1*n_1)} + \dots + 10 \times \log_{10} 10^{(0,1*n_{31})}$$

$$L_{pA} = 10 \times \log_{10} 10^{(0,1*(n_1+K_{y1}))} + \dots + 10 \times \log_{10} 10^{(0,1*(n_{31}+K_{y31}))}$$

Tabulka 18 - Naměřené hodnoty v třetinoktávových pásmech – část 1

Třetinoktávové pásmo	20 [Hz]	25 [Hz]	31,5 [Hz]	40 [Hz]	50 [Hz]	63 [Hz]	80 [Hz]	100 [Hz]	125 [Hz]	160 [Hz]	200 [Hz]	250 [Hz]	315 [Hz]	400 [Hz]
1. CC 1,1 [dB]	57,2	67,6	68,5	65,2	68,4	70,2	67,3	67,1	66,1	66,6	68,5	65,5	64,8	67,7
2. CC 1,6 [dB]	59,0	67,8	68,9	66,1	69,5	70,3	67,8	67,6	66,4	66,9	69,2	66,0	65,7	66,9
3. CC 2,1 [dB]	57,8	67,8	69,0	66,4	69,5	70,3	67,9	67,5	66,1	66,5	68,4	65,4	64,0	66,3
4. SC 1,7 [dB]	58,4	68,0	68,7	65,5	69,4	69,9	67,9	67,8	66,9	67,2	69,2	65,7	65,6	67,1
5. SC 2,1 [dB]	58,7	68,2	68,7	66,3	69,4	70,2	67,4	66,9	66,5	66,7	68,5	65,5	64,5	66,9
6. SC 2,5 [dB]	57,8	67,4	67,9	66,0	69,4	70,2	67,5	67,2	66,5	66,3	68,8	65,2	63,8	66,8
Pozadí - hlučnost stroje [dB]	47,7	54,3	54,5	51,3	52,1	52,6	55,0	56,6	57,5	62,7	66,7	61,4	59,2	65,2
Pozadí - hlučnost stroje a odsávání [dB]	57,3	66,8	68,5	65,0	69,4	70,3	67,9	67,6	65,7	66,4	67,9	65,1	63,4	66,3
Pozadí - vypnutý stroj a odsávání [dB]	35,8	41,8	41,1	44,6	43,0	35,3	34,2	36,2	36,6	36,7	41,0	41,6	39,0	40,2

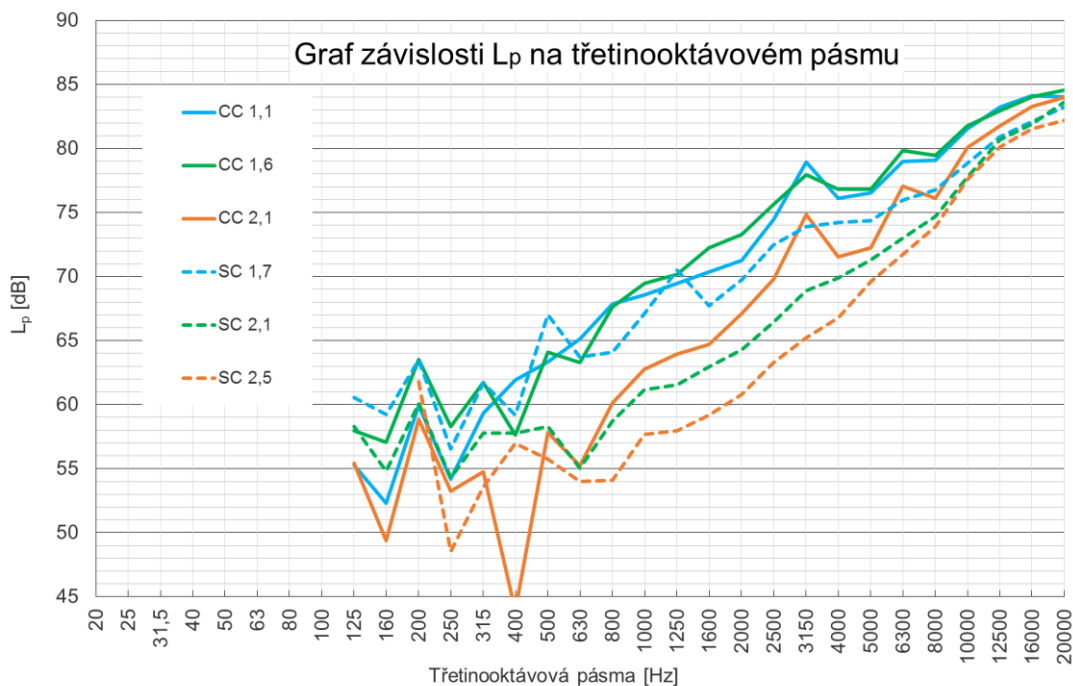
Tabulka 19 - Naměřené hodnoty v třetinooktávových pásmech – část 2

500 [Hz ]	630 [Hz ]	800 [Hz]	1 [kHz ]	1,25 [kHz ]	1,6 [kHz ]	2 [kHz ]	2,5 [kHz ]	3,15 [kHz ]	4 [kHz ]	5 [kHz ]	6,3 [kHz ]	8 [kHz ]	10 [kHz ]	12,5 [kHz ]	16 [kHz ]	20 [kHz ]
66,0	68,2	69,0	69,2	69,9	70,8	71,5	74,5	79,0	76,1	76,5	79,0	79,1	81,5	83,2	84,1	84,0
66,5	67,4	68,8	70,0	70,5	72,5	73,4	75,7	78,0	76,8	76,8	79,8	79,5	81,8	83,0	84,0	84,5
63,9	65,7	64,5	64,8	65,4	66,1	67,8	70,1	74,9	71,6	72,3	77,1	76,1	80,1	81,8	83,3	84,0
68,4	67,6	66,4	68,0	70,9	68,5	70,1	72,6	74,0	74,3	74,4	76,0	76,8	78,8	80,9	82,1	83,2
64,1	65,7	64,0	63,9	63,8	64,9	65,5	67,1	69,1	70,0	71,4	73,1	74,7	77,8	80,7	81,9	83,6
63,5	65,2	63,1	62,4	62,0	62,9	63,1	64,5	65,8	67,1	69,7	71,8	73,9	77,6	80,1	81,5	82,2
58,7	62,3	59,1	58,1	57,5	59,2	57,8	57,1	55,6	53,9	52,7	52,6	48,2	47,4	47,5	47,1	45,1
62,7	65,3	62,5	60,6	59,9	60,5	59,2	58,1	56,6	54,8	53,2	52,7	48,4	47,5	47,6	47,0	44,9
37,8	37,8	38,4	37,8	38,4	40,0	40,9	42,2	45,2	47,5	49,4	51,6	47,0	47,1	48,0	47,8	46,0

Tabulka 20 – Hodnoty hladiny akustického zvuku  $L_p$  a  $L_{pA}$ - průměrné hodnoty

	$L_p$ [dB]	$L_{pA}$ [dB]
<b>1. CC 1.1</b>	<b>91,3</b>	<b>88,4</b>
<b>2. CC 1.6</b>	<b>91,5</b>	<b>88,7</b>
<b>3. CC 2.1</b>	<b>89,9</b>	<b>85,8</b>
<b>4. SC 1.7</b>	<b>89,5</b>	<b>86,0</b>
<b>5. SC 2.1</b>	<b>88,7</b>	<b>83,8</b>
<b>6. SC 2.5</b>	<b>87,9</b>	<b>82,8</b>
<b>Pozadí- hlučnost stroje</b>	<b>73,5</b>	<b>69,6</b>
<b>Pozadí - hlučnost stroje a odsávání</b>	<b>79,2</b>	<b>71,8</b>
<b>Pozadí - vypnutý stroj a odsávání</b>	<b>59,0</b>	<b>57,4</b>

V další části byla hodnocena hodnota hluku při všech řezných rychlostech bez vlivu okolního prostředí. Jedná se tedy o hodnoty hluku při řezných rychlostech, od kterých byly odečteny logaritmické hodnoty pozadí. Tyto hodnoty tedy zaznamenávají pouze hluk od trysky v nastavené vzdálenosti. Byla vyhodnocena také hodnota hladiny akustického zvuku korigovaná váhovým filtrem A. Naměřené hodnoty jednotlivých pásem jsou vyneseny v obr. 60 a zaznamenány v tabulce 21.



Obrázek 62 - Graf závislosti  $L_p$  na třetinooktavovém pásmu

Tabulka 21 - Průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku po odfiltrování okolního prostředí – část 1

Třetinooktavové pásmo	125 [Hz]	160 [Hz]	200 [Hz]	250 [Hz]	315 [Hz]	400 [Hz]	500 [Hz]	630 [Hz]	800 [Hz]	1000 [Hz]	1250 [Hz]
1. CC 1,1[dB]	55,3	52,3	60,0	54,2	59,3	61,9	63,3	65,1	67,9	68,6	69,5
2. CC 1,6 [dB]	58,0	57,1	63,5	58,3	61,8	57,6	64,1	63,3	67,6	69,5	70,2
3. CC 2,1[dB]	55,4	49,4	58,9	53,2	54,8	43,9	57,8	55,2	60,1	62,8	64,0
4. SC 1,7 [dB]	60,6	59,3	63,5	56,5	61,7	59,2	67,0	63,7	64,1	67,1	70,5
5. SC 2,1 [dB]	58,3	54,8	60,1	54,3	57,8	57,8	58,3	55,0	58,7	61,2	61,5
6. SC 2,5 [dB]			61,8	48,5	53,6	57,0	55,7	54,0	54,1	57,7	57,9

Tabulka 22 - Průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku po odfiltrování okolního prostředí – část 2

1600 [Hz]	2000 [Hz]	2500 [Hz]	3150 [Hz]	4000 [Hz]	5000 [Hz]	6300 [Hz]	8000 [Hz]	10000 [Hz]	12500 [Hz]	16000 [Hz]	20000 [Hz]
70,4	71,3	74,4	78,9	76,1	76,5	79,0	79,1	81,5	83,2	84,1	84,0
72,3	73,3	75,6	77,9	76,8	76,8	79,8	79,5	81,8	83,0	84,0	84,5
64,7	67,1	69,8	74,8	71,5	72,3	77,1	76,1	80,1	81,8	83,3	84,0
67,7	69,7	72,5	73,9	74,2	74,4	75,9	76,7	78,8	80,9	82,1	83,2
62,9	64,3	66,5	68,9	69,9	71,3	73,0	74,7	77,8	80,7	81,9	83,6
59,2	60,8	63,3	65,2	66,8	69,6	71,7	73,9	77,6	80,1	81,5	82,2



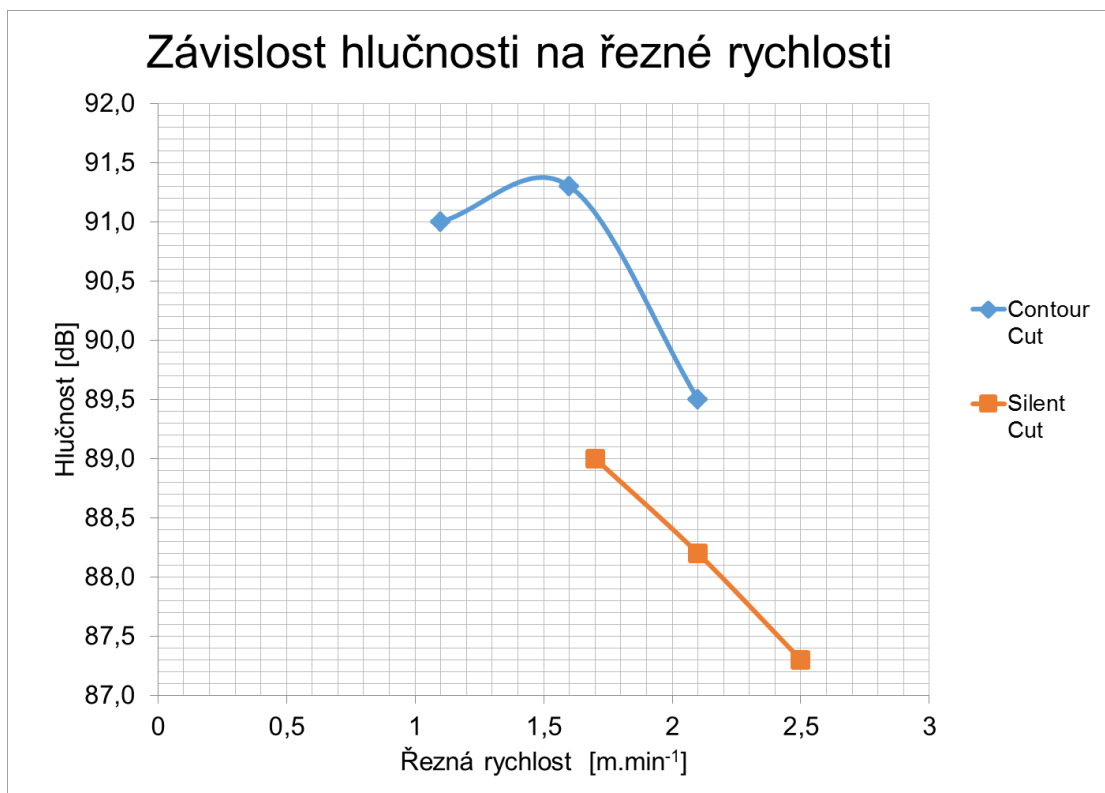
Tabulka 23 – Hodnoty hladiny akustického zvuku  $L_p$  a  $L_{pA}$  po odfiltrování okolí – průměrné hodnoty

	$L_p$ [dB]	$L_{pA}$ [dB]
1. CC 1,1	<b>91,0</b>	<b>88,3</b>
2. CC 1,6	<b>91,3</b>	<b>88,6</b>
3. CC 2,1	<b>89,5</b>	<b>85,7</b>
4. SC 1,7	<b>89,0</b>	<b>85,8</b>
5. SC 2,1	<b>88,2</b>	<b>83,6</b>
6. SC 2,5	<b>87,3</b>	<b>82,5</b>

Na základě vypočtených výsledků je možné zhodnotit průběh jak se změnou řezné rychlosti (řezných parametrů) a metody plazmového řezání změní hodnota akustického tlaku a tedy hlučnosti samotného plazmového zařízení – při Řezání stejného materiálu, stejné tloušťky.

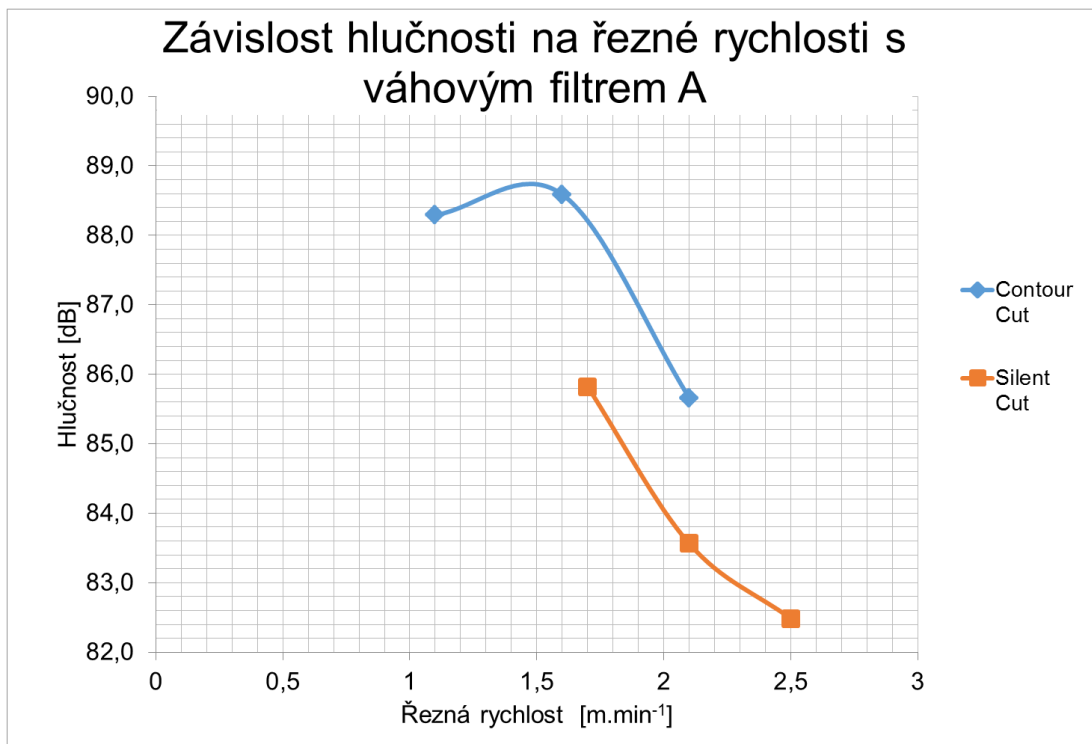
V případě, že uvažujeme jenom hodnoty hladiny akustického zvuku je z výsledku jasné, že čím je větší řezná rychlost, tím je samotný proces plazmového řezání tišší. Toto tvrzení se potvrdilo při metodě plazmového řezání Silent Cut. U metody plazmového řezání Contour Cut je viditelný mírný nárůst hlučnosti mezi vzorky CC 1,1 a CC 1,6, potom však hlučnost stejně jako v případě Silent Cut klesá. Jak je vidět na grafu u metody Contour Cut (modrá křivka obrázek 61), při nižších hodnotách řezné rychlosti je hodnota hluku 91 dB respektive 91,3 dB. U nejvyšší řezné rychlosti je to 89,5 dB. U metody Silent Cut (červená křivka obrázek 61) je hodnota hluku při nejnižší řezné rychlosti 89,0 dB a při nejvyšší rychlosti 87,3 dB. Potvrzuje se tedy, že při optimálních podmínkách je proces plazmového řezání metodou Silent Cut tišší než řezání metodou Contour Cut.

V případě porovnání hlučnosti řezání vzorků s optimálními řeznými parametry, navržené výrobcem plazmového zařízení je hlučnost procesu při Contour Cut (a rychlosti řezání  $1,6 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 91,3 dB a při režimu Silent Cut (a rychlosti  $2,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 87,3 dB. Rozdíl u těchto dvou procesů je tedy 4 dB.



Obrázek 63 - Graf závislosti hlučnosti na řezné rychlosti

V případě porovnávání výsledků korigovaných váhovým filtrem A, tedy tím co slyší lidské ucho, byly hodnoty hlučnosti o něco nižší. Ve výsledcích uvedených v tabulce a v grafu se opět potvrdilo tvrzení, že čím je větší řezná rychlost, tím je proces plazmového řezání tišší. U metody plazmového řezání Contour Cut (modrá křivka grafu na obrázku 62) se nejvyšší hlučnosti dosáhlo při optimální řezné rychlosti a to 88,6 dB. Mírně nižší hlučnost byla u nižší řezné rychlosti a to 88,3 dB. Výrazně nižší hlučnost byla potom u vyšší řezné rychlosti a to 85,7 dB. U metody Silent Cut (červená křivka grafu na obrázku 62) se opět potvrdilo, že řezání touto metodou je nižší než v případě metody plazmového řezání Contour Cut. Hodnota hlučnosti u nejnižší řezné rychlosti při řezání metodou Silent Cut byla 85,8 dB. Naopak o nejvyšší řezné rychlosti 82,5 dB. V případě porovnání optimálních rychlostí byla hlučnost u Contour Cut a rychlosti 1,6 m/min 88,6 dB a při rychlosti Silent Cut a rychlosti 2,5 m/m 82,5 dB. Tady byl rozdíl hlučnosti u těchto dvou metod dokonce až 6,1 dB.



Obrázek 64 – Graf závislosti hlučnosti na řezné rychlosti s váhovým filtrem A

V této části experimentu se podařilo ověřit výrobcem stanovenou teorií o tišším chodu plazmového zařízení při použití řezného režimu plazmového řezání Silent Cut. Cílem této práce bylo ověřit toto tvrzení v porovnání s metodou plazmového řezání Contour Cut a zároveň zjistit vliv řezných parametrů na hlučnost, což bylo realizováno změnou řezných rychlostí. Výrobce udává, že v rozsahu tloušťek materiálu mezi 4 až 30 mm a proudovém rozsahu 60 až 160 A, může být metoda Silent Cut tišší až o 15 dB. Jak již bylo popsáno v předchozí části, toto tvrzení se podařilo potvrdit pro obdélníkové výpalky z 10 mm materiálu.

Metoda plazmového řezání Silent Cut je tedy prokazatelně tišší než metoda plazmového řezání Contour Cut – ověřeno pro rovinné řezy na obdélníkových vzorcích. Rozdíly v hlučnosti jsou sice nižší, než uvádí výrobce, ale to může být způsobeno vybraným typem řezu a tloušťkou materiálu (proudovou hustotou). Největší hluk nastává v počáteční a koncové fázi řezání (při zapálení oblouku a při propalování materiálu), případně při řezání tvarově složitějších řezů, kdy se mění směr řezání. Zároveň hlučnost ovlivňují přejezdy přes lamelové rošty pracovního stolu, kdy se tlak řezacího oblouku třífí o hrany lamel. Maximální hodnoty hlučnosti by tedy musely být hodnoceny v těchto krajních mezích procesu řezání.

## 5 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na porovnání metodou plazmového řezání Silent Cut a Contour Cut při různých řezných rychlostech z hlediska kvality řezné hrany a hlučnosti samotného procesu plazmového řezání.

V prvním kroku byly hodnoceny vzorky z hlediska průběhu řezu a vzniku okují. Při vzorcích vytvořených metodou Contour Cut při spodní hraně. Okuje se tvoří na spodní hraně řezaného materiálu. Okuje byly lehce odstranitelné. Při vzorcích vytvořených metodou Silent Cut měly okuje menší velikost. Opět se tvořili při spodní hraně, ale byly hůře odstranitelné

V dalším kroku se hodnotila drsnost řezné hrany. Výrazně lepší výsledky drsnosti byly u vzorků vytvořených při metodě Silent Cut. Při použití metody Contour Cut se drsnost zmenšuje s klesající řeznou rychlostí. Při použití režimu Silent Cut je trend stejný. Nicméně se vyskytlo jedno měření, které tomuto trendu nezodpovídalo a hodnota drsnosti u vzorku 6 -SC 2,1 byla vyšší.

Při hodnocení tvrdosti pro vzorky vytvořené metodou Contour Cut při použití optimální řezné rychlosti je tvrdost vyhovující. Se zvyšující se řeznou rychlostí se hodnota tvrdosti zvyšuje. Při snížení řezné rychlosti dochází ke zvýšení hodnoty tvrdosti na spodní hraně řezu. Při použití metody Silent Cut se opět se sníženou řeznou rychlostí snižuje hodnota tvrdosti, ale při snížení řezné rychlosti o 30 % nastává opět zvýšení tvrdosti na spodní hraně řezu.

V dalším kroku byla hodnocena velikost tepelně ovlivněné oblasti. Na základě naměřených hodnot je viditelné, že v případě použití metody Contour Cut je tepelně ovlivněná oblast větší jak v případě metody Silent Cut. Při metodě Contour Cut je trend, že s rostoucí řeznou rychlostí roste i velikost tepelně ovlivněné oblasti. U nižších rychlostí řezání při metodě Silent Cut je velikost tepelně ovlivněné oblasti více rovnoměrná v celé ploše řezu. Při nejvyšší řezné rychlosti je trend podobný jako v případě Contour Cut. U obou metod tedy dochází zvyšováním řezné rychlosti k nárůstu tepelně ovlivněné oblasti na spodní hraně řezu. Trend taky ukazuje, že velikost tepelně ovlivněné oblasti roste od horní hrany směrem k dolní hraně.

Dalším krokem hodnocení byl tvar řezné hrany. V případě metody Contour Cut se tvar řezné hrany shoduje s teoretickou hodnotou, tzn. že v případě nižší řezné rychlosti má

řezná spára tvar písmene V a úhel řezné hrany je pozitivní. V opačném případě je řezná spára širší ve spodní části a teda úhel řezné hrany je negativní. V případě metody Silent Cut je úhel skosení řezné hrany výrazně nižší. Naopak řezná hrana má na horní hraně viditelné zaoblení.

V posledním kroku byla hodnocena hlučnost samotného procesu plazmového řezání. V případě metody Silent Cut se zvyšující se řeznou rychlostí se hlučnost procesu plazmového řezání snižovala. V případě metody Contour Cut se hlučnost procesu mírně zvětšuje od nižší k optimální rychlosti řezání. Při zvyšování řezné rychlosti nad hodnotu optimální rychlosti řezání, potom dochází opět k snižování hlučnosti stejně jako v případě Silent Cut. Při porovnání jednotlivých procesů je proces Silent Cut v porovnání s procesem Contour Cut tišší při tvorbě přímého řezu v ustáleném stavu, kterého řezání jsme měřili. Rozdíl v hlučnosti je cca 4 dB, při použití váhového filtru A až cca 6,1 dB.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Typy tepelného řezání .....	15
Obrázek 2 - Schematické znázornění principu řezání laserovým paprskem .....	16
Obrázek 3 - Konstrukce hořáku pro ruční řezání .....	20
Obrázek 4 – Princip řezání kyslíkem .....	20
Obrázek 5 - Schéma principu plazmového dělení [1] .....	22
Obrázek 6 - Rozbor plazmového hořáku .....	23
Obrázek 7 - Schéma závislého zapojení plazmového hořáku [4] .....	24
Obrázek 8 - Schéma nezávislého zapojení plazmového hořáku [4] .....	25
Obrázek 9 - Schéma plazmového hořáku s plynovou stabilizací [3] .....	28
Obrázek 10 - Schéma plazmového hořáku s vodní stabilizací [3] .....	29
Obrázek 11 - Tvar řezné spáry při rozdílných řezných rychlostech $v_r$ – rychlost řezání, b- šířka řezné spáry [1] .....	32
Obrázek 12 - CNC plazmový řezací zařízení Vanad Proxima .....	34
Obrázek 13 - Plazmový zdroj Kjellberg Firsenwalde HiFocus 280i neo .....	36
Obrázek 14 – Výrobce uváděné porovnání hlučnosti Silent Cut - SC a Contour Cut - CC [12] .....	38
Obrázek 15- plazmový hořák PerCut 451 .....	39
Obrázek 16 – Parkovací stanice a výměnná plazmová hlava [20] .....	40
Obrázek 17 - Rozebraný plazmový hořák [20] .....	40
Obrázek 18 - Vstupní údaje pro řezání metodou Contour Cut při 90 A .....	42
Obrázek 19 - Vstupní údaje pro řezání metodou Silent Cut při 90 A .....	43
Obrázek 20 - Pokus o výpalek příliš vysokou rychlostí (pohled na horní hranu plechu) .....	44
Obrázek 21 - Okuje na vzorcích 1, 2, 3 .....	46
Obrázek 22 - Okuje na vzorcích 4, 5, 6 .....	47
Obrázek 23 – Drsnomer Mitotuyo SJ-301 .....	48
Obrázek 24 – Ukázka měření drsnosti .....	49
Obrázek 25 – měřicí zařízení - tvrdoměr BuehlerIndentamet 1100 .....	50
Obrázek 26 – ukázka měření vzorku na tvrdoměru .....	51
Obrázek 27 - Schéma měření tvrdosti podle Vickerse .....	51
Obrázek 28 - Metalografická pila LABOTOM -3 .....	54
Obrázek 29 - Metalografický lis CitoPress-1 .....	54
Obrázek 30 - Metalografický vzorek připravený na broušení .....	54
Obrázek 31 - Brousící stroj Phoenix - Beta .....	56
Obrázek 32 - Vyleštěné a naleptané metalografické vzorky .....	56
Obrázek 33 - Mikroskopická struktura TOO - martenzit .....	57
Obrázek 34 - Mikroskopická struktura feritu .....	57
Obrázek 35 - Vzorek 1: TOO - horní část .....	58
Obrázek 36 - Vzorek 1: TOO - střed .....	58
Obrázek 37 - Vzorek 1: TOO - dolní část .....	58

Obrázek 38 - Vzorek 2: TOO - horní část.....	59
Obrázek 39 - Vzorek 2: TOO - střed .....	59
Obrázek 40 - Vzorek 2: TOO- dolní část.....	59
Obrázek 41 - Vzorek 3: TOO - horní část.....	60
Obrázek 42 - Vzorek 3: TOO - střed .....	60
Obrázek 43 - Vzorek 3: TOO - dolní část.....	60
Obrázek 44 - Vzorek 4: TOO - horní část.....	61
Obrázek 45 - Vzorek 4: TOO - střed .....	61
Obrázek 46 - Vzorek 4: TOO - dolní část.....	61
Obrázek 47 - Vzorek 5: TOO - horní část.....	62
Obrázek 48 - Vzorek 5: TOO - střed .....	62
Obrázek 49 - Vzorek 5: TOO - dolní část.....	62
Obrázek 50 - Vzorek 6: TOO - horní část.....	63
Obrázek 51 - Vzorek 6: TOO - střed .....	63
Obrázek 52 - Vzorek 6: TOO - dolní část.....	63
Obrázek 53 - tvar řezné hrany vzorku 1 .....	64
Obrázek 54 - Tvar řezné hrany vzorku 2 .....	65
Obrázek 55 - Tvar řezné hrany vzorku 3 .....	65
Obrázek 56 - Tvar řezné hrany vzorku 4 .....	66
Obrázek 57 - Tvar řezné hrany vzorku 5 .....	66
Obrázek 58 - Tvar řezné hrany vzorku 6 .....	67
Obrázek 60 - Oblasti lidského sluchu [26].....	68
Obrázek 59 - Hladiny akustického tlaku v prostředí [26] .....	68
Obrázek 61 - Měření hlučnosti plazmového zařízení .....	69
Obrázek 62 - Graf závislosti $L_p$ na třetinoctavovém pásmu .....	72
Obrázek 63 - Graf závislosti hlučnosti na řezné rychlosti .....	74
Obrázek 64 – Graf závislosti hlučnosti na řezné rychlosti s váhovým filtrem A.....	75

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání vlastností metod tepelného dělení [3].....	14
Tabulka 2 - Použití plynu podle materiálu.....	26
Tabulka 3 - Maximální teplota plazmového oblouku v závislosti na použitém plynu.....	26
Tabulka 4 – Přehled používaných plazmových plynů a jejich vlastnosti.....	27
Tabulka 5 - Technické údaje o plazmovém zařízení [15].....	38
Tabulka 6 - Průměrné hodnoty tvrdosti základního materiálu.....	41
Tabulka 7 - Tabulka vzorků.....	45
Tabulka 8- Naměřené hodnoty drsnosti Ra[ $\mu\text{m}$ ].....	48
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty drsnosti Rz[ $\mu\text{m}$ ].....	48
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 1 - CC 1,6.....	51
Tabulka 11 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 2 – CC 2,1.....	51
Tabulka 12 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 3 – CC 1,1.....	52
Tabulka 13 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 4 – SC 2,5.....	52
Tabulka 14 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 5 – SC 1,7.....	52
Tabulka 15 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV 1 pro vzorek 6 – SC 2,1.....	53
Tabulka 16 - Tabulka naměřených rozměrů tepelně ovlivněné oblasti.....	57
Tabulka 17 - Přehled kolmosti řezné hrany měřených vzorků.....	64
Tabulka 18 - Naměřené hodnoty v třetinooktávních pásmech – část 1.....	70
Tabulka 19 - Naměřené hodnoty v třetinooktávních pásmech – část 2.....	71
Tabulka 20 – Hodnoty hladiny akustického zvuku $L_p$ a $L_{pA}$ - průměrné hodnoty.....	71
Tabulka 21 - Průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku po odfiltrování okolního prostředí – část 1.....	72
Tabulka 22 - Průměrné hodnoty hladiny akustického tlaku po odfiltrování okolního prostředí – část 2.....	72
Tabulka 23 – Hodnoty hladiny akustického zvuku $L_p$ a $L_{pA}$ po odfiltrování okolí – průměrné hodnoty.....	73



## Bibliografie

- [1] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
- [2] Nekonvenční metody obrábění. *MM Spektrum* [online]. 2007 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>.  
Prezentace
- [3] DOLEJSKÝ, Tomáš. *Tepelné dělení plazmou: Řezání plazmou*. Ostrava: Zeross, 2018, 66 s. ISBN 978-80-85771-14-5.
- [4] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] *Contour Cut* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut.html>
- [6] *Contour Cut Speed* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut-speed.html>
- [7] *Silent Cut* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-silent-cut.html>
- [8] ROUBÍČEK, Martin. *KRITÉRIA VOLBY METODY A TRENDY TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ* [online]. *AIR LIQUIDE 2007* [cit. 10-05-2020].
- [9] *HiFocus High Precision Plasma Cutting* [online]. Kjellberg Finsterwalde, 2018, 8 s. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: [https://www.kjellberg.de/en/catalog/hifocus-280i-neo.html?file=files/01\\_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Automatisiertes%20Plasma%20schneiden/Brochure-HiFocus-Series-de-en.pdf](https://www.kjellberg.de/en/catalog/hifocus-280i-neo.html?file=files/01_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Automatisiertes%20Plasma%20schneiden/Brochure-HiFocus-Series-de-en.pdf)
- [10] *CNC řezací stroje* [online]. Vanad, 2019, 24 s. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: [https://vanad.cz/public/dokumenty/cs\\_ke-stazeni/katalog\\_CZ.pdf](https://vanad.cz/public/dokumenty/cs_ke-stazeni/katalog_CZ.pdf)
- [11] *Vanad Proxima* [online]. Vanad, 2019, 2 s. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: [https://vanad.cz/public/dokumenty/cs\\_ke-stazeni/KL\\_CZ\\_PROXIMA.pdf](https://vanad.cz/public/dokumenty/cs_ke-stazeni/KL_CZ_PROXIMA.pdf)

- [12] *Silent Cut* [online]. Kjellberg Finsterwalde, 2018, 2 s. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <http://www.cat-cnc.com/Silent-Cut.pdf>
- [13] *Plasma Cutting Systems HiFocus 280i / 360i / 440i* [online]. Kjellberg Finsterwalde, 2011, 4 s. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.sttechno.ru/upload/iblock/ef2/ef2fb5de1711030a71eb8f4cf3baecfd.pdf>
- [14] *Contour Cut- Precision in Detail* [online]. Kjellberg Finsterwalde, 2017, 4 s. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: [https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut-speed.html?file=files/01\\_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Verfahrenstechnologien/Brochure-ContourCut-de-en.pdf](https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut-speed.html?file=files/01_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Verfahrenstechnologien/Brochure-ContourCut-de-en.pdf)
- [15] *HiFocus 280i neo* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/catalog/hifocus-280i-neo.html>
- [16] *Plasma Cutting technology - Silent Cut* [online]. Kjellberg Finsterwalde, 2018, 2 s. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: [https://www.kjellberg.de/en/technology-silent-cut.html?file=files/01\\_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Verfahrenstechnologien/Fluer-SilentCut-SF-HF-de-en.pdf](https://www.kjellberg.de/en/technology-silent-cut.html?file=files/01_inhalte/datenblaetter%20produkte/de/Verfahrenstechnologien/Fluer-SilentCut-SF-HF-de-en.pdf)
- [17] ZMYDLENÝ, Tomáš. Tepelné dělení materiálů: Stručný úvod do řezání kyslíkem, plazmou a laserem [online]. VŠB FS [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/70572546-Tepelne-deleni-materialu.html>. Prezentace.
- [18] ČSN EN 1090-2. *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. 2012.
- [19] ČSN EN 1090-2, PŘÍLOHA D. *Postup pro kontrolu schopnosti procesu automatizovaného tepelného řezání*. 2012.
- [20] *The FineFocus company - Stručný provozní návod: Stručný provozní návod HiFocus i neo s FC 3-440*. Kjellberg Finsterwalde, 2013, 230 s.
- [21] *Rezanie plazmou / Technológia* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.microstep.sk/technologie/rezanie-plazmou/>
- [22] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická

univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.

- [23] KMEC, Ján, Daniel KUČERKA, Miroslav GOMBÁR, Roman HRMO a Ľuba BIČEJOVÁ. *Delenie materiálov*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2014, 287 s. ISBN 978-80-553-1872-1.
- [24] MRŇA, Libor. *Dělení a svařování svazkem plazmatu* [online]. In: . [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_deleni\\_a\\_svarovani\\_plasmou\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_deleni_a_svarovani_plasmou_2013_mrna.pdf). Prezentace
- [25] *12. Tepelné delenie materiálov – podstata procesu, spôsoby* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://www.strojarskatechnologia.info/12-tepelne-delenie-materialov-podstata-procesu-sposoby/>
- [26] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 3. vydání. Praha: ČVUT, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-06554-9.
- [27] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. In: Portál moderní fyziky[online]. Olomouc, 2010 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [28] *7. Dělení materiálu* [online]. In: . s. 5 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-7\\_Deleni\\_materialu\\_RAJ.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-7_Deleni_materialu_RAJ.pdf)
- [29] *Nekonvenční metody obrábění 8. díl* [online]. In: . [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [30] *Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>