

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2024**



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání

Bakalářská práce

Autor: Petr Kala

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

Studijní program: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2024**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kala** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **502357**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající 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:

**Vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of cutting parameters on the quality of cutting edges after plasma cutting**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza současného stavu problematiky plazmového řezání
- 2) Popis moderních způsobů řezání používaných firmou Kjellberg a hlavních procesních parametrů
- 3) Návrh experimentu – výběr vhodných materiálů a tloušťek, vytvoření řezů mapujících vliv parametrů
- 4) Vyhodnocení vytvořených zkušebních vzorků z hlediska ovlivnění geometrie, struktury a mechanických vlastností - porovnání pro vybrané materiály a tloušťky
- 5) Závěrečné zhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Rakhimyanov, A., Loktionov, A., Gaar, N. Technological possibilities of high-precision plasma cutting in processing materials of different class. MATEC Web of Conferences 224, ICMTMTE, 2018
- [2] Nedić, B., Janković, M., Radovanović, M., Globočki Lakić, G. Quality of plasma cutting. SERBIATRIB '13, 13th International Conference on Tribology, 2013
- [3] Nemchinsky, V. A., Severance, W. S. What we know and what we do not know about plasma arc cutting. J. Phys. D: Appl. Phys. 39 (2006) R423–R438

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: **16.10.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

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

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

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## **Prohlášení**

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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: .....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji Docentu Kolaříkovi za ochotu, čas a cenné rady, které my poskytl při psaní této práce. Dále děkuji Ing. Panáčkovy a dalším zaměstnancům ústavu Strojírenské technologie za pomoc při realizaci praktické části mé práce.

## Anotace

Předmětem bakalářské práce je vyhodnocení dopadu procesních parametrů a dalších nastavení a podmínek při řezání plazmou na kvalitu řezu. Hlavní téma je výroba malých otvorů o průměru odpovídajícím tloušťce materiálu. Ověření bylo realizováno na různých materiálech, včetně zjištění ideálních parametrů, kdy mají otvory nejlepší kvalitu.

V teoretické části práce jsou popsány technologie tepelného dělení materiálu, jako je řezání kyslíkem, řezání laserem a řezání plazmou, a jejich porovnání. Detailněji je popsána teorie řezání plazmou, výrobci plazmových zařízení, problematika při řezání plazmou, hodnocení kvality řezu dle normy ČSN EN ISO 9013 a aplikace a nastavení plazmových zařízení.

Praktická část se zabývá výrobou malých otvorů s různým nastavením parametrů řezu na třech vybraných ocelových materiálech (S235JR, Hardox 450 a S960QL) a následné zhodnocení kvality řezu dle normy ČSN EN ISO 9013. Na vzorcích je hodnocena drsnost povrchu, velikost tepelně ovlivněné oblasti, kruhovitost a úchylka kolmosti řezu. Výsledkem je ideální nastavení parametrů pro výrobu malých děr na různých materiálech.

**Název diplomové práce:** Vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání

**Autor práce:** Petr Kala

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, IWE

**Konzultant:** Ing. Tomáš Panáček

**Akademický rok:** 2023/2024

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie

**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, IWE

**Rozsah práce:** 39 stránek, 22 tabulek, 30 obrázků

**Klíčová slova:** Plazmové řezání, Plazmové zařízení, kontrola kvality řezu, Contour Cut, dělení materiálu, tepelné dělení

## Annotation

The subject of this bachelor thesis is the evaluation of the impact of adjustable parameters in plasma cutting on the quality of the cut. The main topic is the production of small diameter holes on different materials, and finding the ideal parameters when the holes have the best quality. In this paper, thermal cutting technologies of material such as oxygen cutting, laser cutting and plasma cutting are described and compared. The theory of plasma cutting, manufacturers of plasma equipment, issues in plasma cutting, evaluation of cut quality according to EN ISO 9013 and applications and settings of plasma equipment are described in detail. The practical part deals with the production of small holes with different settings of cutting parameters on three steel materials and the subsequent evaluation of cutting quality according to ČSN EN ISO 9013. Surface roughness, heat affected zone, circularity and deviation of perpendicularity of the cut are evaluated on the samples. The result is an ideal parameter setting for the production of small holes on various materials.

<b>Title of the final thesis:</b>	Influence of cutting parameters on the quality of cutting edges after plasma cutting
<b>Author:</b>	Petr Kala
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, IWE
<b>Consultant:</b>	Ing. Tomáš Panáček
<b>Academic year:</b>	2023/2024
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, IWE
<b>Extent:</b>	39 pages, 22 tables, 30 pictures
<b>Keywords:</b>	Plasma cutting, Plasma cutting unit, quality control of cutting, Contour Cut, thermal cutting, material cutting

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Tepelné dělení Materiálu .....	2
2.1	Řezání kyslíkem.....	3
2.2	Řezání Laserem.....	6
2.3	Řezání vodním paprskem.....	8
2.4	Porovnání jednotlivých metod tepelného dělení.....	9
2.5	Hodnocení kvality řezu dle normy ČSN EN ISO 9013 .....	10
2.5.1	Drsnost povrchu:.....	10
2.5.2	Úchylka kolmosti a úchylka úhlu .....	11
2.5.3	Natavení horního okraje řezu.....	12
3	Řezání plazmou .....	13
3.1	Problematika řezání plazmou.....	14
3.1.1	Tvorba Strusky.....	14
3.1.2	Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu:.....	15
3.1.3	Řezání malých otvorů .....	16
3.2	Kvalita plazmového řezání .....	16
3.3	Výrobci plazmových řezacích zařízení.....	17
3.4	Aplikace a nastavení zařízení - hlavní pracovní režimy .....	18
3.5	Bezpečnost práce při řezání plazmou .....	20
4	Experimentální část bakalářské práce .....	21
4.1	Popis experimentálního pracoviště .....	21
4.1.1	Zařízení HiFocus 280i neo.....	21
4.1.2	Vanad Proxima.....	22
4.2	Použité materiály na experiment.....	23
4.3	Výroba testovacího vzorku pro určení procesních parametrů .....	25
4.4	Výroba vzorků pro vyhodnocování kvality řezu malých otvorů .....	26
4.4.1	Měření drsnosti řezné hrany .....	28
4.4.2	Měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u otvorů .....	29
4.5	Výroba vzorků pro metalografickou analýzu .....	31
4.5.1	Měření drsnosti řezných hran na vzorcích pro metalografickou analýzu .....	32
4.5.2	Metalografická analýza.....	33
4.5.3	Měření tepelně ovlivněné oblasti.....	35



4.5.4	Měření úchylky kolmosti .....	36
5	Závěr .....	38
5.1	Shrnutí výsledků .....	38
6	Seznam použitých literárních zdrojů .....	40
	Seznam zkratk .....	A
	Seznam obrázků .....	B
	Seznam tabulek .....	B

# 1 Úvod

V dnešní době je v průmyslu kladen stále větší důraz na kvalitu a efektivitu výroby. Pokud se staré metody nevyvinou a nezlepší, bývají nahrazeny novými a efektivnějšími. Proces dělení je ve zpracovatelském průmyslu jednou z prvních fází výroby určité součásti nebo výrobku. Proces řezání zahrnuje použití různých metod. Volba techniky závisí na druhu řezaného materiálu, jakož i na velikosti, tvaru a požadované úrovni přesnosti opracovávané součásti. Příkladem klasických rezných technik je řezání pilou a v oblasti tepelného dělení, řezání kyslíkem. Řezání pilou je mechanické řezání obrobku pomocí kotoučových a pásových pil. Tato metoda se používá pro malé úseky a přesnější rezné operace, ale je to velmi pomalá výrobní metoda. Naproti tomu řezání kyslíkem je základní proces tepelného dělení pomocí řezání plamenem, který se používá při hrubé práci. V závislosti na aplikaci je tato metoda často upřednostňovaným procesem, protože je mnohem rychlejší než mechanické řezání. Řezání kyslíkem je také velmi mobilní a má nízké náklady na vybavení. Při řezání vzniká exotermickou reakcí mezi kyslíkem a železem tepelná energie. Vlivem tepla plamene se však na řezaných hranách vytváří povrchová vrstva, známá jako tepelně ovlivněná oblast.

Mezi další techniky, které se používají při tepelném řezání, patří laserové a plasmové řezání.

Laser je zařízení, které vyzařuje světlo prostřednictvím mechanismu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Tento světelný paprsek má dostatečnou energii k provedení řezu. Laserové řezání se používá na dělení elektricky vodivých i nevodivých materiálů malých tloušťek (maximálně do 40 mm). Výhodou této metody je značná rychlost a univerzálnost vzhledem k množství materiálů, na které lze použít. Další výhodou je velká přesnost, kvalita rezné hrany a malá tepelně ovlivněná oblast.

Hlavním cílem bakalářské práce bude posouzení kvality řezu u vybraných ocelových materiálů, jak při standardním rovinném řezu, tak i při řezání otvorů malých průměrů, které bývají z hlediska kvality velmi problematické. Řezání plazmovým obloukem využívá elektrický výboj a proudící ionizovaný plyn. Čtvrtý stav hmoty, plazma, se řadí do kategorie ionizovaného plynu. Od padesátých let 20. století se vyvíjí technologie řezání plazmovým obloukem. K vytvoření plazmového oblouku, který je stabilizován prouděním plynu, se používá speciálně upravený hořák s unikátně tvarovanou tryskou. Konstrukce hořáku vychází ze svařovacího hořáku určeného pro svařování metodou TIG. Plazmový plyn je zahříván průchodem přes elektrický oblouk který hoří mezi elektrodou a řezaným materiálem. Plyn, který se používá, se nazývá plazmový plyn nebo plazmové médium. Většinou se používá vzduch, kyslík, dusík, argon, vodík nebo jejich směsi.

Při řezání plazmou je důležité správné nastavení rezných parametrů. Ideální parametry se pro každý řezaný materiál a jeho tloušťku mohou lišit. Velice obtížná je i výroba malých otvorů a přesných kontur, jelikož při špatném nastavení rezných parametrů dochází k rychlému zhoršení kvality rezné hrany. Pro plazmové řezání je typický vznik úchylny kolmosti a vroubkování ve tvaru S, které je způsobeno tažením elektrického oblouku. Norma ČSN EN ISO 9013 [1] specifikuje techniky měření a hodnocení kvality řezu a s její pomocí budou určeny ideální parametry plazmového řezání pro různé materiály. [2; 3]

## 2 Tepelné dělení Materiálu

Dělení materiálů je v lidské historii jednou z nejstarších výrobních operací. V blízké minulosti se používaly především takzvané konvenční metody. Ty fungují na principu silového odebrání třísky z materiálu (třískové) nebo jeho lámání či stříhání (beztrískové). Tyto metody jsou však omezeny svou uplatnitelností, jelikož je možné provádět pouze přímě řezy a supertvrdé materiály s horší obrobiteľností nelze těmito metodami dělit vůbec nebo jen s velkým opotřebením řezných nebo střížných nástrojů. Jejich další nevýhodou je nízká efektivita a malá univerzálnost. Mezi výhody konvenčních metod patří nízká cena jejich pořízení, snadná obsluha a ve většině případů i malá či žádná tepelně ovlivněná oblast. Základní rozdělení konvenčních metod dělení materiálu je uvedeno na obrázku 1.



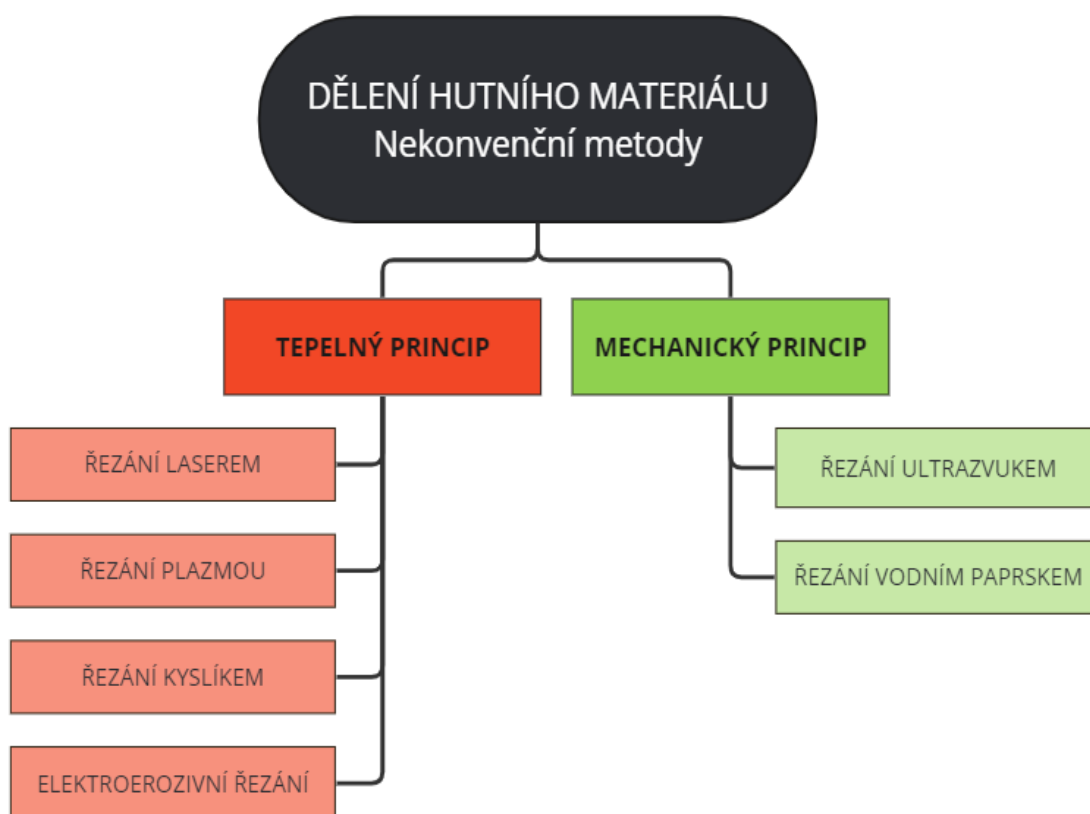
Obrázek 1 Rozdělení konvenčních metod Dělení materiálu

V průmyslové praxi se nejčastěji používá dělení plošných polotovarů jako jsou desky a plechy nebo řezání kulatých profilů. Vzhledem k velkému zastoupení těchto operací v průmyslu rostou: nároky na kvalitu, snižování nákladů, zvýšení produktivity a přesnosti. Nevýhody konvenčních metod a výše zmíněné nároky vedly k vývoji nekonvenčních metod dělení materiálů.

Nekonvenční metody jsou založeny na principu využití fyzikálních, chemických a mechanických dějů k odstranění materiálu z místa řezu. U těchto metod je typické, že nástroj, ať už je to elektroda, tryska nebo drát, není při řezání v kontaktu s materiálem. Namísto toho vytváří energii, která podporuje erozi nebo spalování materiálu v úzké oblasti a tím vzniká řez. Výhodou nekonvenčních metod je možnost plné automatizace, velká flexibilita a možnost vyrábět tvarově složité díly. Rychlost řezání většinou nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu a lze tak dělit materiály s velkou tvrdostí a pevností. Největší nevýhody jsou vznik tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a náročnost

procesu. Tepelně ovlivněná oblast je oblast okolo místa řezu, kde se mění kvůli vnesenému teplu struktura materiálu, tím pádem i tvrdost a další mechanické vlastnosti. TOO musíme mít na paměti při navrhování dalších operací, které má materiál podstoupit např. úprava svarových ploch před svařováním nebo při jeho následném použití. Proto se dnes často používá ještě další metoda dělení, kde TOO nevzniká - tzv. řezání vodním paprskem, které lze aplikovat nejen na kovové materiály, ale například i na kámen, mramor apod.

Jelikož se u nekonvenčních metod pracuje s velkými teplotami, hořlavými a toxickými plyny a jinými zdraví ohrožujícími vlivy, tak podléhají řadě předpisů a norem. Personál musí být certifikován na jejich obsluhu, dále jsou vysoké nároky na ochranné pomůcky a zařízení a tím se celý proces zavedení a provozu těchto metod stává nákladný. Dle ČSN EN ISO 4063 [4] se plazmové řezání značí číslem 83, řezání kyslíkem číslem 81 a řezání laserem se značí číslem 84. [5; 6]



Obrázek 2 Rozdělení nekonvenčních metod řezání

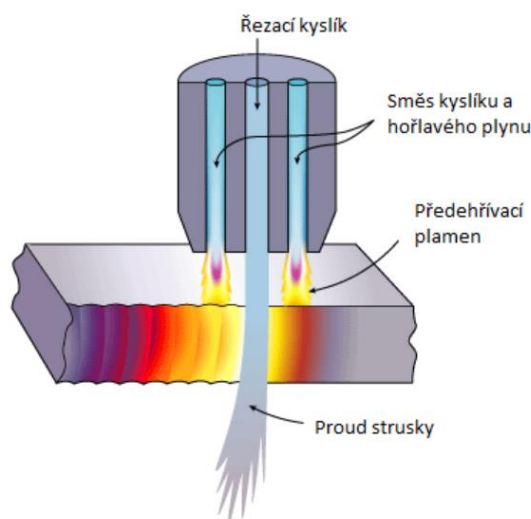
Následující kapitoly se budou věnovat podrobnějšímu popisu nekonvenčních metod tepelného dělení, do kterých spadá i řezání plazmou, což je hlavní předmět zájmu a experimentální metoda použitá v bakalářské práci.

## 2.1 Řezání kyslíkem

Tepelné řezání pomocí kyslíku je proces, který používá k dělení materiálu (ocelových materiálů do max. obsahu 1,6 hmot. % uhlíku) čistý kyslík a plynné palivo (směs vybraného hořlavého plynu s kyslíkem). Kyslíko-palivový hořák zvýší teplotu povrchu

řezaného materiálu (na tzv. zápalnou teplotu řezaného materiálu) a následně je přiveden úzký vysokotlaký proud čistého kyslíku. Ocel začne prudce oxidovat, přičemž se vyvíjí velké množství tepla, ve kterém se materiál (v místě styku s kyslíkem) začne intenzivně spalovat. Další fází řezání kyslíkem je vyfouknutí zplodin hoření z místa řezu, čímž je vytvořena dutina (řezná spára). Teplo a proud kyslíku se pohybují konstantní rychlostí a vytvářejí řez. Chemická reakce, která nastává při řezání se někdy nazývá rychlá řízená oxidace. [5]

Dělený materiál se musí zahřát na výše zmíněnou zápalnou teplotu, která je u oceli závislá na množství uhlíku v materiálu a pohybuje se v rozmezí 1150 °C až 1350 °C, to se odvíjí od typu oceli resp. od jejího chemického složení. Používá se směs plynů například kyslík-acetylen, pak se přidá proud čistého kyslíku s obsahem min. 99,5% na předehřáté místo, který způsobí spalování materiálu. Spalováním vzniká teplo, které dále zahřívá kov do větší hloubky na zápalnou teplotu, a tak pokračuje hoření po celé tloušťce. Struska se vyfukuje proudem kyslíku na spodní straně. [7]



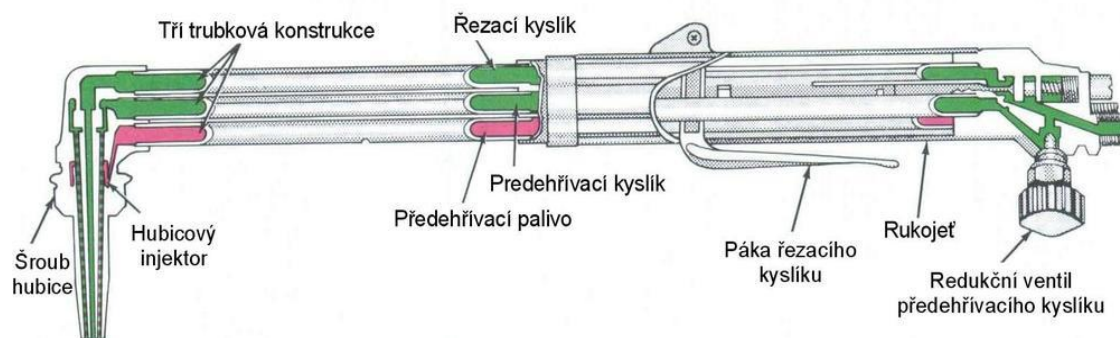
Obrázek 3 Princip řezání kyslíkem [8]

Předehřívací plamen kyslíkového hořáku zahřeje ocel na zápalnou teplotu. Uvnitř hořáku je hořlavý plyn smíšen s kyslíkem, čímž vznikne hořlavá směs. Tryska soustřeďuje hořlavou směs do řezného kužele pomocí otvorů uspořádaných do kruhu. Směs paliva s kyslíkem se vznítí těsně za špičkou trysky. Poměr paliva a kyslíku lze při procesu upravovat, aby byl vytvořen co nejmenší plamen s co nejvyšší teplotou. To umožňuje lepší kontrolu a soustředění plamene na malé ploše ocelového plechu (viz Obrázek 3).

Jakmile plech dosáhne zápalné teploty, je přiveden proud kyslíku, který začne řezat plech. Kyslík je přiváděn pomocí otvoru uprostřed trysky. Nárazem kyslíku na povrch předehřáté oceli začne rychlá oxidace. Ze zoxidované oceli se pak vytvoří roztavená struska, kterou proud odfoukne a umožní proříznout celou tloušťku materiálu.

Řezání kyslíkem je nákladově nejefektivnější proces řezání uhlíkové oceli. Lze jej také kombinovat s řezáním plazmou, laserem nebo vodním paprskem na stejném dílu.

Při procesu hrají roli i další faktory, třeba rychlost, tlak řezného kyslíku a jeho čistota, nastavení předehřevu a výška řezu. Každý z těchto faktorů ovlivňuje konečnou kvalitu řezné hrany. [5]



Obrázek 4 Konstrukce hořáku pro řezání kyslíkem [9]

### Řezaný Kov:

Řezání kyslíkem se široce uplatňuje v mnoha odvětvích průmyslu, ale přesto je používáno především na ocel, přesněji nelegovanou nebo nízkolegovanou ocel do 0,3 hmot.% uhlíku bez předehřátí a do 1,6 hmot.% uhlíku s předehřátím nebo žiháním. Kyslíkem lze řezat všechny tvary a velikosti do maximální tloušťky oceli 300 mm s konvenčními hořáky nebo až do 2000 mm se speciálními hořáky. Je důležité, aby materiál splnil takzvané podmínky řezatelnosti. Ty určují, že v praxi lze materiál úspěšně řezat. [7; 5]

Podmínky řezatelnosti jsou [10]:

1. Musí být vyvinuta dostatečná teplota, aby pokryla ztráty tepelnou vodivostí materiálu, zářením a ztráty ohříváním zplodin hoření.
2. Zápalná teplota kovu musí být nižší, nebo maximálně stejná jako jeho teplota tavení. Jinak by došlo pouze k lokálnímu natavení.
3. Oxidy materiálu musí mít nižší nebo stejnou zápalnou teplotu jako samotný materiál. V opačném případě se po oxidaci kovu buď začne tvořit ochranná vrstva, nebo se materiál roztaví a odteče dříve, než může dojít k řezání. S rostoucím obsahem uhlíku roste i zápalná teplota.
4. Zplodiny hoření (struska) musí být natolik tekuté, aby je proud kyslíku z řezné spáry vyfoukl. Těto podmínce nevyhovují hlavně korozivzdorné oceli, jejich struska ulpívá v řezné spáře.
5. Při řezání musí vznikat dostatečně vysoká teplota, ale odvod tepla do řezaného kovu musí být co nejpomalejší.

### Kyslík:

Kvalita řezu a rychlost řezání je ovlivněna čistotou zdroje kyslíku. Čistota by neměla být nižší než 99,5 %. Také konstrukce trysek hraje zásadní roli, chrání proud kyslíku proti zachycení nečistot a vzduchu, což by mohlo vést k tvoření vzduchových kapes v kovu.

**Používané hořlavé plyny:**

Nejběžněji se jako hořlavý plyn používá: propan, acetylen, propylen, a zemní plyn. V závislosti na teplotě plamene a rozložení tepla může typ plynu ovlivnit faktory, jako je kvalita řezné hrany, doba propalu a rychlost řezání.

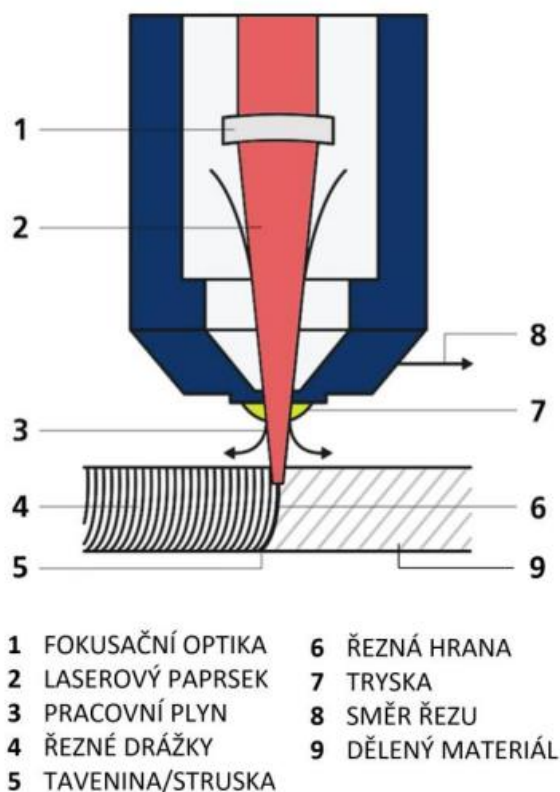
Acetylen: je z uvedených plynů nejběžnější, používá i při jiných aplikacích, nejvíce při svařování. Vzhledem k jeho náročné výrobě a skladování se ale často volí méně nebezpečné a levnější plyny jako např. propan. Acetylen vytváří nejvyšší teplotu plamene ze všech hořlavých plynů. To vede k rychlejšímu propalu (při začátku řezu v ploše). Vytváří také intenzivnější plamen, čímž snižuje velikost tepelně ovlivněné oblasti a míru deformace.

Propan: má nižší teplotu plamene než acetylen. Propal je proto pomalejší než u acetyleny; rychlost řezání je však přibližně stejná.

Zemní plyn: Zemní plyn má ve srovnání s ostatními plyny nejnižší teplotu plamene. V důsledku toho má nejpomalejší dobu pro propalování. [5]

## 2.2 Řezání Laserem

Jedním z nejrozšířenějších způsobů tepelného dělení materiálů je dnes řezání za pomoci laseru. Výhodou je široká škála materiálů, na které lze použít, např. titan, korozivzdorná ocel, slitiny neželezných kovů jako je hliník, nikl a měď, a dokonce i nekovové materiály jako dřevo, plasty, sklo, kompozity a keramika. První funkční laser byl předveden roku 1960, jeho vynálezce byl americký inženýr Theodore H. Maiman. Pro průmyslové použití nastal zlomový bod v roce 1967 kdy R. T. Houldcroft navrhl trysku pro laserové řezání, a tím výrazně vylepšil zaměření ohniska v ochranném plynu, směsi CO<sub>2</sub> a kyslíku.



Obrázek 5 Schéma principu řezání laserem [6]

Laserová technologie zaznamenala v poslední době velký vývoj, a v průmyslu se začala hojně využívat, hlavně díky jejím výhodám oproti ostatním technologiím tepelného dělení.

Hlavními výhodami je například vyšší přesnost řezání, menší tepelně ovlivněná oblast a tím vyšší kvalita řezné hrany, snadná obsluha a automatizace, flexibilita výroby ať se jedná o materiály, řezané tvary a profily. Další výhody jsou vysoké využití materiálu, kvůli malému prořezu a skoro nulovému opotřebení laserové hlavy. V současné době se řezání laserem používá pro dělení materiálů o tloušťce 0,5 až 40 mm.

Nevýhodou je omezená tloušťka, kterou je možné řezat a nutná čistota řezaného materiálu. Nesmí na něm být rez, olej, nálepky ani jiné nátěrové hmoty a nečistoty. Dalším problémem jsou lesklé materiály, které lépe odráží světlo a činí tak proces obtížnější, musí se například zvolit typ laseru s jinou vlnovou délkou.

Laserové řezání se rozděluje podle použitého mechanismu na tři skupiny. A to na řezání oxidační, tavné a sublimační. Nejčastěji se používají techniky založené na tavení, pálení a vyfukování. Jsou totiž účinné na řezání kovů, termoplastů, skla a keramiky. Fungují na principu lokalizovaného tavení obrobku fokusovaným paprskem s pomocí reaktivního nebo inertního plynu. Když je plyn reaktivní, tzn. reaguje s roztaveným materiálem, proces se označuje jako laserové reaktivní tavné řezání. Oba procesy, reaktivní nebo s použitím inertního plynu, se používají k řezání ocelových plechů, což je nejrozsáhlejší odvětví využití laseru. Současný výzkum se zabývá především zvýšením výkonu laserového zdroje. Tak vznikly jako alternativa ke klasickému plynovému CO<sub>2</sub> a pevnolátkovým Nd:YAG laserům, vysoce výkonné diskové a vláknové lasery (jako speciální varianty



pevnotlátkových laserů). S výkonem 1000 W dokáže vláknový laser řezat ocel do tloušťky 14 mm. Nevýhodou těchto silných zdrojů může být u větších tlouštěk materiálu nedokonalé nebo pomalé odebrání roztaveného materiálu. Tyto dva procesy musí být v rovnováze, protože nestačí jenom rychle tavit materiál, když ho pak nejsme schopni z řezu odstranit. Vznikají pak otřepy a je nutná sekundární dokončovací operace na jejich odstranění. Oba procesy, tavení i vyfukování se musí optimalizovat vůči sobě jinak může být operace neefektivní nebo ovlivnit kvalitu dílu.

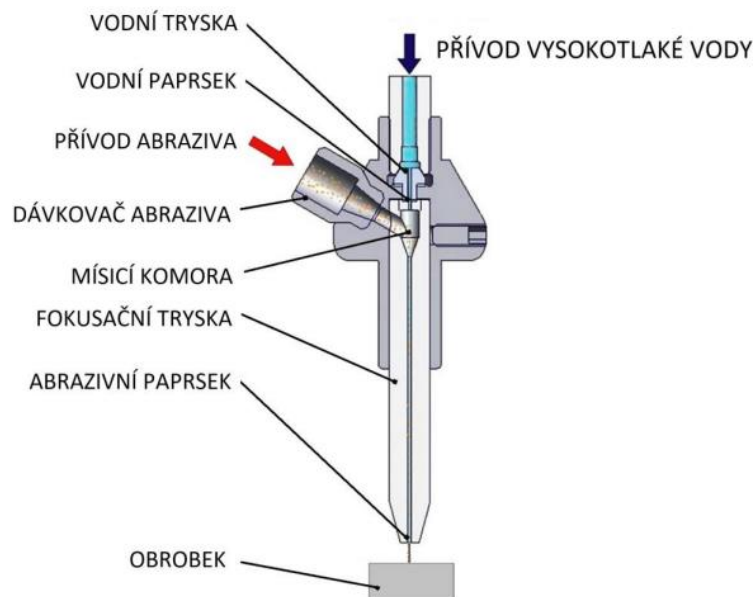
Laserové CNC řezání se používá v automobilovém průmyslu, při výrobě zápustek, forem a nástrojů, ve šperkařství, pro zdravotnické účely a nástroje, při výrobě keramiky a křemíku a v omezeném rozsahu při práci se dřevem. Základní typy laserů používaných při řezání jsou: Nd:YAG, CO<sub>2</sub>, diskové, vláknové a diodové lasery. [11; 12]

### Plazmové řezání

Mezi metody tepelného dělení patří i plazmové řezání, které je hlavním předmětem zájmu bakalářské práce a bude detailněji popsáno v kapitole 3. Řezání plazmou.

## 2.3 Řezání vodním paprskem

Další nekonvenční technologií řezání, i když není založena na tepelném principu řezání, je dělení materiálu vodním paprskem. Je to metoda spočívající v řezání materiálu pomocí tenkého vodního paprsku pod vysokým tlakem, buď s přidavkem abrazivní suspenze nebo bez, který se používá k řezání cílového materiálu pomocí eroze. Další možnost využití je čištění vodním paprskem. Technika s využitím vysokotlaké vody pro řezání materiálů byla poprvé patentována v roce 1968 v USA, ale rychlý vývoj metody řezání vodním paprskem začal až na počátku 80. let 20. století. Jedná se o nově vznikající technologii, která má mnoho výhod oproti ostatním nekonvenčním řezacím technikám.



Obrázek 6 Schéma principu řezání vodním paprskem [6]

Často se za účelem zlepšení výkonu procesu používá přísada v podobě abrazivních zrn granátu, která umožňuje řezání velmi kvalitních a tvrdých materiálů. Správný název této technologie je tak hydroabrazivní řezání (abrazivní vodní paprsek). Proces řezání lze stručně popsat následovně. Voda přiváděná čerpadlem pod tlakem se po průchodu přes sací trysku do směšovací komory smísí s abrazivem. Poté je směs vody a abraziva vedena do směšovací trysky, aby se paprsek vytvořil a stabilizoval (viz Obrázek 6). Výsledkem je proud hydroabraziva, který má dostatečnou sílu, aby prořízl i ty nejtvrdsí materiály. Vodní paprsek můžeme použít v mnoha oblastech moderního průmyslu, například v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, stavebnictví, technologie ochrany životního prostředí a průmyslové údržby. [13]

## 2.4 Porovnání jednotlivých metod tepelného dělení

V poslední době je v oblasti metod tepelného dělení největší konkurence mezi plazmou a laserem. Laser zaznamenal velký pokrok v krátkém čase, a tak se mluví o možnosti nahradit jím v některých oblastech řezání plazmou. Každý proces ale má své přednosti a technologické výhody, a proto si uživatel musí rozmyslet na co bude daný stroj používat a jestli neexistuje lepší varianta.

V kovo zpracujícím průmyslu se řeže široká škála různých materiálů a jejich tloušťek. Plazma je vhodná k řezání kovových materiálů, jako jsou uhlíkové, nízkolegované a vysokolegované (korozivzdorné) oceli včetně ocelí pozinkovaných, hliník a jeho slitiny, měď, mosaz a litina. Na rozdíl od laseru je plazmové řezání velmi flexibilní, pokud jde o kvalitu materiálu a stav plechů. Nevyžaduje se žádný speciální typ plechu nebo předúprava materiálu a obrobky mohou být mastné nebo zkorodované. Technologie HotWire dokonce umožňuje řezání nevodivých materiálů. I přes značné výhody jsou možnosti laseru omezené, protože existují vysoké požadavky na řezaný materiál. Existují faktory, které mají negativní vliv na kvalitu řezu, třeba rez, mastnota, barva a jiné nátěry, výškové změny nebo rýhy na povrchu. Horní a spodní strana řezaného materiálu musí být čistá, protože kvalita řezu do značné míry závisí na kvalitě plechu. Kritické je také řezání materiálů s vysoce reflexním povrchem jako je hliník, mosaz a měď, kde je velká odrazivost laserového paprsku. [14]

Laser se obvykle používá na materiály v rozmezí od 0,5 mm do 40 mm. Plazmové systémy jsou naopak vhodné pro řezání materiálů v tloušťkách od 5 mm do 180 mm. Pro tenké plechy se kvůli širšímu záběru a silnému oblouku spíše nepoužívají. [3]

Hlavní výhody při řezání kyslíkem oproti řezání plazmou jsou, že lze řezat větší tloušťky materiálu a nevzniká zešikmení rezné hrany. Oproti tomu při řezání plazmou dosahujeme mnohem vyšších rychlostí a menší tepelně ovlivněné oblasti a lepší přesnosti. U plazmového řezání je také těžší dosáhnout ideálního nastavení, v opačném případě začne vznikat na hraně řezu drážkování a zvětší se zešikmení. Obtížné je také řezání malých otvorů a oproti jiným metodám je plazmové řezání velmi hlučné.

Tabulka 1 porovnání metod plazmového, kyslíkového a laserového řezání [9]

Vlastnost	Plazmové řezání	Řezání kyslíkem	Řezání laserem
Tloušťka řezaného materiálu	Max 180 mm	Od 5 do 1000 mm	Do 40 mm
Řezané materiály	Elektricky vodivé materiály	Uhlíková a nízkolegovaná ocel	Elektricky vodivé i nevodivé
TOO	0,1 mm	1 mm	0,01 mm
Rychlost řezání	střední	nízká	vysoká
Přesnost	±1 mm	několik mm	desetiny mm

### Tepelná deformace

Řezání vodním paprskem má velkou výhodu, protože nedochází k tepelné deformaci materiálu ani k negativním vlivům tepelně ovlivněné oblasti. Odvod tepla z místa řezu je díky použití vody velmi rychlý a vzniklé teplo při řezání nijak neovlivňuje tvar obrobku, nicméně může vlivem působení vody dojít ke korozi. Největší tepelné deformace vznikají při řezání kyslíkem, stejně tak i největší TOO. U řezání plazmou může dojít k deformaci spíše při řezání materiálů menších tlouštěk..

### Kvalita povrchu

Kvalita povrchu při řezání laserem a vodním paprskem je na vysoké úrovni. Netvoří se otřepty, řez je čistý a díky tomu většinou není třeba následné dokončovací obrábění. Tímto se sníží náklady na výrobu, celkový čas výroby i potřeba více strojů. U plazmového řezání je kvalita povrchu horší ale při správném nastavení a řezání méně složitých tvarů také není třeba dokončovacích operací. Při volbě správné metody řezání je nejdůležitější vědět k čemu bude polotovár použit dál. Například řezání kyslíkem, kdy je kvalita povrchu nejhorší, bude pro následné použití dostatečné a není nutné volit přesnější ale dražší metodu řezání. [13]

## 2.5 Hodnocení kvality řezu dle normy ČSN EN ISO 9013

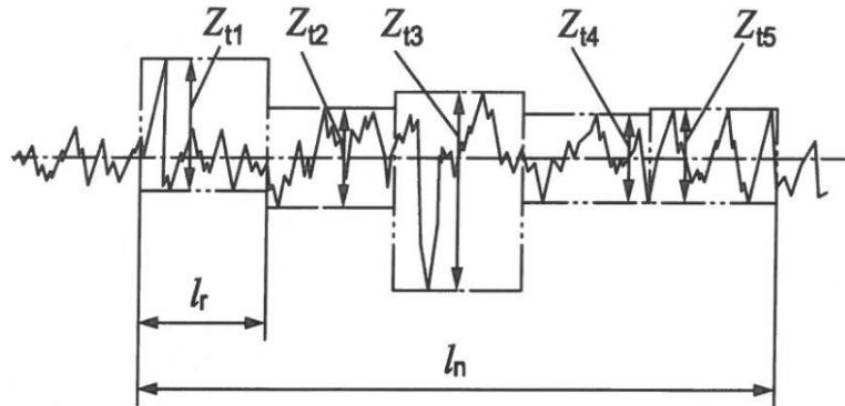
V následující kapitole budou popsány části normy ČSN EN ISO 9013 *Tepelné dělení- Klasifikace tepelných řezů- Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*, které byly použity pro hodnocení kvality řezu při plazmovém řezání v experimentální části bakalářské práce.

Norma ČSN EN ISO 9013 se zabývá hodnocením kvality řezu, geometrickými požadavky a úchytkami kvality na výrobek a metodou měření pro třídu tepelných řezů materiálů vhodných pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem. Hodnocení kvality řezu normou ČSN EN ISO 9013 pro plazmové řezání se posuzuje pro tloušťky řezu od 1 do 150 mm.

### 2.5.1 Drsnost povrchu:

Drsnost povrchu se měří pomocí speciálního zařízení (drsnoměr) s diamantovým hrotem, které je schopno odečíst velikosti největších výstupků a nejhlubších prohlubní na základní délce měřené na řezné hraně výrobku. Parametr  $R_{z5}$  značí průměrnou výšku prvků profilu a vypočítá se jako aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou

jdoucích základních délkách. Parametr  $Z_t$  značí jednotlivé výšky prvků a z pěti  $Z_t$  se vypočítá  $R_{z5}$  (viz Obrázek 7). [1]



#### Legenda

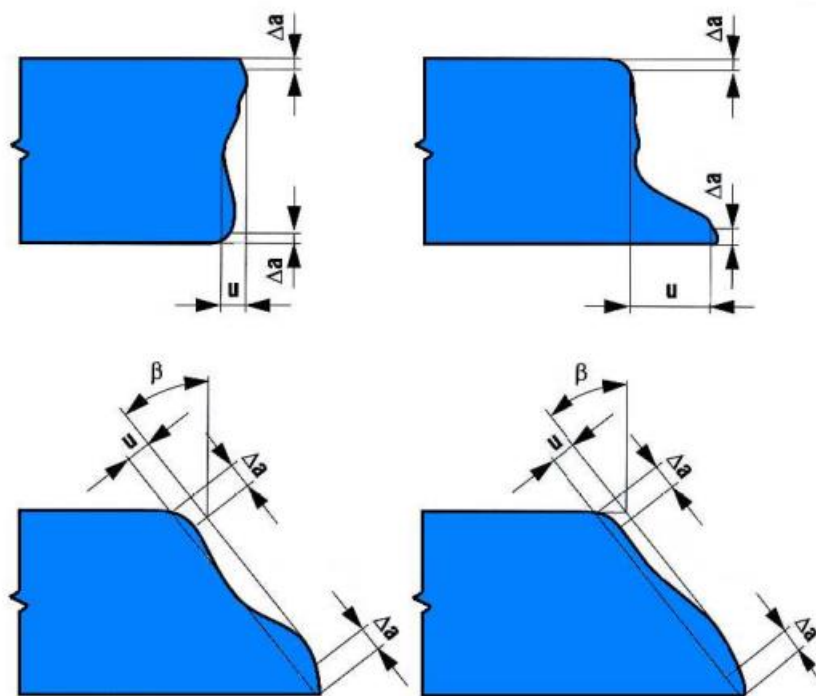
$Z_{t1}$ až $Z_{t5}$	charakterizuje jednotlivé prvky profilu
$l_n$	celková délka
$l_r$	základní délka ( $1/5$ z $l_n$ )

Obrázek 7 měření drsnosti povrchu řezu pomocí parametru  $R_{z5}$  [1]

Dalšími používanými parametry při měření drsnosti povrchu jsou  $R_a$  a  $R_q$ .  $R_a$  je střední aritmetická odchylka profilu od střední čáry a  $R_q$  je průměrná kvadratická úchylka profilu.

### 2.5.2 Úchylka kolmosti a úchylka úhlu

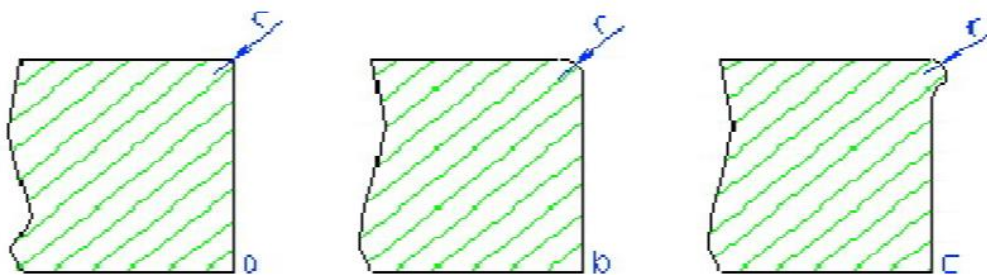
Úchylka kolmosti ( $\beta$ ) a úchylka úhlu „u“ je v normě definována jako vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (navazujícími na plochu řezu), do nichž je tvar řezu vepsán. Přímkami svírají s povrchem řezaného materiálu stanovený úhel (tj.  $90^\circ$  pro svislý řez). Parametr  $\Delta\alpha$  je velikost na horní a spodní hraně řezu, která se při měření nepoužívá. Hrany mohou být poškozeny samotným řezáním nebo následujícím zacházením a zkreslovali by měření – viz Obrázek 8.



Obrázek 8 Určování úchylky kolmosti a úchylky úhlu při plazmovém řezání [1]

### 2.5.3 Natavení horního okraje řezu

Plazmový oblouk může ovlivnit horní okraj řezu, kde se materiál taví vysokou teplotou a roztavená hmota je vyvržena proudem plazmy. Velikost zaoblení horní hrany může být ovlivněna vzdáleností mezi vrcholem trysky a řezaným materiálem nebo rychlostí řezání a řezným materiálem. Řez může mít hranu ostrou (a), hranu natavenou bez přesahu (b) nebo s přesahem (c). Poloměr  $r$  určuje stupeň deformace roztavené hrany. [1]

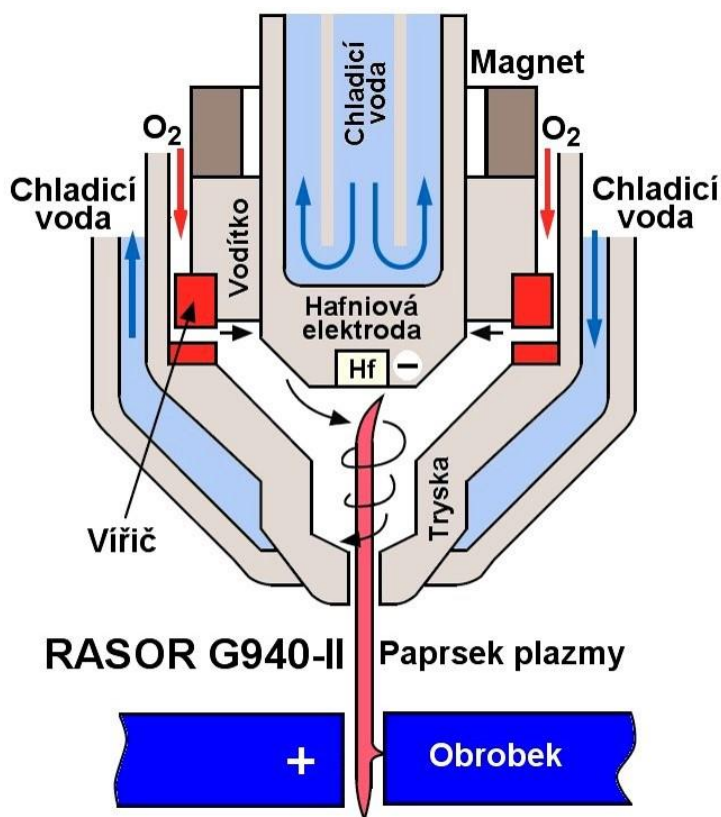


Obrázek 9 ilustrace třech možností natavení horní hrany řezaného materiálu [1]

### 3 Řezání plazmou

Plazmové obloukové řezání (PAC) funguje na principu tavení kovu pomocí vysoké tepelné a kinetické energie ionizovaného plynu, který je směřován na povrch obrobku. Důsledkem vysokých teplot, dosahujících až 20 000 °C, se obrobek nataví a dynamickým účinkem plazmového plynu a jeho vysokou průtokovou rychlostí je roztavený kov spolu s erodovanými částicemi vyfouknut z řezné spáry. Ionizovaný plyn se vytváří tím, že se plazmový plyn zahřeje na extrémně vysokou teplotu průchodem mezi anodou a katodou. Tam se udržuje pomocí zdroje stejnosměrného napětí elektrický oblouk. Hodnota napětí při řezání bývá okolo 140 V. Pracovní plyn po ionizaci opouští trysku jako silný proud horké plazmy. Jako pracovní plyny se používají: argon, dusík, hélium, příp. tlakový vzduch a jejich směsi, a jako ochranné plyny, které chrání řez a plazmový oblouk se používají argon nebo směsi argonu s vodíkem.

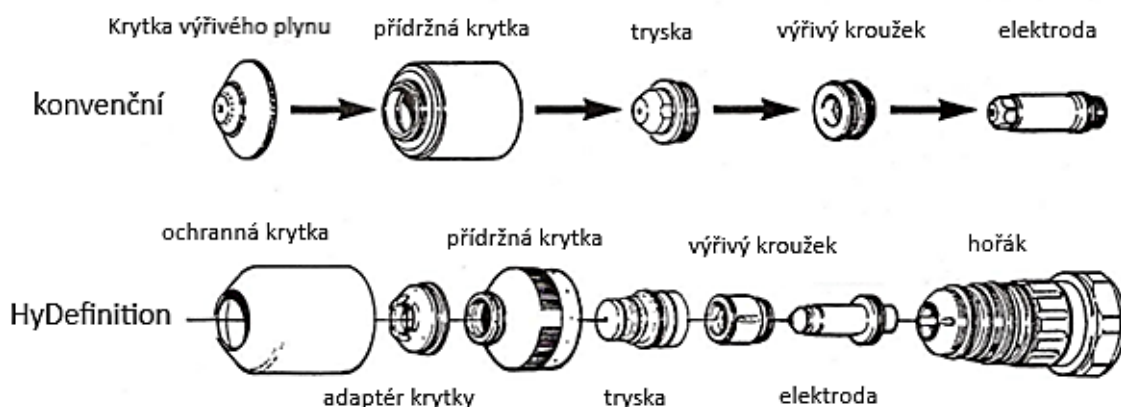
Jsou dvě hlavní rozdělení, které se při PAC používají. První je metoda přímá, kdy oblouk hoří mezi elektrodou a obrobkem. Tato metoda je vhodná pro větší tloušťky materiálu, protože má vyšší intenzitu plazmy, ale lze použít pouze na vodivé materiály. Druhá metoda je nepřímé řezání kde oblouk hoří mezi elektrodou a přídavným drátem, který je dodáván před trysku. Touto metodou lze zpracovávat všechny materiály, ale intenzita proudu plazmy je nižší.



Obrázek 10 Schéma plazmového hořáku [15]

Horký plyn proudící skrz trysku může způsobit její přehřátí, z tohoto důvodu se plazmový hořák může obklopit proudem vody. Řezná rychlost závisí na vlastnostech řezaného

materiálu, jeho tloušťce a na výkonu a nastavení zdroje. Maximální tloušťka se liší kvůli vlastnostem materiálu ale uvádí se většinou 180-250 mm. Jako u každého tepelného dělení vzniká tepelně ovlivněná oblast. U plazmy při správném nastavení nepřesahuje 1 mm. Při výrazném chlazení řezaného materiálu vznikají za tepelně ovlivněnou oblastí mikrotrhliny, které narušují integritu. Přesnost při PAC odpovídá hrubovacím operacím. Řezná spára je široká několik milimetrů a pro tuto technologii je charakteristické její zešikmení mezi 2°-10°. Sklon na pravé a levé straně se liší. Levá strana bývá hladká ale s větším sklonem až 15°. Sklon na pravé straně se pohybuje okolo 3°. Toto zešikmení vzniká vířivým pohybem plynu. [2; 16]



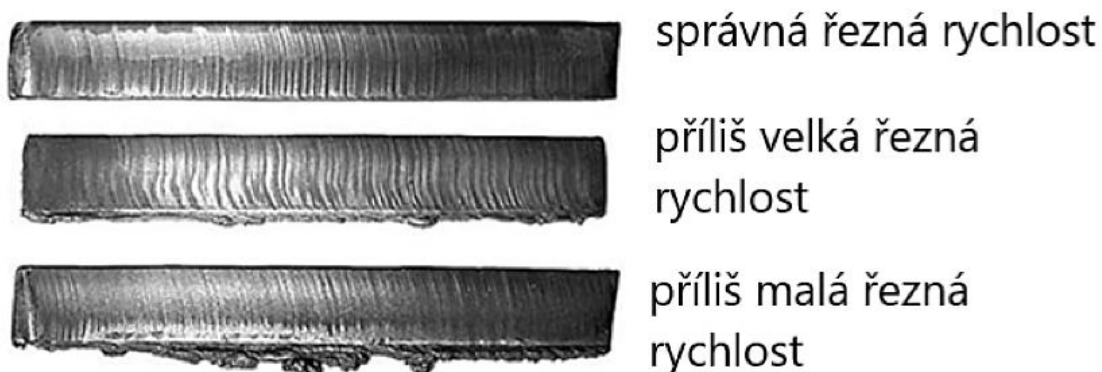
Obrázek 11 Výměnné spotřební díly plazmového hořáku [17]

### 3.1 Problematika řezání plazmou

Mezi hlavní problémy při plazmovém řezání patří výroba otvorů stejného průměru jako tloušťka plechu nebo menších, tvorba strusky a správné zvolení řezné rychlosti a ostatních parametrů, aby negativně neovlivnily kvalitu řezu jako je drsnost povrchu, tepelně ovlivněná oblast, šířka prořezu a úchylka kolmosti.

#### 3.1.1 Tvorba Strusky

V mnoha výrobních dílnách je plazmové řezání běžně používanou metodou pro efektivní řezání plechů a desek. Častým problémem, se kterým se při tomto procesu setkáváme, je však tvorba strusky, což je opětovně ztuhlý zoxidovaný roztavený kov, který není během plazmového řezání zcela vyloučen z řezné hrany. Struska se může projevat v různých formách, včetně nízkorychlostní strusky, vysokorychlostní strusky a vrchního rozstříku. Typ a závažnost tvorby strusky závisí na mnoha proměnných procesu, jako je řezná rychlost, proud, vzdálenost, typ materiálu, tloušťka materiálu, stav povrchu a dokonce i změny teploty materiálu během řezání. Mezi těmito proměnnými jsou tři kritické, které významně ovlivňují tvorbu strusky, a to: řezná rychlost, intenzita proudu a vzdálenost hořáku od obrobku. [18]



Obrázek 12 Příklady řezů s nevhodným nastavením [19]

#### **Tvorba strusky při nízkých rychlostech řezání:**

Při příliš nízké řezné rychlosti má plazmový hořák tendenci zdržovat se v jedné oblasti, což vede ke zvětšení průměru sloupce oblouku. Toto rozšíření sloupce oblouku rozšiřuje oblast řezání do té míry, že vysokorychlostní složka plazmového oblouku již nemůže účinně vytlačovat roztavený materiál. V důsledku toho se tento roztavený materiál hromadí podél spodní hrany obrobku v husté kulovité formě. Extrémně nízké řezné rychlosti mohou dokonce způsobit zhasnutí oblouku z důvodu nedostatečného množství kovu pro jeho udržení.

Tento problém lze obecně řešit postupným zvyšováním rychlosti, snížením proudu nebo zvětšením vzdálenosti hořáku od materiálu. Pokud žádné z těchto opatření nepomůže tak je ještě možnost použít menší velikost trysky.

#### **Tvorba strusky při vysoké rychlosti řezání:**

Naopak příliš vysoké řezné rychlosti mohou vést k vysokorychlostní tvorbě strusky. Při těchto rychlostech může oblouk v řezu zaostávat a zanechávat za sebou malé, tvrdé kapičky neřezaného materiálu nebo neodstraněnou strusku podél dna obrobku. Vysokorychlostní struska je houževnatější a její odstranění často vyžaduje rozsáhlé následné obrábění. Při extrémně vysokých rychlostech může být oblouk nestabilní, kmitat v řezu nahoru a dolů a vytvářet jiskry a roztavený materiál. Může se dokonce stát, že oblouk nepronikne do kovu nebo zhasne.

Pro řešení tohoto problému se doporučuje snižovat řeznou rychlost, zmenšit vzdálenost hořáku, zvýšit proud nebo provést kombinaci všech uvedených vlivů. Také je důležité před provedením řezu zkontrolovat, zda tryska nevykazuje známky opotřebení nebo poškození.

#### **Horní Rozstřík:**

Rozstříkem vzniká struska, která se hromadí podél horního povrchu obrobku. Tvoří se v důsledku opotřebovaných trysek, příliš vysokých řezných rychlostí nebo velké vzdálenosti hořáku od obrobku. Je způsobena vířivým pohybem plazmové trysky, která vymršťuje roztavený materiál před řeznou hranu, nikoliv dolů skrz ni. [18]

### **3.1.2 Vliv řezné rychlosti na kvalitu řezu:**

Při řezání plasmou je důležité určit správnou rychlost posuvu. Pokud zvolíme moc rychlý nebo naopak pomalý řez, kvalita povrchu bude horší, bude na materiálu ulpívat struska a



nevyhneme se dokončovacím operacím. Okno ideální rychlosti nebo „sweet spot“ se liší pro každý použitý plyn a materiál. Pro vzduchové a dusíkové plazmové plyny je například menší než pro kyslíkové, a oceli válcované za studena se obecně řezou lépe než válcované za tepla.

#### **Pro určení ideální řezné rychlosti se používají dvě metody:**

Metoda 1: Provést sérii zkušebních řezů při různých řezných rychlostech a vybrat rychlost, která poskytuje nejčistší řez. Nejlepším ukazatelem je linie zpoždění znázorněná jako vrypy na povrchu řezu. Při nízkých řezných rychlostech vznikají svislé čáry zpoždění kolmo k povrchu desky, zatímco při vysokých řezných rychlostech vznikají šikmé čáry zpoždění ve tvaru písmene S (viz Obrázek 12) [18]. Zkoumáním čar zpoždění je možné určit, zda je třeba zvýšit nebo snížit rychlost, aby bylo nalezeno „okno“ bez strusky. Operátor může mít tendenci při prvním výskytu strusky stroj zpomalit, ale naopak může být nutné rychlost zvýšit.

Metoda 2: Sledovat během řezání oblouk a dynamicky upravovat rychlost tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností oblouku. Pozorovat úhel oblouku při jeho výstupu ze spodní části obrobku. Například při řezání vzduchovou plazmou se upřednostňuje při výstupu svislý oblouk. Při použití dusíku, argonu nebo vodíku je ideální mírný vlečný oblouk, zatímco u kyslíkové plazmy je cílem udržet mírný přední oblouk.

Závěrem lze říci, že kontrola tvorby strusky při plazmovém řezání je zásadní pro zachování kvality řezu a snížení potřeby nákladných sekundárních operací. Pochopením a úpravou kritických procesních proměnných, jako je rychlost řezání, velikost řezného proudu a vzdálenost, mohou operátoři dosáhnout čistších a efektivnějších plazmových řezů a optimalizovat tak celkový výrobní proces. [18]

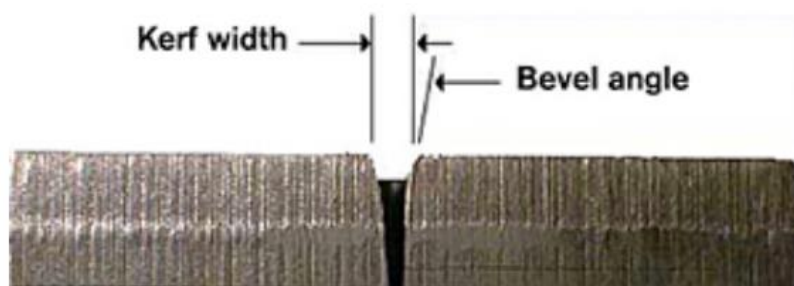
### **3.1.3 Řezání malých otvorů**

Řezání otvorů je další disciplína, která se u metody PAC řeší. Mnoho dílů vyžaduje otvory pro následné sešroubování a musí se dodržet požadovaná přesnost i u malých průměrů děr. Moderní stroje už mají způsoby, jak téměř eliminovat nechtěné zúžení, vrypy a prohlubně. Jako u všech operací i zde má plazma své výhody a nevýhody. Jsme schopni řezat materiály středních tloušťek vysokou rychlostí a dobrou kvalitou. Uvádí se pravidlo, že minimální průměr otvoru by měl být cca 1,2x tloušťka řezaného materiálu. Ale jak jde vývoj dál, tak některé zdroje dokáží řezat i menší průměry. Stroj HiFocus Neo dokáže dle výrobce řezat i díry o průměru 0,6x tloušťka plechu do měkkého materiálu, ale zde záleží i na ideálním nastavení stroje, perfektní kondici hořáku a jeho jednotlivých částí a na vodícím systému zařízení. Proto se u tohoto stroje doporučuje řezat minimální průměry 0,8x tloušťky plechu přičemž tolerance horní a spodní hrany je +/- 0,2 mm. [19; 20]

## **3.2 Kvalita plazmového řezání**

Stejně jako u všech obráběcích procesů i u plazmového řezání jsou nejdůležitější charakteristiky: kvalita, přesnost a produktivita řezání. Aby člověk dosáhl nejlepších výsledků, musí být dobře obeznámen s charakteristikami, principy a vlastnostmi této technologie. Základními proměnnými jsou: rychlost řezání, napětí, výkon a proud oblouku, tlak a průtok plynu, ideální posuv a průměr trysky a její vzdálenost od obrobku.

Produktivita je vyjádřena jako rychlost úběru materiálu a všechny výše uvedené procesní parametry na ní mají vliv. Kvalita je měřena pomocí povrchové topografie a vlastností rezného povrchu materiálu. Přesnost se určí pomocí tolerancí použitých na rozměr a tvar obrobku, zkrátka mírou shody skutečného a jmenovitého rozměru, tvaru a geometrie. Většinou se řeší geometrie prořezu podle ČSN EN ISO 9013. Ta se vyjadřuje šířkou horního prořezu (kerf width), šířkou spodního prořezu a úhlem zúžení (Bevel angle) - viz Obrázek 13. [2]



Obrázek 13 Ukázka úchylky kolmosti na řezu plazmou [19]

### 3.3 Výrobci plazmových řezacích zařízení

Společnost Kjellberg Cutting Inc. a ESAB mají společnou historii a zakladatele. Byl jím Oscar Kjellberg, který je označován jako vynálezce obalované elektrody v roce 1908. Společnost Kjellberg byla založena roku 1921 v Berlíně sedmi partnery z Německého a Švédského průmyslu. Hlavním partnerem byla firma ESAB jejíž zakladatelem a ředitelem byl Oscar Kjellberg. Obě firmy se od té doby zabývají vývojem a výrobou elektrod a svařecích zdrojů. Roku 1959 byl proveden první pokus o řezání plazmou, s použitím směsi argonu a vodíku, pod taktovkou firmy Kjellberg a v roce 1962 vznikl patent na řezání jemným plazmovým obloukem. V dnešní době je společné portfolio obou firem rozsáhlé do všech průmyslových odvětví, kde se řeší svařování a dělení kovů. Nicméně v dnešní době jde o dvě samostatné společnosti, které si vzájemně konkurují a obě se zabývají (mimo jiné) i vývojem a prodejem plazmových řezacích zdrojů. [5; 21]



Obrázek 14 Logo společnosti Kjellberg [21]



Obrázek 15 Logo společnosti ESAB [5]



Obrázek 16 Logo Hypertherm [22]

Hypertherm je jednou z vedoucích společností v oblasti průmyslového dělení materiálů. Společnost vznikla před padesáti lety jako garážová firma o dvou členech. Povedl se jim objev způsobu, jak vytvořit užší plazmový oblouk, který dokáže řezat kov rychleji a přesněji než v té době používané technologie. Uvádí, že jejich hnacím motorem je inovace

zaměřená na zákazníka. Společnost je zaměřena na výrobu a vývoj zařízení na plazmové, laserové a hydroabazivní řezání.

### 3.4 Aplikace a nastavení zařízení - hlavní pracovní režimy

V další kapitole jsou rozebrána možná nastavení přístroje HiFocus 280i neo, na kterém bude prováděn experiment v rámci řešení BP. Jednotlivá nastavení slouží pro specifická použití jako je řezání malých děr, hliníku, pro dělení materiálu ve vyšších rychlostech nebo nevodivých materiálů. Jednotka HiFocus 280i neo disponuje následujícími čtyřmi režimy pro speciální operace.

#### **Contour Cut:**

Řezný režim Contour cut (CC) slouží k usnadnění výroby jemných a přesných řezných obrysů a k řezání malých otvorů. Zaručuje kvalitu otvorů s poměrem průměru k tloušťce 1/1, hrany zůstanou ostré a řezné plochy hladké. Tímto by se měly snížit náklady na následné opracování, časová náročnost celého procesu a zvýšit celková produktivita procesu.

Režim contour cut Speed (CCS) je rozšíření k metodě CC. Používá se pro řezání otvorů a kontur v měkké oceli, ale s vyšší řeznou rychlostí (až o polovinu rychleji). Kvalita řezu by měla zůstat zachována i při tomto výrazném zrychlení. Hlavní výhody tohoto režimu jsou snížení nákladů na metr řezu, úspora času a menší tepelně ovlivněná oblast. [20]

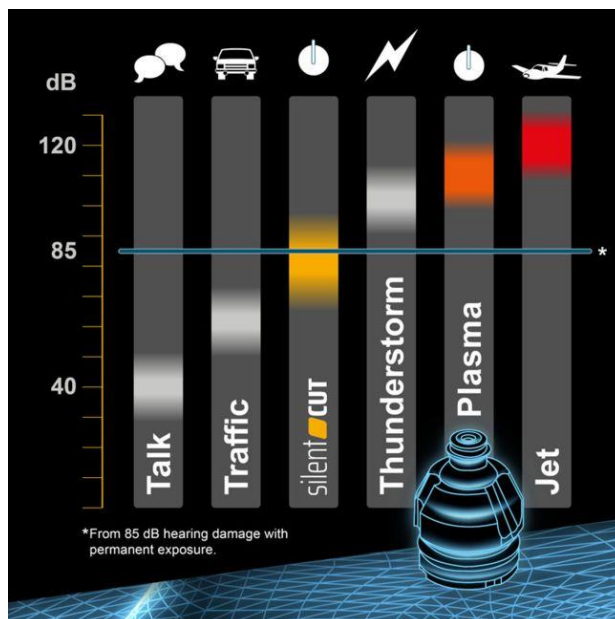
#### **HiFinox and Ar/H<sub>2</sub> Mix**

Režim HiFinox slouží k řezání materiálů malých tlouštěk, hlavně hliníku a korozivzdorné oceli o tloušťce mezi 1 až 6 mm. Řezné plochy zůstávají lesklé, zářezy jsou úzké a množství strusky je minimální. K řezání touto metodou jsou potřeba speciální katody (elektrody) a používají se při nastavení proudu na hodnotu max. 60 A

Metoda Ar/H<sub>2</sub> Mix slouží k řezání hliníku a korozivzdorné oceli o tloušťkách od 6 mm do maximálně 160 mm. U této metody je třeba speciálně namíchaný plazmový plyn – (tzn. směs Ar/H<sub>2</sub>) a jeho poměr se liší pro různé tloušťky a materiály. Pokud není směs správně namíchaná může dojít ke zhoršení kvality řezu a nedosáhneme tak vysokých řezných rychlostí. Při optimálním nastavení a směsi plynů dosáhneme touto metodou přesných řezů vnějších i vnitřních kontur s malou úchylkou kolmosti a kvalitou povrchu i při větších tloušťkách materiálu. Opět se tímto šetří čas a finance na následné dokončovací operace. [20]

#### **Silent Cut:**

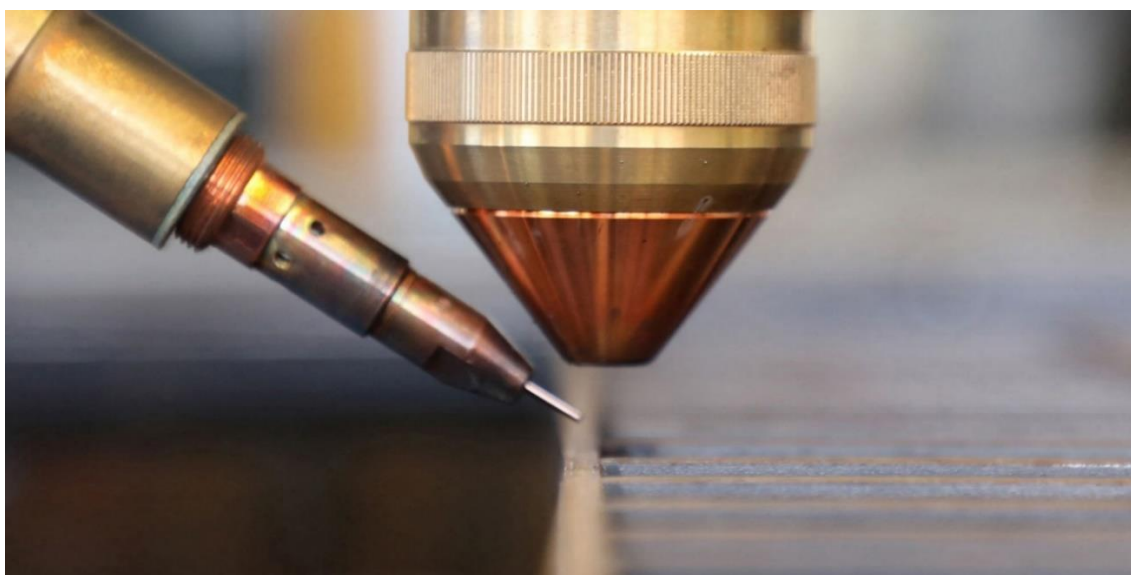
Velkou nevýhodou plazmového řezání je hluk, který při procesu vzniká. Vysoká hustota energie a rychlost proudění způsobují v závislosti na řezné úloze hluk, který může přesáhnout až 100 dB. Na pracovišti je ale maximální povolená hodnota 85 dB dle státního zdravotnického ústavu [23]. Tento problém dal vzniknout příslušenství hořáku s názvem Silent Cut (SC), které by mělo snížit hlasitost při plazmovém řezání na únosnou hodnotu. Silent Cut snižuje hladinu akustického tlaku až o 15 dB ale nevýhodou je menší rozsah použití. Metoda je určena pro konstrukční oceli o tloušťce od 4 do 30 mm a pro proudový rozsah mezi 60 A a maximálně 170 A. Zároveň by použití Silent Cut mělo dodržet při řezání měkkých ocelí obdobnou kvalitu jako u metody CC. U moderních zdrojů je přechod na SC jednoduchý, stačí upravit řezné parametry a vyměnit trysku. [24]



Obrázek 17 Porovnání běžných hlasitostí s plazmovým řezáním [24]

### Hot Wire:

Metoda HotWire je řešením při dělení nevodivých materiálů (železobeton, sklo, keramika) a přerušovaných konstrukcí jako mříže. Princip spočívá ve způsobu nepřímého plazmového řezání, kdy plazmový oblouk hoří mezi katodou a přiváděným drátem. Přerušované konstrukce lze řezat i kyslíkem ale výhodou plazmového řezání je, že není třeba žádný předehřev ani použití rotační hlavy, navíc lze dělit i materiály jako je korozivzdorná ocel nebo hliník. Přídavné zařízení HotWire lze použít u většiny zdrojů od firmy Kjellberg a dosahuje řezné rychlosti až 1,1 m/min, záleží však i na použitém proudu, materiálu a požadované geometrii. Další výhodou oproti jiným metodám je, že je oblouk kontinuální. To šetří životnost spotřebního materiálu a zaručuje vysokou spolehlivost a kvalitu. Zajímavostí je, že se HotWire používá při demontáži jaderných elektráren. [25; 26]



Obrázek 18 Ilustrační obrázek sestavy HotWire [25]

### 3.5 Bezpečnost práce při řezání plazmou

Bezpečnostní opatření, která je třeba dodržovat při řezání plazmovým obloukem, jsou podobná jako pro ostatní tepelné procesy s následujícími upřesněními:

Prevence požáru:

- Před zahájením řezání je potřeba se ujistit, že je prostor bezpečný.
- V blízkosti musí být hasicí přístroj.
- Je třeba odstranit všechny hořlaviny v okruhu 35 stop (10 m) od místa řezání.
- Před manipulací s horkým kovem musí být ochlazen nebo nechán vychladnout, než se může dotýkat hořlavých materiálů.
- Nikdy nesmí být řezány nádoby s potenciálně hořlavými materiály uvnitř - musí být nejprve vyprázdněny a řádně vyčištěny.
- Před řezáním je nutné vyvětrat potenciálně hořlavé prostředí.
- Při řezání s kyslíkem jako plazmovým plynem je třeba zajistit odsávací ventilaci a je nutný systém odvádění spalin.

Prevence výbuchu:

- Nepoužívat plazmový systém, pokud může dojít k výskytu výbušného prachu nebo par
- Neřezat tlakové láhve, potrubí ani žádné uzavřené nádoby.
- Neřezat nádoby, ve kterých byly uloženy hořlavé materiály.

Nebezpečí výbuchu: Argon-vodík a metan

- Vodík a metan jsou hořlavé plyny, které představují nebezpečí výbuchu.
- Je třeba udržovat plameny v bezpečné vzdálenosti od lahví a hadic, které obsahují metan nebo vodíkové směsi.
- Je třeba udržovat plameny a jiskry mimo dosah hořáku při použití metanu nebo argon-vodíkové plazmy.

Ochrana pracovníků:

- Musí být použity ochranné pomůcky: brýle resp. svářečská kukla a oděv proti záření plazmového oblouku. Oděv a rukavice proti popálení rozstříkem strusky a tekutého kovu a při manipulaci s řezaným materiálem. [17]

## 4 Experimentální část bakalářské práce

V experimentální části se bakalářská práce věnuje porovnání kvality řezu při řezání plazmou, s měnícím se nastavením procesních parametrů a výsledky jsou porovnány u vybraných typů oceli (viz kapitola č. 4.2). Řezy byly realizovány na třech různých materiálech stejné tloušťky a měněny byly: rychlost řezání, vzdálenost řezací hlavy od materiálu (výška), předčasné vypnutí a přejetí (při řezání kruhových otvorů). Hlavním cílem BP bylo zjistit, které parametry a podmínky řezání nejvíce ovlivňují kvalitu při řezání malých otvorů (jedna z nejproblematictějších operací v procesu tepelného dělení), a které nastavení vzhledem k řezanému materiálu je pro výrobu otvorů nejlepší. Následně byla hodnocena kvalita otvorů, pomocí měření kruhovitosti a kolmosti řezu a u rovinných řezů byla provedena metalografická analýza a změřena drsnost, kolmost (úchylna kolmosti) a velikost tepelně ovlivněné oblasti.

### 4.1 Popis experimentálního pracoviště

Experimentální část byla realizována na plazmovém zdroji Kjellberg HiFocus 280i neo instalovaném na řezacím stroji Vanad Proxima. Obě zařízení budou v následujících kapitolách podrobně popsána.

#### 4.1.1 Zařízení HiFocus 280i neo

Jedná se o velmi flexibilní, výkonné a vysoce přesné zařízení pro řezání plazmou. Umožňuje dělení materiálů v rozsahu tlouštěk od 0,5 mm do 70 mm. Dá se kombinovat s 2D a 3D CNC řízenými vodícími systémy a roboty. HiFocus 280i neo zajišťuje dobrou kvalitu při řezání vodivých materiálů i ve vyšších rychlostech a tím zároveň šetří na procesních nákladech. Stroj lze vybavit přídatným zařízením i pro řezání pod vodou nebo pro provádění dělení metodou HotWire. Zařízení má možnost nastavení technologie „Contour Cut“, která umožňuje řezání jemných vnitřních i vnějších kontur a malých otvorů z „měkké“ oceli. [20]

Tabulka 2 technické parametry plazmového zdroje HiFocus 280i Neo [17]

Zdroj energie	HiFocus 280i neo
Síťové napětí	3x400 V, 50Hz
Řezný proud	Max 280 A
Značící proud	5-50 A
Rozsah řezání	0,5-70 mm
Rozsah propálení	do 40 mm
Rozměry	1030 x 680 x 1450 mm
Hmotnost	422 kg
Plazmový hořák	PerCut 451

Plazmové hořáky ze série PerCut disponují chlazením vodou až ke hrotu hořáku. Díky tomu lze dosáhnout vysoké hustoty energie, výborné rezné kvality a velmi úzkých prořezů. Hořáky PerCut jsou kompatibilní se zařízením ATChanger, které umožňuje jejich automatizovanou výměnu. Používá se pro automatizované provozy, kde se očekává častá změna úkolů, které má hořák vykonávat. PerCut mohou pracovat i při naklonění až do 50° od řezaného povrchu. Při experimentu byl použit hořák PerCut451, který je složen z částí, které jsou uvedeny na obrázku 19 a v tabulce 3. [20]

Tabulka 3 Hořák PerCut 451, spotřební díly a jejich označení

Číslo	Název	Označení
1	Ochranná krytka	G502
2	Krytka vířivého plynu	G4030
3	Krytka trysky	G3028
4	Tryska	G2010Y
5	Vířivý kroužek	G101C
6	Elektroda	G015Y
7	Chladicí trubice	G902Y



Obrázek 19 Hořák PerCut 451 a jeho spotřební díly [27]

#### 4.1.2 Vanad Proxima

Vanad proxima je moderní řezací CNC stroj. Používá se na plazmové a autogenní řezání a umožňuje práci s deskami velkých formátů. Může obsahovat více suportů osazených hořáky, v našem případě má jeden na řezání kyslíkem a druhý na plazmové řezání. Dále může být vybaven příslušenstvím k řezání trubek a kulatých profilů. V našem případě je vybaven odsávacím sekčním stolem o rozměrech 1 000 x 2 000 mm, který obsahuje odsávací a filtrační zařízení (s filtrem pro tepelné dělení kovových materiálů) s objemovým průtokem 5040 m<sup>3</sup>/hod (viz obrázek 20). Nastavení řezání lze provádět přímo v konzoli Vanad pomocí řídicího a ovládacího systému Vanad B&R, nebo může být exportováno z jiného zařízení například z počítače. [28]



Obrázek 20 Řezací CNC stroj Vanad Proxima [28]

## 4.2 Použité materiály na experiment

Pro účely experimentální práce byly zvoleny tři materiály rozdílných vlastností, ale o stejné tloušťce 10 mm. Jako základní materiál byla zvolena konstrukční ocel S235 JR, která vykazuje zaručenou svařitelnost i řezatelnost. Dále byla zvolena otěruvzdorná ocel Hardox 450, se zvýšenou tvrdostí základního materiálu. A třetí zvolený typ oceli, byla vysokopevnostní zušlechťená ocel S960QL, která má zhoršenou svařitelnost a lze tedy předpokládat, že i vliv řezání na změnu struktury a mechanických vlastností se bude projevovat ve větší míře.

### S235JR:

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti materiálu S235 JR

Mechanické vlastnosti	S235 JR
Mez Kluzu $R_p$	235 MPa
Mez Pevnosti $R_m$	360-510 MPa
Tažnost	26%
Vrubová houževnatost (při 20°C)	27 J

Jedná se o nelegovanou konstrukční jakostní ocel. Používá se na polotovary válcované za tepla. Má zaručenou hodnotu nárazové práce 27J při +20 °C. Není určena k tepelnému zpracování kromě žíhání. Je vhodná pro svařované, šroubované a nýťované konstrukce. [29]



Tabulka 5 Chemické složení materiálu S235 JR

S235 JR	C	Si	Mn	P	S	Cu	N
Chem. složení	0,17	–	1,40	0,035	0,035	0,55	0,012

### Hardox 450:

Tabulka 6 Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 450

Mechanické vlastnosti	Hardox 450
Tvrdość	425-475 HB
Mez Kluzu Rp	1200 MPa
Mez Pevnosti Rm	1400 MPa
Tažnost	10%
Vrubová houževnatost (při -40°C)	40 J

Jedná se o ořezuvzdornou ocel s dobrými vlastnostmi v abrasivním a agresivním prostředí. Má dobrou pevnost i houževnatost a používá se třeba na korby nákladních vozů pro přepravu hlíny a kamení, lžice pro bagry, nože, ozubená kola nebo na demoliční stroje. Hardox 450 umožňuje použití menších tloušťek plechu než u jeho předchůdce (oceli Hardox 400). Při stejné zátěži dokonce prodlouží životnost dílů mezi 35% a 80%. [30; 29]

Tabulka 7 Chemické složení materiálu Hardox 450

Hardox 450	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Chem. složení	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26

### S960QL:

Tabulka 8 Mechanické vlastnosti materiálu S960 QL

Mechanické vlastnosti	S960 QL
Mez Kluzu Rp	960 MPa
Mez Pevnosti Rm	980-1150 MPa
Tažnost	10%
Vrubová houževnatost (při -40°C)	40 J

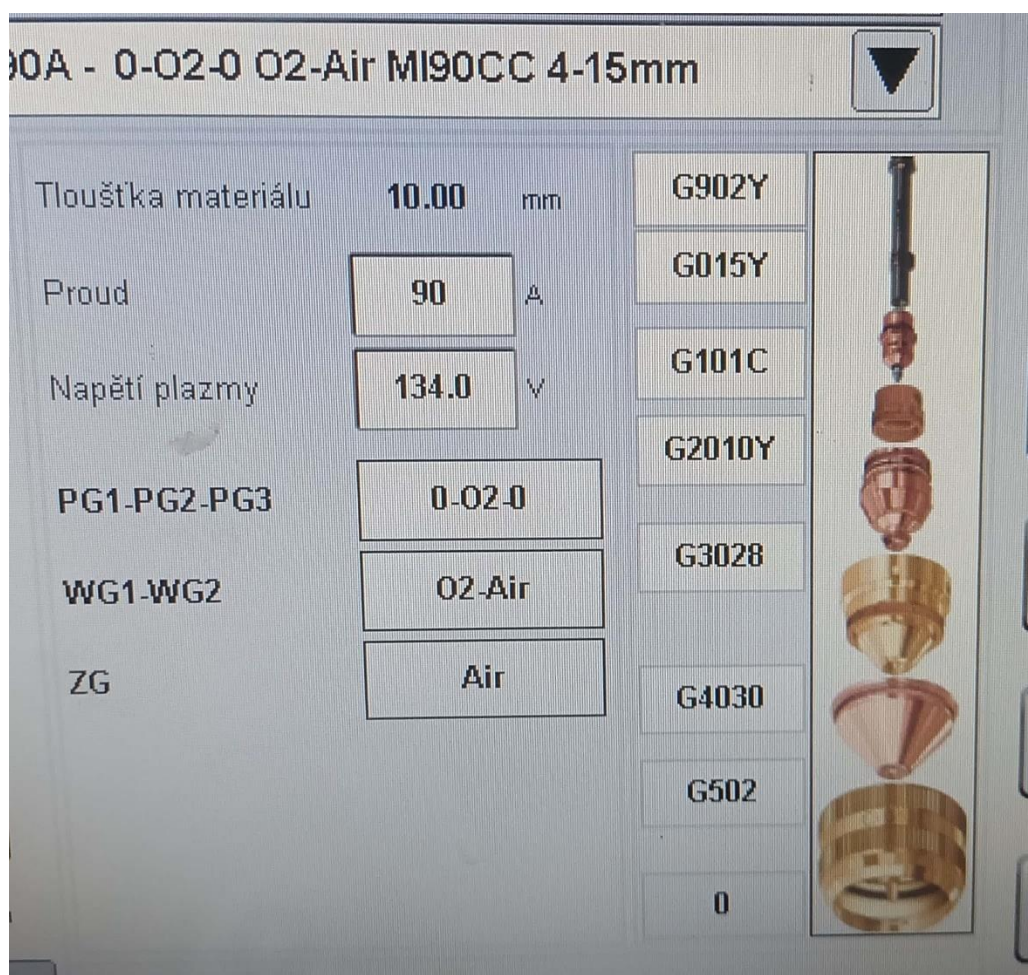
Jedná se o vysokopevnostní konstrukční, legovanou a ušlechtilou ocel s minimální mezí kluzu 960 N/mm<sup>2</sup>. Ocel je zušlechťená a má zaručené hodnoty nárazové práce 40J při +40°C. Používá se na namáhané svařované konstrukce. Třeba Nádrže na vodu, zásobníky, mosty nebo jeřáby. Obsahuje 0,2% C. [29]

Tabulka 9 Chemické složení materiálu S960 QL

S960 QL	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	B
Chem. složení	0,20	0,50	1,60	0,020	0,010	0,30	0,80	2,0	0,70	0,005

### 4.3 Výroba testovacího vzorku pro určení procesních parametrů

Pro řezání kruhových otvorů bylo zvoleno nastavení v režimu contour cut (viz kapitola 3.4) a řezný proud 90 A, dle doporučení výrobce řezacího zdroje. Tato sestava a nastavení je dle tabulek pro řezání měkké oceli o tloušťce 10 mm ideální. Možný rozsah, co lze při tomto nastavení řezat, je tloušťka materiálu 4-15 mm.



Obrázek 21 Spotřební díly pro sestavu Contour cut, a použité řezací parametry: napětí a proud, plazmový a vířivý plyn

V konzoli stroje Vanad Proxima byl vybrán otvor průměru 10 mm a pro první řez zvoleno nastavení doporučené výrobcem. Na pracovní plochu byl umístěn materiál S235JR a pomocí laserového zaměrování nastaven nulový bod. Následně bylo vyříznuto devět otvorů, a u každého otvoru byly použity jiné řezné parametry, ty byly měněny na základě toho, jak byl proveden předchozí otvor a jak by bylo možné řeznou hranu dle teoretických

podkladů vylepšit. Hlavní parametry, které byly měněny byly: přejetí po dokončení celé kontury (v mm), předčasné vypnutí plazmového oblouku (v mm), zpomalení před koncem řezu (v %) a rychlost řezání (v m/min).

Tabulka 10 Řezné parametry použité při prvním řezání testovacího polotovaru

Řez č.	Přejetí (mm)	Vypnutí (mm)	Zpomalení (%)	Rychlost (m/min)	Specifika
1	1	1	-	1,60	-
2	1	2	-	1,60	-
3	0	3	-	1,60	Průměr 20
4	4	3	-	1,60	-
5	4	3	-	1,60	-
6	4	3	1/80	1,60	Vypnutí korekce výšky
7	4	3	1/90	1,60	-
8	4	3	1/90	1,40	-
9	4	2	1/90	1,40	-

Postupná optimalizace nastavení parametrů a podmínek řezání je vidět v tabulce č. 10. Nejlepších výsledků bylo dosaženo na otvorech č. sedm a devět. Otvory jsou pravidelně kruhové s dobrou kvalitou povrchu, jsou jen mírně kuželové a s malou drážkou způsobenou najížděním. První řez byl proveden doporučeným nastavením podle výrobce stroje a i ten dopadl dobře. U třetího řezu byl zvolen špatný program a místo průměru 10 mm byl vyřezán průměr 20 mm, díky tomu bylo možno pozorovat, jak výrazně se zlepšila kvalita povrchu a kruhovitost při řezání větších kontur a bylo potvrzeno jak je obtížné řezat malé otvory. Otvor šest má ze všech nejhorší kruhovitost, i když byl dodržen postup přesně podle návodu vydaného výrobcem plazmového zdroje. Řez č. dva má největší drážku od nájezdu a řez č. čtyři má na stejném místě naopak výstupek.

#### 4.4 Výroba vzorků pro vyhodnocování kvality řezu malých otvorů

Na základě pozorování po výrobě testovacího vzorku byl navržen vzorek na vyhodnocení kvality řezu při výrobě malých otvorů. Nejlépe se osvědčilo nastavení s přejetím 4 mm, předčasným vypnutím 2 a 3 mm před koncem a rychlostí 1,4 a 1,6 m/min. Navržený polotovar bude mít obě strany 100 mm dlouhé, dvě strany budou řezány rychlostí 1,6 m/min a další dvě rychlostí 1,4 m/min. Otvory o průměru 10 mm, řezané do materiálu tloušťky 10 mm budou umístěny minimálně 10 mm od sebe abychom předešli vzájemnému tepelnému ovlivnění. Na každém kusu bude zhotoveno devět děr vždy po trojicích se stejnými řeznými parametry, aby se předešlo náhodné chybě. Experiment bude proveden na všech třech vybraných materiálech (Hardox 450, S960QL a S235JR). V tabulce-Tabulka 11- jsou uvedeny parametry, které byly použity při řezání: přejetí po dokončení celé kontury (v mm), předčasné vypnutí oblouku (v mm), zpomalení před koncem řezu (v %) a rychlost řezání (v m/min).

Tabulka 11 Řezné parametry pro výrobu vzorků na vyhodnocování kvality řezu malých otvorů

Řez Č.	Přejetí (mm)	Vypnutí (mm)	Zpomalení	Rychlost (m/min)
1	4	2	1/90	1,6
2	4	2	1/90	1,6
3	4	2	1/90	1,6
4	4	2	1/90	1,4
5	4	2	1/90	1,4
6	4	2	1/90	1,4
7	4	3	1/90	1,4
8	4	3	1/90	1,4
9	4	3	1/90	1,4

V konzoli stroje Vanad proxima byl zkonstruován zamýšlený tvar polotovaru a nastaveny řezné parametry. Byly vytvořeny první tři otvory, posléze program zastaven a upraveny řezné parametry. Následovalo vyříznutí další trojice, opět zastavení, překonfigurování a řezání zbývajících otvorů. Při řezání kontury vzorku bylo nutné změnit rychlost řezání v průběhu řezu, jelikož nebylo možné proces přerušit z důvodu ovlivnění a chyb, které by vznikly při zastavování plazmového oblouku v půlce řezu a jeho opětovného najíždění jinou rychlostí. Výsledné vzorky byly ručně zbaveny strusky označeny a bylo provedeno první pozorování – vizuální vyhodnocení řezu.



Obrázek 22 Vzorek Hardox a S960 pro vyhodnocování kvality řezu malých otvorů

Nejlepší kvalitu, při hodnocení vizuální kontrolou, mají otvory řezané do materiálu S960QL - na pohled mají nejlepší kruhovitost a malou TOO. Zároveň byl pozorován rozstřík malých kapiček strusky na horní straně po obvodu řezu. Tento jev se ani u Hardoxu

ani u oceli S235 nevyskytl. U materiálu Hardox 450 je na první pohled nejhorší tepelně ovlivněná oblast a drsnost, v otvoru se vyskytují podélné vruby. Jako na jediném se také u materiálu Hardox vyskytla struska po celé délce řezu. Struska nebyla ulpělá a šla snadno odstranit. Nejvíce strusky se shodně na všech vzorcích vyskytovalo na částech, které byly řezány rychlostí 1,4 m/min.

#### 4.4.1 Měření drsnosti řezné hrany

Drsnost řezné hrany byla měřena na rovných stranách (vnějších obvodech) vzorků. Bylo provedeno šest měření na straně řezané rychlostí 1,6 m/s a stejným způsobem i na straně řezané rychlostí 1,4 m/s. Z šesti měření bylo jedno, které se nejvíce lišilo, odebráno. Na měření byl použit drsnoměr Mitutoyo SJ-210 s diamantovým hrotem (viz Obrázek 23).



Obrázek 23 Drsnoměr mitutoyo SJ-210 [31]

V následujících tabulkách 12, 13 a 14 jsou všechny naměřené hodnoty drsnosti.

Tabulka 12 Drsnosti S235JR měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min

S235 JR				S235 JR			
1,6 (m/min)	Rz	Ra	Rq	1,4 (m/min)	Rz	Ra	Rq
1	6,273	1,16	1,452	1	8,244	1,577	1,956
2	5,578	1,053	1,277	2	8,256	1,274	1,567
3	7,879	1,435	1,744	3	9,789	1,536	1,919
4	5,786	1,114	1,324	4	8,997	1,585	1,947
5	6,371	1,325	1,532	5	7,175	1,192	1,499
průměr	6,377	1,217	1,466	průměr	8,492	1,433	1,7776

Tabulka 13 drsnosti S960QL měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min

S960 QL				S960 QL			
1,6 (m/min)	Rz	Ra	Rq	1,4 (m/min)	Rz	Ra	Rq
1	10,424	1,364	1,734	1	11,307	1,921	2,396
2	10,987	1,536	1,974	2	12,749	2,164	2,66
3	10,355	1,401	1,767	3	10,937	1,695	2,103
4	10,342	1,465	1,823	4	12,177	1,532	1,906
5	8,916	1,371	1,706	5	12,366	1,58	2,031
průměr	10,205	1,427	1,801	průměr	11,9072	1,778	2,219

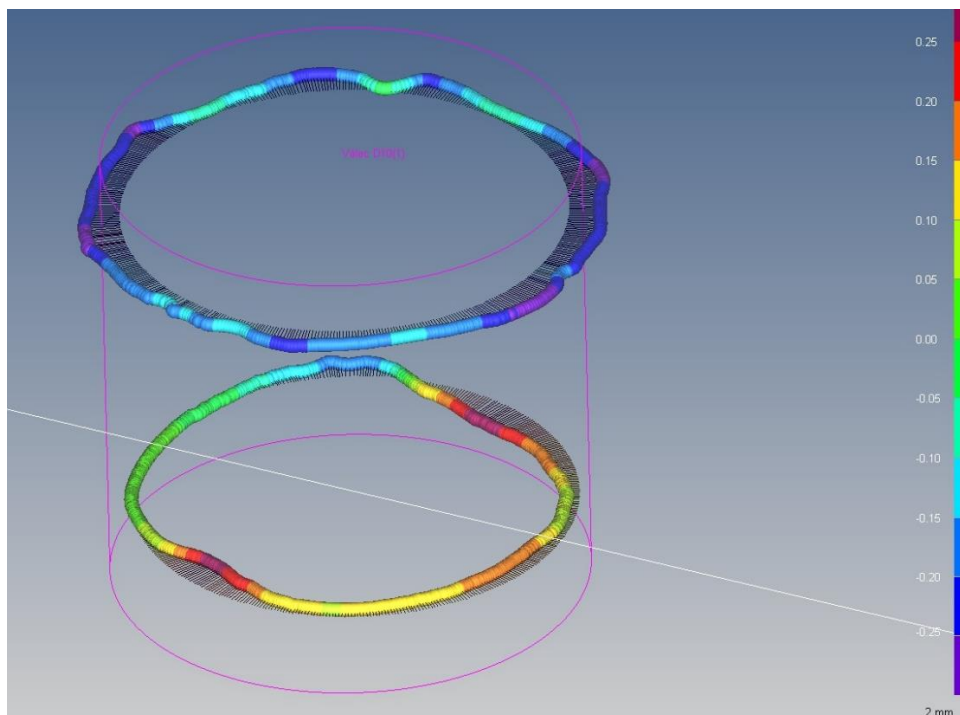
Tabulka 14 drsnosti Hardox 450 měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min

Hardox 450				Hardox 450			
1,6 (m/min)	Rz	Ra	Rq	1,4 (m/min)	Rz	Ra	Rq
1	24,83	4,906	5,705	1	29,835	5,45	6,739
2	24,38	5,711	6,417	2	26,08	5,246	6,22
3	25,323	5,874	6,618	3	22,779	4,483	5,435
4	25,163	4,704	5,712	4	36,126	5,025	6,489
5	23,499	5,077	5,826	5	29,035	5,693	6,723
průměr	24,639	5,254	6,056	průměr	28,771	5,179	6,321

Naměřené hodnoty potvrzují předešlé pozorování. U materiálu S235JR je povrchová drsnost nejlepší s hodnotou  $R_a$  1,2. Horší povrch má materiál S960QL s hodnotou  $R_a$  1,4. A ocel Hardox 450 s velkým rozdílem a hodnotou  $R_a$  5,3. Dále z výsledků můžeme pozorovat, že při nižší rychlosti řezání je drsnost řezné hrany horší.

#### 4.4.2 Měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u otvorů

Na devíti otvorech, na všech třech materiálech byla změřena kruhovitosť ve dvou hladinách. První hladina byla 1,5 milimetru od horní hrany a druhá hladina byla 8,5 milimetru od horní hrany. Z průměru otvorů v obou hladinách byla následně vypočtena úchylka kolmosti řezu. Měření probíhalo na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss PRISMO USS2 a vyhodnocování probíhalo v programu Zeiss Calypso. Měření bylo realizováno ve spolupráci s Ústavem technologie obrábění, projektování a metrologie v měrovém centru C. Zeiss.



Obrázek 24 Výsledky měření kruhovitosti otvoru ve dvou hladinách (-1,5 a -8,5) u materiálu S235

Z výsledků měření (viz tabulky č. 15 a 16) je patrné, že největší úchylka kolmosti vyšla u materiálu S960QL, a to průměrně 4,63 °. Kruhovitost na obou hladinách vyšla u všech materiálů obdobně, a to průměrně 0,35 mm. Nejlepší kruhovitost i úchylka kolmosti vyšla při řezání druhým nastavením, tedy při rychlosti 1,4 m/min, předčasném vypnutí oblouku 2 mm, přejetí po dokončení kontury 4 mm a při zpomalení před koncem řezu na 90%. Naopak nejhorsích výsledků bylo dosaženo při prvním nastavení viz Tabulka 11.

Tabulka 15 výsledky měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u materiálu S235 JR (vlevo) a Hardox 450 (vpravo)

Č. řezu	Kruhovitost		úchylka kolmosti (°)	Č. řezu	Kruhovitost		úchylka kolmosti (°)
	hladina -1,5	hladina -8,5			hladina -1,5	hladina -8,5	
1	0,21	0,35	4,45	1	0,19	0,43	4,2
2	0,31	0,26	3,74	2	0,44	0,45	4,76
3	0,26	0,35	4,38	3	0,3	0,47	4,48
4	0,27	0,39	3,92	4	0,34	0,4	3,27
5	0,29	0,38	3,69	5	0,27	0,37	4,14
6	0,28	0,32	3,29	6	0,35	0,46	3,88
7	0,3	0,39	4,24	7	0,31	0,33	4,16
8	0,3	0,42	3,69	8	0,27	0,38	3,29
9	0,3	0,33	2,99	9	0,32	0,41	4,04
∅	0,28	0,35	3,82	∅	0,31	0,41	4,02

Tabulka 16 výsledky měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u materiálu S960QL

Č. řezu	Kruhovitost		úchylka kolmosti (°)
	hladina -1,5	hladina -8,5	
1	0,36	0,33	4,94
2	0,22	0,32	4,99
3	0,37	0,37	4,72
4	0,29	0,31	4,1
5	0,27	0,31	4,35
6	0,5	0,3	4,43
7	0,34	0,44	4,75
8	0,36	0,48	4,52
9	0,28	0,39	4,88
∅	0,33	0,36	4,63

#### 4.5 Výroba vzorků pro metalografickou analýzu

Další částí experimentu byla výroba vzorků pro metalografickou analýzu, díky níž bude vyhodnocena velikost tepelně ovlivněné oblasti, profil řezu a úchylka kolmosti, včetně posouzení struktury materiálu. Pro tyto účely byly uříznuty tři vzorky z každého materiálu. První vzorek byl vytvořen řezáním doporučenou rychlostí od výrobce 1,6 m/min. Druhý byl řezán rychlostí o 20% vyšší (1,9m/min) a třetí rychlostí o 20% nižší (1,3 m/min). Byl použit program pro manuální zarovnávání svitků, který umožňuje ručně nastavit počátek a konec řezu.



Obrázek 25 Vzorky přímých řezů

Po nařezání devíti vzorků byla odstraněna struska a provedeno vizuální pozorování a měření. Opět pouze u materiálu Hardox 450 byla struska vyvrhelá po celé délce řezu. Materiál S960QL měl opticky nejčistší řez a nejmenší drsnost.



#### 4.5.1 Měření drsnosti řezných hran na vzorcích pro metalografickou analýzu

U vzorků byla proměřena drsnost přístrojem Mitutoyo SJ-210. Bylo provedeno šest měření na každém vzorku a to, které se nejvíce lišilo bylo z vyhodnocovacích dat odebráno. V následující tabulce č. 17 jsou vynesena všechna měření a zprůměrována. Nejlepší drsnost vyšla u materiálu S960QL při řezání rychlostí 1,6 m/min. U nejpevnějšího materiálu Hardox 450 vyšla drsnost nejhorší.

Tabulka 17 Naměřené drsnosti u materiálů S235JR a S960QL

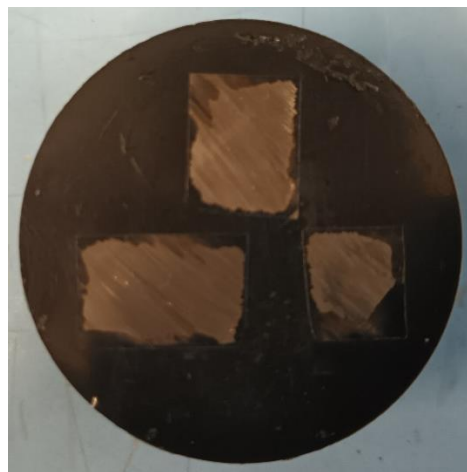
S235				S960			
Rychlost (m/min)	Rz	Ra	Rq	Rychlost (m/min)	Rz	Ra	Rq
1,6	19,07	3,445	4,05	1,6	17,14	1,74	2,73
1,6	29,6	4,07	5,35	1,6	9,5	1,64	2,01
1,6	23,39	3,55	4,54	1,6	15,6	1,97	2,55
1,6	25,39	4,63	5,58	1,6	14,77	1,92	2,51
1,6	26,24	4,7	5,66	1,6	9,69	1,58	1,94
průměr	24,74	4,08	5,04	průměr	13,34	1,77	2,35
1,3	24,2	3,18	4,28	1,3	13,57	2,4	3,04
1,3	21,3	3,78	4,56	1,3	13,2	1,9	2,4
1,3	22,8	3,28	3,99	1,3	10,5	1,85	2,3
1,3	22,82	4,19	5,23	1,3	15,48	2,14	2,65
1,3	21,22	4,02	4,85	1,3	14,3	2,43	2,9
průměr	22,468	3,69	4,582	průměr	13,41	2,144	2,658
1,9	26,77	4,1	5,25	1,9	12,32	1,97	2,43
1,9	35,18	5,4	6,83	1,9	11,28	2,14	2,57
1,9	31,8	4,85	6,09	1,9	13,02	2,28	2,77
1,9	39	6,76	8,24	1,9	13,6	1,97	2,44
1,9	33	4,23	5,67	1,9	11,99	1,98	2,41
průměr	33,15	5,07	6,42	průměr	12,442	2,068	2,524

Tabulka 18 Naměřená drsnost materiálu Hardox 450

Rychlost (m/min)	Rz	Ra	Rq
1,6	19,9	2,33	2,96
1,6	17,2	2,33	2,92
1,6	25,2	4,3	5,36
1,6	18,92	2,78	3,47
1,6	19,06	2,58	2,29
průměr	20,06	2,86	3,40
1,3	35,09	3,27	4,8
1,3	24,55	3,33	4,34
1,3	28,87	3,78	4,82
1,3	23,22	2,75	3,58
1,3	19,7	2,86	3,74
průměr	26,286	3,198	4,256
1,9	41,64	4,83	6,6
1,9	59,15	5,85	8,44
1,9	40,7	5,18	7,13
1,9	34,42	3,54	4,87
1,9	43,43	3,22	8,15
průměr	43,868	4,524	7,038

#### 4.5.2 Metalografická analýza

Vzorky byly následně v metalografické laboratoři nařezané na přesné metalografické kotoučové pile, aby bylo dosaženo vhodných rozměrů pro provedení výbrusu. Dále byly vzorky zalisovány při teplotě 70°C, po dobu sedmi minut (pokaždé po třech vzorcích stejného materiálu do jednoho metalografického vzorku (viz Obrázek 26).



Obrázek 26 Vzorky S235JR po zalisování v plastu

Následně byly zalisované vzorky broušeny na metalografické brusce/leštičce Buehler Beta s automatickou hlavou Vector (viz Obrázek 27). Nejprve byl použit brusný papír zrnitosti 180, přítlak byl 30 N a rychlost 300 otáček za minutu. Při broušení byla po celou dobu přiváděna na brusný papír voda. Po dvou minutách byl vyměněn brusný papír za druhý se zrnitostí 1200 a proces byl zopakován. Jako třetí byl použit papír P2000. Papír se na stroj

připevňoval buď pomocí přilnavé podložky Gecko, ke které přilnula fólie na rubové straně papíru nebo smáčením papíru a jeho přilepením.



*Obrázek 27 Proces leštění vzorků na disku master prep*

Po broušení následovaly ještě dvě operace leštění. První magnetickým diskem s netkanou textilií MD DAC. Na disk bylo naneseno smáčedlo a diamantová suspenze s diamantem o průměru 1  $\mu\text{m}$ . Leštění probíhalo po dobu 210s, rychlostí 150 otáček za minutu.

Na druhé leštění byl použit disk MD NAP a přípravek MasterPrep. Na kotouč byla nanesena destilovaná voda a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (master prep) o průměru zrna 0,25  $\mu\text{m}$ . Leštění probíhalo po dobu 210s a rychlostí 150 ot/min. Ihned po skončení procesu byly vzorky umyty vodou a oťřeny, poté nastříkány lihem a osušeny teplým vzduchem. Při kontrole pod mikroskopem byly na vzorku objeveny rýhy a tudíž byl krok leštění proveden znovu.

Po broušení a leštění následuje leptání vzorků Nitalem 2%. Nital se skládá ze 2% kyseliny dusičné a 98% lihu. Vzorek byl ponořen na pár vteřin do kyseliny a následně omyt teplou vodou, lihem a vysušen proudem teplého vzduchu.



Obrázek 28 Leštěné a leptané vzorky připravené na metalografické vyhodnocení

### 4.5.3 Měření tepelně ovlivněné oblasti

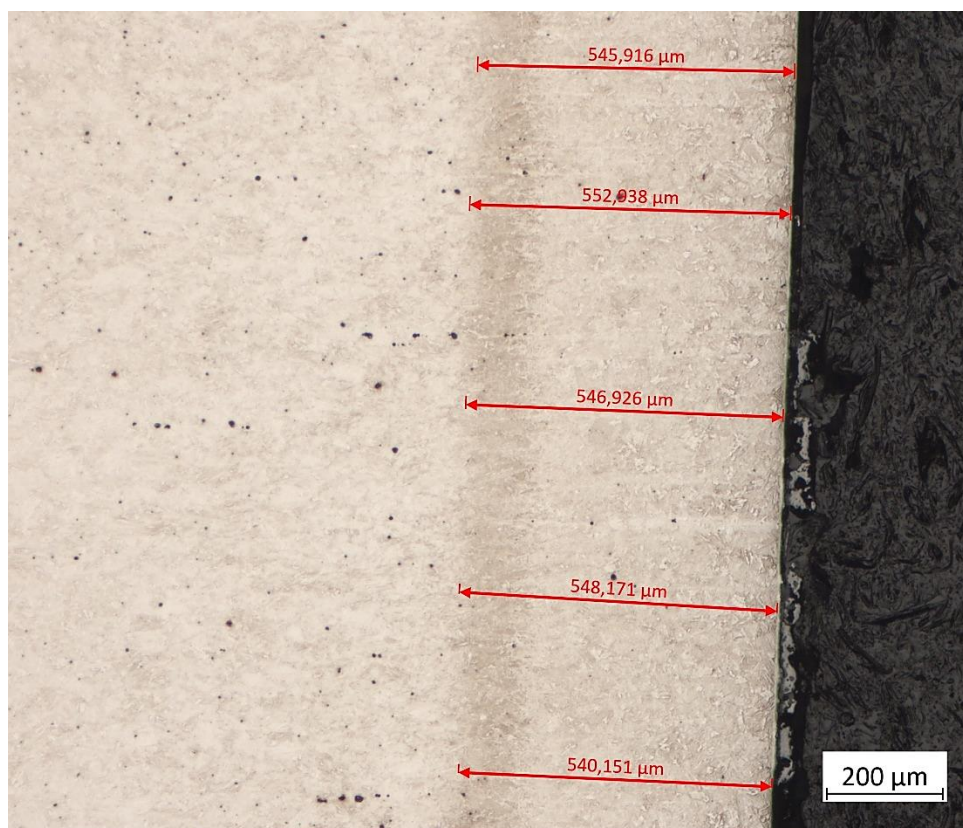
Na hotových vzorcích byla pod mikroskopem (C. Zeiss AxioObserver 1Dm) změřena TOO a úchylka kolmosti se zvětšením 50x a byly vytvořeny fotky mikrostruktury při zvětšení 200x. Tepelně ovlivněná oblast byla měřena ve třech místech na každém vzorku: nahoře, uprostřed a dole. Tímto bylo zjištěno, při jaké rychlosti a v jaké části vzorku vzniká největší TOO, a jak se chovají jednotlivé materiály vzhledem ke vzniku TOO.

Tabulka 19 Naměřené hodnoty velikostí TOO ve třech místech a při třech řezných rychlostech

Rychlost	1,6 m/min		Rychlost	1,3 m/min		Rychlost	1,9 m/min
S960	L (μm)		S960	L (μm)		S960	L (μm)
nahoře	424,5584		nahoře	433,7572		nahoře	422,1888
střed	439,6696		střed	520,3128		střed	437,05
dole	438,4298		dole	526,3432		dole	473,7744
Hardox	L (μm)		Hardox	L (μm)		Hardox	L (μm)
nahoře	512,6472		nahoře	661,0534		nahoře	575,3296
střed	541,9382		střed	653,0334		střed	546,8204
dole	548,3176		dole	685,1742		dole	519,9442
S235	L (μm)		S235	L (μm)		S235	L (μm)
nahoře	511,4918		nahoře	623,5342		nahoře	485,4916
střed	441,8768		střed	669,1108		střed	381,4538
dole	426,8348		dole	553,9642		dole	369,0416

Největší TOO vzniká při řezání rychlostí 1,3 m/min, rychlost je nejmenší ze všech tří použitých variant, a v materiálu se tak koncentruje nejvíce tepla. Materiál S235JR a

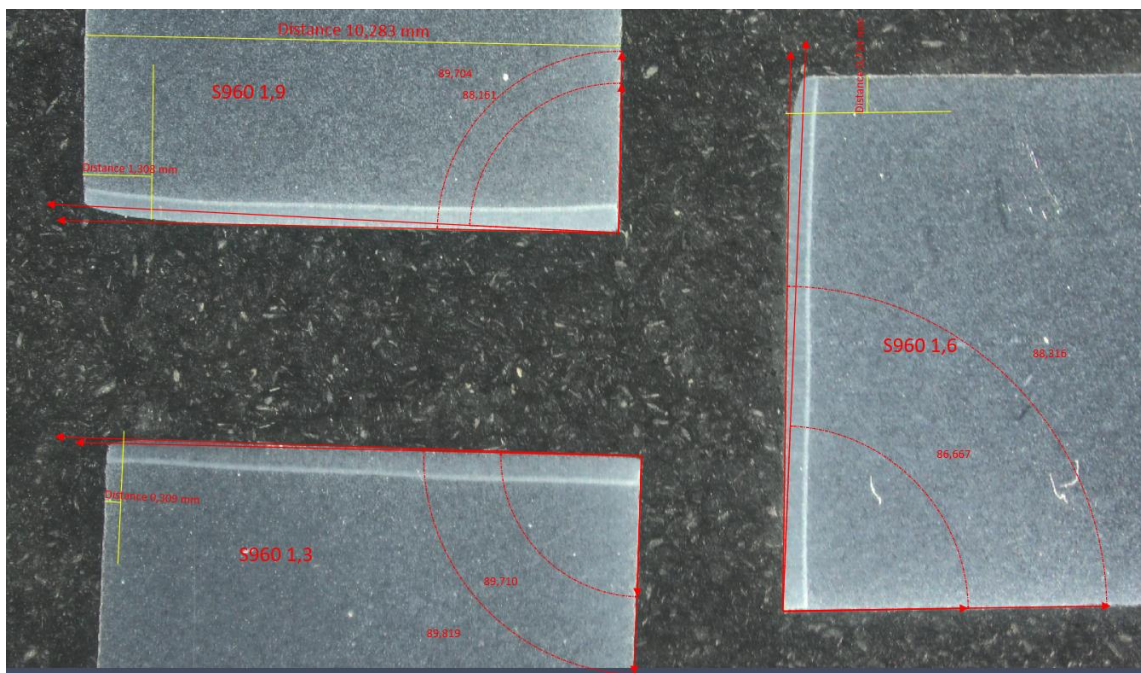
S960QL mají podobné výsledky, ale u materiálu Hardox 450 vyšly velikosti TOO nejhůře, s průměrným rozdílem 100  $\mu\text{m}$  od zbylých dvou materiálů. Největší tepelně ovlivněná oblast se většinou vyskytovala ve středu řezané plochy nebo na jejím spodním okraji.



Obrázek 29 Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti na Hardox 450 ve středu vzorku řezaném rychlostí 1,9 m/min

#### 4.5.4 Měření úchytky kolmosti

Kolmost řezu byla měřena podobně jako TOO. Na metalografickém výbrusu, na snímku z mikroskopu byl elektronicky (pomocí SW Zen) vynesena úhel mezi vodorovnou hranou materiálu a řeznou hranou. Jelikož na horní hraně vzniká zaoblení a spodní hrana není úplně ostrá, tyto hrany se zanedbávají a vynáší se pouze úhel nejdelší rovné části ve středu (viz postup měření uvedený v normě ČSN EN ISO 9013). Zároveň byla na snímcích změřena velikost zaoblení na horní straně obrobku, tam kde vstupuje plazmový oblouk do materiálu.



Obrázek 30 Měření zešikmení a velikosti zaoblení na třech vzorcích materiálu S960QL

Největší úchytky kolmosti i délka zaoblení horní hrany byla změřena u materiálu S235JR a pohybuje se okolo 2° při všech řezných rychlostech. Naopak nejmenší úchytky byly změřeny u materiálu S960QL, ale jako u jediného, největší úhel byl naměřen u hrany řezané rychlostí 1,6 m/min.

Tabulka 20 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu S235 JR

S235JR			
Řezná rychlost (m/min)	1,6	1,3	1,9
Délka zaoblení (mm)	1,39	1,59	1,59
Úchylka kolmosti (°)	1,91	1,96	2,08

Tabulka 21 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu Hardox450

Hardox 450			
Řezná rychlost (m/min)	1,6	1,3	1,9
Délka zaoblení (mm)	0,53	0,33	0,78
Úchylka kolmosti (°)	0,64	0,51	2

Tabulka 22 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu S960 QL

S960QL			
Řezná rychlost (m/min)	1,6	1,3	1,9
Délka zaoblení (mm)	0,73	0,3	1,3
Úchylka kolmosti (°)	1,7	0,2	0,3

## 5 Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na vyhodnocení kvality řezu při rozdílných procesních parametrech a dalších nastavení u různých materiálů řezaných plazmou. Hlavním tématem bylo zhodnocení kvality při výrobě kruhových otvorů o průměru 10 mm na třech materiálech tloušťky také 10 mm. Na nařezaných dílech byla hodnocena drsnost povrchu, úchylka kolmosti, kruhovitost, velikost tepelně ovlivněné oblasti a zaoblení na horní straně řezu. Řezy byly provedeny za různých procesních parametrů, aby bylo možné porovnat, jaké nastavení je vhodné pro různé zkoušené materiály.

Experimenty byly provedeny na materiálech S235JR, Hardox 450 a S960QL. Tyto tři materiály byly zvoleny kvůli jejich rozdílným vlastnostem a použití. První je běžná konstrukční ocel, Hardox 450 je otěruvzdorná ocel a třetí zmíněný je vysokopevnostní ušlechtilá ocel.

S235JR je nelegovaná konstrukční jakostní ocel, se zaručenou hodnotou nárazové práce 27J při +20 °C. Není určena k tepelnému zpracování kromě žíhání. Je vhodná pro svařované, šroubované a nýtované konstrukce.

Hardox 450 je otěruvzdorná ocel s dobrými vlastnostmi v abrasivním a agresivním prostředí. Má dobrou pevnost i houževnatost a umožňuje použití menších tlouštěk plechu než u jeho předchůdce (oceli Hardox 400).

S960QL je vysokopevnostní konstrukční, legovaná a ušlechtilá ocel s minimální mezí kluzu 960 N/mm<sup>2</sup>. Ocel je zušlechťená a má zaručené hodnoty nárazové práce 40J do 40°C. Používá se na namáhané svařované konstrukce.

Prvním krokem při výrobě vzorků bylo určit, jaké parametry budou zvoleny při řezání. Z toho důvodu bylo vyhotoveno devět otvorů, každý při jiném nastavení. Z těchto vzorků se následně vybrali tři, jejichž parametry nastavení byly použity. Následně bylo zhotoveno devět otvorů na každém ze tří materiálů. Jelikož u kruhových otvorů lze jen obtížně měřit drsnost povrchu a TOO, byly zhotoveny ještě vzorky přímých řezů. Z každého materiálu se vyřízly tři vzorky při rozdílných rychlostech řezání. Použité rychlosti jsou 1,3, 1,6 a 1,9 m/min. Na těchto vzorcích byla proměřena drsnost a následně byly nařezány a připraveny pro metalografickou analýzu. Při analýze byla vyhodnocena pod mikroskopem velikost TOO, úchylka kolmosti a velikost zaoblení na horní hraně řezu. Na kruhových otvorech byla pomocí souřadnicového měřicího centra změřena kruhovitost a úchylka kolmosti.

### 5.1 Shrnutí výsledků

Úchylka kolmosti a zaoblení na horní hraně vyšlo u kruhových otvorů nejhůře na materiálu S235JR. Oproti tomu, nejlepších výsledků bylo dosaženo u materiálu S960QL. Materiál Hardox 450 měl nepatrně horší úchylku kolmosti než S960QL. Nejlepších výsledků obecně bylo dosaženo při rychlosti 1,3 m/min. Největší rozdíl při měření úchylky kolmosti na přímých řezech a na kruhových otvorech se projevil u materiálu S960QL, kdy na přímých řezech měl úchylku nejlepší (0,7°) ale na kruhových otvorech byla více než šestkrát větší (4,63 °).

Největší TOO vzniká při řezání rychlostí 1,3 m/s, rychlost je nejmenší ze všech tří použitých variant, a v materiálu se tak koncentruje nejvíce tepla. Materiál S235JR a S960QL mají podobné výsledky, ale u materiálu Hardox 450 vyšly velikosti TOO nejhůře, s průměrným rozdílem 100 µm od zbylých dvou materiálů.

Měřená drsnost povrchu vyšla až dvakrát horší při řezání materiálů rychlostí 1,9 m/s než při jiných rychlostech. Objevila se však jedna výjimka, kdy u materiálu S960 vyšla drsnost při všech rychlostech téměř stejně. Při řezání materiálu Hardox 450 vyšla drsnost při všech rychlostech horší než u jiných materiálů. Potvrdilo se, že čím vyšší rychlost tím bývá povrch horší.

Kruhovitost na obou hladinách vyšla u všech materiálů obdobně, a to průměrně 0,35 mm. Nejlepší kruhovitost i úchylka kolmosti vyšla při řezání druhým nastavením, tedy při rychlosti 1,4 m/min, předčasném vypnutí oblouku 2 mm, přejetí po dokončení kontury 4 mm a při zpomalení před koncem řezu na 90%.



## 6 Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha : 053401, 2019.
- [2] Gostimirovic, Marin. *An Experimental Analysis of Cutting Quality in Plasma Arc Machining*. Novi Sad : ADVANCED TECHNOLOGIES & MATERIALS, 2020.
- [3] Dolejský, Tomáš. *TEPELNÉ DĚLENÍ MATERIÁLU - ŘEZÁNÍ PLAZMOU*. OSTRAVA : ZEROSS, 2018.
- [4] ČSN EN ISO 4063 Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování. 2011. 050011.
- [5] ESAB. [Online] ESAB, 2023. [Citace: 28. 9 2023.] [https://esab.com/us/nam\\_en/esab-university/articles/what-is-oxy-fuel-cutting/](https://esab.com/us/nam_en/esab-university/articles/what-is-oxy-fuel-cutting/).
- [6] Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D. *Vliv technologie dělení materiálů na jejich povrchové vlastnosti*. Zlín : Univerzita tomáše Bati ve Zlíně , 2019.
- [7] SIWECO. Dělení materiálu plamenem. [Online] SIWECO, 2023. [Citace: 28. 9 2023.] <https://www.siweco.cz/autogenni-technika/deleni-materialu-plamenem-33>.
- [8] TWI. OXYFUEL CUTTING - PROCESS AND FUEL GASES. [Online] The Welding Institute, 10 2000. [Citace: 26. 12 23.] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/oxyfuel-cutting-process-and-fuel-gases-049>.
- [9] Ing. Tomáš Zmydlený, IWE. Tepelné dělení materiálů. [Online] <https://docplayer.cz/70572546-Tepelne-deleni-materialu.html>.
- [10] KT MetSteel. Řezání kyslíkem: Využití ve strojírenské výrobě. [Online] KT MetSteel, 15. 3 2021. [Citace: 26. 12 2023.] <https://www.ktmetsteel.cz/rezani-kyslikem-vyuziti-ve-strojirenske-vyrobe>.
- [11] Khatak, Pankaj. Science direct Laser cutting technique: A literature review. *Science direct*. [Online] 25. 8 2021. [Citace: 19. 10 2023.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321056947>.
- [12] Antonio Riveiro, Felix Quintero. *Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas*. Vigo : MDPI, 2019.
- [13] Krajcarz, Daniel. Elsevier-Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting. [Online] 2013. [Citace: 21. 9 2023.] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003075?via%3Dihub>.
- [14] Kjellberg. Plasma vs. Fibre Laser. [Online] Kjellberg. [Citace: 25. 9 2023.] <https://kjellbergcutting.com/plasma-laser-comparison.html>.
- [15] ELUC. Plazmové technologie. [Online] ELUC. [Citace: 26. 12 2023.] <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1419>.
- [16] Tejkal, Roman. OBRÁBĚNÍ PAPERSEM PLAZMY . [Online] 2008. [Citace: 3. 10 2023.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6702](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6702).

- [17] Smith, Finbar. SOLAS- Plasma Arc Cutting. [Online] [Citace: 23. 9 2023.] [https://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M2\\_U7\\_Plasma%20Arc%20cutting.pdf](https://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M2_U7_Plasma%20Arc%20cutting.pdf).
- [18] Hypertherm. Troubleshooting cut quality problems – parts have too much dross. [Online] [Citace: 2. 10 2023.] <https://www.hypertherm.com/en-US/resources/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/too-much-dross/>.
- [19] —. Troubleshooting cut quality problems – cut angularity. [Online] [Citace: 2. 10 2023.] <https://www.hypertherm.com/en-US/resources/system-support/maintenance-and-use/cut-quality/cut-angularity/>.
- [20] Kjellberg. HiFocus 280i neo. [Online] Kjellberg Cutting, 2023. [Citace: 17. 10 2023.] <https://www.kjellberg.de/catalog-details/hifocus-280i-neo.html>.
- [21] Kjellberg cutting. [Online] Kjellberg cutting, 2023. [Citace: 28. 9 2023.] <https://kjellbergcutting.com/cutting-technologies.html>.
- [22] Hypertherm. [Online] Hypertherm, 2023. [Citace: 28. 9 2023.] <https://www.hypertherm.com/en-US/solutions/technology/choosing-a-cutting-process/>.
- [23] Státní zdravotnický ústav. Hluk v pracovním prostředí. [Online] Státní zdravotnický ústav, 2023. [Citace: 3. 1 2024.] <https://szu.cz/temata-zdravi-a-bezpecnosti/pracovni-prostredi-a-zdravi/factory-pracovniho-prostredi/fyzikalni/hluk-prac/hluk-v-prac-prost/>.
- [24] Kjellberg. Silent Cut. [Online] Kjellberg, 2023. [Citace: 2. 11 2023.] <https://www.kjellberg.de/silent-cut.html>.
- [25] —. HotWire – Plasma cutting of interrupted Structures. [Online] Kjellberg Cutting. [Citace: 2. 10 2023.] <https://kjellbergcutting.com/hotwire.html>.
- [26] SOITAAB. SOITAAB HotWire Plasma Grate Cutting. [Online] SOITAAB, 2022. [Citace: 1. 11 2023.] <https://www.soitaabusa.com/wp-content/uploads/2017/08/Soitaab-Plasma-Hotwire-Grate-Cutting-4-19.pdf>.
- [27] Hypertherm. HiFocus 130/160/161i PerCut 221 M parts list. [Online] Hypertherm, 2023. [Citace: 3. 1 2024.] <https://www.hypertherm.com/en-US/solutions/consumables-and-torches/centricut-plasma-consumables/kjellberg-cutting-systems/hifocus-percut-221m-parts-list/>.
- [28] Vanad. Vanad Proxima. [Online] Vanad . [Citace: 3. 12 2023.] [https://vanad.cz/public/dokumenty/cs\\_ke-stazeni/KL\\_CZ\\_PROXIMA.pdf](https://vanad.cz/public/dokumenty/cs_ke-stazeni/KL_CZ_PROXIMA.pdf).
- [29] Feron. Materiálové normy. [Online] Feron. [Citace: 17. 11 2023.] <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>.
- [30] SSAB Oxelosund. Hardox 450. [Online] SSAB Oxelosund. [Citace: 17. 11 2023.] <https://www.oteruvzdorneplechy.cz/pdf/hardox-techsupport-55.pdf>.
- [31] S Tools. stools-shop. [Online] S Tools. [Citace: 16. 11 2023.] <https://www.stools-shop.cz/drsnomer-surftest-sj-210--mm-/>.

[32] Ing.Heinrich, Michal. *Effect of Plasma Gases on Cut Quality during Plasma Arc Cutting*. Ostrava : VŠB, 2007.

## Seznam zkratek

Zkratka:	Vysvětlení:	Překlad:
PAC	Plasma arc cutting	Řezání plazmou
TIG	Tungsten Inert Gass	Svařování wolframovou elektrodou
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	
tzn.	To znamená	
např.	například	
CNC	Computer Numerical Control	Číslicově řízený stroj
CC	Contour cut	Řezání kontury
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	
apod.	A podobně	
atd.	A tak dále	
tzv.	takzvaně	
Resp.	respektive	
Min.	minimální	
Max.	maximální	

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení konvenčních metod Dělení materiálu .....	2
Obrázek 2 Rozdělení nekonvenčních metod řezání.....	3
Obrázek 3 Princip řezání kyslíkem [8] .....	4
Obrázek 4 Konstrukce hořáku pro řezání kyslíkem [9].....	5
Obrázek 5 Schéma principu řezání laserem [6] .....	7
Obrázek 6 Schéma principu řezání vodním paprskem [6].....	8
Obrázek 7 měření drsnosti povrchu řezu pomocí parametru $R_z5$ [1] .....	11
Obrázek 8 Určování úchylky kolmosti a úchylky úhlu při plazmovém řezání [1].....	12
Obrázek 9 ilustrace třech možností natavení horní hrany řezaného materiálu [1] .....	12
Obrázek 10 Schéma plazmového hořáku [15].....	13
Obrázek 11 Výměnné spotřební díly plazmového hořáku [17] .....	14
Obrázek 12 Příklady řezů s nevhodným nastavením [19] .....	15
Obrázek 13 Ukázka úchylky kolmosti na řezu plazmou [19].....	17
Obrázek 14 Logo společnosti Kjellberg [21].....	17
Obrázek 15 Logo společnosti ESAB [5].....	17
Obrázek 16 Logo Hypertherm [22] .....	17
Obrázek 17 Porovnání běžných hlasitostí s plazmovým řezáním [24].....	19
Obrázek 18 Ilustrační obrázek sestavy HotWire [25].....	19
Obrázek 19 Hořák PerCut 451 a jeho spotřební díly [27] .....	22
Obrázek 20 Řezací CNC stroj Vanad Proxima [28].....	23
Obrázek 21 Spotřební díly pro sestavu Contour cut, a použité řezací parametry: napětí a proud, plazmový a vířivý plyn.....	25
Obrázek 22 Vzorek Hardox a S960 pro vyhodnocování kvality řezu malých otvorů .....	27
Obrázek 23 Drsnoměr mitutoyo SJ-210 [31].....	28
Obrázek 24 Výsledky měření kruhovitosti otvoru ve dvou hladinách (-1,5 a -8,5) u materiálu S235 .....	30
Obrázek 25 Vzorky přímých řezů.....	31
Obrázek 26 Vzorky S235JR po zalisování v plastu.....	33
Obrázek 27 Proces leštění vzorků na disku master prep .....	34
Obrázek 28 Leštěné a leptané vzorky připravené na metalografické vyhodnocení .....	35
Obrázek 29 Měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti na Hardox 450 ve středu vzorku řezaném rychlostí 1,9 m/min .....	36
Obrázek 30 Měření zešíkmení a velikosti zaoblení na třech vzorcích materiálu S960QL37	

## Seznam tabulek

Tabulka 1 porovnání metod plazmového, kyslíkového a laserového řezání [9].....	10
Tabulka 2 technické parametry plazmového zdroje HiFocus 280i Neo [17].....	21
Tabulka 3 Hořák PerCut 451, spotřební díly a jejich označení.....	22
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti materiálu S235 JR .....	23
Tabulka 5 Chemické složení materiálu S235 JR.....	24
Tabulka 6 Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 450.....	24
Tabulka 7 Chemické složení materiálu Hardox 450.....	24

Tabulka 8 Mechanické vlastnosti materiálu S960 QL .....	24
Tabulka 9 Chemické složení materiálu S960 QL .....	25
Tabulka 10 Řezné parametry použité při prvním řezání testovacího polotovaru .....	26
Tabulka 11 Řezné parametry pro výrobu vzorků na vyhodnocování kvality řezu malých otvorů .....	27
Tabulka 12 Drsnosti S235JR měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min .....	28
Tabulka 13 drsnosti S960QL měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min .....	29
Tabulka 14 drsnosti Hardox 450 měřené u vzorků řezaných rychlostí 1,6 a 1,4 m/min ..	29
Tabulka 15 výsledky měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u materiálu S235 JR (vlevo) a Hardox 450 (vpravo) .....	30
Tabulka 16 výsledky měření kruhovitosti a úchylky kolmosti u materiálu S960QL .....	31
Tabulka 17 Naměřené drsnosti u materiálů S235JR a S960QL .....	32
Tabulka 18 Naměřená drsnost materiálu Hardox 450 .....	33
Tabulka 19 Naměřené hodnoty velikostí TOO ve třech místech a při třech řezných rychlostech .....	35
Tabulka 20 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu S235 JR .....	37
Tabulka 21 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu Hardox450 .....	37
Tabulka 22 úchylka kolmosti a délka zaoblení u materiálu S960 QL .....	37