

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**Horáček  
Jan**

**2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horáček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **473534**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Porovnání procesů plazmového řezání**

Název bakalářské práce anglicky:

**Comparison of plasma cutting processes**

Pokyny pro vypracování:

Rozbor problematiky plazmového řezání  
Popis jednotlivých variant řezných procesů u moderních plazmových řezacích zařízení  
Návrh experimentu – porovnání režimů řezání a návrh kritérií vhodných pro porovnání  
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) bakalářské práce:

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

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské 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

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou plazmového řezání. V práci je dále popsána historie, princip plazmového řezání, sestavení hořáků, další metody řezání a technické plyny.

Experimentální část se zabývá porovnáním metod Silent cut a Contour cut. U obou metod byl porovnáván řez z hlediska drsnosti povrchu, kolmosti, tvrdosti, tepelně ovlivněné oblasti a hluku při řezání na 6 vzorcích z materiálu S235.

### **Klíčová slova:**

Plazmové řezání, Contour cut, Silent cut,

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the issue of plasma cutting. The paper also describes the history, the principle of plasma cutting, assembly of torches, other cutting methods, and technical gases.

The experimental part is concerned with the comparison of Silent Cut and Contour Cut methods. For both methods, the section was compared in terms of surface roughness, perpendicularity, hardness, heat affected area, and noise when cutting on 6 samples of S235 material.

### **Keywords:**

Plasma cutting, Contour cut, Silent cut

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Porovnání standartních 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 tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkvi, Ph.D., IWE a za metodické vedení a odborné konzultace, které mi poskytl při zpracování mé bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D., IWE a dalším kteří se podíleli na mé práci.

## Obsah

1	Tepelné dělení materiálů [1] [2] .....	9
1.1	Metody tepelného dělení .....	9
1.1.1	Řezání kyslíkem .....	9
1.1.2	Řezání laserem .....	10
1.1.3	Řezání plazmou .....	10
2	Číselné značení metod [3].....	11
3	Historie tepelného dělení plazmou [1] [4] .....	11
4	Fyzikální popis plazmatu [5] [6] [7] .....	12
4.1	Elektrický oblouk .....	12
4.2	Plazmový oblouk .....	13
4.3	Termodynamické děje .....	14
4.3.1	Disociace .....	14
4.3.2	Ionizace .....	14
4.3.3	Excitace .....	15
4.3.4	Rekombinace .....	15
5	Plazmové plyny [10] [11] .....	16
5.1	Argon .....	16
5.2	Vodík .....	16
5.3	Dusík.....	17
5.4	Kyslík .....	17
5.5	Vzduch.....	17
5.6	Plynné směsi .....	18
6	Plazmový hořák [12].....	18
7	Základní technologické parametry [12] [13] [14].....	20
7.1	Rychlost dělení materiálu .....	20
7.2	Nastavení napětí a proudu .....	20
7.3	Opotřebenění dílů .....	21
7.4	Vzdálenost hořáku od materiálu .....	21
7.5	Průměr trysky .....	22
8	Fáze řezání [13] [15].....	22
8.1	Předfuk .....	22
8.2	Pilotní oblouk .....	23
8.3	Řezací oblouk .....	23
8.4	Dofuk .....	23

8.5	Bezpečnost práce a životní prostředí [14] .....	23
9	Popis jednotlivých technologií [16] [17] [18] [21] .....	24
9.1	Technologie dělení hydroterm.....	24
9.2	Technologie duálního plynu .....	25
9.3	Technologie dělení s vodním pláštěm .....	26
9.4	Technologie dělení pod vodou .....	26
9.5	Technologie dělení vzduchovou plazmou .....	27
9.6	Technoogie dělení Hy-definition.....	27
9.7	Technologie dělení X-Definition.....	28
9.8	Technologie Contour cut a Contour cut speed .....	29
9.9	Technologie Silent cut.....	30
10	Experiment .....	31
10.1	Proudový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo [19] .....	31
10.2	Strojní hořák PerCut 450 .....	33
10.3	CNC pálicí stroj Vanad Proxima .....	33
10.4	Použitý materiál pro experiment [20].....	34
10.5	Nastavení parametrů řezání .....	36
10.5.1	Nastavení pro metodu Contour Cut.....	36
10.5.2	Nastavení pro metodu Silent Cut .....	37
10.6	Postup a kontrola vzorků .....	39
10.7	Měření drsnosti řezu .....	41
10.7.1	Vyhodnocení měření výšky prvků profilů Rz5.....	41
10.8	Měření úchylky kolmosti a úhlů „u“ .....	42
10.8.1	Vyhodnocení měření úchylky kolmosti a úhlů „u“ .....	44
10.9	Měření tvrdosti .....	45
10.9.1	Vyhodnocení měření tvrdosti .....	46
10.10	Tepelně ovlivněná oblast .....	48
10.11	Měření hluku.....	51
10.11.1	Výsledky měření hluku.....	51
11	Závěr .....	54

## Úvod

V dnešní době se pro řezání kovů využívají specializované stroje, které používají různé metody řezání. Teoretická část bakalářské práce se věnuje přiblížení metod tepelného dělení. Zvláště je věnována řezání plazmou a popisu různých režimů řezání. Dále se věnuje fyzikální podstatě plazmy, historii, technickým plynům, bezpečnosti a sestavení hořáků.

Pro praktickou část bakalářské práce byly vybrány dva způsoby plazmového řezání od společnosti Kjellberg, které jsou dostupné na fakultě strojní ČVUT v Praze. Společnost Kjellberg nabízí několik variant (režimů) plazmového řezání. Pro potřeby bakalářské práce byl zvolen základní způsob řezání (Contour Cut) dodávaný firmou Kjellberg a doplňující způsob (Silent Cut), který by měl mít výrazně nižší hlučnost při řezání. Při plazmovém řezání se nehledí nejen na hlučnost, ale také je nutné dosáhnout požadované kvality řezu. Kvalita lze hodnotit různými parametry řezu jakou jsou drsnost, kolmost tvrdost a tepelně ovlivněná oblast. Srovnáním těchto parametrů u obou způsobů se věnuje experimentální část bakalářské práce.

Cílem bakalářské práce je porovnání řezání plazmou režimem Silent Cut a Contour Cut při řezání konstrukční oceli S235JR tloušťky 10 mm.



# 1 Tepelné dělení materiálů [1] [2]

Tepelné dělení materiálu je nekonvenčním způsobem řezání, kdy je využita tepelná energie z různých zdrojů, soustředěna do místa dělení. Hlavní výhodou nekonvenčních metod je, že můžeme rychle dělit materiály a tvarově složité tvary, které by konvenční metodou byli složité nebo by vůbec nešli zrealizovat.

## 1.1 Metody tepelného dělení

Tepelné dělení je jednou z nejpoužívanějších metod pro přípravu materiálu ocelových konstrukcí. Mezi metody tepelného dělení patří: řezání plazmou, laserem a kyslíkem.

### 1.1.1 Řezání kyslíkem

Proces spočívá v předehřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu a následném přivedení kyslíku pod tlakem, který zajistí spalování kovu a vytvoření řezné spáry. Maximální řezaná tloušťka komerčně dostupnými zařízeními je 300 mm, což je velkou výhodou, protože ostatní metody tepelného dělení to neumožňují. Kyslíkem lze řezat především kovy a slitiny, které mají teplotu spalování nižší než teplotu tání. Tyto kovy a slitiny musí mít vhodné chemické složení s obsahem uhlíku do 1,6 % a splňují tzv. podmínku řezatelnosti. Nevýhodou je tedy omezený výběr materiálů, na které lze tato metoda použít např. šedá litina a neželezné (barevné) kovy.

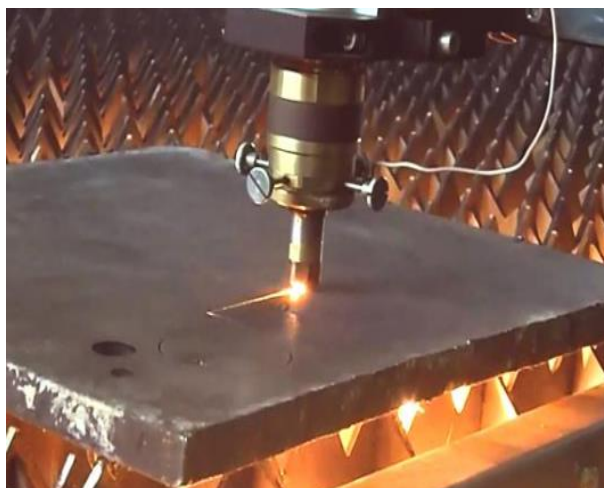


*Obrázek 1- Ukázka strojního a ručního řezání kyslíkem [1]*

### 1.1.2 Řezání laserem

Při tepelném dělení laserem působí úzký paprsek laserového záření s vysokou hustotou energie ( $10^7$ - $10^9$  W/cm<sup>2</sup>). Metody kdy se utváří řezné spáry jsou oxidační, tavné a sublimační.

Používá se k přesnému řezání a vyřezávání kovů. Paprsek laseru je přiváděn do místa řezu soustavou zrcadel a v pracovní hlavě je zaostřován čočkou. Laser se používá především na řezání menších tloušťek materiálů, kdy rychlost řezání může dosahovat až 40 m/min. Hrana řezu je velice kvalitní, hladká a téměř bez okují. Lze řezat velmi mnoho materiálů např. kovové, nekovové, keramické, skleněné atd. U větších tloušťek kovových materiálů je na řezu patrné vznik návarků, větší tepelně ovlivněná oblast a natavení materiálu. Dále s rostoucí tloušťkou přibývá omezení tvarových možností a zhoršení kvality řezu.



*Obrázek 2-Ukázka řezání laserem [2]*

### 1.1.3 Řezání plazmou

Řezání plazmou spočívá v ohřevu nad tavicí teplotu a vytlačení roztaveného kovu ionizačním plynem vysoké teploty a tlaku. Plazmový oblouk má vysokou hustotou energie ( $10^6$  W/cm<sup>2</sup>), tím se vytváří řezná spára. Lze řezat všechny kovové materiály až do tloušťky cca. 150 mm, díky vysoké teplotě paprsku (až 30 000 °C) a rychlosti řezání ( $1500$ - $2300$  m.s<sup>-1</sup>), kvalita řezu však vykazuje větší drsnost povrchu a podkosení. Výhodou této metody je vysoká rychlost řezání a menší tepelně ovlivněná oblast materiálu. Nevýhodou je vysoká

hladina hluku (okolo 100 dB), která se dá eliminovat technologií Silent Cut. Řezání plazmou je blíže popsáno v kapitole 4, 5, 6, 7, 9.



Obrázek 3-Řezání plazmou [3]

## 2 Číselné značení metod [3]

Norma ČSN EN ISO 4063 stanovuje přehled metod svařování a příbuzných procesů (tedy i metod tepelného dělení) a jejich číselné označení. Norma zahrnuje hlavní skupiny metod (označeno jednou číslicí), skupiny (dvě číslice) a podskupiny (tři číslice). Metody tepelného dělení jsou zahrnuty ve skupině 8.

Tabulka 1-Značení metod tepelného dělení

Metoda	ČSN EN ISO 4063
Řezání kyslíkem (OGC - oxy gas cutting)	81
Řezání plazmou (PBC- plasma beam cutting)	83
Řezání laserem (LBC – laser beam cutting)	84

## 3 Historie tepelného dělení plazmou [1] [4]

Řezání plazmou bylo vyvinuto v 50. letech dvacátého století. Poprvé se uplatnila pro řezání neželezných kovů a slitinových ocelí. Později se zjistilo, že pokud zúžíme (fokusujeme) sloupec plazmového oblouku, pomocí měděné dýzy chlazenou vodou, zvýší se nám teplota a napětí plasmy v řezací spáře. Začátkem 60. let dvacátého století byl vynalezen dvou Proudý plazmový oblouk, stíněný sekundárním plynem. Plazmové řezání

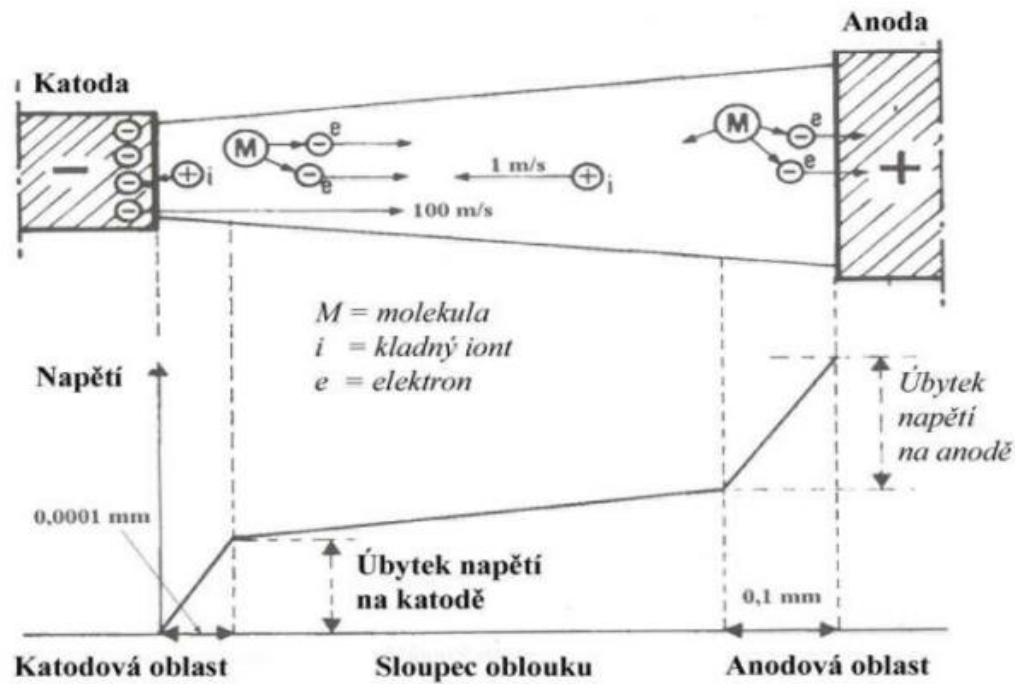
bylo dále vyvíjeno a v 80. letech bylo vyvinuto plasmové řezání pod vodou, díky vodě byla omezena hlasitost hluku a nečistoty při řezání. V současnosti byla například vyvinuta technologie Silent Cut ke snížení hluku (až o 15 dB) nebo Contour Cut pro řezání malých obrysů, pásů a zejména malých děr.

## **4 Fyzikální popis plazmatu [5] [6] [7]**

Plazma je ionizovaný plyn, který se skládá z iontů, elektronů a neutrálních atomů. Díky volně se pohybujícím elektronům je elektricky vodivý. Elektrická vodivost je způsobena přítomností aniontů a elektronů, které vznikají díky termodynamickým jevům ve sloupci oblouku: Disociace, Ionizace, Excitace a Rekombinace.

### **4.1 Elektrický oblouk**

Elektrický oblouk je elektrický výboj kruhového průřezu soustředěný do tenkého sloupce, jehož jádro tvoří ionizovaný plyn. Oblouk je intenzivně svítící a zřetelně ohraničený, skládající se z: katodové oblasti, anodové oblasti a sloupce oblouku. Katodová oblast je rozdělena na dvě oblasti. V první tzv. katodové skvrně dochází k emisi elektronů, která se soustřeďuje v místě minimálního odporu. Lze ji charakterizovat jako část povrchu žhavé katody, z níž elektrony vystupují. Druhá oblast je vyplněna plynem, bezprostředně sousedící s katodou, v níž nastává prudký spád napětí tzv. oblast katodového úbytku napětí. Anodová oblast je tvořena také ze dvou oblastí, z anodové skvrny, kde jsou elektrony pohlcovány, tj. vstupují do anody, a oblasti anodového úbytku napětí, která je bezprostředně přilehlá k anodě, v níž stejně jako u katody nastává prudký pokles napětí. Mezi katodou a anodou tvoří el. oblouk tzv. sloupec oblouku. Sloupec je jasně zářící část tvořena plazmatem (viz výše). Sloupec oblouku má charakter rozšiřujícího se kužele směrem od katody k anodě. Vyšší tepelný výkon má anodová oblast, což je zapříčiněno rekombinací, při které se uvolňuje ionizační a disociační energie (zhruba o 30 % více tepla).



Obrázek 4-Schéma elektrický oblouku [4]

## 4.2 Plazmový oblouk

Plazmový oblouk je intenzivně svítící a zřetelně ohraničený výboj kruhového průřezu s vysokou teplotou. Jeden z rozdílů od elektrického oblouku je fokusace plynu. Fokusací plynu dochází k zvýšení hustoty energie a k větší stabilizaci plazmového oblouku. Dalším rozdílem je, že se používá plazmový plyn, který se přivádí přímo do oblouku plazmovým hořákem a tím se zvyšuje stupeň ionizace, protože plazma je silně zionizovaný plyn. V technické praxi se u plazmy vžil název „stabilizace oblouku“. Jeho pomocí se dosahuje určitého požadovaného kontrahovaného (zúženého) tvaru plazmového oblouku. Stabilizace lze dosáhnout vhodným tvarem trysky a konstrukcí plazmového hořáku, kdy elektroda je zapuštěna do rýsky hořáku na rozdíl např. od TIG hořáku, kde elektroda „vylézá“ ven z hořáku. Dále lze stabilizaci dosáhnout proudícím plynem či vodou. Při intenzivním chlazení se dosahuje menšího průměru oblouku a vyšší teploty. Nejčastěji se chladí vodou nebo plynem. Plazmové řezání a svařování bylo vyvinuto z metody TIG začátkem 50. let dvacátého století v USA.

### 4.3 Termodynamické děje

Probíhají v elektrickém oblouku a mají vliv na stabilitu a hoření oblouku. Jsou ovlivňovány především materiálem, uspořádáním, tvarem elektrod a tepelnou vodivostí plazmatu, elektrody a základního materiálu.

#### 4.3.1 Disociace

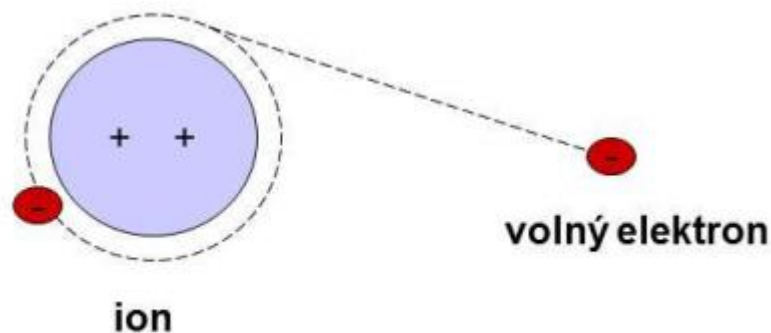
Disociace je děj, při kterém se molekuly, které při normální teplotě jsou dvou atomové (např.  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ ) nebo jsou ještě složitější (např.  $CO_2$ ) rozpadají na atomy. Je to stav, kdy nárazová energie překoná vazební energii. Potřebná energie pro molekuly se nazývá „disociační energie“. Příklad disociace molekuly vodíku je ukázán na obrázku 4.



Obrázek 5-Termodynamický děj disociace [4]

#### 4.3.2 Ionizace

Ionizace vzniká z jedno atomových molekul, které vznikly buď z více atomových molekul (jako výsledkem disociace), nebo vytváří jednoatomové molekuly (např. Argon, helium, ...). V elektrickém neutrálním atomu se nacházejí záporně nabitě elektrony a kladné protony v rovnováze. Při dodávání další tepelné energie, dojde k „vymrštění“ valenčního elektronu (volný elektron) z obalu atomu (zbytkový iont). Výsledkem ionizace je tak vznik volných elektronů (záporně nabitých částic) a kladných zbytků atomů (aniontů).

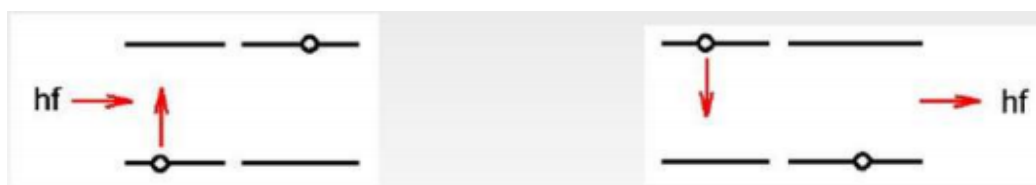


Obrázek 6-Termodynamický děj ionizace [4]

Mezi snadno se ionizující prvky patří například argon, který zvyšující stabilitu a snižuje napětí na elektrickém oblouku. Obtížně ionizující prvky jako je například hélium zvyšuje přenesené teplo.

#### 4.3.3 Excitace

Excitace je fyzikální proces, při kterém dochází k přechodu energetického stavu elektronu na vyšší orbit (tzv. energetickou hladinu) v důsledku dodávané energie. Tento proces je nestabilní, po přerušení dodávání energie elektron přejde zpět na původní hladinu a přitom vyzáří kvantum energie, tento jev se nazývá spontánní emise. Dále se, se stoupající teplotou oblouku zkracuje vlnová délka vyzářeného vlnění (tj. stoupá podíl UV záření).



Obrázek 7-Termodynamický děj excitace [4]

#### 4.3.4 Rekombinace

V plazmatu dochází kromě ionizace, disociace a excitace, také k neutralizačnímu procesu nabitých částic (tzv. Rekombinaci). Kladné ionty a záporné elektrony se opět spojí v neutrální atomy a ty poté v molekuly. Energie se uvolní a elektrický oblouk nataví základní materiál. Plazma může dosahovat až 30 000 °C. Teplota je ovlivněna např. proudem, napětím, plynem, tlakem, .... Rekombinace je hlavní příčinou úbytku elektronů a iontů v plazmatu.

## 5 Plazmové plyny [10] [11]

Jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde dochází k jejich ionizaci a disociaci. Jako plazmový plyn může být používán jednoatomový argon (pokud je plyn atomární nedochází k disociaci) nebo dvouatomové plyny: vodík, dusík, kyslík nebo složitější směsi plynů (např. vzduch). Dělí se na:

- Fokusační plyny-zaostřují plazmový oblouk po jeho výstupu z trysky hořáku. Používají se argon, dusík, směs argonu a vodíku nebo směs argonu a dusíku.
- Asistenční plyny-obklopují plazmový oblouk a pracovní místo a chrání je před účinkem atmosféry. Používá se argon a dusík.

Volba plazmového a asistenčního plynu je závislá na typu materiálu a jeho tloušťce. Směsi obou plynů jsou doporučeny výrobcem. Plazmové plyny se volí následující:

- Pro konstrukční ocel: kyslík, vzduch
- Pro vysoce legovanou ocel: argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík
- Pro neželezné kovy: argon/vodík, vzduch
- Pro kompozitní materiály: argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík.

### 5.1 Argon

Patří do skupiny inertních plynů, během řezání nereaguje s materiálem tzn. je chemicky netečný. Jeho atomová hmotnost je nejvyšší ze všech plazmových plynů. Díky nízkému ionizačnímu potenciálu je argon nejlepší pro zapálení plazmového oblouku. Avšak argon nelze používat jako jediný rezný plyn, protože má nízkou tepelnou vodivost a nízkou tepelnou kapacitu. Argon získáváme separací vzduchu, kde má podíl 0,9 % a je nejčastěji dodáván v plné směsi v tlakových lahvích.

### 5.2 Vodík

Vodík je bezbarvý, lehký plyn bez chuti a zápachu. Vyrábí se termickým rozkladem zemního plynu při 1000 °C. Je dodáván v tlakových lahvích z nízkouhlíkové nebo legované oceli. Má velmi dobrou tepelnou vodivost. Dále se vodík při vysokých teplotách



disociuje. To znamená, že velké množství energie je odebíráno z oblouku (jako ionizace), a proto se povrchové vrstvy ochlazují. Tento účinek vede k dalšímu zúžení oblouku, a proto lze dosáhnout vyšší energetické hustoty. Rekombinační procesy mají ten účinek, že odebraná energie je opět uvolňována v roztavené lázni ve formě tepla. Také vodík však nelze použít jako jediný plyn, protože má na rozdíl od argonu velmi malou atomovou hmotnost, a proto nemůže produkovat dostatek kinetické energie k vytlačení taveniny.

### **5.3 Dusík**

Dusík je plyn bez barvy, zápachu a chuti, není toxický ani nebezpečný. Je to inertní plyn a za vyšších teplot se začne rozkládat na atomární dusík, který reaguje s materiálem. Dusík se získává separací vzduch jako argonu, kde jeho podíl je 79 %. Dodávání je také v tlakových lahvích. Dusík se vlastnostmi pohybuje mezi argonem a vodíkem, může tedy být použit jako samostatný plazmový plyn. Používá se pro řezání vysokolegovaných ocelí o velkých tloušťkách.

### **5.4 Kyslík**

Kyslík je bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Je to velmi reaktivní plyn, tvoří mnoho sloučenin (jeho sloučeniny se nazývají oxidy a nejznámější je voda). Plyn je podobný dusíku díky své tepelné vodivosti a atomové hmotnosti. Kyslík má určitou afinitu k železu, což znamená, že během oxidace vzniká teplo, které lze použít ke zvýšení rezné rychlosti. Kyslík se používá hlavně jako řezací a sekundární plyn pro řezání nelegované a nízkolegované oceli. Používá se především při řezání uhlíkové oceli.

### **5.5 Vzduch**

Hlavními složkami vzduchu jsou dusík (přibližně 70 %) a kyslík (přibližně 21 %). Lze tak použít kombinované vlastnosti obou plynů. Stlačený vzduch je jedním z cenově nejvýhodnějších technických plynů a používá se k řezání oceli do tlouštěk 40 mm nelegované, nízkolegované a vysoce legované oceli.

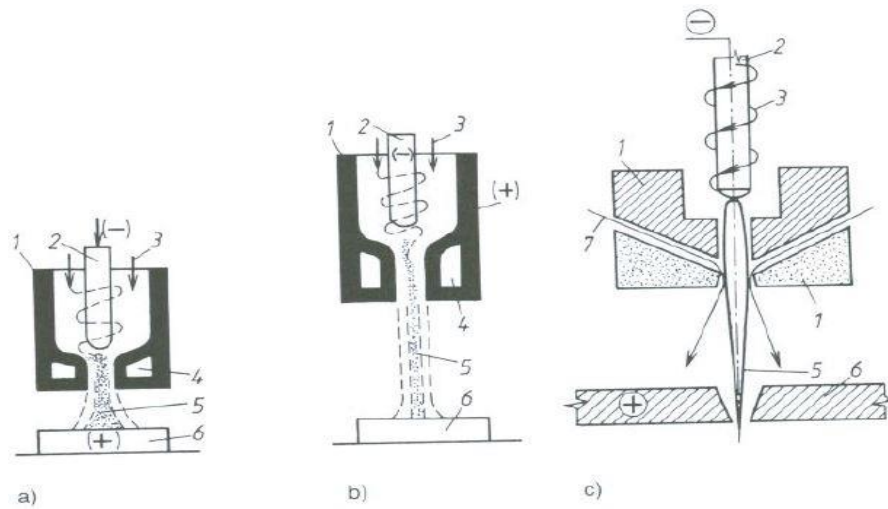
## 5.6 Plynné směsi

Výše uvedené plyny se často také používají ve vybraných kombinacích jako plynné směsi. Například dobré tepelné vlastnosti vodíku mohou být kombinovány s vysokou atomovou hmotností argonu. To umožňuje řezání vysoce legované oceli a také hliníku s tloušťkou materiálu větší než 5 mm s obsahem vodíku v závislosti na tloušťce materiálu. Čím větší tloušťka materiálu, tím více vodíku se používá. Maximální obsah činí 35 objemových %. Samozřejmě jsou možné i jiné kombinace, například směsi dusík-vodík nebo argon-dusík-vodík.

## 6 Plazmový hořák [12]

V plazmovém hořáku dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou energii. Nejdůležitějším charakteristickým rysem plazmového hořáku je způsob stabilizace elektrického oblouku a životnost jednotlivých součástí v hořáku. Dělí se na:

- **Plazmové hořáky s plynovou stabilizací:**
  - a) **S transferovým obloukem** - el. oblouk hoří mezi elektrodou a řezaným materiálem
  - b) **Netransferovým obloukem** – el. oblouk hoří mezi elektrodou a výstupní tryskou, která tvoří anodu.
  
- **Plazmové hořáky s vodní stabilizací** – řezací tryska má přídatné kanálky, kterými se vstříkuje voda do plazmového hořáku. Výhodou je možnost řezat pod vodou, čímž se sníží hluchnost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu.



Obrázek 8-a) hořák s plynovou stabilizací s transferovým obloukem, b) hořák s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) hořák s vodní stabilizací (1 - těleso hořáku, 2 - katoda, 3 - přívod plynu, 4 - chlazení hořáku, 5 - paprsek plazmatu, 6 - obrobek, 7 - přívod vody)

Každý komponent hořáku se z důvodu omezené životnosti vyrábí samostatně. Největší opotřebení má výstupní tryska a elektroda, děje se tak u zapalování oblouku. Elektroda musí být chlazená, buď kapalinou nebo plynem, jak je uvedeno výše. Při chlazení plynem se zlepšuje kvalita řezu a tepelně ovlivněná oblast.

## 7 Základní technologické parametry [12] [13] [14]

Nejvíce ovlivňující parametry tepelného dělení plazmou jsou napětí, proud a řezná rychlost, které volíme podle materiálů a tloušťek řezaného materiálu.

Dalším vedlejším parametrem je typ chlazení trysky, plazmový plyn, průměr trysky, opotřebení trysky a vzdálenost hořáku od děleného materiálu.

### 7.1 Rychlost dělení materiálu

Nastavení řezné rychlosti je velmi důležité, protože ovlivňuje celou řadu činitelů jako je úhel řezu, reliéf dělené plochy, velikost a přilnutí roztaveného kovu na spodní straně řezu. Rychlost řezání se odvíjí od druhu a tloušťky řezaného materiálu. Pohybuje se v rozmezí mezi 0,2 do 7,5 m·min<sup>-1</sup>. Rozlišujeme tři druhy řezání:

- **Oblouk, který zaostává ve směru posuvu** – Tento typ oblouku je nejpoužívanější a používá se pro všechny dělené materiály a plyny.
- **Oblouk předbíhá osu hořáku ve směru posuvu** – Používá se při dělení tenkých materiálů.
- **Oblouk zůstává kolmý k místu řezu** – Používá se při dělení hliníku a korozivzdorné oceli. Používá se vzduch jako plazmový plyn.

Kvalita těchto činitelů je podmíněna správným nastavením řezné rychlosti.

### 7.2 Nastavení napětí a proudu

Při tomto způsobu dělení se používá stejnosměrný proud, který nastavujeme podle velikosti tloušťky, typu materiálu a rychlosti řezání. Při vysokém nastavení proudu dojde k velkému zaoblení hrany a dochází na spodní straně řezané spáry k vytváření otřepů roztaveného materiálu. Naopak při nízkém nastavení proudu se materiál „neprořízne“. Následnou regulací napětí přiblížíme nebo oddálíme vzdálenost oblouku od řezaného materiálu.

### 7.3 Opotřebení dílů

Nejvíce opotřebovávanými díly hořáku jsou tryska a elektroda, u kterých je doporučováno provádět výměnu současně. Výměnu určí a provede operátor. Výměna se provádí, pokud úbytek elektrody dojde na délku jednoho milimetru a měří se hloubkoměrem (viz obrázek 9). Opotřebená tryska se vyznačuje oválným otvorem.



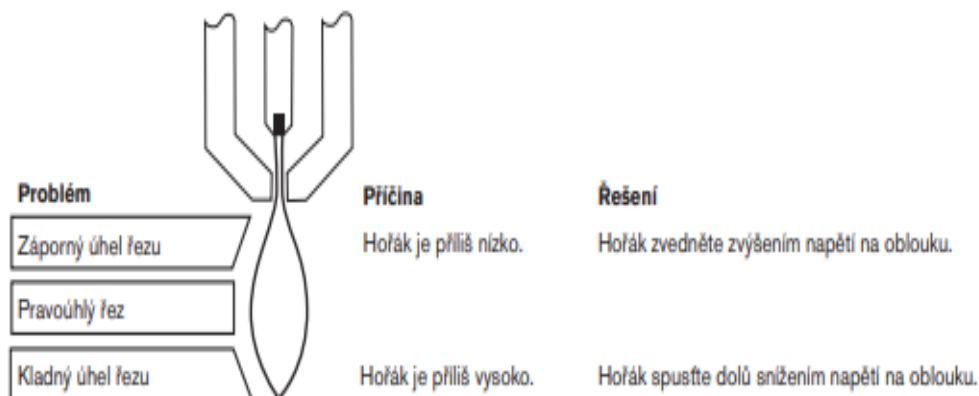
Obrázek 9-Měrka prohlubně elektrody [5]

### 7.4 Vzdálenost hořáku od materiálu

Optimální řezná výška je 2-6 mm podle tloušťky řezaného materiálu a nastavení parametrů.

Máme dva druhy regulace. První je automatická regulace výšky, která je nejpoužívanější. Udržuje hořák v konstantní vzdálenosti od řezaného materiálu. Hodnota napětí je závislá na výšce a řezné rychlosti. Druhá metoda je bez regulace, u které nastavíme vzdálenost před začátkem řezání. Tato hodnota se udržuje po celou dobu řezání. U této metody je nevýhodou, že u tenkém materiálu může dojít ke zvlnění a tím i ke změně vzdálenosti hořáku od materiálu.

Pokud nastavíme malou vzdálenost hořáku od řezaného materiálu, vznikne záporný úhel řezné hrany. Naopak u velké vzdálenosti hořáku od materiálu vznikne kladný úhel řezné hrany.



Obrázek 10 - Vliv délky oblouku na úhel řezu [5]

## 7.5 Průměr trysky

Abychom dosáhli kvalitního řezu, je dobré volit průměr trysky co nejmenší. Čím bude průměr trysky menší, tím bude plazmový oblouk užší a bude mít větší intenzitu energie. Nevýhodou, ale je, že malý průměr trysky se rychleji opotřebovává. Proto musíme zvolit optimální průměr, který se volí podle tloušťky řezaného materiálu a použitého proudu zdroje. Nejčastěji používané rozměry jsou v rozsahu od 0,79 do 6,35 mm.

## 8 Fáze řezání [13] [15]

### 8.1 Předfuk

Je to fáze kdy před zažehnutím pilotního oblouku jsou přiváděny plyny. Současně je spuštěn plazmový a ochranný plyn. Předfuk je prováděn, aby se vytvořila dostatečná atmosféra a vír plazmového plynu. Tento proces trvá přibližně 2 až 3 sekundy.

## 8.2 Pilotní oblouk

Je oblouk, který se vytváří mezi elektrodou a tryskou. Pilotní oblouk nepříznivě ovlivňuje opotřebovávání trysky a elektrody. Proto je důležité, aby oblouk přešel co nejrychleji na řezací oblouk. Pilotní oblouk trvá 1 až 4 sekundy.

## 8.3 Řezací oblouk

Řezací oblouk je velmi závislý na konstantní rychlosti řezání a na vzdálenosti hořáku od děleného materiálu. Musíme si dávat pozor, aby nedošlo ke vzniku dvojitého oblouku, jelikož by došlo ke zničení trysky.

## 8.4 Dofuk

Dofuk znamená přivádění plynů i po skončení řezání. Důvodem dofuku je, že chrání ovlivněné místo řezu před okolní atmosférou a intenzivně chladí hořák. Tento proces trvá obvykle 10 sekund.

## 8.5 Bezpečnost práce a životní prostředí [14]

Při řezání plazmou je problém, že dochází ke vzniku ultrafialového a infračerveného záření, které eliminujeme ochranou zraku. Dále dochází ke vzniku jedovatého dýmu, zplodin a prachu, které se musí odfiltrovat a následně přefiltrovat, aby neškodily životnímu prostředí a obsluze strojů. Negativním jevem je velmi vysoký hluk (okolo 100 dB). Např. systémy s vodní ochranou zabraňují z velké části šíření těchto jevů (viz obrázek 11).



Obrázek 11-Plazové řezání pod vodní hladinou [6]

## 9 Popis jednotlivých technologií [16] [17] [18] [21]

Základním rozdělení řezání plazmou se dělí na čtyři varianty. Liší se podle charakteru účinků plazmatronů což jsou mechanismy, v nichž se tvoří plazma. Konstrukce plazmatronů předurčuje i účinnost plazmatického řezání.

Prvním variantou je tzv. Plasma Arc Machining (PAM), v plazmatronech se tvoří oblouk mezi elektrodou a řezaným materiálem. Tato varianta se používá hlavně pro vodivé materiály. Tryska plazmového hořáku je zde u toho způsobu relativně málo namáhána.

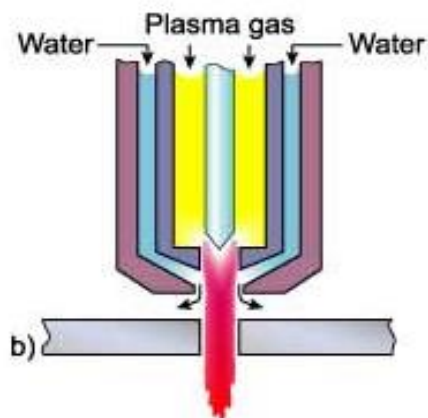
Druhou variantou je tzv. Plasma Beam Maching (PBM), oblouk hoří mezi elektrodou z málo tavitelného materiálu jako je například grafit a tryskou, která je anodou. U této varianty je princip chlazení vodou. Voda vede kolem trysky anebo kanálem, kde se plyn procházející obloukem ionizuje a vystupuje z trysky v podobě plazmy. Použití této metody je vhodné pro elektricky nevodivé materiály. Nejčastěji se pracuje s plynem argonem anebo se směsí argonu a vodíku.

Posledními variantami, která jsou v posledních letech stále častěji používány jsou tzv. Air Plasma Systém a tzv. Water-Injected Plasma. Z hlediska ekonomiky jsou méně nákladné a používají se pro řezání nízkolegovaných ocelí. U varianty se vstříkáváním vody se do komory tangenciálně přivádí proud vody pod vysokým tlakem a používá se tu dusík. Takto se vytvoří vír, který obklopí plazmový oblouk a odvádí jej tvarovým otvorem k hlavě hořáku. Chlazení vodou kladně ovlivňuje kvalitu řezu a šířku řezné spáry.

### 9.1 Technologie dělení hydroterm

Vířivé vstříkávání způsobuje, že při teplotách kolem 50 000 K voda vytváří tenký film okolo oblouku, aby se odpařovala. Odpaří se kolem 10% vody a její skoro veškeré množství vychází z trysky ve tvaru kužele. Tato vodní clona má za úkol chladit materiál na povrchu, aby se netvořili oxidy. Voda prodlužuje životnost trysek a stabilitu oblouku. Tryska má přídavné kanály, jimiž se vstříkuje voda. Konečný řez je velmi kvalitní a má skoro pravoúhlé hrany. Povrch a hrany materiálu jsou u této metody tepelně ovlivněny jen minimálně. Další výhodou je zvýšení řezné rychlosti, snížení eroze trysek a menší riziko dvojitého oblouku

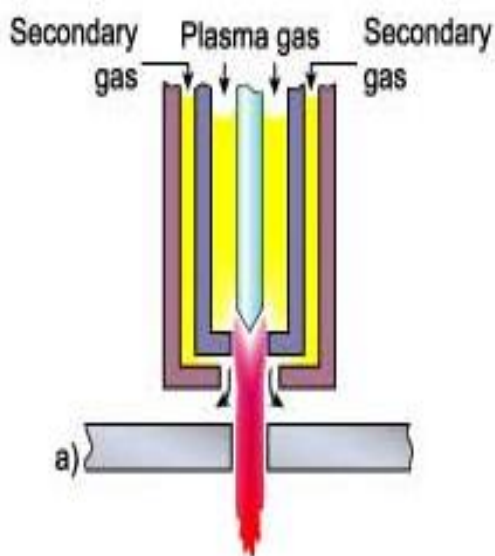




Obrázek 12 - Vstřikování vody [7]

## 9.2 Technologie duálního plynu

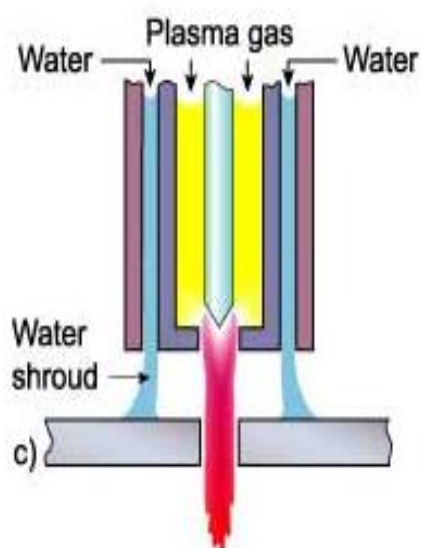
Tento proces pracuje podobně jako u konvenčního systému, akorát kolem trysky se zavádí sekundární plynový štít. Účinky sekundárního plynu jsou zúžení oblouku a lepší od fouknutí strusky. Jako primární plyn tzv. tvarovací plyn se obvykle používá vzduch, dusík nebo kyslík. Sekundární plyn je nejčastěji kyslík, dusík nebo argon. Výhodou oproti konvenční plazmě je snížení rizika vzniku dvojitého oblouku, vyšší řezné rychlosti a snížení zaokrouhlení horní hrany.



Obrázek 13 - Schéma duálního dělení plazmou [7]

### 9.3 Technologie dělení s vodním pláštěm

Dělení s vodní clonou je podobné jako metody duálního plynu akorát místo plynu je oblouk chráněn vodním pláštěm. Díky vodě se zvyšuje životnost trysek, snižuje se tvorba škodlivého kouře a dochází ke snížení hladiny hluku. Protože vodní plášť nezvyšuje stupeň zúžení, nerovnost řezné spáry a řezná rychlost se zdatelně nezlepší.



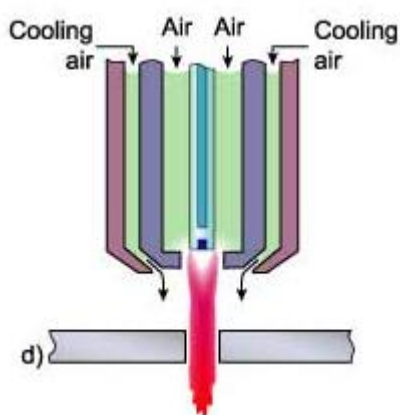
Obrázek 14 - Schéma dělení plazmou s vodním pláštěm [7]

### 9.4 Technologie dělení pod vodou

U plazmového řezání pod vodou je obrobek ponořen asi 50–75 mm pod hladinou vody. Hladina kouře a hluku, stejně jako oslnění oblouku, jsou vysoce sníženy. Negativním účinkem této metody je, že při řezání nelze obrobek pozorovat a řezná rychlost se snižuje o 10–20 %. Dále obsluha nemůže ze zvuku oblouku určit, zda řezný proces probíhá správně a zda se vytváří kvalitní řez. Voda okolo hořáku se stále musí pohybovat, aby nevznikli kapsy vodíku, které se uvolňují z vody pod obrobkem, protože by mohlo dojít k explozi. Tato technologie je pokládána jako nejvíce ekologickou. ”

## 9.5 Technologie dělení vzduchovou plazmou

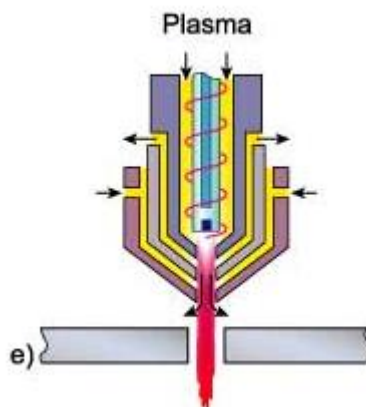
Plyny vytvářející plazmu (např. argon nebo dusík) mohou být nahrazeny vzduchem, ale vyžaduje to speciální elektrodu z hafnia nebo zirkonia namontovanou v měděném držáku. Výhodou u této metody je, že místo drahých plynů používáme stlačený vzduch. Nevýhoda je, že elektrody s hrotem z hafnia jsou velmi drahé ve srovnání s wolframovými elektrodami.



Obrázek 15 - Schéma dělení vzduchovou plazmou [7]

## 9.6 Technologie dělení Hy-definition

U tohoto procesu je speciálně navržená tryska, která má unikátní konstrukci odvětrávané dvoudílné trysky, která zužuje plazmový oblouk. Díky této trysce máme tedy větší hustotu energie, a to přibližně na 60 000 J. Výsledné zvýšení energie umožnilo vynikající kvalitu řezu s kvalitní řeznou hranou, užším řezem a vyššími řeznými rychlostmi než u konvenční technologie plazmového řezání. Dříve byla tato technologie omeze na výkonem 70 A a maximální tloušťka řezu pro ocel byla 9 mm. Dnes mohou systémy s Hy-definition řezat až do tloušťky 75 mm s dobrou kvalitou a vyšší rychlostí ve srovnání s ostatními procesy. Navíc tyto systémy lze velmi dobře zautomatizovat. Pokročilé parametry zadávané do systému CAM umožňují řezat například kulaté otvory bez zúžení, hrany jsou do pravého úhlu a časy cyklů řezu se zkracují na polovinu pro mnohem vyšší úroveň produktivity.



Obrázek 16 - Schéma dělení Hy-definition [7]

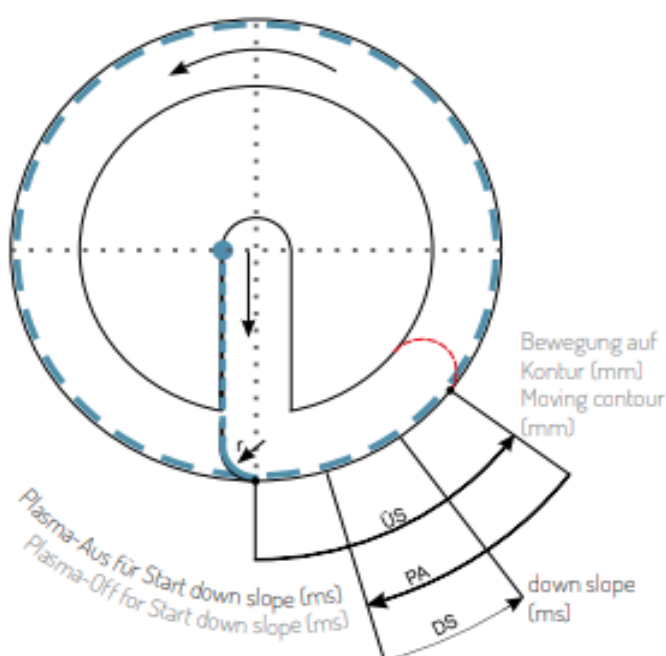
## 9.7 Technologie dělení X-Definition

Tato technologie má maximální výstupní proud 300 A. Díky výstupnímu výkonu a novému procesu propalu s asistencí argon, je umožněno propalovat o 30 % větší tloušťky materiálu u nízkouhlíkové oceli a o 20 % větší tloušťky u korozivzdorné oceli, než bylo možné dříve u používaných technologií. Kombinací vynikající kvality řezu, vyšší rychlosti a automatického systému se jedná o nejmodernější a nejvíce produktivní řezací systém. Tato technologie se vyrovnává technologii řezání laserem a to o daleko nižší vstupní investici. Další výhodou je, že obsluha je snadná a intuitivní. Skládá se z nových a rozšířených technologií řezání jako například jsou:

- **Technologie víření tryskou HyFlow** – Je konstrukce dvoudílné odvětrávané trysky, která vyrovnává a zaostřuje plazmový oblouk pro zvýšenou stabilitu oblouku a hustou energii.
- **Vent-to-shield** – Technologie, ve které je vodík z odvzdušňovaného plazmového plynu regenerován a smíchán s ochranným plynem, čímž se snižuje úhel a kvalitnější barva okrajů na korozivzdorné oceli do tloušťky 12 mm.
- **Plazmové tlumení** – Tato technologie přidává komoru v trysce, aby absorbovala kolísání tlaku a průtoku, které vytvářejí nestabilitu oblouku s nízkým tlakem. To eliminuje zvlněné a nepravidelné řezné povrchy u tenkých korozivzdorných materiálů.

## 9.8 Technologie Contour cut a Contour cut speed

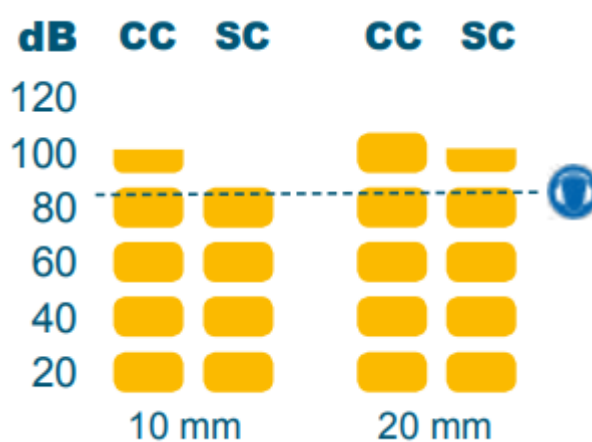
Contour cut je technologie používaná pro řezání malých obrysů, úzkých pásů a hlavně malých děr s poměrem průměru k tloušťce 1:1 je dosaženo vynikající kvality řezu. Kvalitní a ostré řezné hrany snižují dodatečné zpracování, což snižuje náklady na výrobu. Pro řezání větších kontur je vhodná technologie Contour Cut Speed, která má stejné spotřební díly jako Contour cut. Díky níž se při zachování odpovídající kvality řezu zvýší rychlost řezání o 50 %. Tím se zlepší řezný výkon a zároveň dochází ke snížení nákladů na řezný metr. Hlavním důvodem, proč jsou metody Contour cut a Contour cut speed tak účinná je nastavení řezacího plánu (viz obrázek 17) a speciálním tvarem trysky (viz obrázek 25 vlevo).



Obrázek 17-Ukázka trajektorie řezání [8]

## 9.9 Technologie Silent cut

V důsledku vysoké hustoty energie a rychlosti proudění plazmového oblouku dochází k vysokým hladinám zvuku, které jsou pro lidské slyšení vnímány jako hlasité a rušivé (více než 100 dB). Právě pro tyto účely byla vyvinuta technologie Silent Cut. Díky speciálně navržené trysce (viz obrázek 25 vpravo) a při řezání konstrukčních ocelí o tloušťce mezi 4-30 mm v proudovém rozsahu od 60-160 A se hladina akustického zvuku sníží až o 15 dB. To zajišťuje lepší pracovní prostředí a významně přispívá k bezpečnosti práce. Na obrázku 18 je vidět porovnání hlučnosti řezání tlouštěk 10 a 20 mm na pracovišti s metodou Contour cut.



Obrázek 18- Porovnání hlučnosti metod Contour Cut a Silent Cut [8]

## 10 Experiment

Experimentální část se věnuje porovnání dvou řezných metod. První technologie Contour Cut (CC), se využívá pro řezání konstrukčních ocelí a umožňuje řezání malých děr o průměru rovné tloušťce materiálu 1:1. Druhou metodou je Silent Cut (SC), která slouží k výraznému snížení akustického tlaku, a to až o 15 dB. Uvedené metody byly porovnávány z hlediska kvality řezu (změřením kolmosti a drsnosti řezné hrany na šesti různých vzorcích) a ovlivnění mechanických vlastností (změření tvrdosti na řezné hraně). U každé metody byly použity tři vzorky různých tvarů. Dále byla kladen změřena hlučnost při řezání různých typů (vzorků) a porovnávány obě metody z hlediska vlivu typu řezu na hlučnost řezání.

Pro vyhotovení řezu byl použit plasmový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo s automatickou regulací plynů. Dále plazmový hořák PerCut 450 a stroj Vanad Proxima. Jako základní materiál byla vybrána konstrukční ocel S235JR tloušťky 10 mm. U obou metod byli nařezány vzorky s optimálními parametry řezání, udávanými výrobcem řezacího stroje (tj. všechny vzorky různých typů řezů byly vytvořeny pro jednotlivé metody stejnou rychlostí a se stejným nastavením zdroje).

### 10.1 Proudový zdroj Kjellberg HiFocus 280i neo [19]

Jde o moderní a vysoce flexibilní zdroj nové generace ze skupiny velmi výkonných zdrojů od firmy Kjellberg. Je určen pro řezání elektricky vodivých materiálů, např. konstrukční ocel, korozivzdorná vysokolegovaná ocel, hliník a jeho slitiny apod. V rozsahu od 0,5 – 70 mm. Tento zdroj HiFocus 280i neo, který je zobrazen na obrázku 19 umožňuje více plynné řezání, tedy má automatickou regulaci plynů, tzn. že zdroj si umí automaticky nastavit kombinaci a množství plynů, podle dané metody řezání, tloušťky a druhu řezaného materiálu. Ideálně se hodí pro ocelářská střediska, výrobce a distributory ocelí. Lze jej kombinovat s 2 D a 3 D řídicími systémy. V tabulce



Obrázek 19-Proudový zdroj HiFocous 280i neo

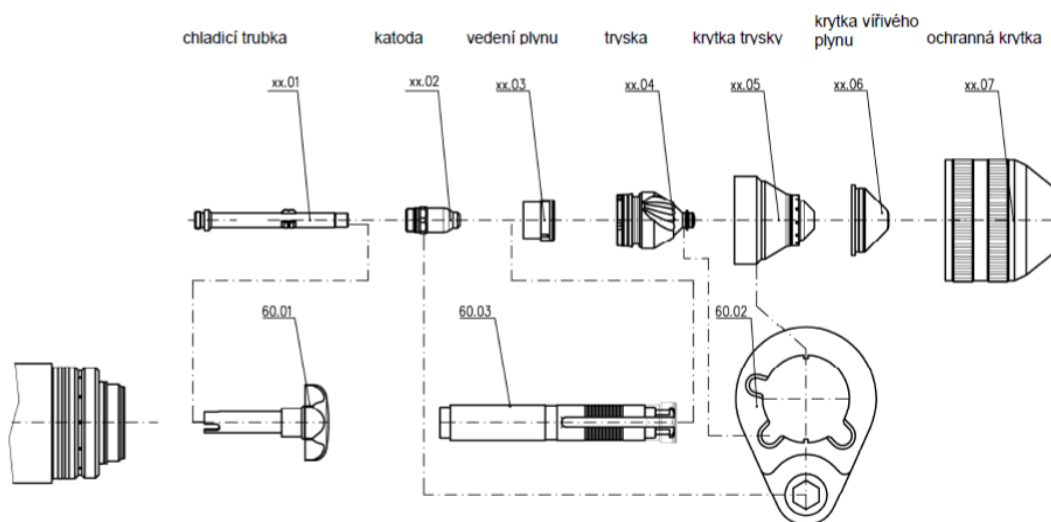
Tabulka 2-Technické údaje plazmového zdroje HiFocus 28i neo

<b>Číslo artiklu</b>	.11.034.302
<b>Strana sítě:</b>	
<b>Síťové napětí <math>U_1^*</math>:</b>	3x 400 V $\pm$ 10 %, 50 Hz
<b>Max. příkon:</b>	67 kVA (zatěžovatel 100 %)
<b>Pojistka, pomalá:</b>	T 100 A
<b>Síťový kabel:</b>	NSSHÖU: 4 x 35 mm <sup>2</sup> Cu
<b>Účinník cos phi:</b>	0,89 (280 A)
<b>Účinnost:</b>	0,91
<b>Strana řezání:</b>	
<b>Plazmový hořák</b>	PerCut 440/450; PerCut 441/451
<b>Napětí naprázdno <math>U_0</math>:</b>	330 V
<b>Řezací proud <math>I_0</math>:</b>	10 – 280 A
<b>Řezací napětí <math>U_A</math>: (100 %)</b>	200 V
<b>Řezací výkon <math>P_0</math>:</b>	56 kW
<b>Zatěžovatel X:</b>	100 % při 280 A
<b>Pilotní proud <math>I_{PB}</math>:</b>	max. 40 A
<b>Kabel obrobku:</b>	průřez vodiče: 95 mm <sup>2</sup> Cu
<b>Charakteristika:</b>	klesající
<b>Metoda zapalování:</b>	zapalování pilotního oblouku pomocí vysokonapěťové zapalovací jednotky (v přípojovací jednotce plazmového hořáku PBA-440) vybuzení hlavního oblouku pomocí pilotního oblouku
<b>Hmotnost m:</b>	422 kg
<b>Rozměry (dxšxv):</b>	1030 x 680 x 1450 mm (s řídicími a podpěrnými kolečky)
<b>Krytí:</b>	IP22
<b>Třída tepelné odolnosti:</b>	F
<b>Chlazení přístroje:</b>	externí chlazení pomocí vestavěného ventilátoru
<b>Chlazení hořáku:</b>	externí cirkulační chlazení
<b>Chladicí prostředek:</b>	směs chladicího prostředku s integrovanou ochranou proti korozi - „Kjellfrost -15“ (ochrana proti zamrznutí do -15°C) nebo - „Kjellfrost -25“ (ochrana proti zamrznutí do -25°C)
<b>Tlak:</b>	9,0 bar



## 10.2 Strojní hořák PerCut 450

Plazmový hořák typu PerCut 450, který je zobrazen na obrázku 20 je určen pro používání se zdrojem HiFocus 280i neo a tvoří s uvedeným proudovým zdrojem bezpečný technický celek. Hořák se skládá z hlavy hořáku, svazku hadic a spotřebních dílů. K řezání používáme plazmové plyn jako vzduch (Air), kyslík (O<sub>2</sub>), argon (Ar), dusík (N<sub>2</sub>), vodík (H<sub>2</sub>) a jejich směsi. Jako vířivé plyny lze používat vzduch (Air), kyslík (O<sub>2</sub>) a dusík (N<sub>2</sub>) nebo jejich směsi. Práce hořáku spočívá v přenesení řezacího proudu na elektrodu (katodu) pomocí měděného lanka, které je vztaženo do elektricky izolující hadice vratného toku chladícího prostředku. Elektroda je tepelně nejnamáhanější součást hořáku kvůli přechodu mezi plazmou a elektrickým obloukem. Tryska zužuje plazmu do stabilního oblouku. Tryska se musí intenzivně chladit, protože je vystavena velmi vysokým teplotám. Čím užší výstupní plazmový oblouk tím se tryška rychleji opotřebovává a musí se vyměnit.



Obrázek 20-Strojní hořák pro plazmové řezání PerCut 450

## 10.3 CNC pálicí stroj Vanad Proxima

Tento stroj je vysoce výkonné zařízení hodící se jak pro plazmové, tak i autogenní řezání. Dráha stroje je vedena lineárním vedením na všech pojezdových osách a má oboustranný pohon s bezvúlovými převodovkami. Umožňuje použití až 8 supportů díky vysoké nosnosti ramene a poskytuje ruční či automatické ukosování. Stroj je vybaven databází, kdy se automaticky nastaví všechny technologické podmínky a parametry řezání pro různé materiály a jejich tloušťky. Součástí je i sekčně odsávaný pracovní stůl o

rozměrech 1000 x 2000 mm, který je napojen na odsávání od firmy Kemper sloužící k odsávání škodlivých látek, které při řezání vznikají. Dále je dodáván technologický program WRYKRYIS pro přípravu výroby pálicích (řezacích) plánů. Stroj je určen do těžkého provozu a je zobrazen na obrázku 21.



Obrázek 21-CNC pálicí stroj Vanad Proxima a technické údaje

Tabulka 3-Technické údaje pálicího stroje Vanad Proxima

Motor	370 W – 0,6 Nm
Maximální pracovní rychlost	podle užití technologie
Max. rychlost	35,4 M/min
Přesnost polohování	0,25 mm
Opakovaná přesnost	0,15 mm
Přesnost úhlopříčky	0,5 mm na 3 m
Max. zrychlení	1,4 m/sec <sup>2</sup>
Počet suportů	1 autogenní jednotka, 1 plazmová jednotka
Rychlost zvedání hořáků	8m/min (plazma)
Kapacita volné paměti pro pálicí plány	cca 2 GB
Přesnost nastavení zapalovací výšky plazmy	0,1 mm

## 10.4 Použitý materiál pro experiment [20]

Jako materiál pro experiment byl použit plech z oceli S235JR o tloušťce 10 mm zobrazen na obrázku 22. Jde o konstrukční ocel obvyklé jakosti. Používá se pro svařované, šroubované a nýtované konstrukce pro stavbu budov, jeřábů, mostů apod. Dále se používá na méně namáhané strojní díly a nosné konstrukce strojů. U této oceli je používáno jen normalizační žíhání, které slouží k dodání oceli homogenní a jemnou zrnou strukturu, pro

další tepelné zpracování není určena. V tabulce 4 a 5 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli a její chemické složení.

Tabulka 4-Chemické složení oceli S235

S 235	C	Mn	Si	P	S	N
Zastoupení v [%]	0,17	1,4	-	0,045	0,045	0,009

Tabulka 5-Mechanické vlastnosti oceli S235JR

Minimální mez kluzu ReH MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤80	>80≤100	>100≤150	>150≤200	>200≤250
235	225	2115	215	215	195	185	175
Pevnost v tahu Rm MPa a pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
≥3≤100		>100≤150			>150≤250		
360-510		350-500			340-490		
Minimální tažnost v % ( $L_0=5.65 \sqrt{S_0}$ ) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
>3≤40	>40≤63	>63≤100	>100≤150	>150≤250			
26	25	24	22	21			



Obrázek 22-Plech z oceli S235JR a tloušťce 10 mm

## 10.5 Nastavení parametrů řezání

Pro obě metody bylo použito doporučené nastavení od výrobce. Výměna komponentů v hořáku byla provedena manuálně operátorem stroje.

### 10.5.1 Nastavení pro metodu Contour Cut

Pro metodu Contour Cut byla použita sestava nastavení 90A- 0-O<sub>2</sub>-Air MI90CC 4-15 mm. Jako plazmový plyn byl použit kyslík (O<sub>2</sub>) a vířivý plyn byl použit kyslík (O<sub>2</sub>) se vzduchem (Air) viz. tabulka 6. V tabulce 7 je zobrazeno nastavení a sestava hořáku (z hlediska spotřebních dílů).

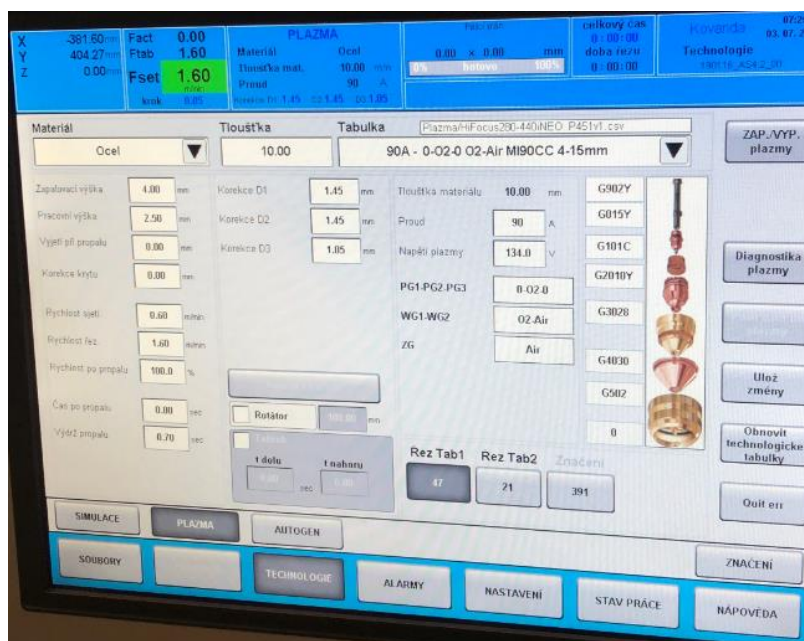
Tabulka 6-Nastavení zdroje

Řezací proud (A)	Řezací napětí (V)	Tloušťka (mm)	Plazmový plyn 1 (dílky stupnice)	Plazmový plyn 2 (dílky stupnice)	Plazmový plyn 3 (dílky stupnice)	Vířivý plyn 1 (dílky stupnice)	Vířivý plyn 2 (dílky stupnice)	Řezací tlak (bar)	Rychlost řezání (m/min)
90	134	10	0	99	0	40	40	8	1,6

Tabulka 7 - Nastavení a sestava hořáku

Zapalovací výška (mm)	Výška propalu (mm)	Doba propalu (s)	Řezací výška (mm)	Chladicí trubka	Katoda	Vedení plynu	Tryska	Krytka trysky	Krytka vířivého plynu	Ochranná krytka
4	4	0,7	2,5	G9O2Y	G015Y	G101C	G2010Y	G3028	G4030	G502

Na obrázku 23 je zobrazeno, jak vypadá nastavení zdroje a hořáku na ovládacím panelu stroje.



Obrázek 23-Nastavení zdroje na ovládacím panelu

### 10.5.2 Nastavení pro metodu Silent Cut

Pro metodu Silent Cut byla použita sestava 90A- 0-O<sub>2</sub>-Air MI90SC 4-15 mm. Jako plazmový plyn byl použit kyslík (O<sub>2</sub>) a vířivý plyn byl použit vzduch (Air) viz. tabulka 8. V tabulce 9 je zobrazeno nastavení a sestava hořáku.

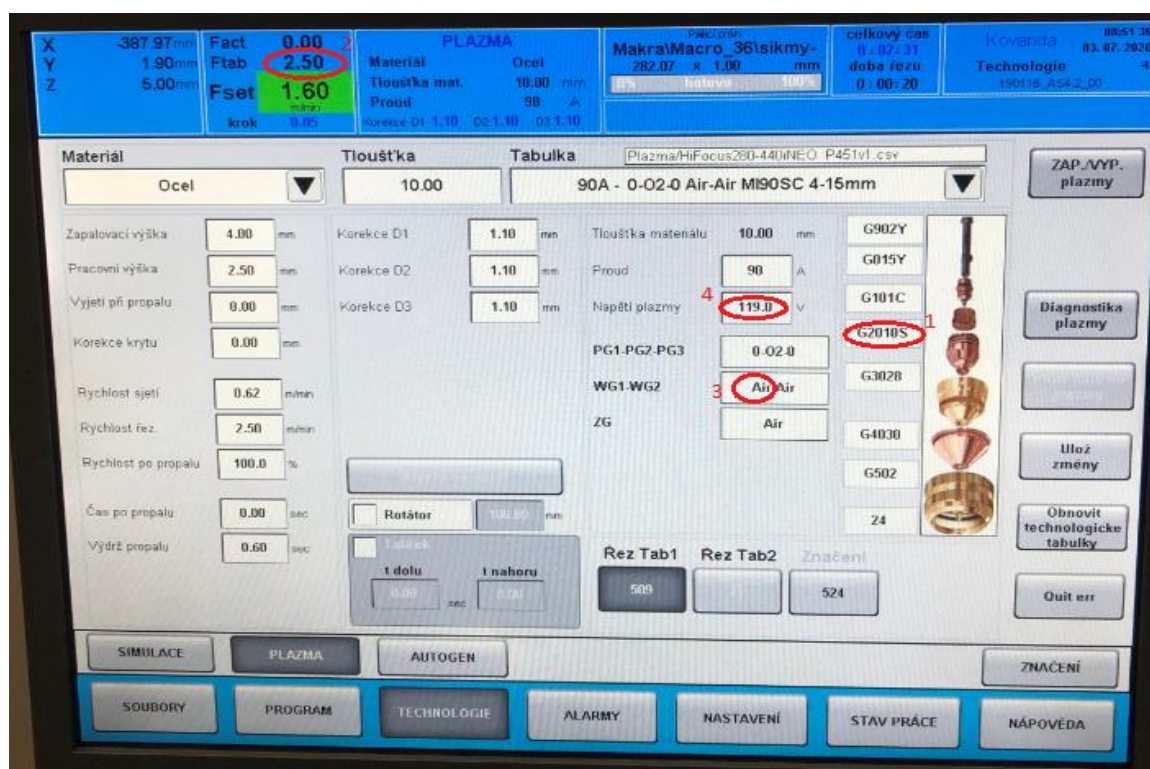
Tabulka 8 - Nastavení zdroje

Řezací proud (A)	Řezací napětí (V)	Tloušťka (mm)	Plazmový plyn 1 (dílký stupnice)	Plazmový plyn 2 (dílký stupnice)	Plazmový plyn 3 (dílký stupnice)	Vířivý plyn 1 (dílký stupnice)	Vířivý plyn 2 (dílký stupnice)	Řezací tlak (bar)	Rychlost řezání (m/min)
90	119	10	0	99	0	50	50	8	2,6

Tabulka 9 - Nastavení a sestavení hořáku

Zapalovací výška (mm)	Výška propalu (mm)	Doba propalu (s)	Řezací výška (mm)	Chladicí trubka	Katoda	Vedení plynu	Tryska	Krytka trysky	Krytka vířivého plynu	Ochranná krytka
4	4	0,7	2,5	G9O2Y	G015Y	G101C	G2010S	G3028	G4030	G502

Na obrázku 24 je zobrazeno, jak vypadá a jaké jsou změny v nastavení zdroje a hořáku na ovládacím panelu stroje u metody Silent cut. Prvním a nejzásadnějším rozdílem je změna trysky hořáku (viz ovál 1). Tato tryska má nepatrně jiný tvar a díky tomu má nižší hluk při řezání (viz obrázek 25). Dále se změnila rychlost řezání z 1,60 na 2,50 m/min (viz ovál 2). Další změna nastává u vířivých plynů. První vířivý plyn je změněn ze vzduchu (air) na kyslík (O<sub>2</sub>) (viz ovál 3), druhý vířivý plyn zůstává stejný. Poslední změna nastává ve velikosti napětí, kdy u metody Contour cut je 134 V a u metody Silent cut 119 V (viz ovál 4).



Obrázek 24-Nastavení zdroje na ovládacím panelu



Obrázek 25-Na levé straně tryska pro metodu Contour cut a na pravé straně pro metodu Silent cut

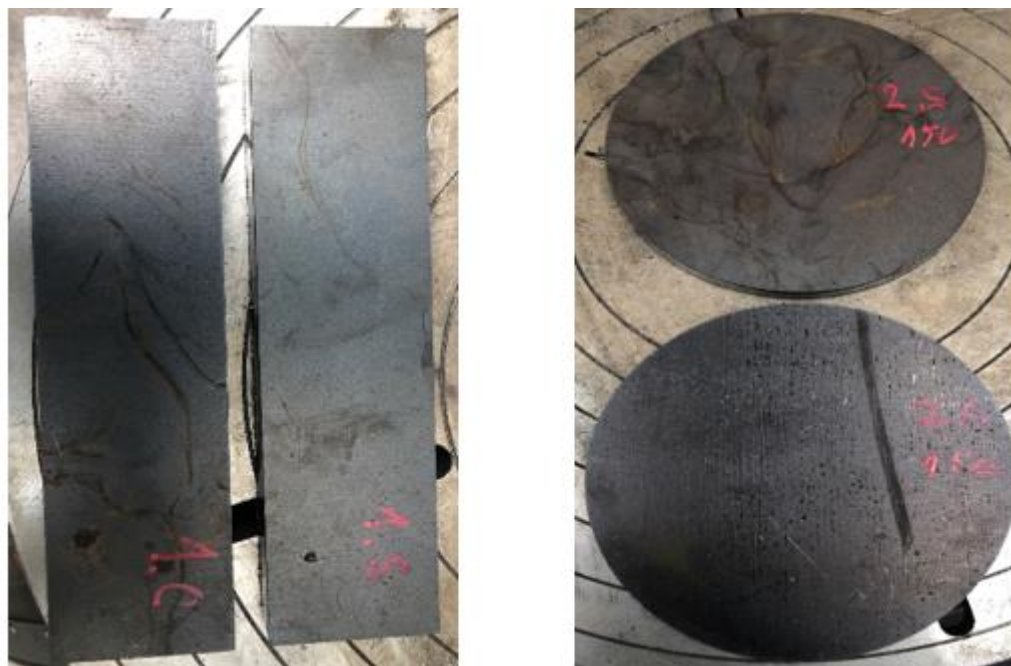
## 10.6 Postup a kontrola vzorků

Vzorky byli zkoušeny a vyhodnocovány podle normy ČSN EN 1090-2 (provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí-Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce) [22]. Podle této normy lze stanovit:

- Úchylku kolmosti a úhlu řezné plochy
- Průměrnou drsnost povrchu řezné plochy
- Tvrdost povrchu řezné plochy

Požadavek normy ČSN EN 1090-2 na tvar vzorku s ohlede na kontrolu tepelného dělení, stanoví speciální typ vzorku, obsahující tvar přímého rovinného řezu, řezu s ostrým rohovým úhlem a se zakřivením obloukem. Vzhledem k nedostatku času a zjednodušení experimentu byly zkušební kusy navrženy pro účely této bakalářské práce, tak aby měly tvar přímého rovinného řezu, šikmého rovinného řezu a přímého řezu zakřiveného oblouku.

Ke každé metodě (Contour cut, Silent cut) byli nařezány tři vzorky. Pro přímý řez (vzorky označené 1.CC, 1.SC) byla velikost vzorků 200 x 50 mm. Tloušťka vzorku byla 10 mm (viz obrázek 26 vlevo). Druhý typ vzorků (označené 2.CC, 2.SC) byli typu rovinného řezu zakřiveným obloukem (tzn. kruhového průřezu o velikosti 150 mm a tloušťce 10 mm (viz obrázek 26 vpravo).



Obrázek 26-Výsledné vzorky řezu přímého 1.CC, 1.SC a 2.CC, 2.SC

Posledním zkušebními vzorky (s označením 3.CC, 3.SC), byli řezy šikmé (řezané pod úhlem 30°). Velikost byla stejná jako u vzorků s přímým řezem, tedy 200 x 50 mm. Tloušťka byla taktéž 10 mm (viz obrázek 27).



Obrázek 27-Výsledné vzorky šikmého řezu 3.CC, 3.SC



## 10.7 Měření drsnosti řezu

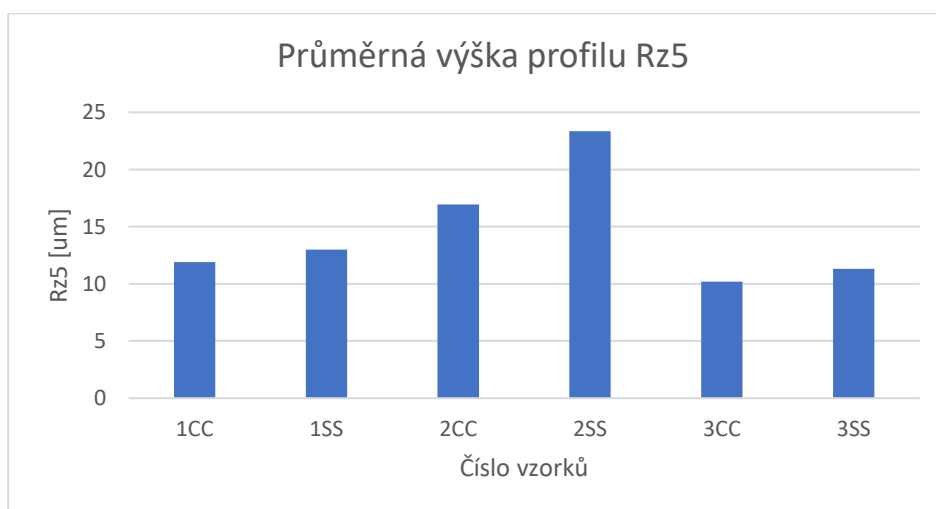
Výška prvků profilů  $Rz_5$  se musí stanovit podle normy ČSN EN ISO 9013 (Tepelné dělení-Klasifikace tepelných řezů-Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu) [23]. Měření probíhalo na přenosném drsnoměru Mitutoyo SJ 301 zobrazeném na obrázku 28. Měření bylo realizováno u každého vzorku pětkrát na různých místech řezné plochy.



Obrázek 28-Drsnoměr Mitutoyo SJ 301

### 10.7.1 Vyhodnocení měření výšky prvků profilů $Rz_5$

Průměrné výška prvků profilů  $Rz_5$  na vzorcích (1.CC, 1.SC, 2.CC, 2.SC, 3CC, 3.SC) jsou zaznamenány v grafu na obrázku 29 (číselné hodnoty jsou uvedené v tabulce č. 10)



Obrázek 29-Průměrná výška profilu  $Rz_5$

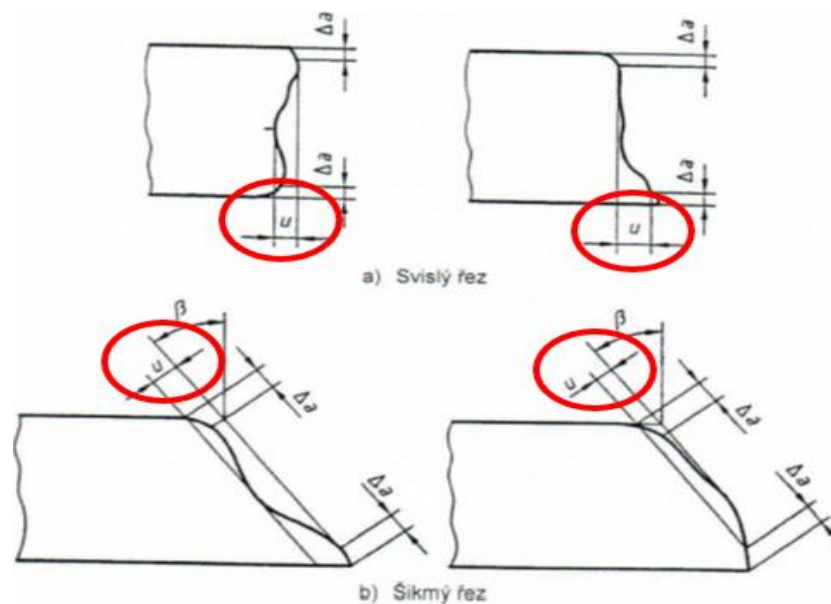
Všechny naměřené vzorky se nacházejí v tolerančním poli 1 (podle normy ČSN EN ISO 9013), kromě vzorku 2.SC. Ten se nachází v tolerančním poli 2 a je nejhorším výsledkem. Jedná se o řez metodou Silent Cut kruhového řezu. Naopak nejlepší výsledek byl dosažen u vzorku 3.CC což je technologie Contour Cut u řezu šikmého.

Tabulka 10 - Vyhodnocení měření výšky prvků profilů Rz5

Vzorek	1.CC	1.SS	2.CC	2.SS	3.CC	3.SS
Rz5 [um]	11,9	12	16,92	23,36	10,2	11,3
Toleranční pole	1	1	1	2	1	1

## 10.8 Měření úchylky kolmosti a úhlů „u“

Úchylka kolmosti a úchylka úhlů se stanovuje podle ČSN EN ISO 9013 stejně jako u měření drsnosti Rz5. Ke změření kolmosti museli být hrany řezů zbaveny otřepů a ze vzorků byl vytvořen metalografický výbrus. Na obrázku 30 je vidět, jak se určuje odchylka kolmosti.



Obrázek 30-Definice oblasti měření úchylky kolmosti a úhlové úchylky

Metalografický výbrus byl vyroben nařezáním vzorků na menší rozměry pomocí přesné kotoučové pily Struers labotom-3. Při řezání byl materiál intenzivně chlazen, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorku (viz obrázek 31).



*Obrázek 31-Kotoučová pila Struers labotom-3*

Tyto vzorky byly dále lisovány za tepla do konečného tvaru v zařízení Struers CitoPress-1 (viz obrázek 32).



*Obrázek 32-Zařízení Struers CitoPress-1*

Metalografické vzorky byly dále broušeny a leštěny na stroji Buehler beta s automatickou hlavou Vector (zobrazen na obrázku 33). K broušení byl nejdříve použit brusný papír o hrubostí 180, 1200 a 2000. Dalším krokem bylo leštění na leštícím plátnu MD DAC. Dále se leštilo se suspenzí poloidního křemíku s plátnem MD NAP. Naposled bylo provedeno leptání Natilem.



Obrázek 33-Leštící stroj Buehler beta s automatickou hlavou

### 10.8.1 Vyhodnocení měření úchylky kolmosti a úhlů „u“

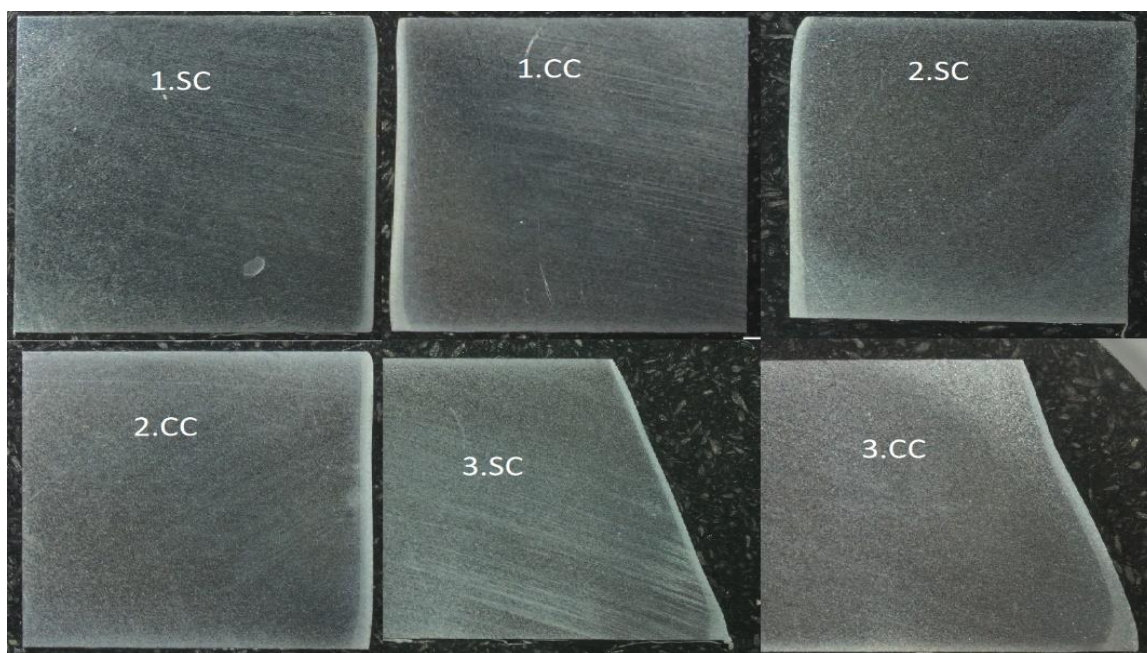
Vyhodnocování bylo provedeno vyfocení metalografického výbrusu na mikroskopu a následně byla graficky odečtena a dopočítána úchylka kolmosti „u“, kdy byla porovnána s tabulkou tolerančního pole (viz tabulka 11). Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 12. Všechny vzorky vyšli v tolerančním poli 2, ale technologie Silent Cut má menší úchylky kolmosti.

Tabulka 11-Toleranční pole úchylky kolmosti nebo úchylky "u"

Toleranční pole	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka u [mm]
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$

Tabulka 12-Vyhodnocení měření úchylky kolmosti a úhlů „u“

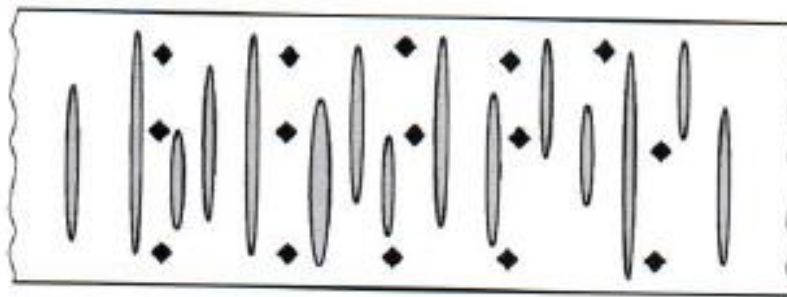
Vzorek	1.CC	1.SS	2.CC	2.SS	3.CC	3.SS
u [mm]	0,242	0,16	0,232	0,155	0,346	0,15
Toleranční pole	2	2	2	2	2	2



Obrázek 34-Metalografické vzorky

## 10.9 Měření tvrdosti

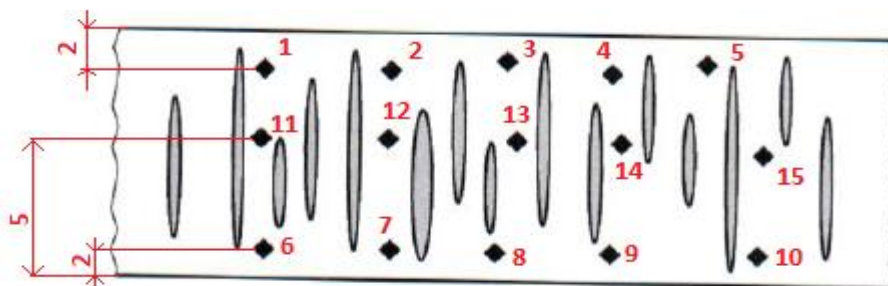
Zkouška (mikro) tvrdosti na ovlivněných řezných plochách byla provedena v souladu ČSN EN ISO 6509-1 (Koroze kovů a slitin-Stanovení odolnosti slitin měď-zinek proti odzinkování - Část 1: Metoda zkoušení) [24]. Měření bylo realizováno na tvrdoměru Buehler IndentaMet 1100. Byla použita metoda tvrdosti podle Vickerse se zatížením HV1. Doba vtisku čtyřbokého jehlanu byla 10 s. Měřilo se v blízkosti horního a spodního okraje, jakož i ve středu plechu (viz obrázek 35) – tzn. v souladu s požadavky normy ČSN EN 1090-2. Jak už bylo výše uvedeno, tak měření bylo realizováno jen u vzorků č. 1, kde byl svislý přímý řez.



Obrázek 35-Místa měření na povrchu

### 10.9.1 Vyhodnocení měření tvrdosti

Měření proběhlo na vzorkách o tloušťce 10 mm, jak už je výše napsáno. Postup měření byl od horního okraje řezu ke spodnímu okraji. Posléze se měřil střed řezu tedy 5 mm od obou okrajů (viz obrázek 36). U obou metod byl postup měření stejný. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č.13.

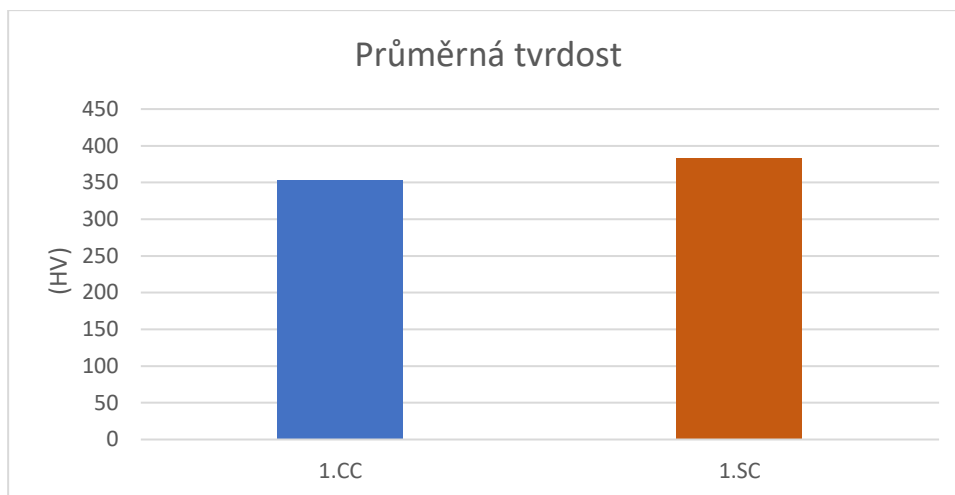


Obrázek 36-Postup měření tvrdosti

Tabulka 13-Výsledky měření tvrdosti

Číslo měření	Způsob 1.CC [HV1]	Způsob 1.SC [HV1]	Průměrné hodnoty 1.CC	Průměrné hodnoty 1.CC
1	368,4	382,3	374,22	394,02
2	387,5	399,9		
3	368,4	377,4		
4	369,4	391,2		
5	377,4	419,3		
6	318,1	385,6	317	388,06
7	318,5	386,1		
8	305,6	393,5		
9	295,3	383,9		
10	347,5	391,2		
11	384,5	386,1	368,72	369,08
12	363,2	383,9		
13	351,8	348,5		
14	375,2	372		
15	368,9	350,4		

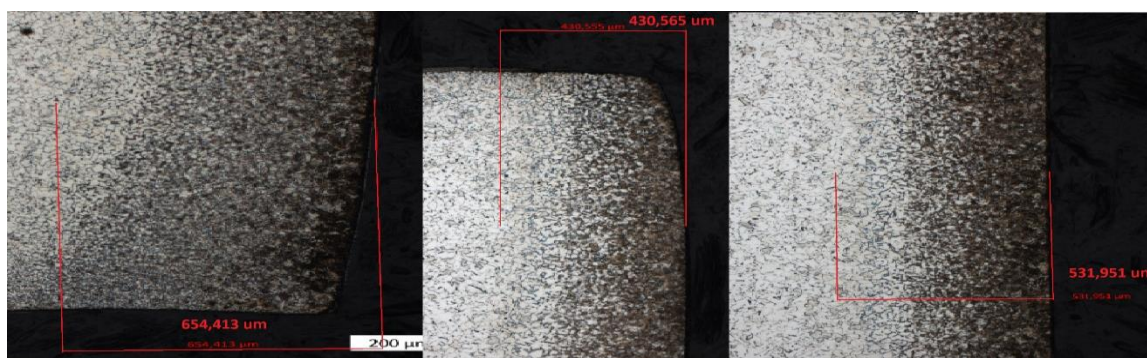
Z grafu (viz obrázek 37) a tabulky 13 je zřejmé, že větší tvrdost řezných ploch je po tepelném dělení metodou Silent Cut. Rozdíl mezi technologiemi je 31,11 HV. U obou metod, ale došlo ke zpevnění povrchu v místě řezu, kdy před řezáním byla tvrdost 250 HV1. U metody Contour Cut o 103,3 HV a u metody Silent Cut o 134,4 HV1, což je ovlivněno rozdílnou rychlostí řezání.



Obrázek 37-Graf průměrné tvrdosti

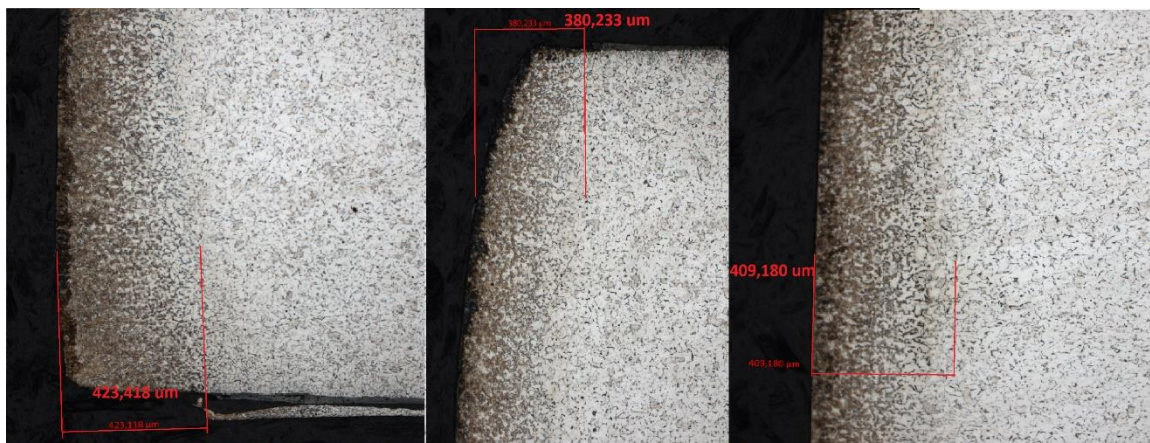
## 10.10 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněná oblast (tzv. TOO) se vytváří v nejbližším okolí řezu. TOO je změna struktury materiálu, která je ovlivněna množstvím vneseného tepla. Na snímcích metalografických výbrusů vzorků je vidět okotovaná TOO a její rozsah. Vždy byla měřena spodní hrana (na obrázcích vlevo), horní hrana (na obrázcích uprostřed) a střední část výbrusů (na obrázcích vpravo).



Obrázek 38-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 1.CC

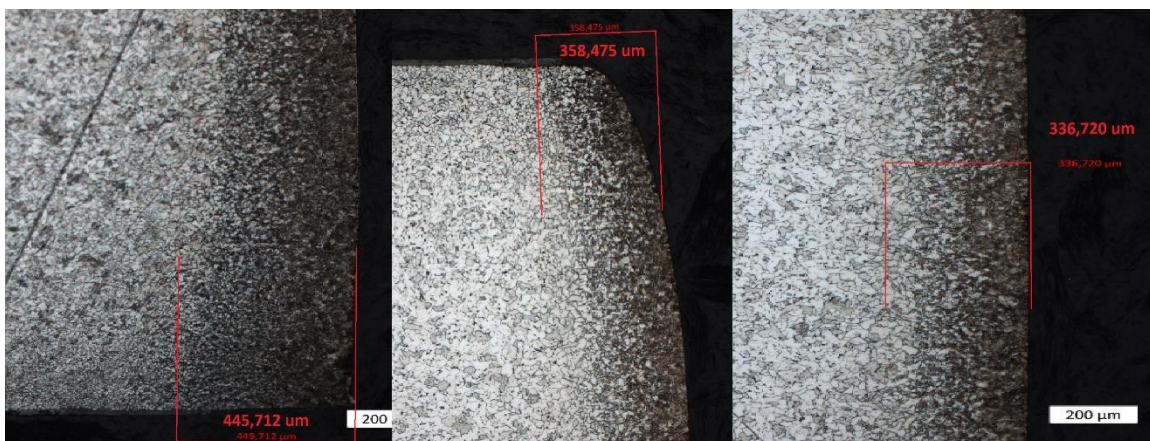




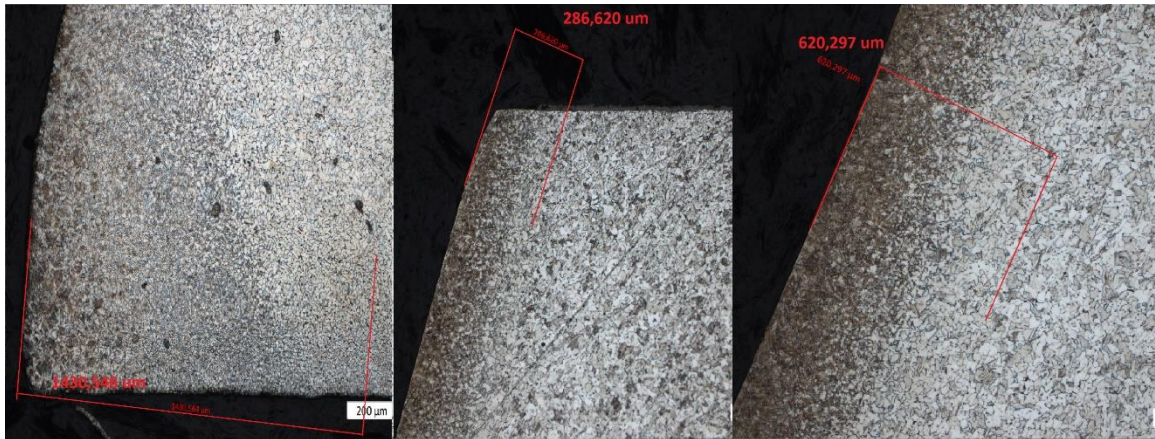
Obrázek 39-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 1.SC



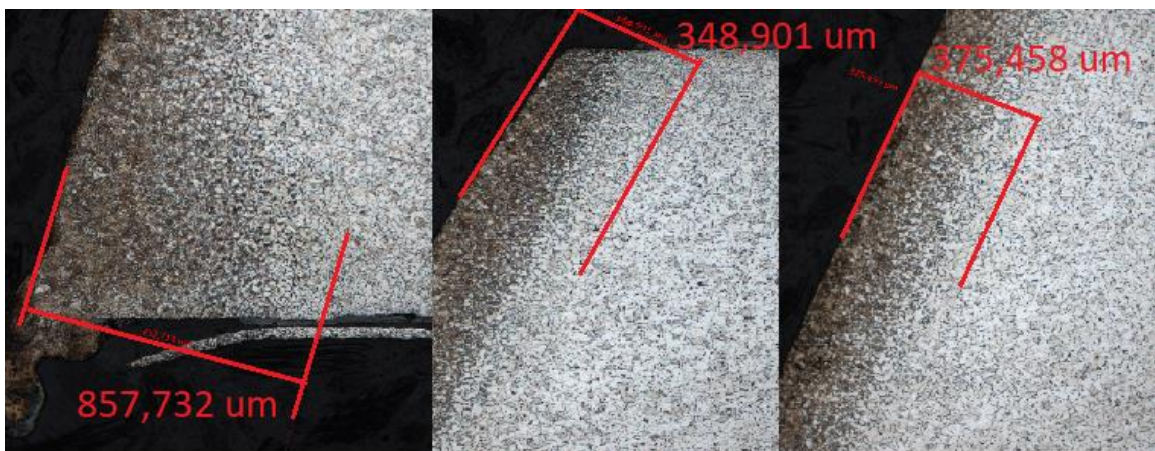
Obrázek 40-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 2.CC



Obrázek 41-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 2.SC



Obrázek 42-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3.CC



Obrázek 43-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3.SC

Na výše uvedených snímcích a v tabulce 14 je vidět, že TOO je vždy větší u metody Contour cut, což je způsobeno nižší řeznou rychlostí, kdy u metody Silent cut byla použita rychlost 2,5 m/min a u metody Countour cut byla použita rychlost 1,6 m/min.

Tabulka 14-Průměrná tepelně ovlivněná oblast

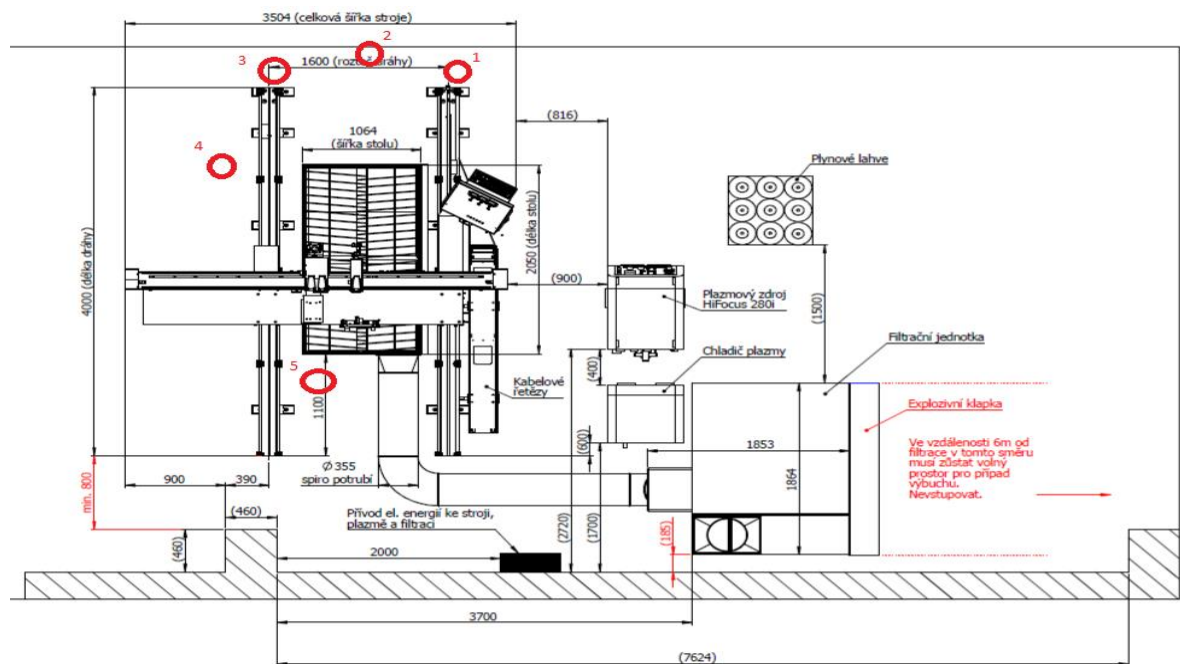
Vzorky	1.CC	1.SC	2.CC	2.SC	3.CC	3.SC
TOO [mm]	0,538	0,404	0,564	0,38	0,779	0,527

## 10.11 Měření hluku

Měření hluku probíhalo v laboratoři Ústavu strojírenské technologie FS, ČVUT v Praze, za pomoci pracovníků z Ústavu techniky životního prostředí. Bylo použito 5 mikrofonů rozmístěných okolo CNC stroje. Všechny zvukoměry byli umístěny 2 m daleko a 1,5 m vysoko od hořáku stroje (viz obrázek 44).

Frekvence zvuku, které působí na člověka, lidský sluch vnímá s rozdílnou citlivostí. Z tohoto důvodu je nutné lineárně měřený akustický signál frekvenčně upravit tak, aby jeho frekvenční charakter odpovídal tomu, jak je člověkem vnímán. K tomuto účelu jsou zvukoměry vybaveny tzv. váhovým filtrem.

Pro měření hluku byl použity hodnoty korigované váhovým filtrem A (tj. to co slyší lidské ucho) a hodnoty nekorigované. Váhový filtr A je nejvíce používaným filtrem k měření akustických signálů.



Obrázek 44-Schématické rozmístění mikrofonů na pracovišti

### 10.11.1 Výsledky měření hluku

Z výsledků, které jsou zobrazeny v tabulce 15 je zřejmé, že celkově na pracovišti od zapálení oblouku vyšla lépe technologie Silent Cut o 2-6 dB pro hodnoty korigované váhovým filtrem A. A pro nekorigované hodnoty o 2-4 dB tiší než u metody Contour Cut. Největší hluk byl u vzorku 3. CC. U vzorku 2.SC je hlasitost nejmenší.

Tabulka 15-Průměrně naměřené hodnoty na pracovišti ze všech 5 mikrofonů

<b>Průměrný hluk na pracovišti ve vzdálenosti 2 m</b>		
<b>STAV</b>	<b>Nekorigované průměrné hodnoty (<math>L_P</math>) [dB]</b>	<b>Korigované průměrné hodnoty (<math>L_{PA}</math>) [dB]</b>
1.CC (1.6 m/min)	91,8	88,7
1.SC (2.5 m/min)	87,9	82,8
2.CC (1.6 m/min)	91,8	88,7
2.SC (2.5 m/min)	87,8	82,7
3.CC (1.6 m/min)	92,4	89,3
3.SC (2.5 m/min)	88,5	83,3
Pozadí_ stroj + odsávání	79,2	71,8
Pozadí_ stroj	73,5	69,6
Pozadí vše vypnuté	59,0	57,4

Dále byl změřen hluk vytvořený pouze vlastním řezacím procesem. Hluk byl měřen až od 0,1 s po zapálení oblouku (viz tabulka 16).

Tabulka 16-Průměrně naměřené hodnoty po zapálení oblouku ze všech 5 mikrofonů

<b>Hluk pouze od trysky ve vzdálenosti 2 m (po korekci hluku od odsávání a volnoběhu stroje)</b>							
<b>Mikrofon</b>	<b>1 [dB]</b>	<b>2 [dB]</b>	<b>3 [dB]</b>	<b>4 [dB]</b>	<b>5 [dB]</b>	<b>Nekorigované průměrné hodnoty (L<sub>P</sub>) [dB]</b>	<b>Korigované průměrné hodnoty (L<sub>PA</sub>) [dB]</b>
<b>1.CC (1.6 m/min)</b>	89,8	90,2	91,2	93,7	88,9	91,3	88,6
<b>1.SC (2.5 m/min)</b>	87,7	85,8	86,5	91,4	84,3	87,3	82,5
<b>2.CC (1.6 m/min)</b>	92,5	91,2	92,1	92,8	92,5	91,6	88,6
<b>2.SC (2.5 m/min)</b>	88,7	86,9	77,7	88,2	87,0	87,1	82,4
<b>3.CC (1.6 m/min)</b>	92,6	90,1	91,3	94,2	90,9	92,2	89,2
<b>3.SC (2.5 m/min)</b>	88,4	86,2	87,4	92,1	84,3	88,0	83,0

Vyhodnocování měření bylo provedeno pouze za ustálených řezných podmínek. Vlastní řezací proces vyšel lépe u metody Silent cut a to v rozmezí mezi 4-4,5 Db pro nekorigované hodnoty. Pro korigované hodnoty s váhovým filtrem A, bylo rozmezí hluku o 6,1-6,2 Db nižší u metody Silent cut než u metody Contour cut. U samotných metody vyšel vždy nejhůře šikmý řez (3.CC, 3.SC). Mezi vzorky s přímým řezem (1.CC, 2.SC) a rovinného řezu zakřiveného oblouku ( 2.CC, 2.SC) byl maximální rozdíl 0,3 Db. Zajímavé je, že u hodnot s korigovaným váhovým filtrem A vzorek 1.CC a 2.CC vyšly hodnoty totožné a to 88,6 Db. V praxi je tvořen největší hluk při zapalování oblouku, propalování materiálu a změně směru řezu.

## 11 Závěr

V úvodu práce byly nejprve popsány metody tepelného dělení, historie a fyzikální princip plazmatu. Dále se bakalářská práce zabývala plazmovými plyny a hořáky, které se při řezání plazmatem používají. Následně byli popsány metody plazmového řezání.

Experimentální část práce vycházela z porovnání dvou metod plazmového řezání. První metodou byla Contour Cut, která se používá pro řezání malých děr o průměru rovné tloušťce materiálu 1:1. Druhou metodou byla Silent Cut, jež se využívá ke snížení akustického tlaku při řezání. Pro potřebu porovnání obou metod byla experimentální část rozvržena do pěti částí. Každá část se zabývala jinou problematikou testování kvality plazmového řezání.

První část experimentu se zabývala měřením drsnosti  $R_{Z5}$ . Měření bylo stanoveno podle předpisů normy ČSN EN ISO 9013. Všechny vzorky vyšli v tolerančním poli 1 kromě vzorku 2. SC, ten vyšel v tolerančním poli 2. Dle normy ČSN EN 1090-2+A1 bylo docíleno provedení třídy EXC1 u obou metod. Technologie Silent Cut měla větší drsnost povrchu u všech vzorků než u metody Contour Cut.

V druhé části experimentu byla zjišťována úchylnost kolmosti „u“, která se rovněž jako v první části stanovuje podle předpisu normy ČSN EN ISO 9013. Všechny vzorky vyšli v tolerančním poli 2 a podle předpisu normy ČSN EN 1090-2 bylo taktéž docíleno provedení EXC1 u obou metod. Na základě srovnání tří vzorků vyšlo, že technologie Silent Cut je v průměru o 0,118 mm přesnější.

Třetí část experimentu byla věnována porovnání změn tvrdosti řezných ploch. Toto měření se provádí podle normy ČSN EN ISO 6509-1. Při porovnání vzorků vyšlo, že rozdíl mezi nimi je 31,11 HV. Technologie Silent Cut měla v průměru tvrdost 384,42 HV a Contour Cut tvrdost 353,31 HV. Je tedy zřejmé, že po řezání metodou Silent Cut je tvrdost povrchu řezných ploch větší, což je ovlivněno rozdílnou rychlostí řezání. Na základě normy ČSN EN 1090-2 by tvrdost nemusela být pro tento typ konstrukční oceli S235JR měřena, ale měření bylo provedeno kvůli porovnání vlivu na mechanické vlastnosti řezných hran.

Čtvrtá část se zabývala tepelně ovlivněnou oblastí řezu, kdy u metody Contour Cut vyšla v průměru o 0,19 mm větší tepelně ovlivněná oblast. Ze třetí a čtvrté části tedy vyplývá, že čím větší řezná rychlost tím menší je TOO. Dále čím větší je TOO tím menší je tvrdost řezaného povrchu.

V poslední části experimentu bylo provedeno měření hluku. Největší vyprodukovaný hluk byl u metody Contour cut a to u vzorku šikmého řezu o hodnotě 92,2

Db. Technologie Silent cut měla vzorek šikmého řezu hodnotu 88 Db. Rozdíl byl u vzorků mezi technologiemi od 4 do 4,5 Db. Z tohoto vyplývá že technologie Silent cut je tižší

Na základě výsledku experimentu bylo zjištěno, že technologie Silent cut vykazuje lepší výsledky v kolmosti řezu, tvrdosti řezných ploch, tepelně ovlivněné oblasti a hlučnosti. Nevýhodou metody Silent cut je však drsnost povrchu, která byla oproti metodě Contour cut výrazně horší. Na základě tohoto experimentu je prokázáno snížení hlučnosti při řezání metodou Silent cut a zachování (resp. zlepšení) určitých charakteristik řezu, kdy řez je vyhovující a podmínky příznivější.

## Použité literární zdroje

[1] MINAŘÍK, V. Tepelné dělení materiálu. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 50 s., ISBN 80-01-01028-7.

[2] Kolařík, L.: Prezentace svařování plamenem, ČVUT – FS – Ústav strojírenské technologie, Praha, 2010 URL: [u12133.fsid.cvut.cz](http://u12133.fsid.cvut.cz)

[3] ČSN EN ISO 4063, Svařování a příbuzné procesy – přehled metod a jejich číslování, Praha: Český normalizační institut, 2010

[4] Plasma cutting history, staženo dne 30.1.2020, dostupné na webu: <http://www.messer-coupage.fr/informations/plasma/hypertherm/Docs%20Plasma%20Hypertherm%20etc/Plasma%20cutting%20history.htm>

[5] DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II. CERM, s.r.o. Brno, 2004. 238 s. ISBN 80- 214-2683-7.

[6] KOLAŘÍK L., Technologie svařování – Elektrický oblouk, Staženo dne 31.1.2020, dostupné na [https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod\\_resource/content/1/5\\_oblouk\\_tsv\\_2016.pdf](https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod_resource/content/1/5_oblouk_tsv_2016.pdf)

[7] Excitace a ionizace, staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm#InterakceAlfaBeta>

[8] Plazmový a elektrický oblouk, staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou\\_29259.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou_29259.html)

[9] Olson L. D., ASM Handbook, Vol. 6 Welding, Brazing, and Soldering, ASM International, 1993, ISBN: 978-0-87170-382-8



- [10] Nekonvenční metody obrábění, staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
- [11] Vlastnosti a čistoty plynů, staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: <http://www.kjellberg.de/Cutting-Equipment/Plasma/Plasma-cutting/Used-gases/Gas-properties.html>
- [12] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3–2. díl. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005, 221 s. ISBN 80-718-3336-3.
- [13] HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., Delenie kovových materiálů okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [14] HyPerformance Plasma HPR260XD Auto Gas: Návod k používání,, staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: <http://www.hypertherm.com>
- [15] SADÍLEK, M., Nekonvenční metody obrábění II. VŠB-TU, 2016. ISBN 978-80–248-3944-8
- [16] Cutting processes – plasma arc cutting – process and equipment staženo dne 7.6.2020, dostupné na webu: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasmaarc-cutting-process-and-equipment-considerations-051/>
- [17] Technický týdeník-obrábění plazmou, staženo dne 7.6.2020, dostupné na webu: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou\\_29259.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-plazmou_29259.html)
- [18] Řezání plazmou, staženo dne 7.6.2020, dostupné na webu: <https://www.hypertherm.com/learn/spark-the-blog/what-does-a-good-plasma-cut-look-like/>
- [19] Plazmový zdroj HiFocus 280i neo, staženo dne 25.7.2020, dostupné na webu: <https://www.kjellberg.de/en/catalog/hifocus-280i-neo.html>
- [20] Chemické a mechanické vlastnosti, staženo dne 25.7.2020, dostupné na webu: [http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy\\_list\\_1.0038.pdf](http://www.bogner.cz/files/files/Materialovy_list_1.0038.pdf)

[21] Technologie Silent cut a Contour cut, staženo dne 30.6.2020, dostupné na webu: <https://www.kjellberg.de/en/processes-cutting.html>

[22] ČSN EN 1090-2: Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí–Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce. *Kontrola maximálního dovoleného poměru šířky k tloušťce:  $h_0 \leq t$* , 2012, 100.0: 75.

[23] ČSN EN ISO 9013 (05 3401). *Tepelné dělení–Klasifikace tepelných řezů–Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu, říjen, 2003.*

[24] ČSN EN ISO 6509-1 (038167). *Koroze kovů a slitin - Stanovení odolnosti slitin měď-zinek proti odzinkování - Část 1: Metoda zkoušení*

### **Použité zdroje k obrázkům**

[1] Kolařík, L.: Prezentace svařování plamenem, ČVUT – FS – Ústav strojírenské technologie, Praha, 2010 URL: [u12133.fsid.cvut.cz](http://u12133.fsid.cvut.cz)

[2] obrázek příkladu řezání laserem, staženo dne 28.1.2020, dostupné na webu: <https://cs.radiopachone.org/jak-se-lisi-rezani-laserem-od-plazmy-1228>

[3] obrázek příkladu řezání laserem, staženo dne 28.1.2020, dostupné na webu: <https://hbt-weld.cz/app/uploads/2019/02/Plazmov%C3%A9-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD.jpg>

[4] KOLAŘÍK L., Technologie svařování – Elektrický oblouk, Staženo dne 31.1.2020, dostupné na webu: [https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod\\_resource/content/1/5\\_oblouk\\_tsv\\_2\\_016.pdf](https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod_resource/content/1/5_oblouk_tsv_2_016.pdf)

[5] HyPerformance Plasma HPR260XD Auto Gas: Návod k používání, , staženo dne 3.2.2020, dostupné na webu: <http://www.hypertherm.com>

[6] Roubíček, M.: Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení, Airliquide, 2008

[7] Cutting processes – plasma arc cutting - process and equipment staženo dne 7.6.2020, dostupné na webu: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasmaarc-cutting-process-and-equipment-considerations-051/>

[8]Technologi Contour cut Kjellberg staženo dne 30.6.2020, dostupné na webu: <https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut-speed.html>

## Seznam obrázků

Obrázek 1- Ukázka strojního a ručního řezání kyslíkem [1] .....	9
Obrázek 2-Ukázka řezání laserem [2] .....	10
Obrázek 3-Řezání plazmou [3].....	11
Obrázek 4-Schéma elektrický oblouku [4] .....	13
Obrázek 5-Termodynamický děj disociace [4].....	14
Obrázek 6-Termodynamický děj ionizace [4] .....	15
Obrázek 7-Termodynamický děj excitace [4] .....	15
Obrázek 8-a) hořák s plynovou stabilizací s transferovým obloukem, b) hořák s plynovou stabilizací s netransferovým obloukem, c) hořák s vodní stabilizací (1 - těleso hořáku, 2 - katoda, 3 - přívod plynu, 4 - chlazení hořáku, 5 - paprsek plazmatu, 6 - obrobek, 7 - přívod vody) .....	19
Obrázek 9-Měrka prohlubně elektrody [5] .....	21
Obrázek 10 - Vliv délky oblouku na úhel řezu [5] .....	22
Obrázek 11-Plazové řezání pod vodní hladinou [6] .....	23
Obrázek 12 - Vstříkávání vody [7].....	25
Obrázek 13 - Schéma duálního dělení plazmou [7].....	25
Obrázek 14 - Schéma dělení plazmou s vodním pláštěm [7].....	26
Obrázek 15 - Schéma dělení vzduchovou plazmou [7] .....	27
Obrázek 16 - Schéma dělení Hy-definition [7].....	28
Obrázek 17-Ukázka trajektorie řezání [8] .....	29
Obrázek 18- Porovnání hlučnosti metod Contour Cut a Silent Cut [8] .....	30
Obrázek 19-Proudový zdroj HiFocous 280i neo .....	32
Obrázek 20-Strojní hořák pro plazmové řezání PerCut 450.....	33
Obrázek 21-CNC pálicí stroj Vanad Proxima a technické údaje.....	34
Obrázek 22-Plech z oceli S235JR a tloušťce 10 mm.....	35
Obrázek 23-Nastavení zdroje na ovládacím panelu .....	37
Obrázek 24-Nastavení zdroje na ovládacím panelu .....	38
Obrázek 25-Na levé straně tryska pro metodu Contour cut a na pravé straně pro metodu Silent cut .....	39
Obrázek 26-Výsledné vzorky řezu přímého 1.CC, 1.SC a 2.CC,2.SC .....	40
Obrázek 27-Výsledné vzorky šikmého řezu 3.CC, 3.SC.....	40
Obrázek 28-Drsnoměr Mitutovo SJ 301 .....	41
Obrázek 29-Průměrná výška profilu Rz5 .....	41
Obrázek 30-Definice oblasti měření úchylky kolmosti a úhlové úchylky.....	42
Obrázek 31-Kotoučová pila Struers labotom-3 .....	43
Obrázek 32-Zařízení Struers CitoPress-1 .....	43
Obrázek 33-Leštící stroj Buehler beta s automatickou hlavou .....	44
Obrázek 34-Metalografické vzorky .....	45
Obrázek 35-Místa měření na povrchu .....	46
Obrázek 36-Postup měření tvrdosti .....	46
Obrázek 37-Graf průměrné tvrdosti.....	48
Obrázek 38-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 1.CC .....	48
Obrázek 39-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 1.SC .....	49
Obrázek 40-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 2.CC .....	49
Obrázek 41-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 2.SC .....	49
Obrázek 42-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3.CC.....	50
Obrázek 43-Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3.SC .....	50

Obrázek 44-Schématické rozmístění mikrofonů na pracovišti.....	51
--	----

## Seznam tabulek

Tabulka 1-Značení metod tepelného dělení.....	11
Tabulka 2-Technické údaje plazmového zdroje HiFocus 28i neo.....	32
Tabulka 3-Technické údaje pálicího stroje Vanad Proxima.....	34
Tabulka 4-Chemické složení oceli S235.....	35
Tabulka 5-Mechanické vlastnosti oceli S235JR.....	35
Tabulka 6-Nastavení zdroje.....	36
Tabulka 7 - Nastavení a sestava hořáku.....	36
Tabulka 8 - Nastavení zdroje.....	37
Tabulka 9 - Nastavení a sestavení hořáku.....	38
Tabulka 10 - Vyhodnocení měření výšky prvků profilů $R_{Z5}$ .....	42
Tabulka 11-Toleranční pole úchylky kolmosti nebo úchylky "u".....	44
Tabulka 12-Vyhodnocení měření úchylky kolmosti a úhlů „u“.....	45
Tabulka 13-Výsledky měření tvrdosti.....	47
Tabulka 14-Průměrná tepelně ovlivněná oblast.....	50
Tabulka 15-Průměrně naměřené hodnoty na pracovišti ze všech 5 mikrofonů.....	52
Tabulka 16-Průměrně naměřené hodnoty po zapálení oblouku ze všech 5 mikrofonů.....	53