



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Barbora Michálková

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: **B 2343 VÝROBA A EKONOMIKA VE STROJÍRENSTVÍ**

STUDIJNÍ OBOR: **2303R014 TECHNOLOGIE, MATERIÁLY A EKONOMIKA
STROJÍRENSTVÍ**

Praha 2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Michálková** Jméno: **Barbora** Osobní číslo: **483351**
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:

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 plazmového řezání používaných předními světovými výrobci a popis hlavních procesních parametrů
- 3) Návrh experimentu – vytvoření řezů mapujících vliv parametrů
- 4) Vyhodnocení vytvořených zkušebních vzorků z hlediska ovlivnění geometrie, struktury a mechanických vlastností
- 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 Zmydlený, ESAB Vamberk, s.r.o. člen koncernu

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

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

Studentka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi 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

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Ladislavovi Kolaříkovi Ph.D. za ochotný přístup, věnovaný čas a cenné rady. Dále bych chtěla poděkovat panu Ing. Tomáši Panáčkovi a zaměstnancům ústavu Strojírenské technologie za jejich čas a pomoc při experimentu. Také bych ráda poděkovala panu Ing. Tomáši Zmydlenému Ph.D. za poskytnutí cenných informací.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání. Teoretická část nejdříve stručně popisuje způsoby tepelného dělení. Poté se zaměřuje na plazmové řezání, vysvětluje princip a uvádí trendy v této oblasti. Dále vzájemně porovnává zmíněné technologie tepelného dělení a uvádí vady řezu tepelného dělení. Praktická část je zaměřena na kvalitu povrchu řezu otvorů. Uvádí vliv úhlu nájezdu a přejetí na kvalitu povrchu řezu.

Název diplomové práce:	Vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání
Autor práce:	Barbora Michálková
Vedoucí práce:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Zmydlený Ph.D.
Akademický rok:	2020/21
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D.
Rozsah práce:	72 stránek, 15 tabulek, 62 obrázků
Klíčová slova:	Tepelné dělení, plazmové řezání, vady řezů

Annotation

This bachelor thesis deals with the influence of cutting parameters on the quality of cutting edges after plasma cutting. The theoretical part first briefly describes the methods of thermal separation. Then it focuses on plasma cutting, explains the principle and sets out trends in this area. It also compares the mentioned technologies of thermal separation and sets out the cut defects of thermal division. The practical part is focused on the quality of surfaces cut using plasma cutting technology. It shows the effect of the angle of approach and overrun on the quality of the cutting surface.

Title of the final thesis:	Influence of cutting parameters on the quality of cutting edges after plasma cutting
Author:	Barbora Michálková
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D.
Consultant:	Ing. Tomáš Zmydlený Ph.D.
Academic year:	2020/21
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík Ph.D.
Extent:	72 pages, 15 tables, 62 pictures
Keywords:	Thermal separation, plasma cutting, cutting defects

Obsah

Úvod	10
1 Způsoby tepelného dělení materiálu	11
1.1 Řezání kyslíkem.....	11
1.2 Laserové řezání.....	12
2 Řezání plazmou	13
2.1 Termodynamické děje v plazmatu	14
2.2 Princip plazmového řezání	16
2.3 Historie plazmového řezání.....	17
2.4 Plazmová zařízení	18
2.5 Elektrické zapojení plazmových hořáků	18
2.5.1 Přenesený oblouk (závislé zapojení)	19
2.5.2 Nepřenesený oblouk (nezávislé zapojení)	19
2.5.3 Kombinované zapojení.....	20
2.6 Druhy plynů při plazmovém řezání	20
2.6.1 Teploty plazmy v závislosti na plynech	21
2.7 Rozdělení plazmových zařízení podle konstrukce	21
2.7.1 Plazma bez ochranného média	21
2.7.2 Plazma s ochranným médiem	22
2.7.3 Plazma s vodní clonou.....	22
2.7.4 Plazma se vstřikováním vody	22
2.7.5 Plazma pod vodou.....	23
2.7.6 HD plazma	23
2.8 Plazmové hořáky	23
2.8.1 Elektroda	24
2.8.2 Vodní chlazení	26
2.8.3 Vířivý kroužek.....	26
2.8.4 Tryska	27
2.8.5 Kryt trysky.....	27
2.8.6 Krytka	28
2.8.7 Ochranný kryt.....	28
2.9 Parametry řezání plazmou	29
2.9.1 Řezná rychlost	29

2.9.2	Řezný proud	30
2.9.3	Řezná výška	30
2.10	Bezpečnost práce při řezání plazmou.....	31
3	Porovnání technologií tepelného dělení	31
4	Tepelně ovlivněná oblast po tepelném dělení	32
5	Vady řezů	32
6	Kvalita řezu při tepelném dělení.....	34
7	Způsoby zvýšení kvality řezu při řezání plazmou.....	38
8	Trendy v oblasti řezání plazmou	38
8.1	HiFocus neo – Kjellberg	39
8.1.1	Silent cut.....	39
8.1.2	Contour cut	40
8.1.3	Contour cut speed.....	41
8.2	M ³ plazma - ESAB.....	41
8.2.1	SmartBevel™	41
8.2.2	SmartCycle™	42
8.2.3	SquareCut.....	42
8.2.4	Enhanced Hole	43
8.3	HyPerformance – Hypertherm	43
8.3.1	Rapid Part.....	43
8.3.2	PowerPierce	43
8.3.3	True Hole	44
8.3.4	True Bevel.....	44
9	Problémy kvality řezných hran při řezání vnitřních kruhových otvorů	45
10	Experimentální část.....	46
10.1	Experimentální zařízení - Plazmový řezací stroj	46
10.1.1	Plazmový řezací zdroj Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo	47
10.1.2	CNC řídicí systém Vanad Proxima 20	48
10.2	Použitý základní materiál.....	48
10.3	Popis experimentu.....	49
10.4	Programování plánu řezu	51
10.5	Výroba a následná úprava vzorku	52
10.6	Měření pomocí CNC měřicího stroje	54
10.7	Měření drsnosti řezné plochy kruhových děr	58

Závěr	63
Bibliografie	64
Zdroje obrázků	69
Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	71
Seznam grafů.....	72
Seznam elektronických příloh	72

Úvod

Se zvyšující se potřebou zrychlit a zefektivnit strojní výrobní proces roste i tlak na zefektivnění předvýrobní fáze, kterou je příprava a dělení polotovarů pro budoucí výrobky. Plasma je díky své univerzálnosti, cenové dostupnosti, přijatelným provozním nákladům, vysoké produktivitě a uspokojivé přesnosti a jakosti řezů, stále oblíbenější technologií pro přípravu výpalků. Plasmové dělicí stroje se tak stávají už takřka nedílnou součástí přípravy polotovarů v každé větší společnosti zabývající se strojírenskou výrobou. Nové funkce, rozšiřující se příslušenství, výkonné CNC řídicí systémy a automatické 3D hlavy umožňují mimo jiné zrychlit předvýrobní fázi, ale také přenést do předvýrobní fáze na plasmové dělicí stroje část výrobních operací jako jsou např. příprava děr a také úkosů pro budoucí svary.

Aby mohlo být jednoduché obrábění bez vysokých nároků na přesnost, jako je např. vrtání volných děr či frézování vodících drážek a úkosů, nahrazeno pálením plasmou, je potřeba docílit vyšší přesnosti a kvality řezu. Kvalita řezu se tak stává jedním z klíčových parametrů procesu dělení plasmou. Tato bakalářská práce si klade za cíl zmapovat vliv základních procesních parametrů na výše zmiňovanou kvalitu řezu u plazmového řezání vnitřních otvorů.

1 Způsoby tepelného dělení materiálu

Tepelné dělení materiálu nachází v průmyslové výrobě velmi široké uplatnění. Obecně jsou způsoby tepelného dělení materiálu mnohem produktivnější než mechanické způsoby řezání a dělení materiálu. [1]

Mezi hlavní způsoby tepelného dělení materiálu můžeme zařadit řezání kyslíkem, laserem a plazmou. Jelikož je tato práce zaměřena primárně na řezání plazmou, budu se ostatním způsobům tepelného dělení materiálu věnovat jen okrajově.

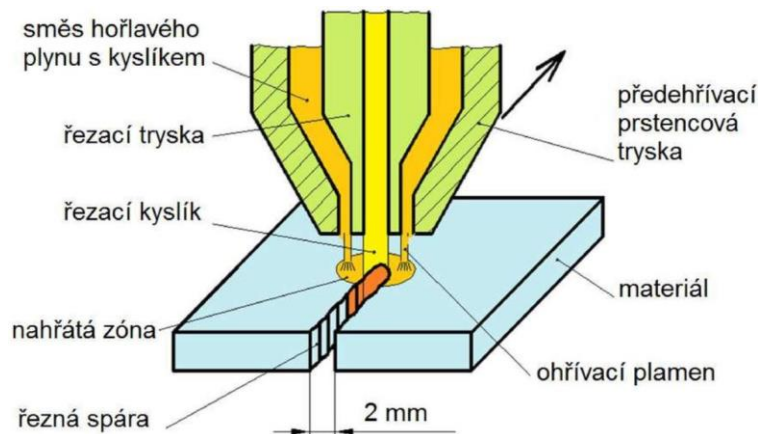
1.1 Řezání kyslíkem

Řezání kyslíkem spočívá v ohřátí základního materiálu v místě řezu na zápalnou teplotu řezaného materiálu tzv. nahřívacím plamenem (viz obrázek 1), který je tvořený směsí hořlavého plynu a kyslíku (obdobně jako při svařování plamenem). Zápalná teplota je pro každý materiál jiná a závisí především na chemickém složení materiálu. Po ohřátí materiálu se do reakce dodá čistý řezný kyslík pod tlakem, který zajistí spalování kovu a utvoření řezné spáry. Řezání kyslíkem se používá v různých odvětvích a většinou tam, kde jsou mechanické metody dělení nedostatečné nebo příliš pomalé. [1]

U řezání kyslíkem platí omezení, které nazýváme podmínky řezatelnosti. Dle [2] je nutné, aby kov splňoval těchto pět podmínek:

- Zápalná teplota řezaného kovu musí být menší nebo rovna jeho teplotě tavení. Pokud by tato podmínka neplatila, docházelo by pouze k lokálnímu odtavení materiálu (a ne spalování), což by mělo za následek velmi nekvalitní řeznou spáru.
- Při hoření kovu musí vznikat dostatečně velké teplo, aby se pokryly ztráty tepla způsobené odvodem a reakce mohla samočinně dále pokračovat.
- Materiál musí být v průběhu řezání dostatečně přehříván v celém průřezu před čelem řezacího kyslíku, a to nejméně na zápalnou teplotu.
- Tavicí teplota strusky (obsahující kysličníky) musí být nižší než tavicí teplota řezaného kovu. Struska musí být schopna dosáhnout dostačující tekutosti, aby mohla být odstraněna pomocí kyslíku z řezné spáry.

Tyto podmínky dobře splňuje obyčejná (nízkouhlíková a nízkolegovaná) ocel. Zápalná teplota této oceli se pohybuje v rozmezí 1030 až 1250 °C. Problém ovšem nastává u vysokolegovaných ocelí, nezelezných kovů a šedé litiny, tyto materiály kyslíkem řezat nelze. [2]

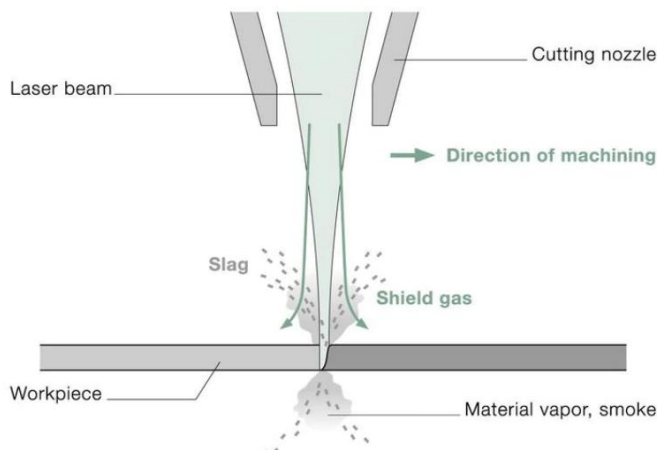


Obrázek 1 - Řezání kyslíkem [50]

1.2 Laserové řezání

Laser je optický zdroj elektromagnetického záření. Laserový paprsek je tvořen fotony, což jsou částice světla, které jsou generovány na stejné vlnové délce, což znamená, že jsou monochromatické. Dále jsou fotony koherentní, což znamená že jsou generovány ve stejné fázi a nízko rozbíhavé (= laserový svazek je úzký i na dlouhé vzdálenosti). V průmyslové praxi se nejčastěji používají pevnolátkové a plynové lasery, které obvykle pracují v infračervené oblasti elektromagnetického spektra. Při laserovém řezání může dojít dle [3] k jedné ze tří různých variant vytváření řezu:

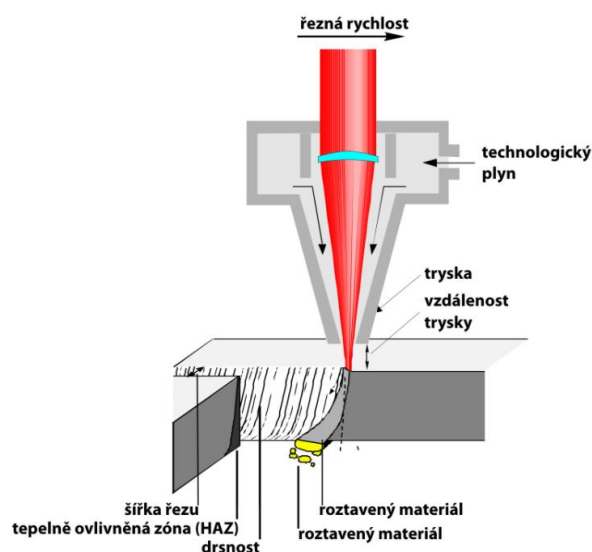
- Sublimačnímu řezání
 - Princip tohoto řezání je založen na odpařování řezaného materiálu laserem. Přiváděný plyn poté odstraňuje vzniklé páry a izoluje plochy řezu od okolí. Vzniká úzký řez s vysokou kvalitou. Tento druh laserového řezání je velmi energeticky náročný a proces pomalý. Tato technologie je k řezání plechů moc drahá, využívá se například v lékařství při řezání stentů. [4]



Obrázek 2 - Laserové sublimační řezání [4]

překlad: laser beam– laserový paprsek, cutting nozzle- řezací tryska, direction of machining- směr obrábění, slag- struska, shield gas- ochranný plyn, workpiece- obrobek, material vapor- pára materiálu, smoke- kouř

- Tavnému řezání
 - Laser u tohoto druhu řezání slouží k natavení základního materiálu, který je poté vyfukován ze spáry inertním plynem. Potřebná energie je mnohem menší než u předchozího způsobu řezání, ale častým jevem je zhoršená kvalita řezu kvůli tuhoucím kapkám taveniny na spodním okraji řezaného materiálu. [3]



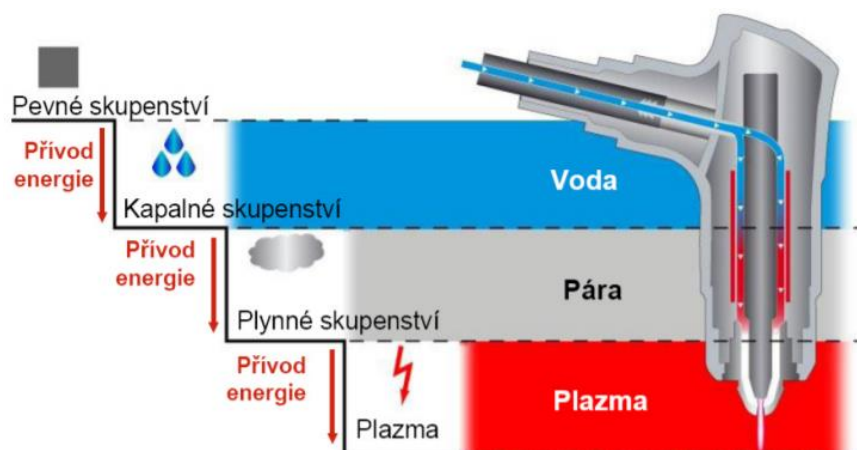
Obrázek 3 - Laserové tavné řezání [3]

- Oxidačnímu řezání
 - Oxidační řezání bývá využíváno u běžných a konstrukčních ocelí díky své vysoké řezné rychlosti. Jako asistenční plyn je používán kyslík. Řezaný materiál je ohřátý nad zápalnou teplotu a dochází k exotermické reakci. Kvalita řezu není dobrá, ale většinou dostačující. [3]

2 Řezání plazmou

Plazma je definována jako čtvrté skupenství látky. Mezi ostatní tři skupenství patří pevná látka, kapalina a plyn. Plazmu získáme z plynu dodáním další tepelné energie díky alespoň částečné ionizaci (viz kapitola 3.1). Látka se obecně stane plazmatem, obsahuje-li volné nosiče náboje. Tyto volné náboje umožňují látce reagovat na elektrická či magnetická pole a vytvářet je. K vytvoření plazmatu můžeme dojít několika cestami – zvýšením tlaku, elektrickým výbojem nebo zvýšením teploty. V průmyslové praxi se nejčastěji využívá elektrického výboje. [5]

Plazmové řezání nachází nejčastěji uplatnění v řezání středně silných materiálů. Nelegované oceli jdou plazmou dělit do tloušťky cca 50 mm, vysokolegované oceli a hliník do 30 mm. Maximální dosažitelná rezná rychlost je 6 m/min, což je oproti například laserovému řezání zhruba poloviční rychlost. Kvalita povrchu řezu je často negativně ovlivněna podkosením řezu způsobeným klesající kinetickou energií plazmatu v závislosti na tloušťce materiálu. V dnešní době jsou již dříve hojně používané vzduchové plazmy nahrazovány modernějšími plazmovými stroji, které umí pracovat s více druhy plazmových plynů. Mezi nevýhody plazmového řezání patří hlučnost procesu a velké množství škodlivých emisí. Těmto nevýhodám se lze vyhnout díky řezání pod vodou. [1; 6]



Obrázek 4 - Skupenství plazmy [51]

Plyn, který se nachází v ionizovaném stavu se tedy nazývá plazma. Je to soubor kladně i záporně nabitých částic a částic bez elektrického náboje. Celkově je plazma elektricky neutrální, jelikož je počet kladně a záporně nabitých částic v jednotce objemu stejný. V elektrickém výboji slouží plazma k tomu, aby vytvořila vodivou dráhu v prostředí, které původně vodivé nebylo. [6]

2.1 Termodynamické děje v plazmatu

V plazmatu se odehrávají čtyři nejdůležitější termodynamické děje, a to disociace, ionizace, excitace a rekombinace.

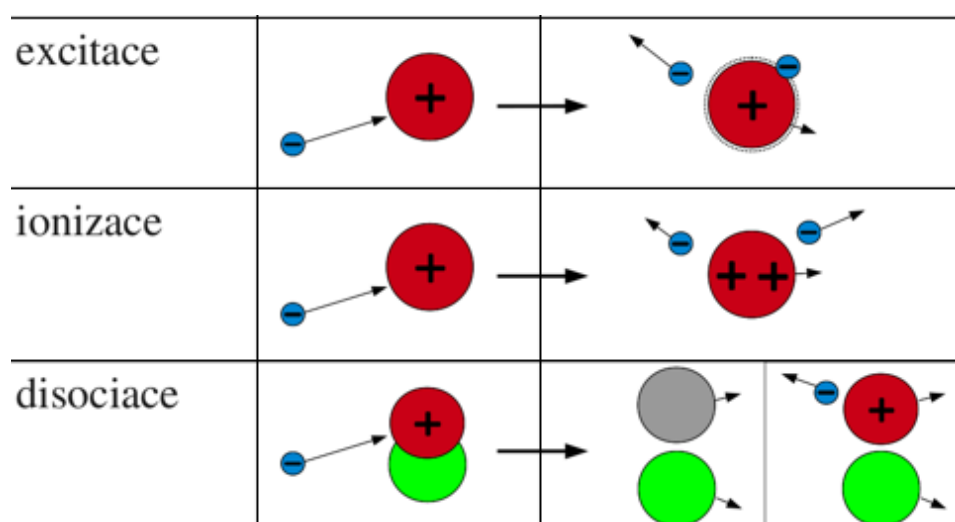
Když plynu dodáme energii (kinetickou nebo tepelnou), jeho molekuly se začnou hýbat. Čím větší množství energie dodáme, tím rychleji se budou částice pohybovat. Bude docházet k srážkám. Existují pružné a nepružné srážky. U srážek pružných zůstává celková hybnost a mění se jen směr a rychlost částic, zatímco u srážek nepružných se kinetická energie mění. Plazma se odlišuje od neutrálního plynu právě díky nepružným srážkám. [6]

Pokud je překročena tzv. disociační energie (dodaná kinetická energie je větší), dochází k disociaci plynu. Ta se projeví tak, že se molekuly plynu při srážce rozpadnou na jednodušší částice, jako jsou odtržené molekuly, excitované atomy nebo ionizované atomy i molekulové ionty. Díky tomuto ději se zvyšuje počet částic, které jsou schopné vést elektrický náboj. Příkladem je vodík, který je složen ze dvou atomů. Při dodání disociační energie o velikosti 4,48 eV dojde k rozštěpení molekuly na dva samostatné atomy. Disociace probíhá v rozmezí teplot 2 500 °C až 6 000 °C. [6; 7]

Při dodání další energie nastává ionizace. Ionizace spočívá v tom, že se z tzv. valenčního obalu atomu vyrazí díky nepružné srážce elektron. Valenční obal je nejvzdálenější obal od jádra. Po vyražení elektronu se z atomu stává kladný zbytkový iont. Volné vyražené sekundární elektrony poté přispívají ke zvyšování vodivosti. Primární elektrony, které taky zvyšují vodivost, jsou emitovány přímo z elektrody při jejím rozžhavení. K ionizaci plynu dochází při vysokých teplotách kolem 20 000 °C. Částečná ionizace nastává v elektrickém oblouku mezi anodou a katodou za teplot v rozmezí 5 000 °C až 15 000 °C. [6; 7]

Excitace je děj, při kterém přejde elektron atomu z nižší energetické hladiny do vyšší díky přijaté energii. K posunu využije přecházející elektron energii, kterou vykoná narážející elektron. Tento jev není stabilní což způsobuje to, že vyražený elektron přejde po čase zpět na původní hladinu, a přitom vyzáří kvantum energie (= tzv. spontánní emise). [6; 7]

Rekombinace je opakem ionizace, energie se při tomto ději uvolňuje. Rekombinační děj je založen na splynutí vyraženého volného elektronu s kladným iontem v neutrální atom a ten pak v molekulu. Energie přijatá v průběhu disociace a ionizace se tímto uvolní a díky tomu se nataví základní materiál. [6; 7; 8]



Obrázek 5 - Schémata termodynamických jevů [7]

Termodynamické děje uvedené v této kapitole probíhají i v elektrickém oblouku. Plazmový oblouk se od elektrického liší v množství dodané energie. Tím, že je do oblouku přiváděn plazmový plyn, který zvyšuje stupeň ionizace a oblouk je fokusován (obvykle tvarem trysky), čímž se zvýší hustota výkonu a dostáváme se na mnohem vyšší teploty oblouku, než má elektrický oblouk. [8]

2.2 Princip plazmového řezání

Princip řezání plazmou spočívá ve vytlačování roztaveného kovu alespoň částečně ionizovaným plynem. Plazma má mnoho využití. Můžeme pomocí ní nanášet tenké vrstvy materiálu na povrch, svařovat, obrábět, osvětlovat okolí či dezinfikovat pomůcky v lékařství. Tato práce se bude věnovat konkrétně řezání plazmou. To je založeno na vytlačování roztaveného řezaného materiálu pomocí proudícího plazmatu. Rychlost řezání plazmou se pohybuje v rozmezí od 16 do 50 m.s⁻¹ a teplota od 7 000 °C do 35 000 °C. Rychlost a teplota konkrétně záleží na zvolené technologii řezání a druhu plynu. [6]

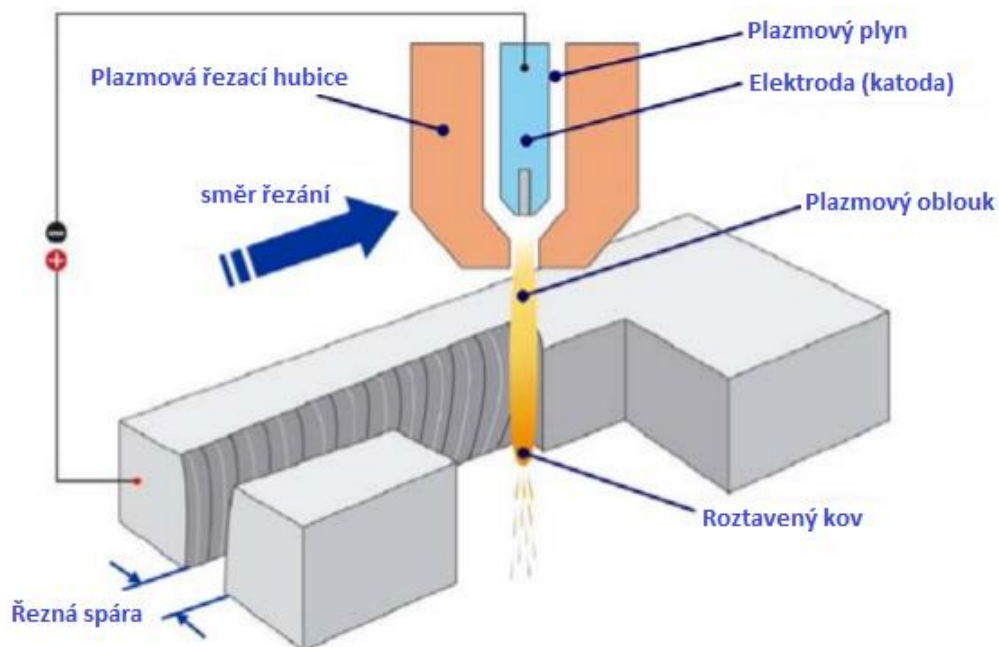
Tabulka 1 - Používané plazmové plyny a jejich vlastnosti

DRUH PLYNU	CHEMICKÁ AKTIVITA	RELATIVNÍ HUSTOTA (vzduch = 1)	IONIZAČNÍ ENERGIE [eV]
Vodík	Redukční	0,06	13,59
Argon	Inertní	1,38	15,76
Dusík	Neredukční	0,91	14,55
Kyslík	Oxidační	1,04	13,62

Řezání plazmou je vysoce výhodná a efektivní technologie tepelného dělení, která nabízí vysokou kvalitu řezu v kombinaci s vysokou rychlostí řezání. Plazmou lze řezat široké spektrum kovových materiálů, mnohem širší než například u řezání kyslíkem. Kvalitou řezu se plazma stále více přibližuje laserovému řezání. Pro nejvyšší kvalitu řezu je potřeba používat nejvhodnější plazmové i ochranné plyny, které jsou určeny pro daný řezaný materiál. [6]

Mezi výhody této technologie patří velký výkon při řezání do tloušťky 30 mm, vysoká řezná rychlost, která může být až 10x vyšší než autogenní řezání a velmi dobrá automatizace. Plusem je to, že pro vysokolegované oceli a hliníkové materiály ve střední a vyšší tloušťce

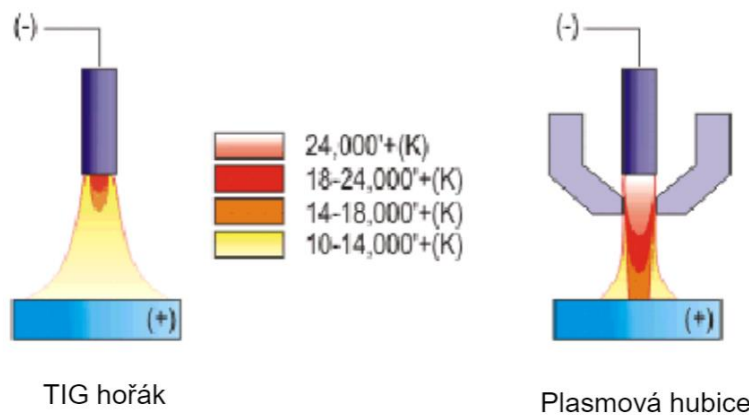
nemá tato technologie konkurenci. Další velkou výhodou je také to, že nastavení procesních parametrů pro různé materiály a tloušťky lze plně automatizovat. Nevýhodou může být omezení z hlediska tloušťky (do 200 mm), širší řezná spára, úkos na řezané hraně, zaoblení horní hrany a neposlední řadě hlučnost a intenzivní UV záření. [9]



Obrázek 6 - Plazmové řezání [6]

2.3 Historie plazmového řezání

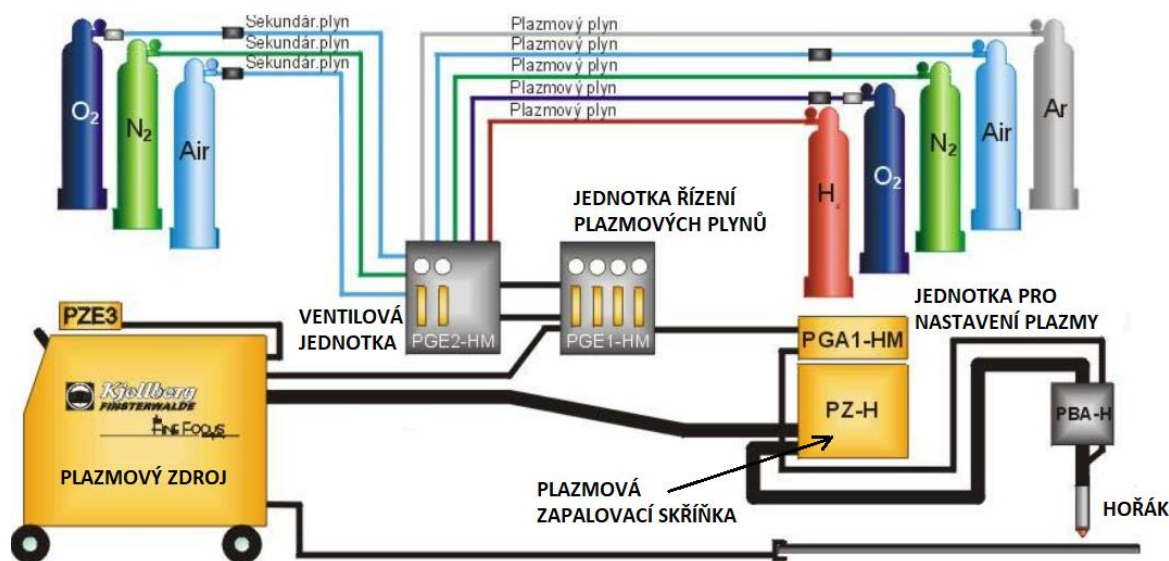
V roce 1941 přichází Ministerstvo obrany USA s požadavkem na novou a rychlejší metodu TIG (Tungsten Inert Gas) hořáku pro svařování a řezání. Nového vývoje se ujal doktor Robert Gage a v roce 1957 přišel s prvním plazmovým řezacím hořákem, který byl modifikací TIG hořáku (viz obrázek 7). V průběhu dalších let byly vyvíjeny modifikované plazmy, jako například dvouproudový plazmový oblouk stíněný sekundárním plynem a vzduchová plazma. Od roku 1965 se k plazmatu přidala voda a světlo světa spatřila vodou stíněná plazma, vodní injekční plazma a podvodní řezání. V roce 1980 nastal zásadní zvrát, když byly vyvinuty nízkoproudové vzduchové plazmy, což byla podstatně ekonomičtější varianta než doposud používané. Roku 1983 byly vyvinuty tzv. kyslíkové plazmy, které zvyšovaly řeznou rychlost a kvalitu řezu u uhlíkových ocelí. Dva roky poté se začal jako plazmový plyn u kyslíkové injekční plazmy používat dusík, kyslík se pouze injekčně přidával do hubice. Mezi poslední důležité události můžeme zařadit zrod plazmy roku 1990 s vysokou hustotou oblouku neboli High density (HD) plasma. [9]



Obrázek 7 – Schématické porovnání TIGového a plazmového hořáku [9]

2.4 Plazmová zařízení

Plazmová zařízení se dělí na ruční a strojní. Ruční zařízení se skládá ze zdroje a řezacího hořáku a je snadno přenosné. Strojní zařízení obsahují zdroj energie, hořák, řídicí jednotku a manipulační jednotku, což může být souřadnicový pracovní stůl, manipulátor nebo robot. Podle typu zařízení dále může stroj obsahovat například odsávání, či více hořáků najednou. Plyny v tlakových láhvích jsou napojeny na směšovací jednotku. [9; 10]



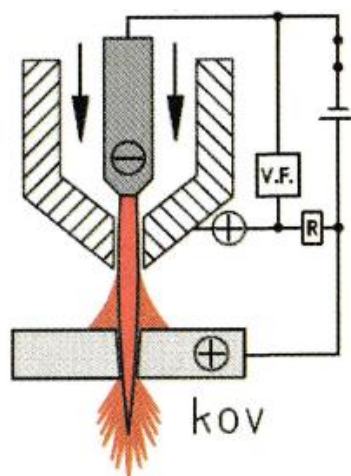
Obrázek 8 - Konstrukce plazmového řezacího stroje [9]

2.5 Elektrické zapojení plazmových hořáků

Zařízení se dělí na dva typy, a to podle toho, jaký používají druh zapojení oblouku. Oblouk může být přenesený, nepřenesený nebo kombinovaný. [6]

2.5.1 Přenesený oblouk (závislé zapojení)

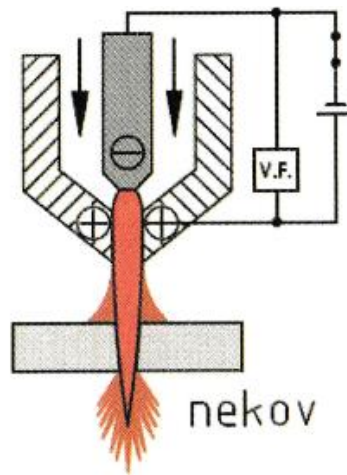
Přenesený oblouk, též nazývaný závislé zapojení, je určen pro obrábění vodivých kovových materiálů. Anglický termín pro tento druh zapojení je Plasma Arc Machining (PAM), což doslovně přeloženo znamená obrábění plazmovým obloukem. Hlavní plazmový oblouk hoří mezi řezaným materiálem a elektrodou umístěnou v hořáku. Pro zapálení plazmového oblouku se využívá pomocného, tzv. pilotního oblouku. Ten vzniká mezi měděnou dýzou a elektrodou v hořáku. Přiváděný plyn je pomocným obloukem ionizován a díky tomu vzniká plazma, která přeneše elektrický oblouk mezi elektrodou a řezaný materiál. Tryska je v tomto případě méně tepelně namáhána a vydrží tedy déle. Tento typ zapojení se využívá pro řezání, svařování a navařování elektricky vodivých materiálů. Výhodami tohoto zapojení je schopnost obrábění, jakkoliv tvrdého materiálu a jeho rychlost. Nevýhodou je vysoká hlučnost, větší tepelně ovlivněná oblast a vysoké pořizovací náklady. [6; 11; 12]



Obrázek 9 - Závislé zapojení hořáku [6]

2.5.2 Nepřenesený oblouk (nezávislé zapojení)

Nepřenesený oblouk neboli nezávislé zapojení, se vyznačuje tím, že hlavní plazmový oblouk hoří uvnitř hořáku. Anglický termín pro toto zapojení je Plasma Beam Machining (PBM), což v překladu znamená obrábění plazmovým paprskem. Zážeh plynu vzniká v hořáku mezi měděnou dýzou a elektrodou. Proudící plyn je tímto obloukem ionizován, tím pádem se stává plazmou. Tryska je v případě tohoto zapojení extrémně namáhána, a proto musí být ve většině případů chlazena. Tento typ oblouku se používá pro řezání nevodivých materiálů jako je například keramika ale především pro technologii nástřik plazmatem. Výhodou tohoto zapojení je, že je vhodné pro jakkoli tvrdý nevodivý či vodivý materiál. Nevýhodou je příliš rychlé opotřebení trysky. [6; 11]



Obrázek 10 - Nezávislé zapojení hořáku [6]

2.5.3 Kombinované zapojení

Hořák využívá kombinace obou typů zapojení. K zažehnutí se využívá nepřenesený oblouk, kterému se také říká pilotní. Poté se pro vlastní proces „přepne“ oblouk na závislé zapojení (tzv. přenesený oblouk, vodivě spojený se základním materiálem). Výhodou tohoto oblouku je nízké opotřebení hořáku a vhodnější zatížení elektrody. Tento typ zapojení se používá například u svařování. [6; 10; 13]

2.6 Druhy plynů při plazmovém řezání

Druhy plynů používané při řezání jsou určeny výrobcem plazmových zařízení a řezaným materiálem. [14]

Plyny se dělí dle [6] podle funkce, kterou plní při řezání na:

- 1) PLAZMOVÉ PLYNY - Tyto plyny ve vzniklém elektrickém oblouku disociují a ionizují a vytváří plazmový oblouk. Mezi plazmové plyny patří Ar, He, N₂, O₂ či směsi Ar+N₂, N₂+H₂ a vzduch. Průtokové množství bývá v rozmezí 1 až 8 l.min⁻¹. Při ohřevu plazmových plynů se mnohonásobně zvětšuje jejich objem a tím plyny dosahují vysokých výstupních rychlostí. [6; 14]
- 2) OCHRANNÉ PLYNY – Těmto plynům se také říká asistenční a slouží k ochraně paprsku plazmy. Dále také chrání místo řezu před účinky atmosféry. Jedná se o plyny Ar a N₂. Průtokové množství bývá 15 až 25 l.min⁻¹. [6; 14]

Tabulka 2 - Možnosti druhu plynů při řezání [6]

ŘEZANÉ MATERIÁLY	PLAZMOVÝ PLYN	OCHRANNÝ PLYN
Konstrukční ocel	O ₂ , N ₂ , Ar, vzduch	O ₂ , O ₂ +N ₂ , vzduch
Vysokolegovaná ocel	Ar+H ₂ , Ar+H ₂ +N ₂ , Ar+N ₂ , N ₂ , vzduch	N ₂ , Ar, O ₂
Neželezné kovy	Ar+H ₂ , N ₂	N ₂ , O ₂ +N ₂ , vzduch
Kompozity	Ar+H ₂ , Ar+H ₂ +N ₂ , vzduch	O ₂ +H ₂ , O ₂ +N ₂

2.6.1 Teploty plazmy v závislosti na plynech

Maximální dosažitelná teplota plazmového řezání závisí na složení použitého plazmového plynu. Je tomu tak díky fyzikálním vlastnostem plynu, mezi které patří tepelná vodivost a kapacita, ionizační energie a energie tepelné disociace molekul. [9]

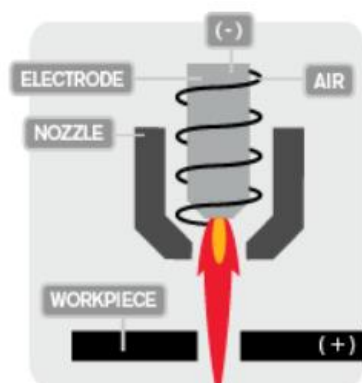
Dosažitelné teploty plynů dle [9]:

- Dusík N₂ – 9 000 °K
- Vodík H₂ – 10 000 °K
- Argon Ar – 16 000 °K
- Helium He – 20 000 °K
- Vodou stabilizovaná plazma – 35 000 °K

2.7 Rozdělení plazmových zařízení podle konstrukce

Obecně se plazmová zařízení dělí na zařízení bez ochranného média a s ochranným médiem. [6]

2.7.1 Plazma bez ochranného média

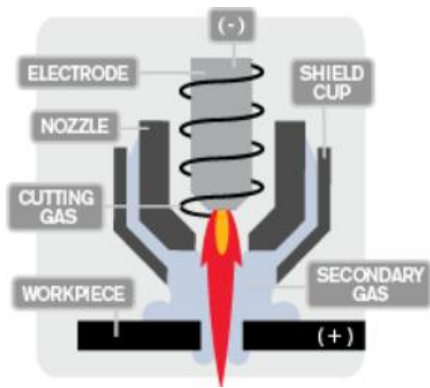


Obrázek 11 - Jednplynné řezání [49]

Tato konstrukce hořáku bez ochranného média se řadí mezi nejjednodušší. Uprostřed hořáku nalezneme elektrodu. Elektrodu chrání kovová tryska. Mezi tryskou a elektrodou proudí ve spirále plazmové médium. Tento typ hořáku patří sice mezi nejlevnější, ale kvalita řezu není příliš dobrá. [6; 15]

překlad: electrode – elektroda, air – plazmové médium, nozzle – tryska, workpiece – obrobek

2.7.2 Plazma s ochranným médiem

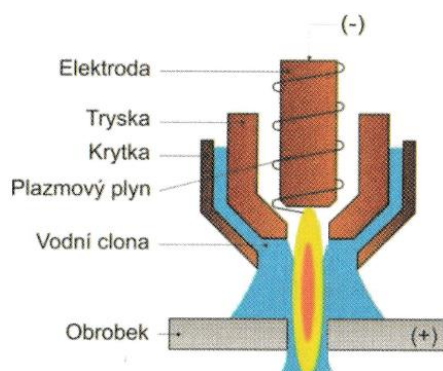


Obrázek 12 - Dvouplynné řezání [49]

Dalším typem konstrukce plazmového hořáku je varianta se sekundárním ochranným plynem, který obklopuje plazmový plyn, a to za účelem zlepšení kvality řezu a stabilizace plazmového oblouku. Tato technologie se nazývá dvouplynné řezání nebo také Dual Flow a patří mezi řezání s nejlepší kvalitou řezu, srovnatelnou s laserovým řezáním. [6; 15]

překlad: *electrode* – elektroda, *shield cup* - krytka, *nozzle* – tryska, *cutting gas* – plazmový plyn, *secondary gas* – ochranný plyn, *workpiece* – obrobek

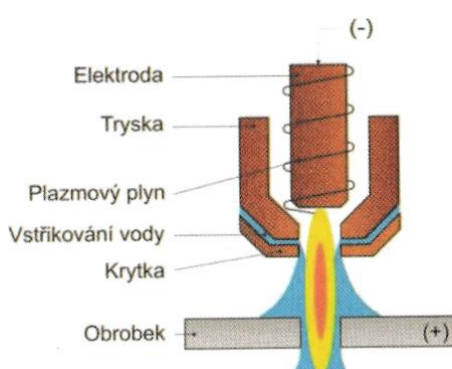
2.7.3 Plazma s vodní clonou



Obrázek 13 - Řezání s vodní clonou [6]

Plazmový oblouk je zde chráněn vodní clonou (viz obrázek 13). Ta zamezuje nežádoucímu úniku plynu, záření a ochlazuje řezaný materiál. Vodní clona ale neposkytuje požadované zúžení paprsku plazmy, proto není kolmost řezu lepší než u dvouplynného řezání. [6]

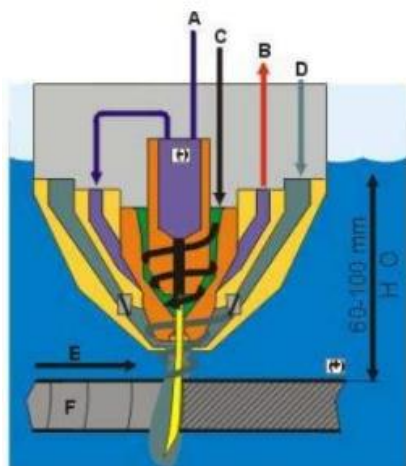
2.7.4 Plazma se vstřikováním vody



Obrázek 14 - Řezání se vstřikováním vody [6]

U této technologie dochází k požadovanému zúžení plazmového paprsku, a to díky vstřikování vody. Hořák je upraven krytkou, která přivádí vodu okolo plazmového oblouku a tím ho ochlazuje a zužuje. Ke všemu dochází k disociaci vody ve vodík a kyslík, a to vytváří vhodnou plynovou směs. Výsledkem je přesnější a kvalitnější řez. [6]

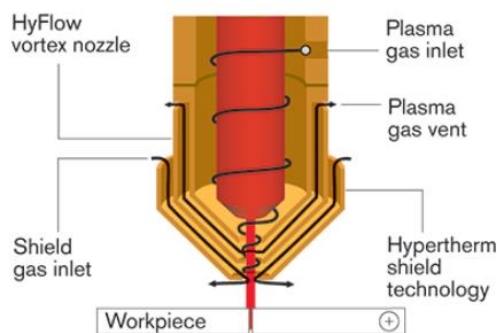
2.7.5 Plazma pod vodou



Obrázek 15 - Řezání pod vodou [9]

Plazmový hořák u řezání je ponořen zhruba 50 až 100 mm pod vodní hladinou. Okolní voda slouží k rozpuštění vznikajících dýmů a kouře, snížení hluku a UV záření a přispívá také ke chlazení materiálu. Tato technologie patří mezi neekologičtější způsoby řezání. Ovšem má to i své nevýhody a to například, že při řezání hrozí nahromadění bublin vodíku pod řezaným materiálem, a to může vést k výbuchu. [6]

2.7.6 HD plazma



Obrázek 16 - Hy Definition plazma [52]

Mezi nejkvalitnější nové technologie patří plazmová zařízení s technologií intenzivního zúžení plazmového paprsku pomocí vířivé trysky. Dochází ke zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Díky tomu je řezná spára až dvakrát užší a kolmější. Dosahovaná kvalita řezu se již blíží laseru, výhodou je nižší pořizovací cena. Hořák je chlazen pomocí vody. Na tomto principu vyvinuly unikátní technické řešení

chráněné patentem dvě společnosti. Od společnosti Hypertherm se patent nazývá Hy Definition a od firmy Kjellberg se nazývá Hi Focus. [6]

překlad: HyFlow vortex nozzle – vířivá tryska HyFlow, Shield gas inlet – vstup ochranného plynu, Plasma gas inlet – vstup plazmového plynu, Plasma gas vent – výstup plazmového plynu, Hypertherm shield technology – technologie stínění Hypertherm, workpiece – obrobek

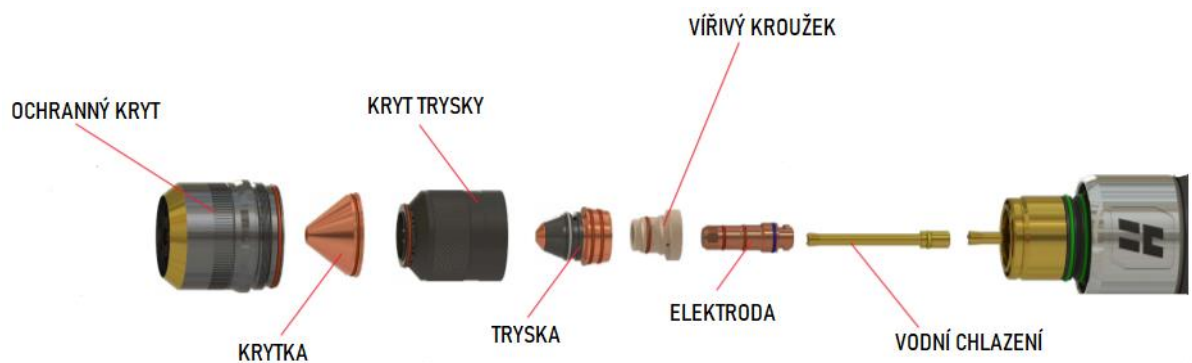
2.8 Plazmové hořáky

Jednou z nejdůležitějších částí plazmového řezacího stroje je plazmový hořák. Ty dělíme na ruční a strojní. Ruční hořáky jsou ergonomicky uzpůsobené pro držení v ruce, proto mají rukojeť s ovládacím tlačítkem. Hořáky mohou být chlazené kapalinou či plazmovým plynem. Kapalina, která ochlazuje hořák se většinou používá propylenglykol. [6]



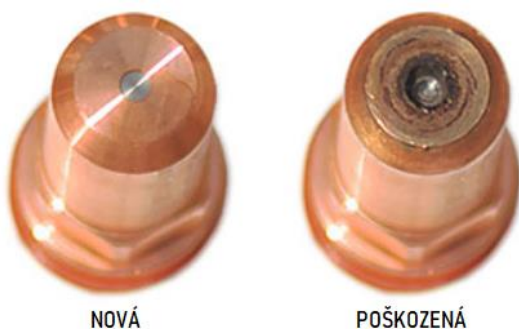
Obrázek 17 - Ruční a strojní plazmový hořák [53]

Existují různě modifikované hořáky a jejich modifikace se odvíjí od druhu používaného plynu, proudu a řezaného materiálu. Díly hořáků, které se vlivem činnosti rychle opotřebovávají, jsou konstrukčně řešeny jako snadno měnitelné a jsou výrobcem dodávány jako náhradní spotřební součástky. Mezi spotřební součástky plynem chlazených hořáků se řadí vířivý kroužek, elektroda, tryska a krytka hořáku (viz obrázek 18). U vodou chlazeného hořáku je navíc rozvod kapaliny. [6]



Obrázek 18 - Spotřební díly hořáku Hypertherm XPR300™ [16]

2.8.1 Elektroda



Obrázek 19 - Nová a poškozená elektroda [18]

Elektroda přenáší energii do plazmového oblouku. Je zapojena jako katoda v elektrickém oblouku. Skládá se z těla elektrody a emisivní části (vločky). V minulosti se emisivní vločky vyráběly z wolframu. Wolfram ale při styku se vzduchem výrazně oxiduje, a proto se přešlo na hafnium či zirkon. Tělo elektrod je vyrobeno z mědi, slitiny mědi či stříbra.

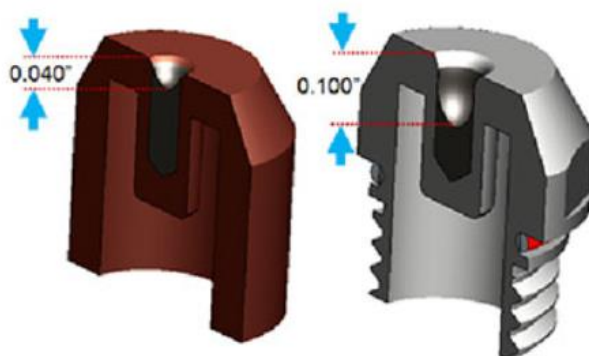
Pokud hoří oblouk, elektroda se opotřebovává, přesněji se vypaluje emisivní vložka. Výhoda použití hafnia je taková, že má vysokou teplotu tavení. Nevýhodou je ovšem jeho špatná tepelná vodivost. Ta způsobuje nárůst opotřebení elektrody. Abychom zpomalili opotřebení, je nutné elektrodu zevnitř ochlazovat kapalinou. Dalším řešením příliš rychlého opotřebení je vybrat elektrodu, která má stříbrnou vložku. Stříbro je sice nákladné, ale je zároveň velmi dobrým vodičem a výborně odvádí teplo. [17]



Obrázek 20 - Řez elektrodou hořáku [54]

překlad: silver wrap – stříbrný obal, hafnium insert – hafniová vložka, copper body – měděné tělo

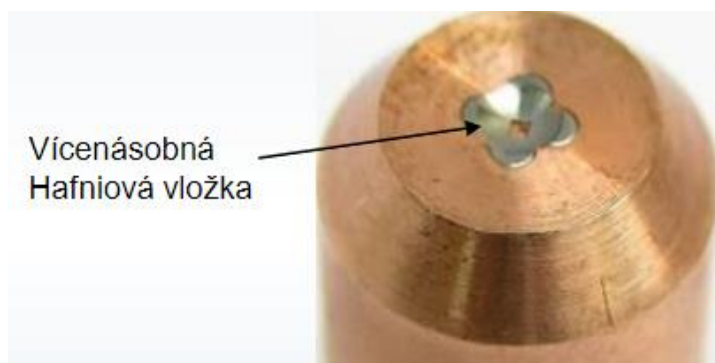
Pokud se vyhořelá elektroda nevymění včas, může dojít ke špatnému natavení oblouku, což má za následek nekvalitní řez. Po nějaké době by mohl také nastat zkrat a ten by zničil celý hořák. Bezpečnostní zóna opotřebení je pro měděné elektrody přibližně 1 mm a pro stříbrné 2,6 mm. Jak moc je elektroda vyhořelá se dá měřit pomocí speciálního indikátoru opotřebení elektrod. [1; 17]



Obrázek 21 - Bezpečnostní zóna opotřebení elektrod [18]

Společnost ESAB přišla s novinkou – iSeries XTremeLife™. Jedná se o speciálně upravenou elektrodu s vícenásobnou hafniovou vložkou (viz obrázek 22). Elektrody jsou chlazené po celé své délce, zejména v ústí a tím je zvyšována jejich životnost při vysokoproudových aplikacích (používáno především při řezání tlouštěk nad 20 mm při

proudech 300-400 A). K tomuto typu elektrody je doporučován extrémně chlazená dvoudílná hubice. [19]



Vícenásobná
Hafniová vložka

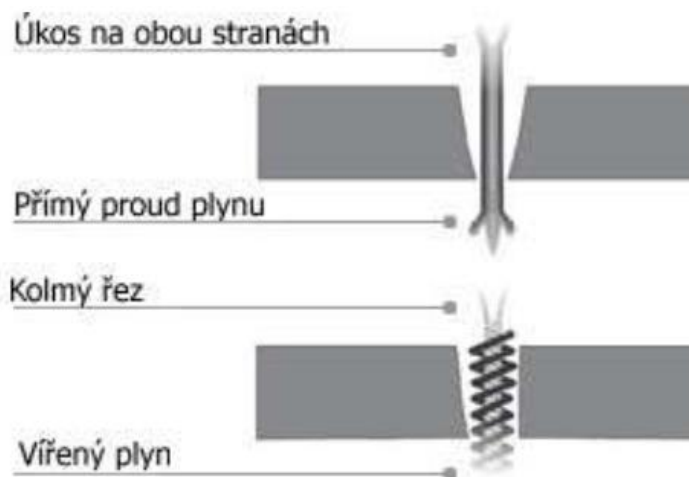
Obrázek 22 - Dělená elektroda [19]

2.8.2 Vodní chlazení

Pokud zvolíme řezání s vodním vstřikováním, bude nám dodán hořák s trubičkou pro kapalinu. Kapalina je do hlavice hořáku přiváděna především kvůli chlazení. Díky chlazení lze dosáhnout lepší kvality řezu. Jako chladicí kapalina se využívá směs demineralizované, deionizované vody a propylenglykolu. [16]

2.8.3 Vířivý kroužek

Vířivý kroužek slouží k ovládnutí vířícího toku plazmového plynu kolem elektrody. Víř vytváříme kvůli lepšímu vycentrování řezného oblouku na elektrodě, rychlejšímu zúžení řezného oblouku a kvůli schopnosti lepšího řezu. Pokud by plyn nebyl vířen, vznikl by oboustranný úkos. V případě záměny rotace plynu dochází ke změně strany s kolmějším řezem. [16; 20; 21]



Obrázek 23 – Význam víření plynu kolem elektrody [21]

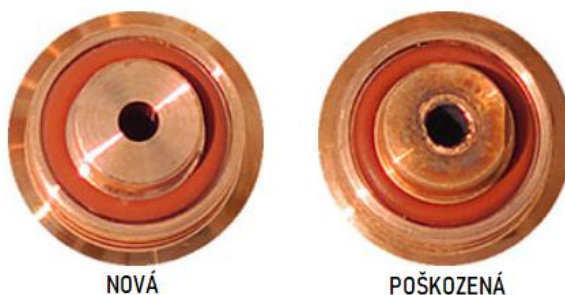
Vířivý kroužek bývá vyráběn z materiálu odolného vůči vysoké teplotě, jako je například keramika. Kroužek má v sobě malé otvory, jak již bylo zmíněno, kvůli víření plynu, u kterých je potřeba dbát na to, aby zůstávaly bez nečistot. Dále také musí být kroužek správně namazán mazivem. Poškozený kroužek poznáme na kvalitě řezu (viz obrázek 24). [18]



Obrázek 24 - Vířivý kroužek [55]

2.8.4 Tryska

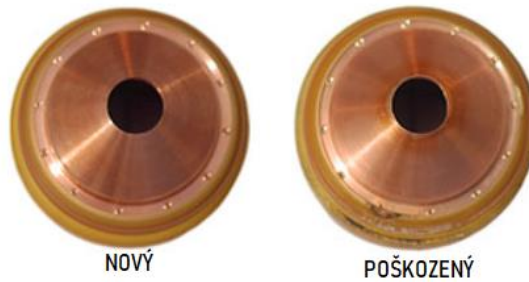
Primární funkcí trysky je tvarovat, rovnat a zužovat (fokusovat) plazmový oblouk. Ve většině případů je tryska vyrobena z mědi a povrch je překrytý niklem pro zvýšení životnosti. Když je tryska nová, otvor je dokonale kulatý a má ostrou hranu. Postupem času vinou opotřebení při používání se otvor deformuje. Za životnost jedné elektrody se většinou spotřebují zhruba dvě trysky. [1; 16; 18]



Obrázek 25 - Nová a poškozená tryska [18]

2.8.5 Kryt trysky

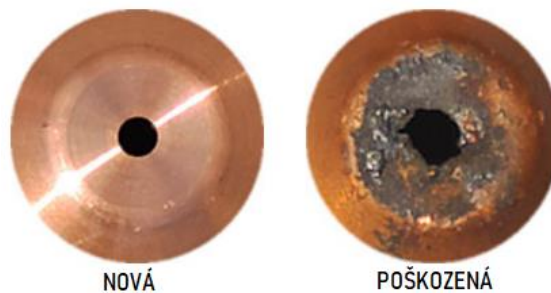
Kryt trysky má za úkol zajišťovat tok chladicí kapaliny (či plynu) kolem elektrody do exteriéru trysky. Tento díl není opotřebováván plazmovým obloukem, proto může vydržet až dokonce 30 výměn elektrod. Tento spotřební díl se vyměňuje pouze pokud je spálený či ohnutý, či pokud jsou ucpané malé otvory pro proudění plynu. [16; 18]



Obrázek 26 - Nový a poškozený kryt trysky [18]

2.8.6 Krytka

Krytka chrání ostatní spotřební materiál před roztaveným řezaným materiálem. V některých případech pomáhá vířit plazmový plyn. Tento spotřební díl je velmi náchylný na mechanické poškození nárazem, díky své těsné blízkosti s řezaným materiálem. Otvor krytu je zásadní pro kvalitu řezu, proto by měl být vyměněn, když se spálí, deformuje či jakkoliv jinak poškodí. [16; 18]



Obrázek 27 - Nová a poškozená krytka [18]

2.8.7 Ochranný kryt

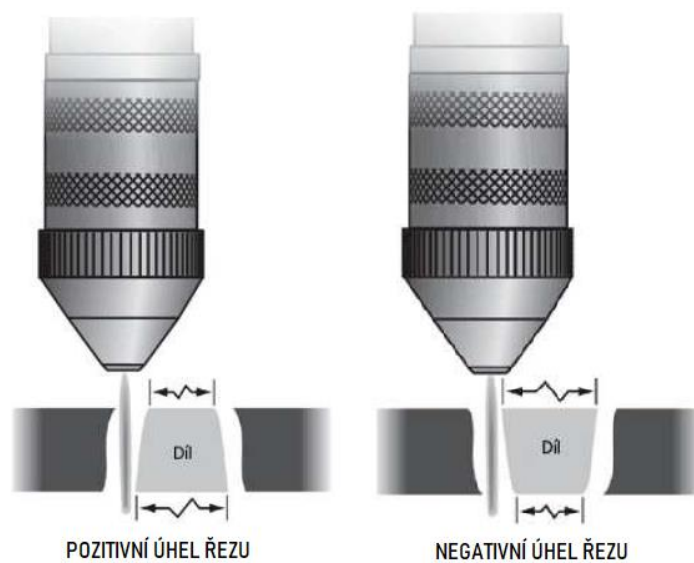
Ochranný kryt drží veškerý spotřební materiál na svém místě a směřuje sekundární plyn do krytky. Tento ochranný kryt by se měl měnit pouze v případě viditelného poškození, jako je například nahromadění strusky, promáčknutí či spálení. [16; 18]



Obrázek 28 - Nový a poškozený ochranný kryt [18]

2.9 Parametry řezání plazmou

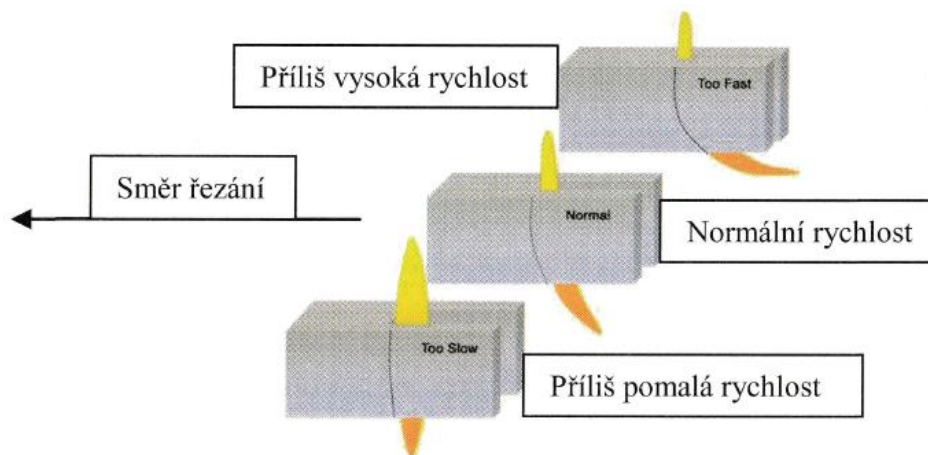
Mezi nejdůležitější parametry řezání plazmou patří řezná rychlost, řezný proud a řezná výška. Tyto parametry spolu vzájemně souvisí a vždy se při nastavování plazmového řezacího stroje mezi nimi hledá ideální kompromis, při kterém vzniká pravouhlý řez. Při nesprávně nastavených parametrech vzniká negativní nebo naopak pozitivní úhel řezu. Negativní úhel řezu může vzniknout kvůli poškozenému spotřebnímu dílu hořáku, nízké řezné výšce (což způsobuje nízké napětí na oblouku), příliš vysoké řezné rychlosti či kvůli zakřivenému řezanému materiálu. Naopak pozitivní úhel řezu vzniká díky vysoké řezné výšce, vysokému napětí na oblouku, příliš velké řezné rychlosti či špatnému nastavení proudu a hořáku. [21]



Obrázek 29 - Pozitivní a negativní úhel řezu [21]

2.9.1 Řezná rychlost

Rychlost řezání je přímo úměrná velikosti řezného proudu a tloušťce řezaného materiálu. Čím je vyšší řezná rychlost, tím je řezná spára užší. Vysoká rychlost způsobuje drsnější reliéf řezu. Při příliš vysoké rychlosti může dokonce dojít ke ztrátě penetrace řezaným materiálem, jinak řečeno dojde k neproříznutí celé řezané tloušťky. Naopak nižší řezná rychlost má za následek širokou řeznou spáru a způsobuje zvětšení nežádoucí tepelně ovlivněné oblasti, zaobluje horní hranu řezu a na spodní hraně zůstávají otřepy kovu a bubliny. Pokud je řezná rychlost příliš pomalá, dojde k úplné ztrátě oblouku, jelikož je z okolí vytlačen všechen řezaný materiál a oblouk už nemá kde hořet. Pro ideální řeznou rychlost je typická struktura reliéfu řezu ve tvaru písmena „S“ (viz obrázek 31). Správná rychlost lze také poznat podle odletujících jisker, které se mají objevovat především pod výpalkem. [6; 20; 21]



Obrázek 30 - Závislost řezné rychlosti na tvaru plazmy a reliéfu řezné stopy [6]



Obrázek 31 – Detail řezu materiálem

2.9.2 Řezný proud

Vysoký řezný proud má za následek širokou řeznou spáru a velmi rychlé ničení hubice. Snižování proudu vede k zúžení řezné spáry až po ztrátu penetrace materiálem. Nízký řezací proud také způsobuje pozitivní úhel na výpalku. Vhodná velikost řezného proudu se volí podle tloušťky řezaného materiálu. Dále má také největší vliv při výběru vhodného hořáku, konkrétně velikosti elektrody. Důvodem je, abychom elektrodu nepřetížili. [21]

2.9.3 Řezná výška

Řezná výška je definována jako výška mezi koncem hořáku a řezaným materiálem. Moderní plazmová zařízení si již díky zpětné vazbě z napětí na oblouku umí stanovit sama svou ideální řeznou výšku. Tato funkce je nazývána Automatická korekce výšky hořáku. Z počátku se hořák dotkne řezaného materiálu a posune se automaticky na požadovanou ideální výšku. Pokud je hořák příliš blízko řezanému materiálu, může docházet k ulpívání rozstříkujícího kovu na hubici a tím k jejímu ucpávání a znehodnocování. Tento rozstřík se objevuje především při začátečním propalu (pokud řez nezačíná na hraně plechu) a při řezu na hraně materiálu, proto

se může stát, že stroj při počátečním propalu svůj hořák vertikálně oddálí a poté opět přisune blíže. [6; 21]

2.10 Bezpečnost práce při řezání plazmou

Při provozu plazmového řezacího stroje dochází k souběhu více pracovních rizik zároveň. Jedná se o riziko popálení a riziko úrazu elektrickým proudem. Nezanedbatelná rizika jsou též hlučnost procesu a na výskyt ultrafialového, infračerveného záření a ozónu. [1; 6]

Vzhledem k velmi rychlým přejezdům portálu při mimopracovních přesunech hořáku do nové pozice hrozí obsluze také riziko kolize se strojem. Toto riziko je však u moderních strojů již eliminováno instalací světelných závor, které vytvářejí před pohyblivou částí stroje optickou „stěnu“, při jejímž narušení dojde k okamžitému vypnutí stroje – tzv. central stop.

3 Porovnání technologií tepelného dělení

Každá technologie tepelného dělení materiálu má své výhody a nevýhody a ty je potřeba při volbě zvážit. Z hlediska optimální kvality řezné spáry platí, že pro malé tloušťky (cca do 20 mm) je nejvhodnější použít řezání laserem. Oceli lze laserem řezat do tloušťky 40 mm, ale u horní hranice tloušťky materiálu už je potřeba velký výkon a kvalita řezu se zhoršuje. Proto se doporučuje střední tloušťky od 20 do 150 mm řezat plazmou. U velkých tlouštěk (až do 300 mm) je vhodné jako technologii použít řezání kyslíkem. [6]

Tabulka 3 - Porovnání technologií tepelného dělení [6]

HODNOCENO	PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ	ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM	LASEROVÉ ŘEZÁNÍ
TLOUŠŤKA ŘEZANÉHO MATERIÁLU	od tenkých plechů do 180 mm (pod vodou do 120 mm)	od 25 mm do 300 mm	od nejtenčích plechů do 40 mm
ŘEZANÉ MATERIÁLY	vhodnější jsou elektricky vodivé, oceli, hliník, měď, ...	omezení na uhlíkovou ocel	elektricky vodivé i nevodivé materiály
ŘEZNÁ SPÁRA	v řádu jednotek mm	v řádu jednotek mm	v řádu desetin mm
TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST	větší (kolem 1 mm), ale pod vodou malá	velká (nad 1 mm)	malá (v řádu deseti mm)
RYCHLOST ŘEZÁNÍ	1000 až 4000 mm.min ⁻¹	100 až 500 mm.min ⁻¹	2500 až 7000 mm.min ⁻¹
VEDENÍ HOŘÁKU	ručně i strojně	ručně i strojně	strojně

4 Tepelně ovlivněná oblast po tepelném dělení

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) vzniká při všech způsobech tepelného dělení z důvodu metalurgických přeměn v základním materiálu okolo místa řezu. Je to ta část materiálu, která nebyla roztavena, resp. spálena, ale byla ohřáta a uskutečnila se v ní normalizace a částečná překrystalizace. V této oblasti může dojít k ovlivnění mechanických vlastností materiálu (stejně jako u svařování). Velikost tepelně ovlivněné oblasti je závislá na intenzitě tepla produkovaného při řezání. Maximální velikost této oblasti je u nízkouhlíkových ocelí okolo tloušťky 15 mm v rozmezí 1,6 až 2,3 mm. Při vyšších řezných rychlostech může docházet ke zvýšení tvrdosti a vzniku mikrotrhlin na řezané hraně jako důsledek jejího příliš rychlého ochlazování. To může být problém dynamicky namáhaných konstrukcí. Tento problém řeší norma ČSN EN 1090: *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí*, která mimo jiné předepisuje kontrolu kvality řezných ploch a případné obrobení volných řezných hran vytvořených plazmou na svařovaných ocelových konstrukcích. [6; 9; 22]



Obrázek 32 - Tepelně ovlivněná oblast po různých metodách dělení materiálu [56]

5 Vady řezů

Vady jsou odchylky a nedokonalosti, které rozeznáváme podle norem, konkrétně u řezání podle normy ČSN EN ISO 17658: *Vady při řezání kyslíkem, laserem a plazmou*. Tato norma určuje terminologii vad u řezání plazmou, kyslíkem a laserem. V tabulce 4 jsou seřazeny názvy vad s charakteristickými obrázky. [23]

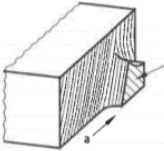
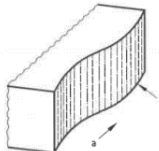
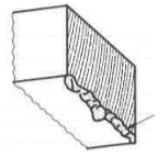
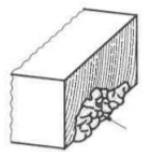
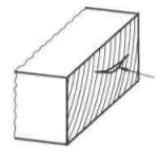
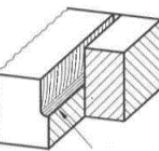
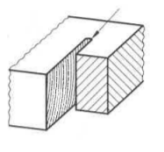
Tabulka 4 - Přehled vad dle ČSN EN ISO 17658 [23]

NÁZEV VADY	OBRÁZEK	NÁZEV VADY	OBRÁZEK
1. Natavení horní hrany řezu		2. Natavení dolní hrany řezu	

Tabulka 4 - Přehled vad dle ČSN EN ISO 17658 [23]

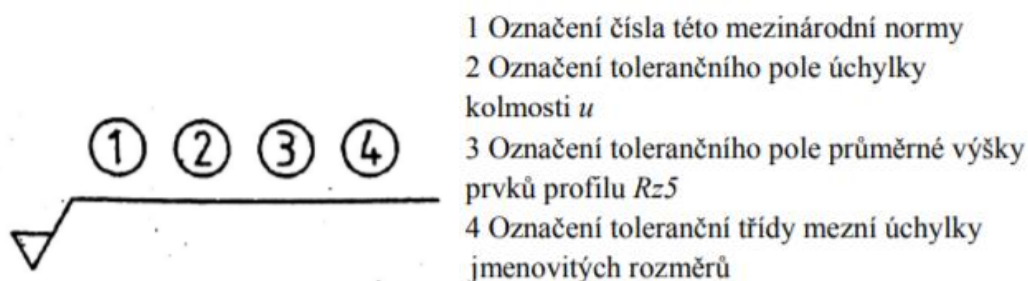
3. Řetěz ztuhlých kapiček ulpívajících na horní hraně řezu		4. Řetěz ztuhlých kapiček ulpívajících na dolní hraně řezu	
5. Převíslá horní hrana řezu		6. Utavená horní hrana řezu	
7. Žlábek u hrany řezu - pod horní hranou řezu		8. Žlábek u hrany řezu - pod dolní hranou řezu	
9. Rozšíření spáry řezu - u horní hrany		10. Rozšíření spáry řezu - u dolní hrany	
11. Úhlová odchylka řezu		12. Úhlová odchylka řezu na jedné ploše řezu	
13. Vydutá plocha řezu		14. Zvlněný profil plochy řezu	
15. Nadměrné opožďení řezné stopy - vysoká rychlost		16. Předbíhání řezné stopy - nízká rychlost	
17. Místní odchylka řezné stopy		18. Nadměrná hloubka řezné stopy	
19. Nepravidelná hloubka řezné stopy		20. Izolované zápaly	
21. Skupina zápalů		22. Skupina zápalů ve spodní části plochy řezu	

Tabulka 4 - Přehled vad dle ČSN EN ISO 17658 [23]

23. Neúplné ukončení řezu - nedoříznutí		24. Zvlněná plocha řezu	
25. Ulpívající struska na spodní hraně řezu		26. Slepenec strusky na ploše řezu	
27. Makrotrhlina na ploše řezu		28. Přerušovaný řez ve směru hloubky řezu	
29. Přerušovaný řez ve směru řezání			

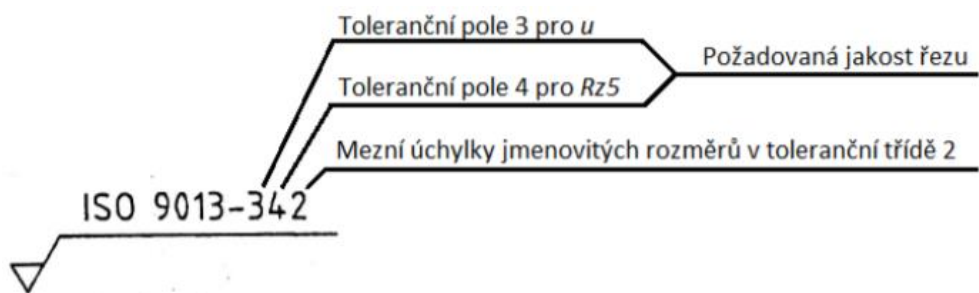
6 Kvalita řezu při tepelném dělení

Další norma, která se zabývá kvalitou řezných ploch je ČSN EN ISO 9013: *Geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezu*. Podle této normy se posuzují geometrické vady a úchyly jakosti povrchu řezu po tepelném dělení materiálu. Norma platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy laserem od 0,5 mm do 32 mm a řezy plazmou od 0,5 mm do 150 mm. Převážně se podle této normy vyhodnocují strojní způsoby vedení hořáku, jelikož se jedná o přesnější způsob a lze při něm lépe aplikovat změny v praxi. Geometrické požadavky na výrobky platí, pokud je na dokumentaci uveden odkaz na tuto normu (viz obrázek 33). [24]



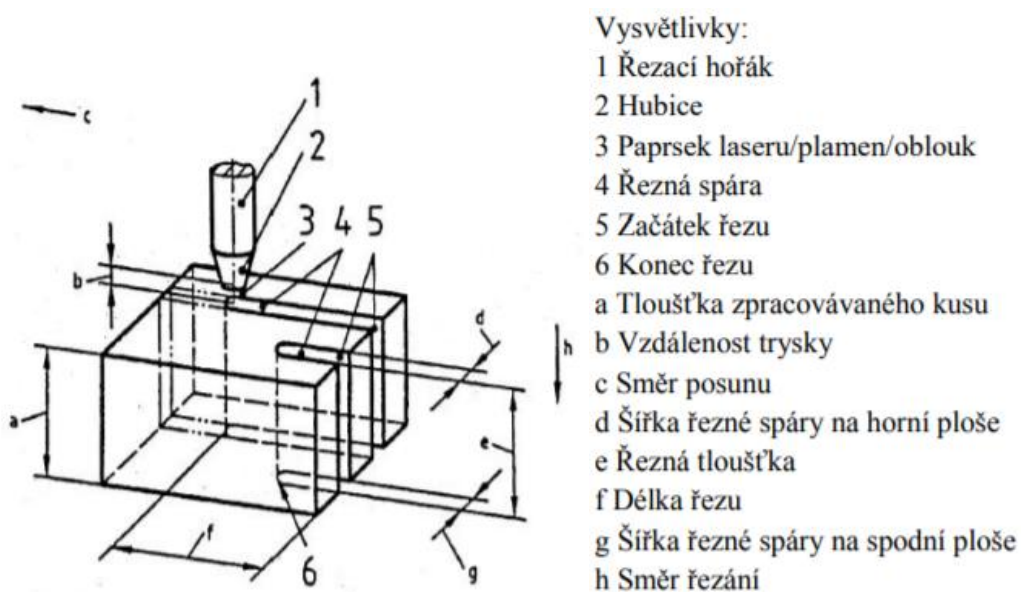
Obrázek 33 - Obecně značení jakosti na výkrese [24]

Konkrétní příklad:

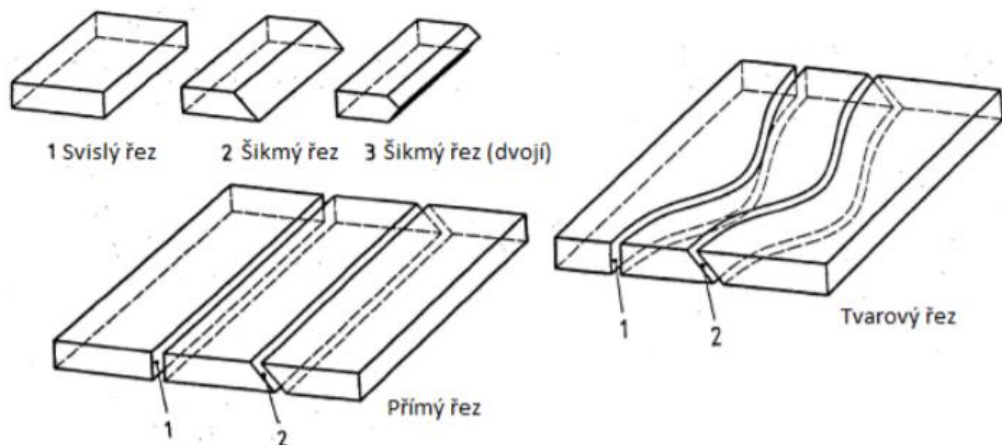


Obrázek 34 – Příklad značení jakosti na výkresech [24]

Na počátku normy jsou popsány termíny vztahující se k tepelnému dělení. Nejprve k procesu řezání (viz obrázek 35) a poté k ukončení řezání. Poté jsou uvedeny v normě typy řezů (viz obrázek 36). [24]



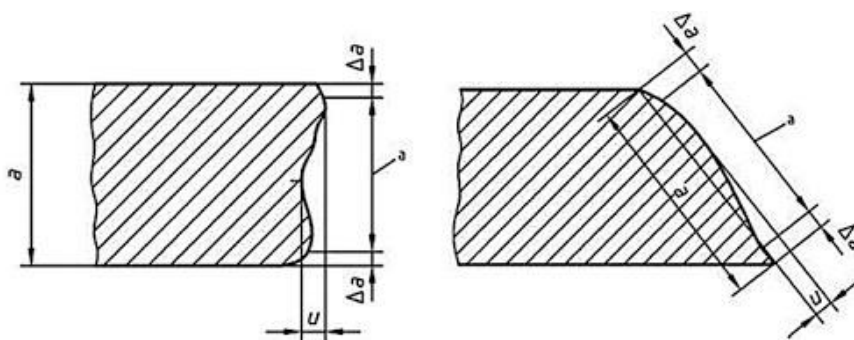
Obrázek 35 - Termíny vztahující se k řezání [24]



Obrázek 36 - Typy řezů [24]

Charakteristické veličiny pro kvalitu povrchu jsou podle normy následující: úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka, průměrná výška prvků profilu, skluz a natavení horní hrany.

Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlů (u) je v normě popsána jako vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, které se dotýkají řezného povrchu. Od délky vyhodnocované oblasti se musí odečíst Δa , což je dovolené natavení hran (viz obrázek 37). Zjištěná úchylka by měla odpovídat tolerančnímu poli 1 až 5 (viz tabulka 5), které je většinou pro výrobek zadané. [24]

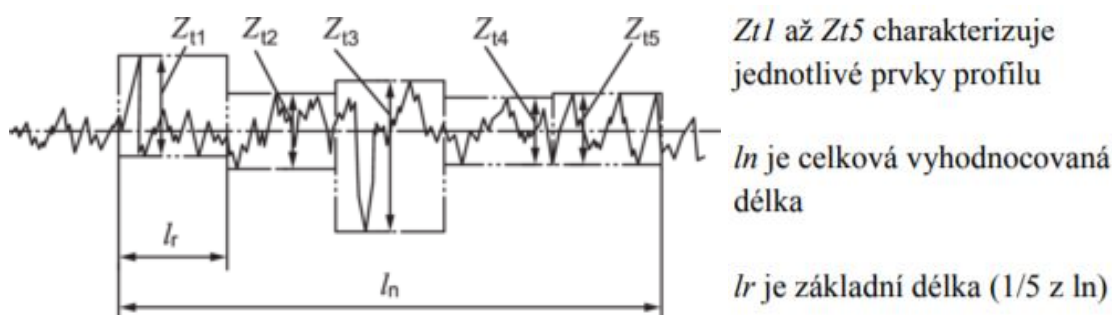


Obrázek 37 - Oblast měření úchylky kolmosti a úhlové úchylky [24]

Tabulka 5 - Toleranční pole úchylek kolmosti a úhlových úchylek [24]

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

Jako další charakteristická veličina kvality řezu je hodnocena průměrná výška prvků profilu neboli $Rz5$. Jedná se o aritmetickou střední hodnotu z jednotlivých hloubek drsnosti profilu na pěti za sebou následujících základních délkách. Podle naměřených hodnot se poté podle normy určí toleranční pole 1 až 4 (viz tabulka 6). [24]

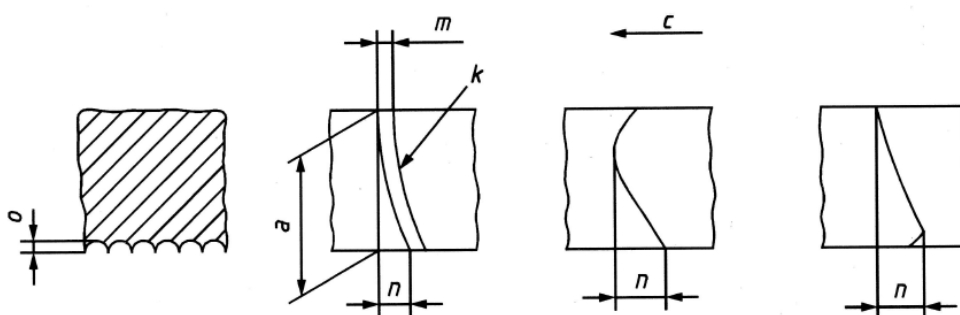


Obrázek 38 - Průměrná výška prvků profilu Rz [24]

Tabulka 6 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 [24]

Toleranční pole	Průměrná výška prvků profilu, Rz5
	μm
1	$10 + (0,6 a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8 a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2 a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8 a \text{ mm})$

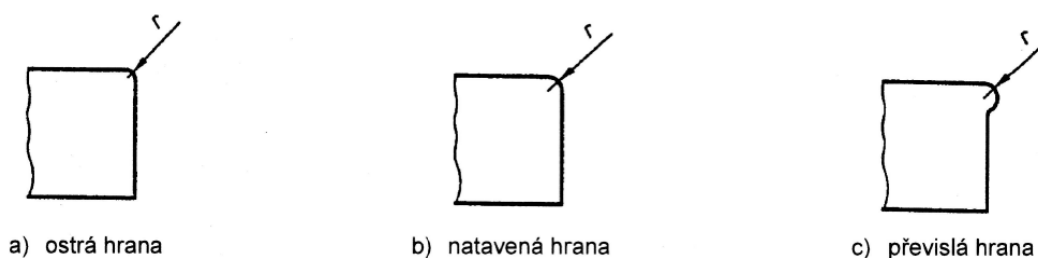
Termín skluz (n) je v normě popsán jako průmět vzdáleností mezi dvěma body skluzové rýhy (viz obrázek 39) ve směru řezání a je znakem určité rychlosti. [24]



Obrázek 39 - Skluzová rýha [24]

n – skluz, a – tloušťka řezu zpracovávaného kusu, o – hloubka drážky, m – šířka skluzové rýhy, c – směr posunu, k – skluzová rýha, c – směr posunu

Natavení horní hrany (r) (viz obrázek 40) je veličina charakterizující tvar horní hrany řezu. [24]



Obrázek 40 - Možnosti natavení hrany materiálu [24]

Dále platí, že je-li na výkrese či jiné dokumentaci uvedena norma ČSN EN ISO 9013, musí být rozměry považovány za jmenovité rozměry. Skutečné rozměry se určují na čistém řezu. Mezní úchytky rozměrů jsou rozděleny do dvou tolerančních tříd, 1 a 2, v závislosti na tloušťce řezaného materiálu a jmenovitém rozměru. Úchytky platí pouze pro řezy plamenem a plazmou. Při řezu laserem závisí dosažitelná úchytky jen na geometrii a předběžné úpravě řezaného materiálu. Zároveň platí pravidlo, že poměr délky a šířky zpracovávaného dílu nesmí být větší než 4:1 a obvodová délka řezu musí být větší než 350 mm. [24]

Dále jsou v normě popsány termíny a definice jako jsou natavení horní hrany, otřep, okuje, drážkování. V normě jsou také popsány podmínky měření, měřící místa, měřidla, jejich umístění, vyhodnocení dle tabulek a zařazení do tolerančních polí a tříd. [24]

7 Způsoby zvýšení kvality řezu při řezání plazmou

Základem je zvolit správnou kombinaci parametrů řezání s ohledem na tloušťku řezaného materiálu a typ materiálu. Výrobci dodávají ke svým řezacím strojům tabulky doporučených parametrů. V katalogu vybere obsluha stroje správnou tabulku pro odpovídající typ řezaného materiálu, tloušťku materiálu, požadovanou kvalitu řezu a cílovou produktivitu. Dále zvolí správný plazmový a ochranný plyn a vybere vhodnou řeznou rychlost procesu. Obsluha také musí zkontrolovat, zda jsou používány správné spotřební díly hořáku (ověří katalogová čísla) a zkontroluje jejich opotřebení. Pokud jsou díly opotřeбенé, je potřeba je vyměnit.

Důležité je zvolit správný směr řezání obrobku. U vnějšího obrysu by se měl hořák pohybovat ve směru hodinových ručiček, zatímco u vnitřního otvoru proti směru ručiček.

Pro optimální kvalitu řezu je dále potřeba zkontrolovat, zda je hořák v pravém úhlu vůči obrobku a zda při řezání nevibruje. Vibrace může způsobit špatné připevnění hořáku k portálu. Pokud i nadále není schopen stůl dosahovat požadované kvality řezu, i když by podle dokumentů měl, je potřeba kontaktovat výrobce a ten stůl seřídí. [25; 26]

8 Trendy v oblasti řezání plazmou

Současné řezací stroje jsou plně automatizované systémy, řízené moderními CNC a softwary, které jsou často připravované pro integraci do výrobních linek a celků odpovídající trendu průmyslu 4.0.

Stroje jsou nositelem jednotlivých technologií, které jsou více či méně automatizovány a vyžadují různou úroveň znalostí a zkušeností obsluhy. Plazmové řezací technologie jsou dnes v drtivé většině případů dodávány jako celek obsahující veškeré komponenty nutné pro úspěšný chod procesu, hardware, software i procesní parametry. Jsou dodávány prakticky všem výrobcům řezacích strojů cca dvěma až třemi špičkovými dodavateli, specializovanými na plazmový proces. Zjednodušeně, výrobce si nakoupí plazmovou technologii od externího

dodavatele a instaluje ji na svůj stroj. Nastavení parametrů není obvykle manuální, ale je integrováno do plazmového řezacího stroje, což je rozdíl například oproti řezání kyslíkem.

Mezi přední světové výrobce plazmových zdrojů, kteří udávají trendy v oblasti plazmového řezání kovových materiálů se řadí zejména firmy: Kjellberg, Hypertherm a ESAB. Tito výrobci vyvíjejí pro svá zařízení nové moderní procesy/způsoby plazmového řezání pro konkrétní aplikace (které obvykle pojmenovávají různými obchodními názvy a patentově je chrání), proto se může stát, že obdobné inovace plazmové technologie nesou různé názvy. Například technologii Contour Cut nabízí zdroje od společnosti Kjellberg, zatímco společnost Hypertherm nabízí ke svým zdrojům podobnou technologii, jen pod názvem True Hole. Většina těchto nových moderních variant cílí buď na zvýšení rychlosti a přesnosti řezání nebo na snížení hlučnosti, což jsou asi dva základní směry vývoje. Zatím se hlučnosti věnuje pouze firma Kjellberg. Možná právě otázka hlučnosti bude budoucím trendem i ostatních hráčů na trhu.

Tato práce se ve své praktické části bude věnovat především zvýšení kvality řezu při vytváření vnitřních otvorů menších průměrů. V následujících kapitolách jsou popsány tři inovace, od každé z výše uvedených firem jedno. Následně jsou v podkapitolách popsány varianty řezacích procesů, pro které má výrobce odladěné optimální parametry, či speciálně vyvinuté hořáky.

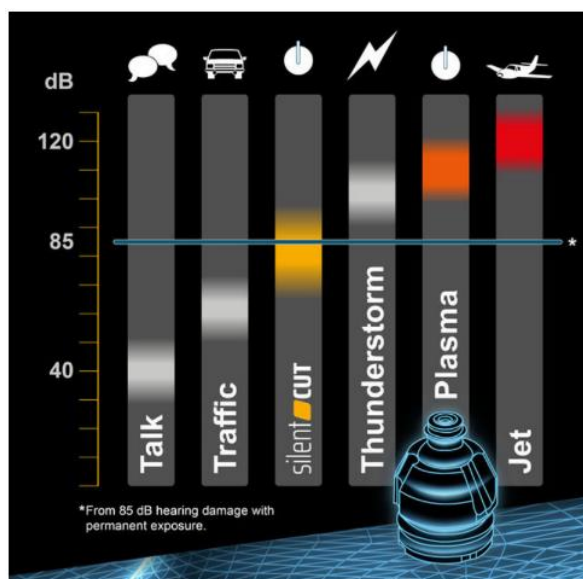
8.1 HiFocus neo – Kjellberg

HiFocus neo je inovace od firmy Kjellberg. Využívá technologii, která je založena na víření plynu, který se točí kolem plazmového oblouku velmi vysokou rychlostí a zužuje ho. Tato technologie je vhodná pro materiály různých tlouštěk od 0,5 do maximálně 160 mm. Náklady na řezání jsou sníženy díky optimalizaci chránící spotřební díly, což prodlužuje jejich životnost. Dalšími výhodami jsou nižší spotřeba plynu ve srovnání s konkurencí, zvýšený řezný výkon a vysoká kvalita řezu. Oproti standardním řezacím strojům tato technologie dokáže zvýšit řezací rychlost a řezný výkon zhruba o 43 % a díky tomu snížit náklady o 31 %. Toto zařízení umožňuje využívání řezacího procesu Silent cut (SC), Contour cut (CC) či Contour cut speed (CCS). [27]

8.1.1 Silent cut

Silent cut je inovace od firmy Kjellberg snižující hlučnost plazmového řezání, která je pro pracovníky vyskytující se v blízkosti plazmového řezacího stroje škodlivá. Bez této inovace dosahuje klasická plazma, díky své vysoké rychlosti proudění, hlučnosti kolem 130 dB, v závislosti na kvalitě řezu a řezacím úkonu. Silent cut dokáže snížit hlučnost až o 15 dB, což je

lidským sluchem vnímáno jako snížení hluku zhruba o polovinu. Tato inovace může být dostupná pro různé stroje od firmy Kjellberg, stačí pouze vyměnit trysky v plazmovém hořáku. Pro maximální kvalitu řezu je tato technologie doporučena pro řezání oceli tloušťky 4 až 30 mm při rozsahu řezacího proudu 60 až 170 A. Nejzásadnějším rozdílem je změna tvaru trysky hořáku a dále se u prvního vířivého plynu mění stlačený vzduch (air) na kyslík (O₂), druhý vířivý plyn zůstává stejný. Poslední změna nastává ve velikosti napětí, kdy u metody Silent cut je napětí vyšší. Technologie Silent cut tedy významně přispívá k ochraně zdraví pracovníků a zvýšení bezpečnosti při práci. [28; 29]

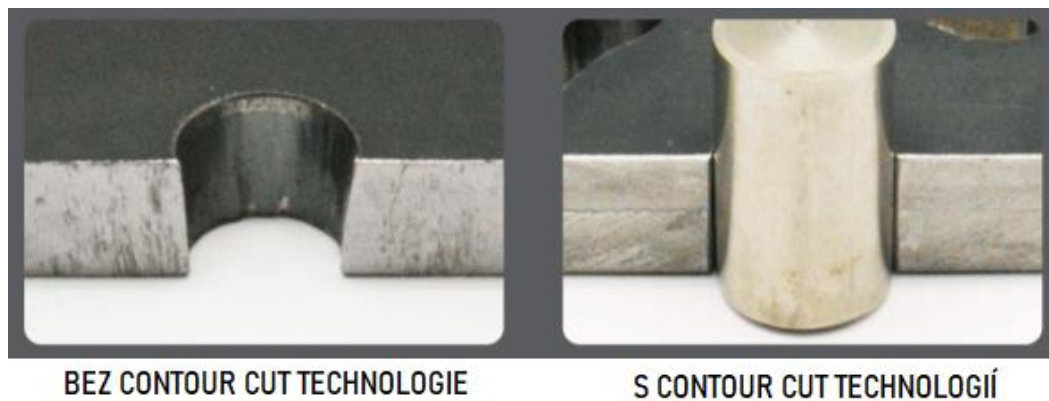


Obrázek 41 - Graf hlučnosti technologie Silent cut [28]

překlad: talk – mluvení, traffic – doprava, thunderstorm – bouřka, jet – tryskové letadlo

8.1.2 Contour cut

Inovace Contour cut od společnosti Kjellberg je technologie určená pro řezání malých obrysů, zejména malých otvorů v oceli. Je to speciální kombinace parametrů řezání, která se vyplatí použít zejména u řezání otvorů u oceli s poměrem průměru ke tloušťce: 1:1. Tato technologie využívá změnu směru řezu obrysu. Vnější obrys dílu se řeže po směru hodinových ručiček a vnitřní otvory proti směru hodinových ručiček. Dále dochází k výraznému snížení řezné rychlosti a díky tomu mají řezané otvory horní i spodní hrany ostré a velmi hladkou plochu řezu. Výhodnost této technologie spočívá v tom, že díl poté nemusí být nákladně opracováván, například převrtáván. Contour cut tedy šetří čas a výrobní náklady a díky tomu zvyšuje produktivitu. [30]



Obrázek 42 – Contour cut technologie [30]

8.1.3 Contour cut speed

Contour cut speed od firmy Kjellberg je další vývoj technologie Contour cut. Díky správné úpravě parametrů dokáže tato technologie řezat obrysy v obdobné kvalitě až 50 % rychleji, tím pádem snižuje náklady a značně zvyšuje produktivitu. Řez touto technologií má vynikající kvalitu, velmi malou tepelně ovlivněnou oblast a vysokou přesnost obrysu. Vysokou řeznou rychlostí navíc dosáhneme úspory ve spotřebě plynu. [31]

8.2 M³ plazma - ESAB

M³ plazma je označení inovace od firmy ESAB, které je vysokorychlostní a dokáže řezat proudem až 600 A tloušťky v rozmezí 2 až 150 mm, aniž by byla omezena kvalita řezu. Tato technologie zaručuje výhodnou kombinaci spolehlivosti, hospodárnosti a produktivity díky novému hořáku PT-36, který nahrazuje tři jednoúčelové hořáky (pro řezání větších tlouštěk, pro přesné řezání a pro plazmové značení). Hořák PT-36 obsahuje dvakrát méně spotřebních dílů než standardní plazmové hořáky. Celkově tento automatizovaný plazmový systém prodlužuje životnost spotřebních dílů díky přesné kontrole a řízení průtoku plynů. [32]

8.2.1 SmartBevel™

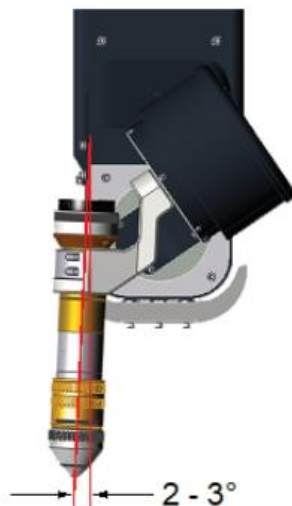
Technologie SmartBevel™ od firmy ESAB umožňuje snazší programování a řezání úkosů a díky tomu šetří čas i peníze. Technologie obsahuje data zkosení a geometrické kompenzace nutné k řezání úkosů V, X, Y a K na oceli o tloušťce 6 až 50 mm. Všechny tyto data kompenzace zkosení vkládá technologie rovnou do CNC, nikoli do programovacího systému. Tato technologie nabízí možnost volit úkosy již při programování procesu řezání v programu Columbus III. [33]

8.2.2 SmartCycle™

Technologie SmartCycle od firmy ESAB zvyšuje produktivitu řezání celkovou integrací CNC a plazmového systému. Tato technologie zkracuje dobu cyklu díky eliminaci zbytečných pohybů nástroje a zkrácení neproduktivních časů. Celkovou dobu řezání významně zkracuje vyhnutí se počátečnímu snímání výšky tam, kde je to možné a vyloučení úplného zasunutí hořáku po každém řezu. Značný nárůst produktivity můžeme pocítit nejlépe při řezání menších dílů s více otvory. [34]

8.2.3 SquareCut

SquareCut od firmy ESAB dokáže zlepšit kvalitu řezu díky zkosenému hořáku o 2 až 3° (viz obrázek 43). Naklonění hořáku kompenzuje přirozený úhel zkosení při plazmovém řezání. Tato technologie zlepšuje kruhovitost a válcovitost malých otvorů a pravouhlost řezných hran. Zkosení hořáku dosáhneme díky speciální plazmové úkosovačce DMX také od firmy ESAB. Tato technologie také umožňuje řezat materiály vysokou rychlostí díky vyššímu proudu v kombinaci s nakloněným hořákem. Bez této technologie můžeme například ocel o tloušťce 12 mm řezat proudem 200 A a rychlostí 2700 mm/min. S touto technologií bychom stejnou ocel řezali proudem 400 A a rychlostí 5000 mm/min. [35]



Obrázek 43 - Zkosený hořák u technologie SquareCut [35]

8.2.4 Enhanced Hole

Technologie Enhanced Hole od firmy ESAB umožňuje dosahovat téměř vždy dokonalé válcovitosti při řezání malých otvorů až do průměru rovnému tloušťce materiálu díky správné kombinaci pokročilých funkcí systémů iSeries, Vision® CNC a Smart Voltage Height Control. Technologie Enhanced Hole vyžaduje kombinaci výše zmíněných systémů pro měření a nastavení velikosti napětí na hořáku a řízení stroje, a ještě k tomu speciální software pro nastavení a kontrolu parametrů. Technologie funguje u strojů plně automaticky a nevyžaduje zásah obsluhy stroje. [36]

8.3 HyPerformance – Hypertherm

HyPerformance je inovace od firmy Hypertherm, která kombinuje vyšší řezné rychlosti, rychlé cykly procesů, rychlé přechody a vysokou spolehlivost. Inovace zvyšuje výkonnost a snižuje provozní náklady. Toto zařízení umožňuje používat řezací procesy jako je: Rapid Part, PowerPierce, True Hole či True Bevel. [37]

8.3.1 Rapid Part

Tato technologie od firmy Hypertherm nabízí až 100% zvýšení produktivity díky optimalizaci procesu řezání. Rapid Part redukuje časy procesů jako jsou zasunutí hořáku, počáteční snímání výšky, předfuk plynu, detekci proříznutí materiálu nebo pohyb stolu. Většinu těchto procesů dokáže technologie urychlit díky optimalizaci pohybů stroje. [38]

8.3.2 PowerPierce

Tato technologie PowerPierce od firmy Hypertherm rozšiřuje možnosti proříznutí (Piercing) oceli. Zařízení jsou s touto technologií schopné proříznout materiál až o tloušťce 45 mm při 400 A, a 75 mm při 800 A. Těchto schopností dosahuje zařízení díky kapalinou chlazené krytce hořáku, která odpuzuje roztavený řezaný materiál během prořezávání a řezání. [37]



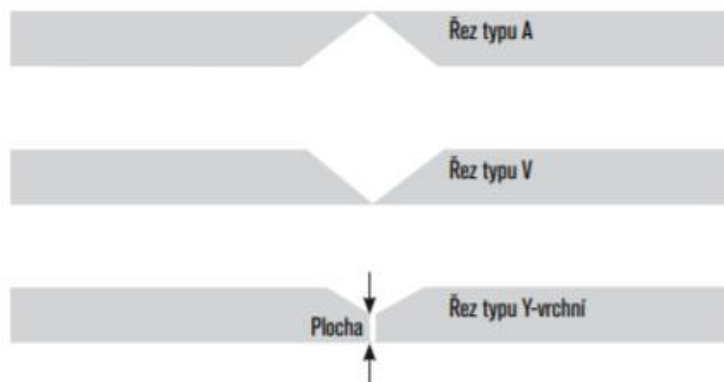
Obrázek 44 - Hořák s a bez technologie PowerPierce [37]

8.3.3 True Hole

Technologie True Hole od firmy Hypertherm je obdoba technologie Contour cut od firmy Kjellberg a Enhanced Hole od společnosti ESAB. Technologie True Hole nastaví specifickou kombinaci parametrů řezání, která výrazně zlepšuje kvalitu otvorů od poměru tloušťky k průměru díry 1:1 do 2:1. Aspekty ovlivňující kvalitu vyříznutých děr jsou: typ procesního plynu, průtok plynu, velikost řezacího proudu, metodika proříznutí, technika vedení hořáku, změna řezné rychlosti a ukončení oblouku. [39]

8.3.4 True Bevel

Technologie True Bevel od firmy Hypertherm usnadňuje řez uhlíkových a nízkoalokovaných ocelí pod úhlem typu V, A i Y. Pro úkosy typu V a A (viz obrázek 45) jsou úhly řezů v rozsahu 15° až 45°. Pro typ Y je rozsah od 22,5° do 45°. K této technologii se dodávají funkční tabulky, které pomocí vzorců dopočítají parametry řezu, postačí jen zadat tloušťku, typ a úhel řezu. [40]



Obrázek 45 - Typy řezů pod úhlem [40]

Bez technologie True Bevel



S technologií True Bevel

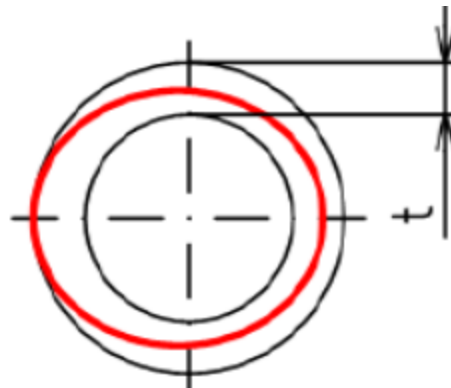


Obrázek 46 - Kvalita řezu s a bez technologie True Bevel [40]

9 Problémy kvality řezných hran při řezání vnitřních kruhových otvorů

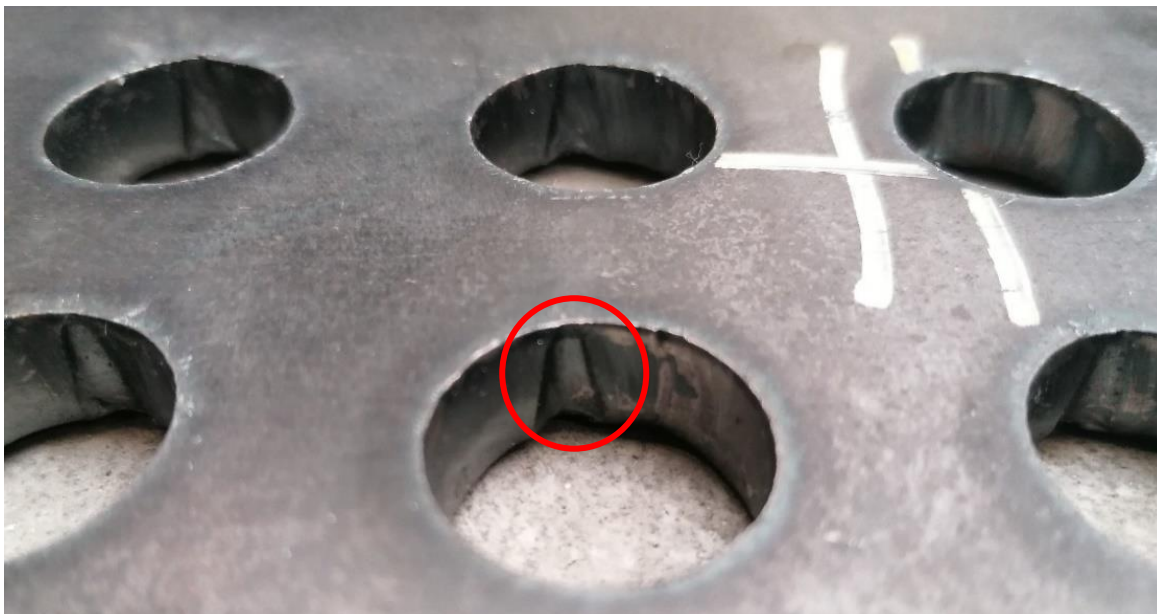
Jedním z nejčastějších problémů při řezání kruhových děr plazmou je jejich nevyhovující kruhovitost a nežádoucí kuželovitost.

Kruhovitost je definována jako rozdíl průměrů dvou soustředných kružnic. Tolerance je vyhovující, pokud všechny body díry leží v daném mezikruží. [41]



Obrázek 47 - Definice kruhovitosti [41]

Dále se u děr objevuje nežádoucí zápal neboli vrub v místě, kde plazma najíždí do řezu a zároveň řez ukončuje. Nechtěné kuželovitosti se vyhneme volbou vhodné kombinace parametrů řezu a použitím neopotřebovaných spotřebních dílů. Kruhovitost ovlivňuje především kombinace parametrů řezu, ale i míra opotřebovanosti hořáku nebo volba typu a úhlu nájezdu plazmového hořáku do řezu.



Obrázek 48 – Nežádoucí zápaly v kruhových dírách na zkušební vzorku

10 Experimentální část

Experimentální část této práce se zabývá kvalitou řezných hran při řezání kruhových otvorů za použití plazmového řezacího stroje. Častým problémem při řezání vnitřních otvorů bývá jejich nedostatečná kvalita, ať už se jedná o jejich kruhovitost, kolmost či drsnost řezné plochy. Dále se také v místě nájezdu hořáku do řezu objevuje nežádoucí zápal neboli vrub. Cílem výrobců plazmových zdrojů je dosáhnout obdobné kvality řezu vnitřních otvorů jako například při vrtání či laserovém řezání. Tohoto cíle výrobci dosahují za pomoci různých vyvinutých technologií, které již v dnešní době umožňují řezání kvalitních otvorů až od průměru rovnajícímu se tloušťce řezaného materiálu. Když je průměr otvoru menší než tloušťka materiálu, téměř vždy je s ohledem na kvalitu řezu upřednostňováno vrtání. Vrtání je v tomto případě i rychlejší. [42]

10.1 Experimentální zařízení - Plazmový řezací stroj

Experimentální řezy byly vyhotoveny za pomoci zdroje Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo, hořák byl použit PerCUT 450 a CNC systém Vanad Proxima (viz popis v kapitolách 10.1.1 – 10.1.2).

10.1.1 Plazmový řezací zdroj Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo

HiFocus 280i neo je flexibilní, výkonné a vysoce přesné zařízení. Dokáže řezat základní materiál od tloušťky 0,5 mm do 70 mm. Zdroj dokáže řezat proudem v rozmezí 10 až 280 A. Zdroj lze kombinovat s 2D či 3D CNC vodícími systémy. Standardně je při řezu k dispozici technologie Contour Cut a Silent Cut, je však zapotřebí specifické příslušenství. [43]

Tabulka 7 - Technické údaje zdroje HiFocus 280i neo [43]

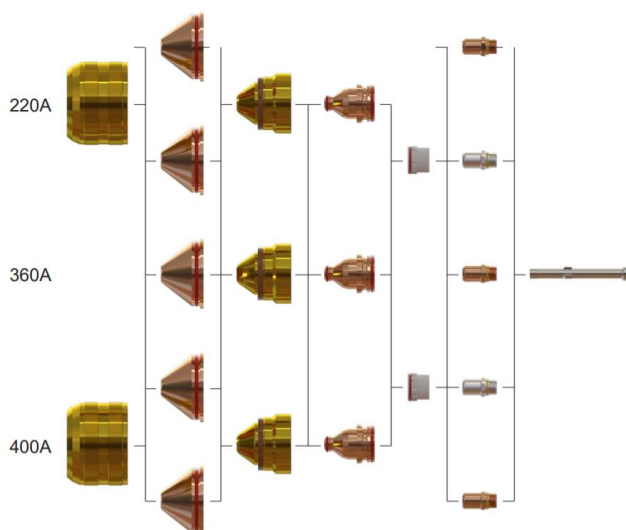
ZDROJ	HiFocus 280i neo
Síťové napětí	3x 400 V, 50 Hz
Maximální řezací proud	280 A
Proud pro značení	5 až 50 A
Rozsah řezacích tloušťek	0,5 až 70 mm
Rozměry	1030 x 680 x 1450
Váha	422 kg



Obrázek 49 - plazmový zdroj HiFocus 280i neo [43]

Ke zdroji HiFocus 280i neo je doporučován hořák PerCut 450. Jedná se o strojní hořák. Jednotlivé části strojního hořáku byly podrobně popsány v kapitole 2.8 a v jejích podkapitolách. Pro každý proud je doporučena trochu jiná správná sestava spotřebních dílů hořáku (viz obrázek 50).

Při mém experimentu byla použita chladicí trubka G902Y, katoda G015Y, vedení plynu G101C, tryska G2012Y, krytka trysky G3028, krytka vířivého plynu G4030 a ochranná krytka G502.



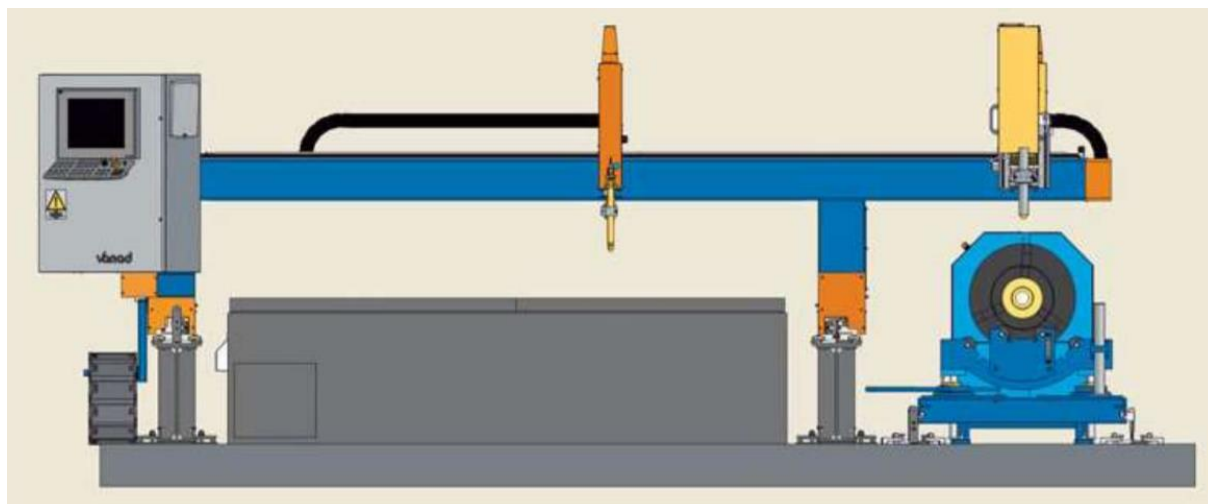
Obrázek 50 - Spotřební díly hořáku PerCut 450 [57]

10.1.2 CNC řídicí systém Vanad Proxima 20

Vanad Proxima 20 je výkonný CNC pálicí stroj. Mezi přednosti tohoto pálicího stroje patří vysoká přesnost polohování, vynikající dynamické vlastnosti a eliminace neproduktivních časů při provozu. [44]

Tabulka 8 - Parametry konkrétního řezacího stroje na fakultě

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 ²
Počet suportů:	1 autogenní jednotka, 1 plazmová jednotka
Rychlost zvedání hořáků:	8 m/min (plazma)
Kapacita volné paměti pro pálicí plány:	cca 2 GB
Přesnost nastavení zapalovací výšky plazmy:	+/- 0,1 mm



Obrázek 51 - CNC pálicí systém Vanad Proxima [44]

10.2 Použitý základní materiál

Jako základní materiál byl použit ocelový plech jakosti S235JR o tloušťce 10 mm. Jedná se o standardní za tepla válcovanou nelegovanou ocel. Má dobrou plasticitu, houževnatost a pevnost. Písmeno S u značení materiálu značí, že se jedná o konstrukční ocel. Třímístné číslo uvádí hodnotu minimální meze kluzu v MPa. Písmena JR vyjadřují, že při teplotě 20 °C je

hodnota nárazové práce 27 J/cm². Teplota tání této oceli je 1420 až 1460 °C, pevnost v tahu je 360 až 510 N/mm². Materiál je svařitelný, což zajišťuje obsah uhlíku, který je nižší než 0,22 % (viz tabulka 9). [45; 46]

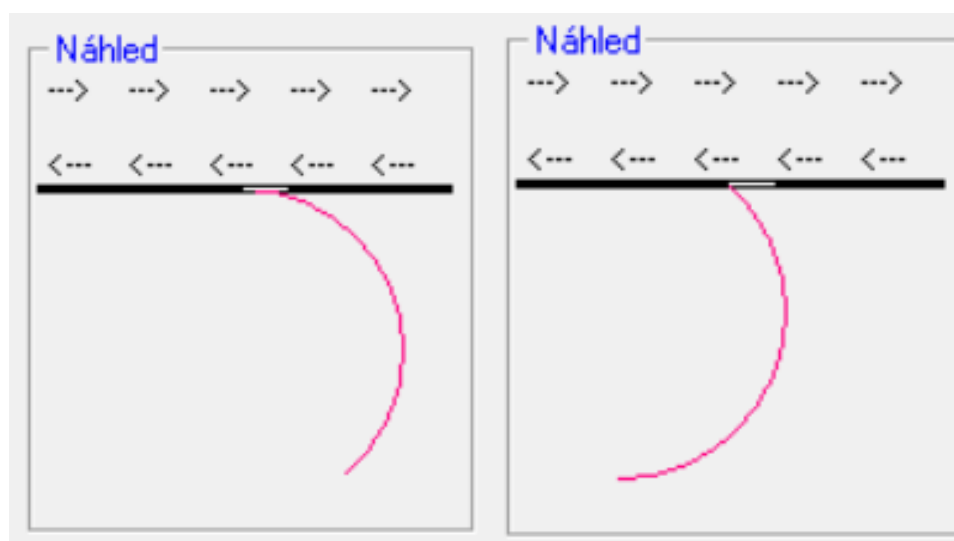
Tabulka 9 - Chemické složení oceli S235JR [46]

Maximální zastoupení prvků v chemickém složení v [%]						
C	Mn	Si	P	S	N	Cu
0,17	1,40	-	0,035	0,035	0,012	0,55

10.3 Popis experimentu

Na výše zmíněném plazmovém řezacím stroji bylo vyříznuto 55 děr o průměru 20 mm do plechu S235JR tloušťky 10 mm. Experiment spočíval v úpravě dráhy hořáku. Byl měněn úhel nájezdu do řezu (od 50° do 90° po 10°) a přejetí (od záporného -0,5 mm do 0,5 mm po 0,1 mm). Ukázka trajektorie nájezdu pod 50 a 90° je znázorněna na obrázku 52. Přejetí v mínusu je jinak vyjádřené nedoříznutí otvoru. Když je u přejetí nastavená kladná hodnota, hořák pokračuje dál i přesto, že už začíná „druhé kolo“ (viz obrázek 53).

Každá díra má svou kombinaci přejezdu a úhlu nájezdu do řezu. Výjezd byl v průběhu experimentu nastaven nulový, jelikož docházelo ke kolizi hořáku a materiálu (hořák si hlídal výšku od materiálu a když vnitřek díry propadl, narazil hořák do řezaného materiálu).



Obrázek 52 – Ukázka nájezdu hořáku pod úhlem 50 a 90°

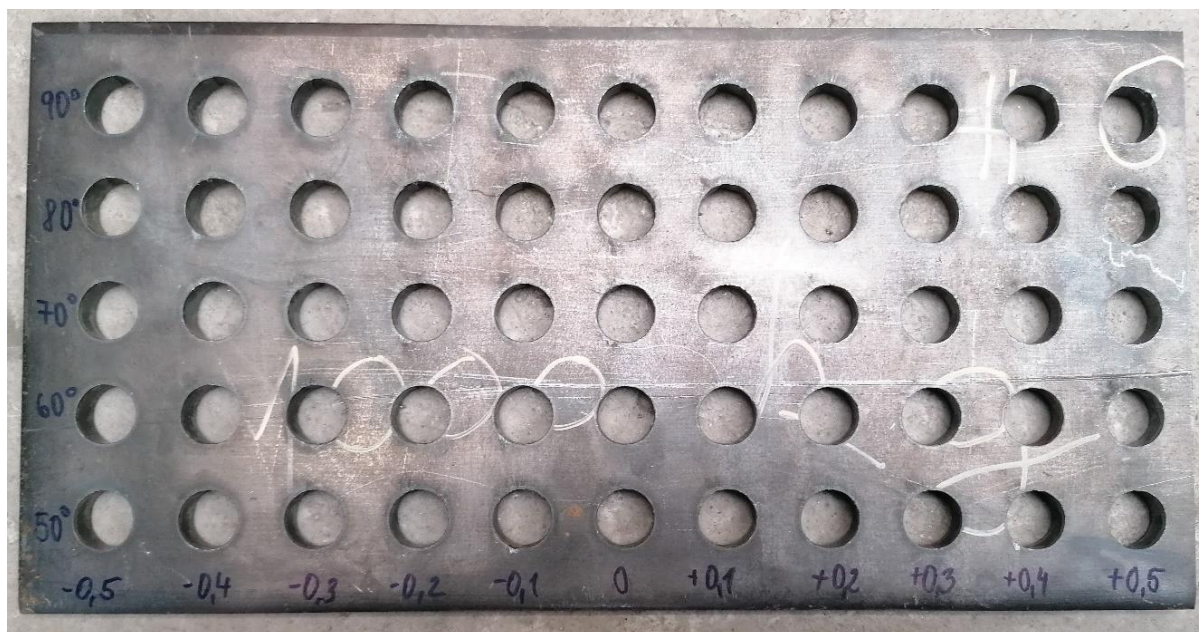


Obrázek 53 – Ukázka přejetí -0,5 mm a +0,5 mm

Parametry pro řezání zkušebních vzorků byly voleny podle katalogu výrobce (viz tabulka 10). Skutečně použité hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 10 - Doporučené parametry řezání pro zdroj HiFocus 280i neo [47]

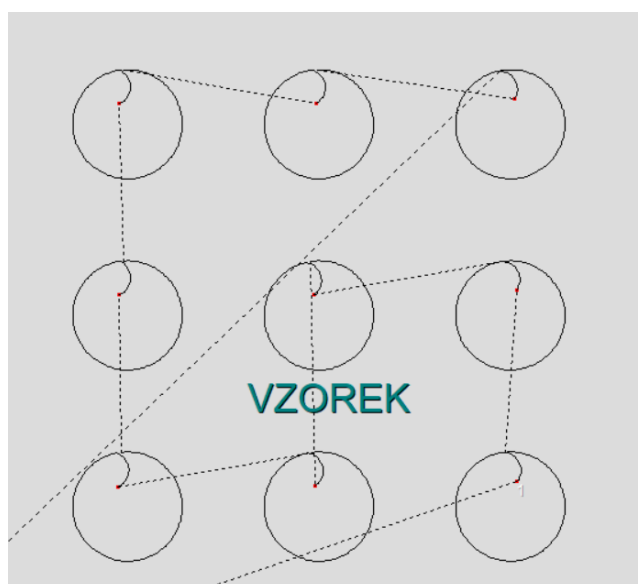
MATERIÁL	TLOUŠŤKA [mm]	ŘEZACÍ PROUD [A]	ZAPALOVACÍ PLYN	PLAZMOVÝ PLYN	SEKUDÁRNÍ PLYN	TECHNOLOGIE
S235	0,5 – 1,5	20	Stlačený vzduch	O ₂	O ₂	HiFocus Contour Cut
	1 - 30	35 – 200			Stlačený vzduch + O ₂	
	4 – 25	60 - 200			Stlačený vzduch	HiFocus Contour Cut Speed
	6 - 70	200 - 280			Stlačený vzduch	



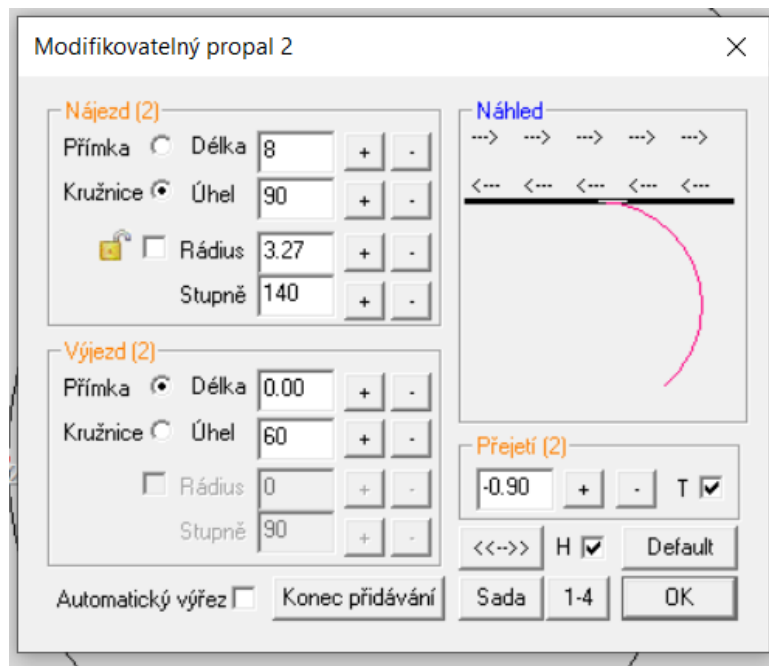
Obrázek 54 - Zkušební hotový plech

10.4 Programování plánu řezu

Nejprve byl navržen plán řezu v SW WRYKRY. Pro jednotlivé díry jsem zvolila kombinace přejetí a úhlu nájezdu. Nájezd byl umístěn vždy na stejném místě u každého otvoru.



Obrázek 55 - Ukázka vytvořeného návrhu plánu řezu



Obrázek 56 - Ukázka nastavení nájezdu hořáku do díry

10.5 Výroba a následná úprava vzorku

Zkušební řezy byly uskutečněny na řezacím plazmovém stroji (popsaném v kapitole 10.1), který je umístěn v halové laboratoři Ústavu strojírenské technologie fakulty strojní na ČVUT v Praze. Použité parametry byly zvoleny dle katalogu zdroje a jsou uvedeny v tabulce 12.



Obrázek 57 - Plazmový řezací stroj v halové laboratoři ÚST

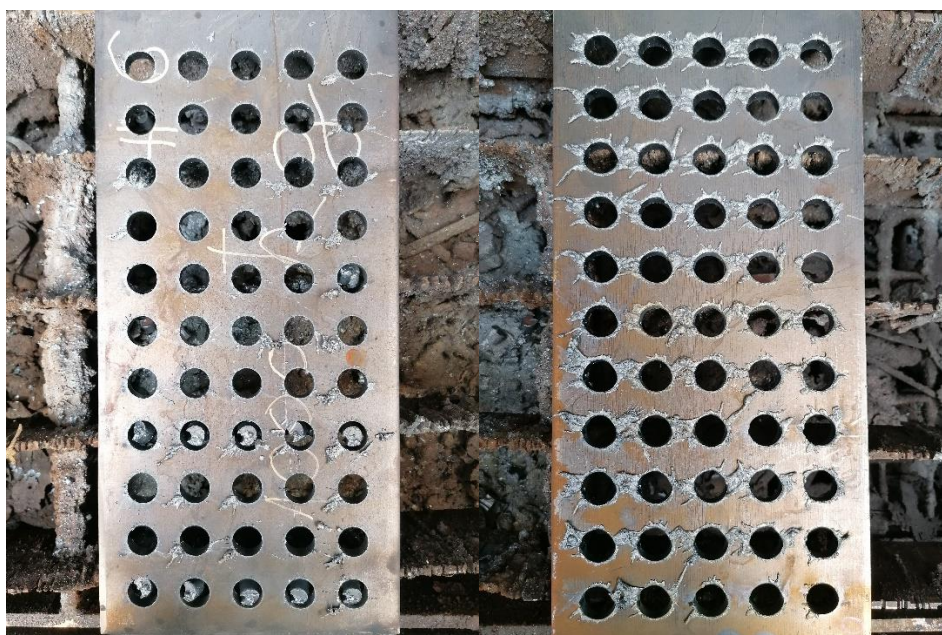
Tabulka 11 - Nastavení parametrů řezu

ŘEZACÍ PROUD [A]	NAPĚTÍ PLAZMY [V]	RYCHLOST ŘEZU [m/min]	PRACOVNÍ VÝŠKA HOŘÁKU [mm]	ZAPALOVACÍ VÝŠKA HOŘÁKU [mm]	VÝDRŽ PROPALU [s]
130	125	1,2	2,5	4	0,5



Obrázek 58 - Proces řezání vzorku

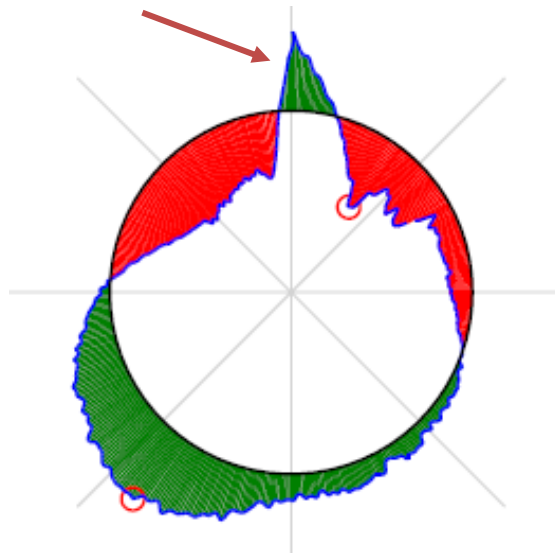
Ze vzorku byla následně po řezání odstraněna ulpělá struska pomocí ruční brusky.



Obrázek 59 - Vzorek před očištěním z horní a spodní strany

10.6 Měření pomocí CNC měřicího stroje

Následně se pomocí měřicího souřadnicového CMM stroje Carl Zeiss UMPC 850 změřila kruhovitost a průměr každé díry (viz tabulka 12 a 13). Součástí výstupu ze stroje byl kromě údajů průměrů a kruhovitosti grafický výstup (viz obrázek 60). Protokol měření ze souřadnicového stroje je obsažen v elektronické příloze 1.



Obrázek 60 - Grafický výstup z měřicího stroje UMPC 850

Na grafickém výstupu (viz obrázek 60) můžeme vidět zdokumentovaný povrch díry. Přístroj změřil maximální a minimální průměr jako vzdálenost dvou přes střed protilehlých bodů. Červená kolečka tedy značí body, které jsou od středu nejdále/nejbliže. Poté se do výstupu promítne požadovaný průměr 20 mm. Následně je vše, co je dále než požadovaný průměr, označeno zelenou barvou a vše co je blíže červenou barvou.

Vložená hnědá šipka nám u grafického výstupu na obrázku 60 ukazuje na zaznamenaný již zmíněný nežádoucí zápal (viz kapitola 9).

Při měření byl průměr odečítán pro každou díru dvakrát, vždy přibližně 1 mm od horní a spodní hrany řezu. Konkrétní naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12.

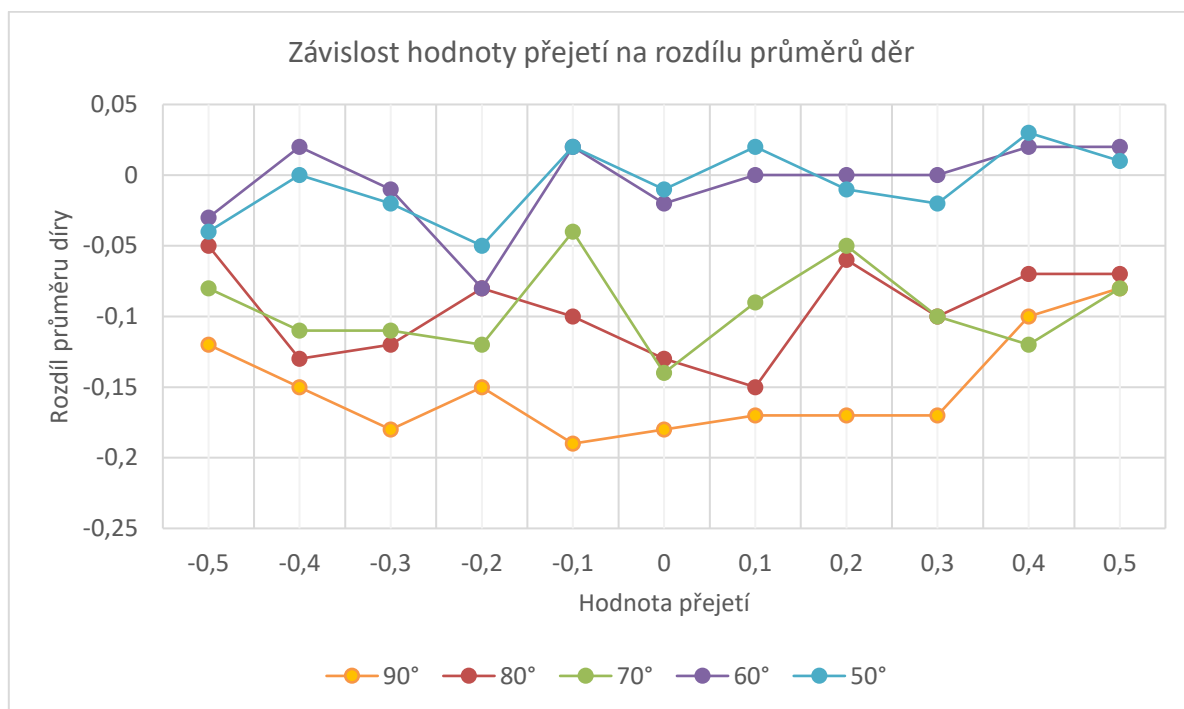
Tabulka 12 - Výsledky měření průměrů děr

	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
90°	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1. ∅	19,77	19,82	19,85	19,82	19,82	19,83	19,83	19,83	19,81	19,78	19,76
2. ∅	19,89	19,97	20,03	19,97	20,01	20,01	20,00	20,00	19,98	19,88	19,84
Δ	-0,12	-0,15	-0,18	-0,15	-0,19	-0,18	-0,17	-0,17	-0,17	-0,10	-0,08
80°	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.
1. ∅	19,76	19,77	19,81	19,82	19,81	19,80	19,82	19,81	19,80	19,79	19,79
2. ∅	19,81	19,90	19,93	19,90	19,91	19,93	19,97	19,87	19,90	19,86	19,86
Δ	-0,05	-0,13	-0,12	-0,08	-0,10	-0,13	-0,15	-0,06	-0,10	-0,07	-0,07
70°	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.
1. ∅	19,72	19,76	19,80	19,82	19,79	19,83	19,81	19,81	19,80	19,76	19,75
2. ∅	19,80	19,87	19,91	19,94	19,83	19,97	19,90	19,86	19,90	19,88	19,83
Δ	-0,08	-0,11	-0,11	-0,12	-0,04	-0,14	-0,09	-0,05	-0,10	-0,12	-0,08
60°	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.	41.	42.	43.	44.
1. ∅	19,74	19,76	19,79	19,77	19,78	19,78	19,82	19,80	19,82	19,76	19,74
2. ∅	19,77	19,74	19,80	19,85	19,76	19,80	19,82	19,80	19,82	19,74	19,72
Δ	-0,03	0,02	-0,01	-0,08	0,02	-0,02	0	0	0	0,02	0,02
50°	45.	46.	47.	48.	49.	50.	51.	52.	53.	54.	55.
1. ∅	19,66	19,70	19,73	19,72	19,78	19,80	19,80	19,80	19,80	19,79	19,79
2. ∅	19,70	19,70	19,75	19,77	19,76	19,81	19,78	19,81	19,82	19,76	19,78
Δ	-0,04	0	-0,02	-0,05	0,02	-0,01	0,02	-0,01	-0,02	0,03	0,01

Díry jsou téměř vždy menší než požadovaný průměr 20 mm. Rozmezí průměrů u horní hrany sahá od 19,66 do 19,85. U spodní hrany byly naměřeny průměry od 19,80 do 20,03.

Z naměřených průměrů se dá dále vyčíst, že se díra, jak nepatrně zvětšuje, tak je dokonale kolmá, tak nepatrně zmenšuje. V 78 % případů se díra nepatrně zvětšuje. Maximální hodnota zvětšení díry je 0,15 mm, zato hodnota zmenšení je maximálně jen 0,03 mm. Díra je dokonale kolmá při kombinaci úhlu nájezdu 60° a přejetí od 0,1 do 0,3 mm. Domnívám se, že čím je menší úhel nájezdu, tím méně zkosená díra je, protože u 50° je rozdíl mezi průměry maximálně 0,05 mm, zatímco u 90° je rozdíl až 0,19 mm. Přejetí, ať už záporné či kladné, na kolmost řezu nemá prokazatelný vliv.

Z grafu 1 lze vyčíst závislost hodnoty přejetí na rozdílu průměrů děr. Okolo ideální hodnoty rozdílu průměru díry, což je 0, se nejvíce pohybují hodnoty při úhlu nájezdu 50 a 60°. Největší zkosení díry bylo naměřeno pro úhel nájezdu 90°.



Graf 1 - Závislost hodnoty přejetí na rozdílu průměrů děr

Dále byla, jak již bylo zmíněno výše, změřena kruhovitosť otvorů (viz tabulka 13). Opět bylo měření provedeno 1 mm od horní hrany řezu a 1 mm od spodní hrany řezu – proto jsou v tabulce uvedeny pro každou díru dvě hodnoty kruhovitosti.

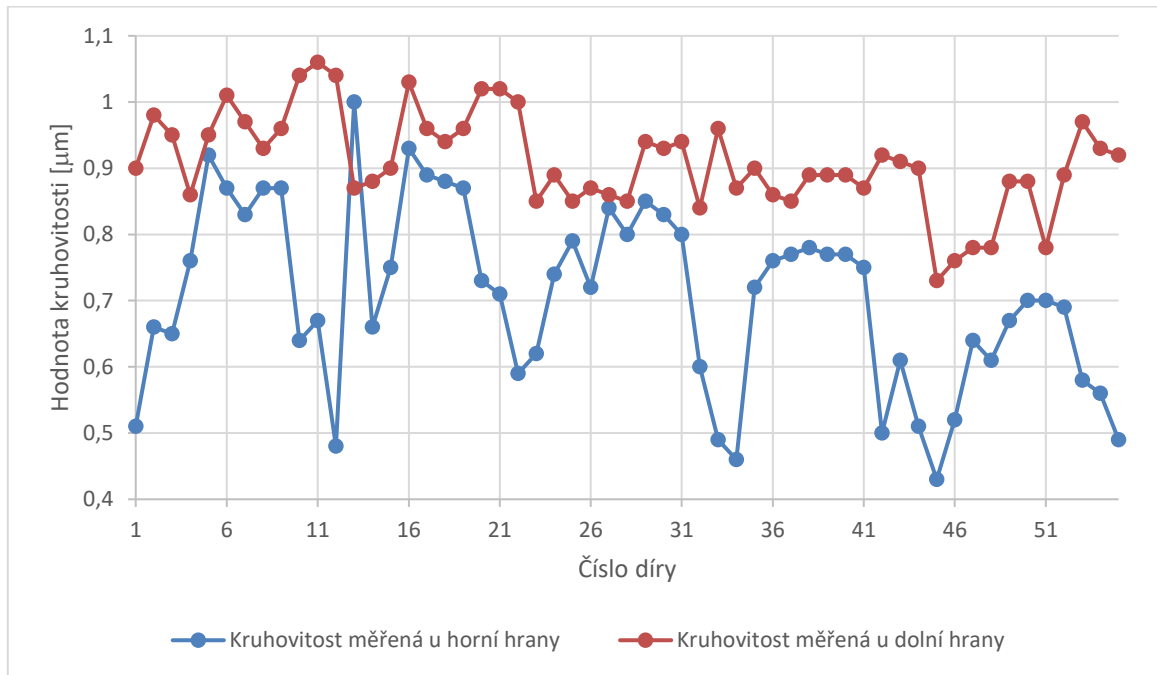
Naměřené hodnoty kruhovitosti do značné míry ovlivňuje nežádoucí již zmiňovaný zápal (viz obrázek 48). Definice kruhovitosti je popsána v kapitole 9.

Tabulka 13 - Výsledky měření kruhovitosti děr [μm]

	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
90°	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1. o	0,51	0,66	0,65	0,76	0,92	0,87	0,83	0,87	0,87	0,64	0,67
2. o	0,90	0,98	0,95	0,86	0,95	1,01	0,97	0,93	0,96	1,04	1,06
80°	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.
1. o	0,48	1,00	0,66	0,75	0,93	0,89	0,88	0,87	0,73	0,71	0,59
2. o	1,04	0,87	0,88	0,90	1,03	0,96	0,94	0,96	1,02	1,02	1,00
70°	23.	24.	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.
1. o	0,62	0,74	0,79	0,72	0,84	0,80	0,85	0,83	0,80	0,60	0,49
2. o	0,85	0,89	0,85	0,87	0,86	0,85	0,94	0,93	0,94	0,84	0,96
60°	34.	35.	36.	37.	38.	39.	40.	41.	42.	43.	44.
1. o	0,46	0,72	0,76	0,77	0,78	0,77	0,77	0,75	0,50	0,61	0,51
2. o	0,87	0,90	0,86	0,85	0,89	0,89	0,89	0,87	0,92	0,91	0,90
50°	45.	46.	47.	48.	49.	50.	51.	52.	53.	54.	55.
1. o	0,43	0,52	0,64	0,61	0,67	0,70	0,70	0,69	0,58	0,56	0,49
2. o	0,73	0,76	0,78	0,78	0,88	0,88	0,78	0,89	0,97	0,93	0,92

Z této tabulky 13 lze vyčíst, že kruhovitosť u horní hrany řezu je daleko lepší než u spodní hrany řezu. U horní hrany řezu se hodnota většinou nejčastěji pohybuje mezi 0,4 až 0,6 mm, zatímco u dolní hrany dostáváme hodnoty kruhovitosti až 1 mm. To bude ovlivněno tím, že zápal u dolní hrany řezu je daleko hlubší a větší než u horní.

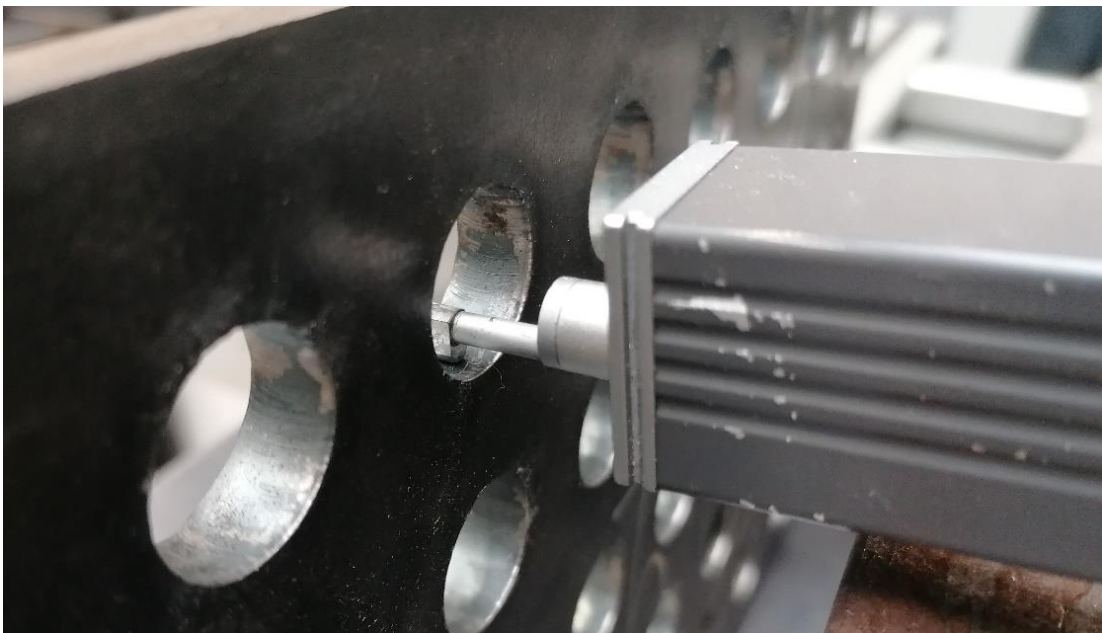
Z grafu 2 lze vyčíst, že hodnota kruhovitosti změřená v dolní části díry se pohybuje kolem větší hodnoty než kruhovitosť změřená v horní části díry. Dále lze z grafu vyčíst, že vždy od přejetí -0,5 do 0 kruhovitosť narůstala a poté od 0 do 0,5 opět klesala (vyznačuje se hrbolky viditelnými na spojnicí hodnot kruhovitosti měřené u horní hrany). Z toho vyplývá, že „kvalitnější“ díry s menší kruhovitosť vznikly v maximálních krajních polohách nastavení.



Graf 2 - Hodnoty kruhovitosti

10.7 Měření drsnosti řezné plochy kruhových děr

Dále byla vyhodnocována drsnost řezných kruhových ploch. K měření byl použit přenosný drsnoměr Mitotuyo SJ-301. Drsnost byla u každé díry měřena vždy ve stejném místě (naproti zápalu), kolmo ke směru řezu (viz obrázek 61). Byla hodnocena největší výška profilu Rz a střední aritmetická odchylka profilu Ra. Největší výška profilu Rz byla měřena na vzdálenosti 0,8 mm.



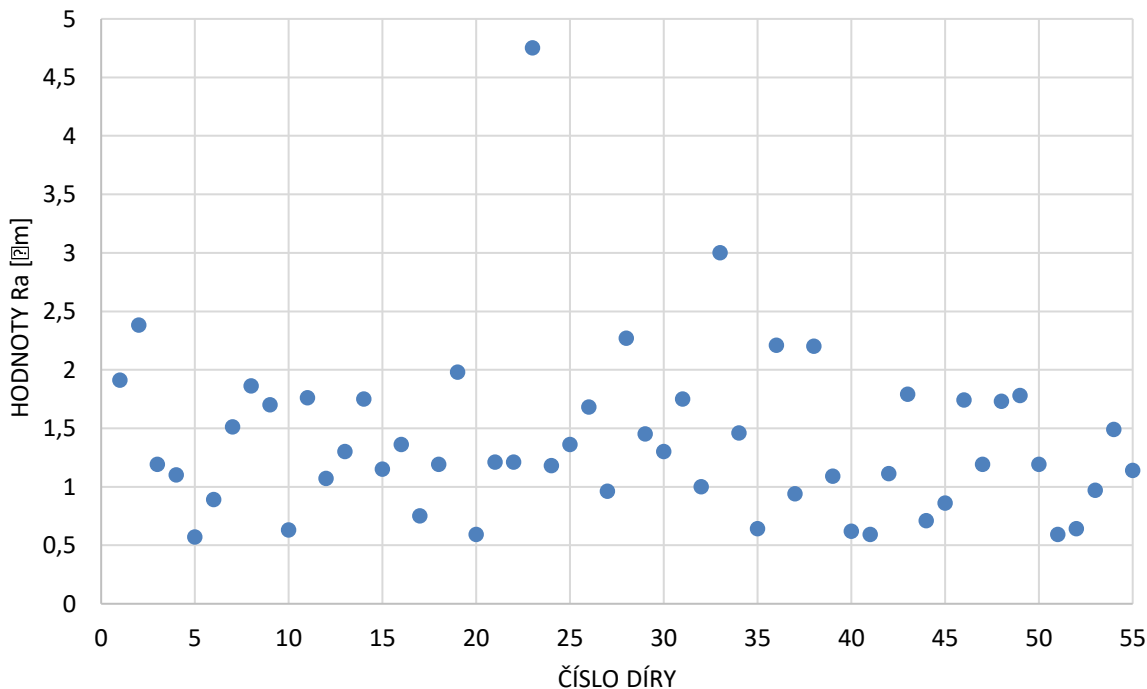
Obrázek 61 - Měření drsnosti ploch řezů drsnoměrem Mitotuyo SJ-301

Tabulka 14 - Naměřená střední aritmetická odchylka profilu Ra [μm]

Ra [μm]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
90°	1,91	0,89	1,76	1,36	1,21	1,68	1,75	2,21	0,59	1,74	0,59
80°	2,38	1,51	1,07	0,75	1,21	0,96	1,00	0,94	1,11	1,19	0,64
70°	1,19	1,86	1,30	1,19	4,75	2,27	3,00	2,20	1,79	1,73	0,97
60°	1,10	1,70	1,75	1,98	1,18	1,45	1,46	1,09	0,71	1,78	1,49
50°	0,57	0,63	1,15	0,59	1,36	1,30	0,64	0,62	0,86	1,19	1,14

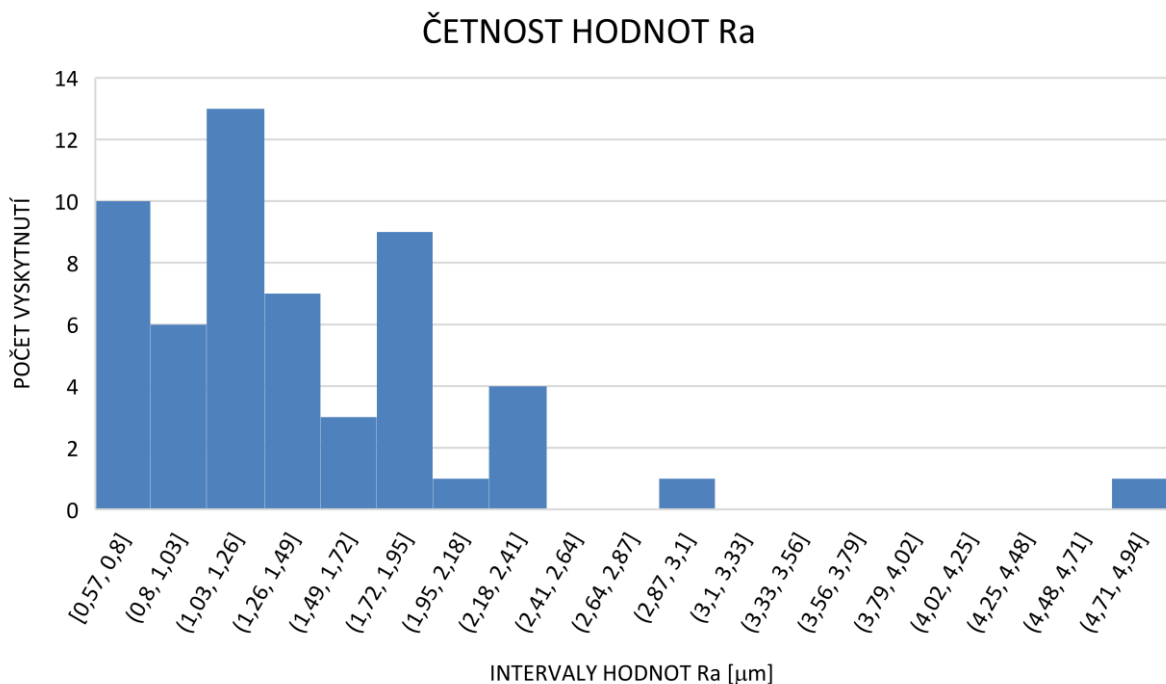
Hodnoty střední aritmetické odchylky profilu Ra se nejčastěji pohybují mezi hodnotami 0,5 až 2,4 μm (viz graf 3). Nejhorší naměřená hodnota byla nejpravděpodobněji způsobena chybou měření. Pro porovnání hodnoty Ra vyvrtávaných děr bývají obvykle v rozmezí 1,6 až 3,2 μm . [48]

V rámci výše pospaného experimentálního řezání děr nebyl vysledován žádný trend či prokazatelná závislost mezi úhlem nájezdu či přejetím a výslednou drsností.



Graf 3 - Hodnoty střední aritmetické odchylky profilu Ra

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány také v histogramu. Histogram zobrazuje četnost hodnot v daném intervalu. Z grafu 4 (histogramu) můžeme vypozorovat, že nejvíce hodnot, 13, leží v intervalu Ra od 1,03 do 1,26 μm .

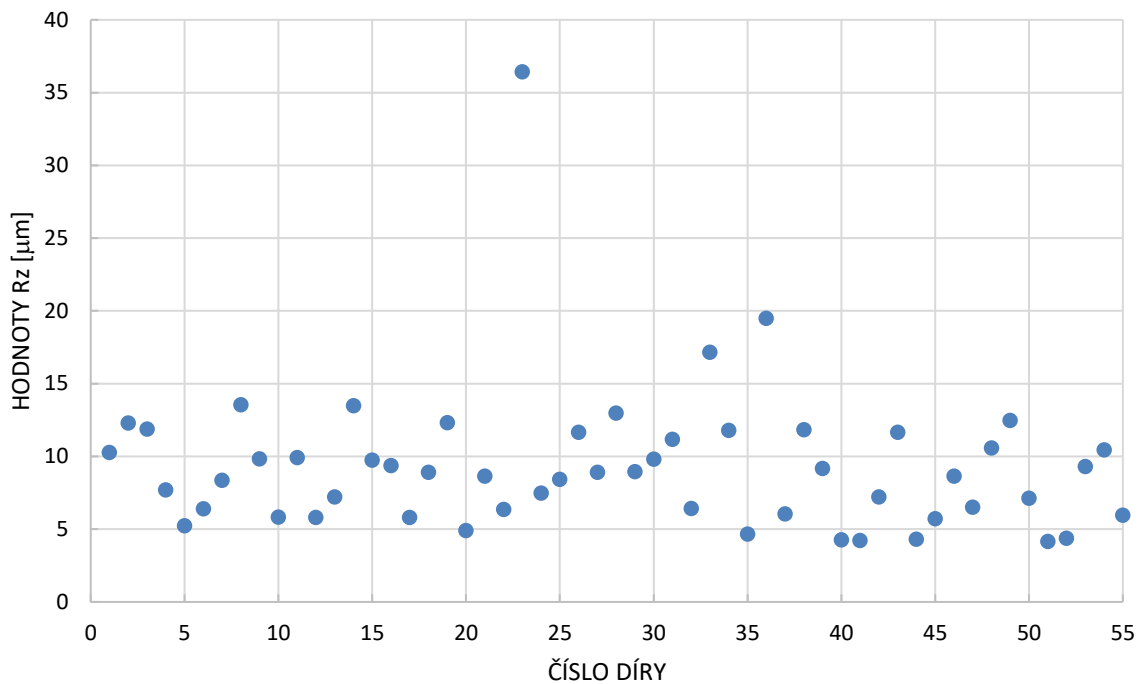


Graf 4 - Četnost hodnot střední aritmetické odchylky profilu Ra

Tabulka 15 - Naměřená největší výška profilu Rz [μm]

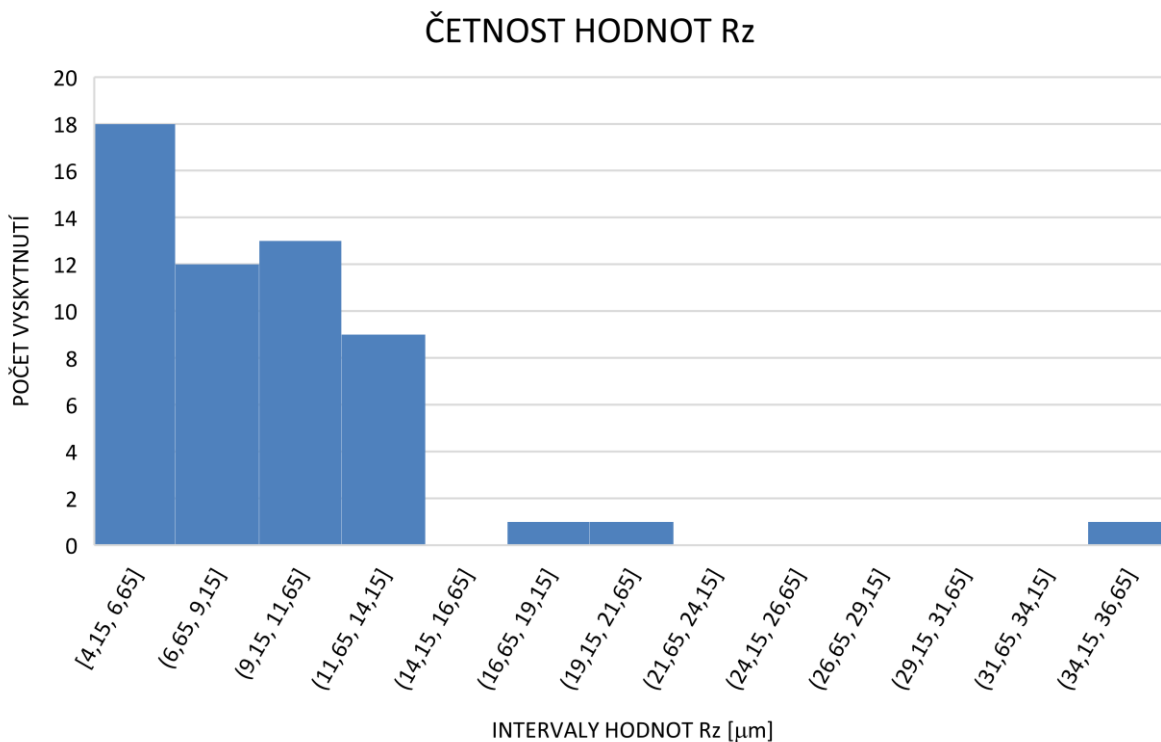
Rz [μm]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
90°	10,27	6,40	9,91	9,37	8,64	11,65	11,16	19,49	4,21	8,63	4,15
80°	12,29	8,36	5,79	5,80	6,35	8,91	6,41	6,03	7,20	6,51	4,36
70°	11,88	13,55	7,20	8,90	36,41	12,98	17,15	11,83	11,64	10,57	9,30
60°	7,68	9,83	13,48	12,31	7,48	8,94	11,78	9,16	4,30	12,47	10,44
50°	5,22	5,81	9,74	4,89	8,41	9,81	4,65	4,26	5,70	7,12	5,96

Hodnoty největší naměřené výšky profilu Rz sahají od hodnoty 4,15 μm do 19,49 μm (viz graf 5).



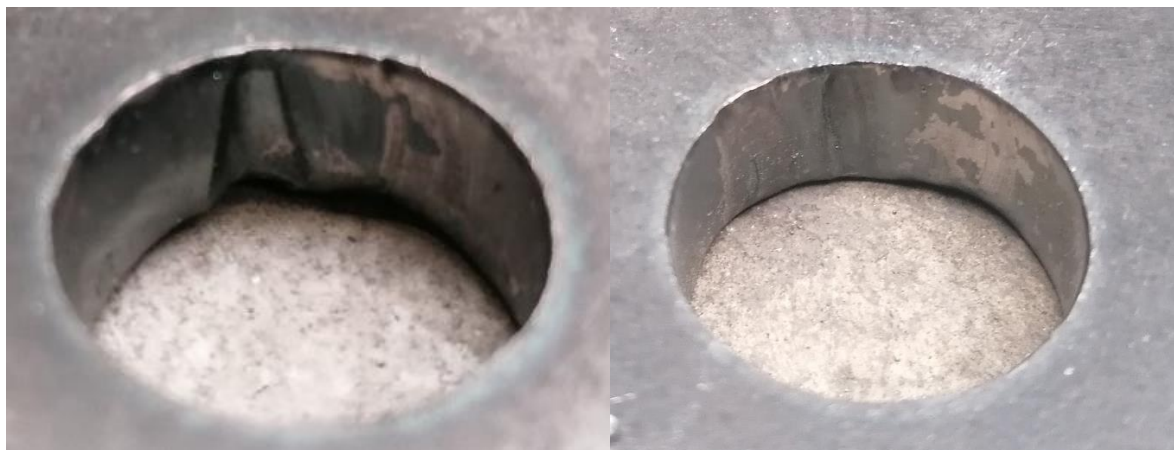
Graf 5 - Hodnoty největší výšky profilu Rz

Četnost hodnot v daných intervalech byla zaznamenána do grafu 6. Nejvíce hodnot, 18, leží v intervalu Rz 4,15 až 6,65 µm.



Graf 6 - Četnost hodnot největší výšky profilu Rz

Dále byl vyříznut vzorek, ze stejného materiálu o stejné tloušťce, kde byl nastaven režim „předčasné vypnutí – 0,5 s“. Tento režim postupně snižuje 0,5 s před koncem proud a tlak plynu. Díra při tomto režimu dosahovala nejlepší kvality. Zápal neboli vrub už nebyl tak výrazný, v některých případech téměř neviditelný (viz obrázek 62).



Obrázek 62 - Porovnání díry bez a s funkcí předčasného vypnutí

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo posoudit vliv parametrů řezání na kvalitu řezných hran po plazmovém řezání. Jak bylo popsáno výše, v rámci experimentální části této bakalářské práce bylo na CNC pálicím stroji Vanad Proxima 20 s plazmovým zdrojem Kjellberg Firstenwalde HiFocus 280i neo a hořákem PerCut 450 realizováno vyřezání vnitřních kruhových otvorů o průměru 20 mm do ocelového plechu jakosti S235JR a tloušťce 10 mm. Na vypálených otvorech byla u každé díry dvakrát (u horní hrany řezu a u spodní hrany řezu) změřena kruhovitost a průměr. Dále byla změřena u každého otvoru vždy na stejném místě drsnost povrchu Ra a největší výška profilu Rz.

Z výsledků vyplývá, že nejlepší kvality řezných hran bylo dosaženo při použití kombinace parametrů úhlu nájezdu 50 nebo 60° a hodnoty přejetí -0,5 či 0,5 mm. Dále kvalitu řezu výrazně pozitivně ovlivnila funkce předčasného vypnutí 0,5 s.

Dalšími možnostmi, jak dosáhnout vyšší kvality řezných hran, může být například změna tvaru nájezdu hořáku do spirály či nastavení výjezdu hořáku do prázdné díry s čímž se pojí vypnutí hlídání výšky hořáku.

Tato bakalářská práce určitě nalezne uplatnění v praxi, neboť přehledně a logicky shrnuje základní principy a aktuální informace o řezání plazmou a v neposlední řadě popisuje nejnovější trendy a inovace světových výrobců v oblasti plazmového řezání kovových materiálů.

Informace obsažené v této bakalářské práci mohou do určité míry posloužit technickým pracovníkům v průmyslové praxi jako vodítko při výběru funkcí nového plazmového stroje, nebo pro tvorbu technologického postupu či programu pro vyřezávání děr plazmou.

Bibliografie

- [1] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-010-1028-7.
- [2] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [3] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). *LAO - lasery a optika* [online]. [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [4] Sublimační řezání. *TRUMPF* [online]. 2021 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/laserove-rezani/sublimacni-rezani/
- [5] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80904582-2-2.
- [6] DOLEJSKÝ, Tomáš. *Tepelné dělení materiálu: Řezání plazmou - se souborem testových otázek*. 1. Ostrava: Zerros, 2018. ISBN 978-80-85771-14-5.
- [7] KHUN, Josef a Vladimír SCHOLTZ. *Nízkoteplotní plazma VI – srážky v plazmatu II*. [online]. Aldebaran homepage [cit. 2020-12-16]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2013_04_vla.php
- [8] KOLAŘÍK, Ladislav. Technologie svařování – Elektrický oblouk. In: *Moodle ČVUT* [online]. [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: https://moodle.fs.cvut.cz/pluginfile.php/19177/mod_resource/content/1/5_oblouk_tsv_2016.pdf
- [9] ZMYDLENÝ, Tomáš. Tepelné dělení materiálů: Stručný úvod do řezání kyslíkem, plazmou a laserem. In: *DocPlayer.cz* [online]. s. 71 [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/70572546-Tepelne-deleni-materialu.html>
- [10] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
- [11] HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování*. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2414-7.

- [12] LAD, Parth, Vaibhav WANI a Pranit MEHATA. Plasma Arc Machining: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* [online]. 2020, **7**(07), 5 [cit. 2021-03-24]. ISSN 2395-0056. Dostupné z: <https://www.irjet.net/archives/V7/i7/IRJET-V7I728.pdf>
- [13] NEMCHINSKY, V. a W. SEVERANCE. What we know and what we do not know about plasma arc cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2006, **39**(22), 423-438. ISSN 0022-3727. Dostupné z: doi:10.1088/0022-3727/39/22/R01
- [14] MORAVEC, Jaromír. *Plazmové svařování a dělení materiálu* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41837203-Plazmove-svarovani-a-deleni-materialu-jaromir-moravec.html>
- [15] Define plasma - Plasma cutting processes. *Plasma, waterjet and laser cutting systems / Hypertherm* [online]. Copyright © 2020 Hypertherm, Inc. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/>
- [16] *HYPERTHERM* [online]. 2021 Torch and consumables catalog. 2020. Dostupné také z: <https://www.hypertherm.com/Download?fileId=HYP105524>
- [17] LAPČÍK, Zdeněk. Prodloužení životnosti elektrod pro plazmové řezání. *MM průmyslové spektrum* [online]. **2007**(10) [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prodlouzeni-zivotnosti-elektrod-pro-plazmove-rezani>
- [18] How to Recognize Damaged Plasma Torch Consumables. *The Lincoln Electric Company* [online]. 1999 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/cutting-how-tos/Pages/how-to-recognize-damaged-plasma-torch-consumables.aspx>
- [19] ISeries Plasma Systems. *ESAB* [online]. [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://www.esab.co.uk/gb/en/iserie/index.cfm>
- [20] BRATAN, S., S. GORBATYUK, S. LEONOV et al. Technological possibilities of high-precision plasma cutting in processing materials of different class. *MATEC Web of Conferences*. 2018, **224**. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/201822401011
- [21] ZMYDLENÝ, Tomáš. Řezání plazmou. In: *Microsoft OneDrive* [online]. 2021, s. 74 [cit. 2021-07-25]. Dostupné z: <https://onedrive.live.com/?authkey=%21AvIPFzz%2DRzE8La4&cid=64A415E9D4E55BC4&id=64A415E9D4E55BC4%2124212&parId=64A415E9D4E55BC4%2124183&o=OneUp>

- [22] ČSN EN 1090-2. *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [23] ČSN EN ISO 17658. *Svařování - Vady při řezání kyslíkem, laserem a plasmou - terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 32 s.
- [24] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 32 s.
- [25] Jak zlepšit kvalitu plazmového řezu. *DocPlayer.cz* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7589346-Jak-zlepsit-kvalitu-plazmoveho-rezu.html>
- [26] Jak řešit problémy s kvalitou řezu při řezání plazmou. *ESAB* [online]. [cit. 2021-07-21]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/how-to-troubleshoot-plasma-cut-quality.cfm>
- [27] *HiFocus neo* [online]. 2021 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-hifocus-neo.html>
- [28] *Silent Cut* [online]. 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-silent-cut.html>
- [29] HORÁČEK, Jan. *Porovnání procesů plazmového řezání* [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/93183>. Bakalářská práce. Fs ČVUT.
- [30] *Contour cut* [online]. 2021 [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut.html>
- [31] *Contour Cut Speed* [online]. 2021 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/technology-contour-cut-speed.html>
- [32] M3 PLAZMA: Nový rozměr v automatizovaném řezání plazmou. *ESAB VAMBERK, s. r. o.* [online]. [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/m3_plasma_cz.pdf
- [33] SMARTBEVEL™ TECHNOLOGY. *ESAB* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/mechanized/technologies/smart-bevel-technology.cfm>

- [34] SMARTCYCLE™ TECHNOLOGY. *ESAB* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/mechanized/technologies/smartcycle-technology.cfm>
- [35] SQUARECUT TECHNOLOGY. *ESAB* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/mechanized/technologies/squarecut-technology.cfm>
- [36] ENHANCED HOLE TECHNOLOGY™. *ESAB* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/mechanized/technologies/precision-hole-technology.cfm>
- [37] HyPerformance plasma cutting systems. *Plasma, waterjet and laser cutting systems / Hypertherm* [online]. Hypertherm, Inc. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/en-US/learn/about-our-products/hyperperformance-plasma-cutting-systems/>
- [38] Rapid Part technology. *Plasma, waterjet and laser cutting systems / Hypertherm* [online]. Hypertherm, Inc. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/en-US/learn/about-our-products/surecut-technology2/plasma/rapid-part-technology/>
- [39] True Hole technology. *Plasma, waterjet and laser cutting systems / Hypertherm* [online]. Hypertherm, Inc. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/en-US/learn/about-our-products/surecut-technology2/plasma/true-hole/>
- [40] True Bevel technology. *Hypertherm, Inc.* [online]. [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/en-US/learn/about-our-products/surecut-technology2/plasma/true-bevel/>
- [41] Geometrické tolerance. *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2014 [cit. 2021-07-29]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>
- [42] *Drilling vs. Cutting holes in plates* [online]. Voortman Steel Machinery [cit. 2021-08-02]. Dostupné z: <https://www.voortman.net/en/knowledge-base/increase-output-drilling-versus-cutting-holes>
- [43] *HiFocus 280i neo - Kjellberg Finsterwalde* [online]. Copyright © 2021 Kjellberg Finsterwalde [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: <https://www.kjellberg.de/en/catalog/hifocus-280i-neo.html>
- [44] Pálicí stroj Vanad PROXIMA. *Vanad* [online]. [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: <https://vanad.cz/cs/palici-stroje/nabidka-stroju/vanad-proxima>

- [45] Značení ocelí. *Ferona a.s.* [online]. Ferona a.s., 2017 [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/?typ=2>
- [46] EN 1.0038 Steel S235JR Material Equivalent, Properties, Composition. *World Material - Free Online Material Information Resource* [online]. 2021 [cit. 2021-07-11]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/1-0038-steel-s235jr-material/>
- [47] *Příručka s daty pro řezání*. 2. Finsterwalde: Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH, 2016.
- [48] DRSNOST POVRCHU. *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2014 [cit. 2021-08-05]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>
- [49] Define plasma - Plasma cutting processes. *Plasma, waterjet and laser cutting systems | Hypertherm* [online]. Copyright © 2020 Hypertherm, Inc. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/learn/cutting-education/plasma-technology/types-of-plasma/>

Zdroje obrázků

- [50] Obrázek řezání kyslíkem, staženo dne 24.3.2021, dostupné na webu: https://docplayer.cz/docs-images/42/6540265/images/page_8.jpg
- [51] Obrázek skupenství plazmy, staženo dne 16.3.2021, dostupné na webu: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQm0qU-2VtsDLIWZaEJWg-iVO-sl8GM0D1wrw&usqp=CAU>
- [52] Obrázek Hy Definition plazmy, staženo dne 13.4.2021, dostupné na webu: https://www.hypertherm.com/globalassets/learn-about-cutting/product-lines/hyperformance/ill_hpr400_il1_400x258.png
- [53] Obrázek ručního a strojního plazmového hořáku, staženo dne 23.3.2021, dostupné na webu: https://docplayer.cz/docs-images/52/12688302/images/page_4.jpg
- [54] Obrázek řezu elektrodou hořáku, staženo dne 23.3.2021, dostupné na webu: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61jpBdrsvLL_SL1024.jpg
- [55] Obrázek vířivého kroužku, staženo dne 23.3.2021, dostupné na webu: <https://www.pierce.eu/foto-produkty/327-20200124120439-3.jpg>
- [56] Obrázek tepelně ovlivněné oblasti po různých metodách dělení materiálu, staženo dne 24.3.2021, dostupné na webu: <https://docplayer.cz/docs-images/103/159334791/images/35-0.jpg>
- [57] Obrázek spotřebních dílů hořáku PerCut 450, staženo dne 11.07.2021, dostupné na webu: <http://plasmapoint.pl/wp-content/gallery/plazma/percut440-percut450g-line-280-400a-hifocus-280i-360i-440i.jpg>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Řezání kyslíkem [50]	12
Obrázek 2 - Laserové sublimační řezání [4]	12
Obrázek 3 - Laserové tavné řezání [3].....	13
Obrázek 4 - Skupenství plazmy [51]	14
Obrázek 5 - Schémata termodynamických jevů [7]	15
Obrázek 6 - Plazmové řezání [6].....	17
Obrázek 7 – Schématické porovnání TIGového a plazmového hořáku [9].....	18
Obrázek 8 - Konstrukce plazmového řezacího stroje [9]	18
Obrázek 9 - Závislé zapojení hořáku [6]	19
Obrázek 10 - Nezávislé zapojení hořáku [6].....	20
Obrázek 11 - Jednoplýnné řezání [49].....	21
Obrázek 12 - Dvouplyné řezání [49].....	22
Obrázek 13 - Řezání s vodní clonou [6]	22
Obrázek 14 - Řezání se vstřikováním vody [6]	22
Obrázek 15 - Řezání pod vodou [9]	23
Obrázek 16 - Hy Definition plazma [52]	23
Obrázek 17 - Ruční a strojní plazmový hořák [53]	24
Obrázek 18 - Spotřební díly hořáku Hypertherm XPR300™ [16]	24
Obrázek 19 - Nová a poškozená elektroda [18]	24
Obrázek 20 - Řez elektrodou hořáku [54]	25
Obrázek 21 - Bezpečnostní zóna opotřebení elektrod [18]	25
Obrázek 22 - Dělená elektroda [19]	26
Obrázek 23 – Význam víření plynu kolem elektrody [21]	26
Obrázek 24 - Vířivý kroužek [55]	27
Obrázek 25 - Nová a poškozená tryska [18].....	27
Obrázek 26 - Nový a poškozený kryt trysky [18].....	28
Obrázek 27 - Nová a poškozená krytka [18].....	28
Obrázek 28 - Nový a poškozený ochranný kryt [18]	28
Obrázek 29 - Pozitivní a negativní úhel řezu [21].....	29
Obrázek 30 - Závislost řezné rychlosti na tvaru plazmy a reliéfu řezné stopy [6]	30
Obrázek 31 – Detail řezu materiálem	30
Obrázek 32 - Tepelně ovlivněná oblast po různých metodách dělení materiálu [56].....	32
Obrázek 33 - Obecně značení jakosti na výkrese [24]	34
Obrázek 34 – Příklad značení jakosti na výkresech [24]	35
Obrázek 35 - Termíny vztahující se k řezání [24]	35
Obrázek 36 - Typy řezů [24]	35
Obrázek 37 - Oblast měření úchylky kolmosti a úhlové úchylky [24]	36
Obrázek 38 - Průměrná výška prvků profilu Rz [24]	36
Obrázek 39 - Skluzová rýha [24].....	37
Obrázek 40 - Možnosti natavení hrany materiálu [24]	37
Obrázek 41 - Graf hlučnosti technologie Silent cut [28]	40

Obrázek 42 – Contour cut technologie [30]	41
Obrázek 43 - Zkosený hořák u technologie SquareCut [35].....	42
Obrázek 44 - Hořák s a bez technologie PowerPierce [37]	44
Obrázek 45 - Typy řezů pod úhlem [40]	44
Obrázek 46 - Kvalita řezu s a bez technologie True Bevel [40]	45
Obrázek 47 - Definice kruhovitosti [41]	45
Obrázek 48 – Nežádoucí zápaly v kruhových dírách na zkušební vzorku	46
Obrázek 49 - plazmový zdroj HiFocus 280i neo [43]	47
Obrázek 50 - Spotřební díly hořáku PerCut 450 [57]	47
Obrázek 51 - CNC pálicí systém Vanad Proxima [44]	48
Obrázek 52 – Ukázka nájezdu hořáku pod úhlem 50 a 90°	49
Obrázek 53 – Ukázka přejetí -0,5 mm a +0,5 mm	50
Obrázek 54 - Zkušební hotový plech	51
Obrázek 55 - Ukázka vytvořeného návrhu plánu řezu	51
Obrázek 56 - Ukázka nastavení nájezdu hořáku do díry	52
Obrázek 57 - Plazmový řezací stroj v halové laboratoři ÚST	52
Obrázek 58 - Proces řezání vzorku	53
Obrázek 59 - Vzorek před očištěním z horní a spodní strany	53
Obrázek 60 - Grafický výstup z měřicího stroje UMPC 850	54
Obrázek 61 - Měření drsnosti ploch řezů drsnoměrem Mitotuyo SJ-301	58
Obrázek 62 - Porovnání díry bez a s funkcí předčasného vypnutí	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Používané plazmové plyny a jejich vlastnosti.....	16
Tabulka 2 - Možnosti druhu plynů při řezání [6]	21
Tabulka 3 - Porovnání technologií tepelného dělení [6]	31
Tabulka 4 - Přehled vad dle ČSN EN ISO 17658 [23]	32
Tabulka 5 - Toleranční pole úchylek kolmosti a úhlových úchylek [24]	36
Tabulka 6 - Toleranční pole pro průměrnou výšku prvků profilu Rz5 [24]	37
Tabulka 7 - Technické údaje zdroje HiFocus 280i neo [43]	47
Tabulka 8 - Parametry konkrétního řezacího stroje na fakultě	48
Tabulka 9 - Chemické složení oceli S235JR [46]	49
Tabulka 10 - Doporučené parametry řezání pro zdroj HiFocus 280i neo [47].....	50
Tabulka 11 - Nastavení parametrů řezu	53
Tabulka 12 - Výsledky měření průměrů děr	55
Tabulka 13 - Výsledky měření kruhovitosti děr [μm]	57
Tabulka 14 - Naměřená střední aritmetická odchylka profilu Ra [μm]	59
Tabulka 15 - Naměřená největší výška profilu Rz [μm]	60

Seznam grafů

Graf 1 - Závislost hodnoty přejetí na rozdílu průměrů děr	56
Graf 2 - Hodnoty kruhovitosti	58
Graf 3 - Hodnoty střední aritmetické odchyly profilu Ra	59
Graf 4 - Četnost hodnot střední aritmetické odchyly profilu Ra	60
Graf 5 - Hodnoty největší výšky profilu Rz	61
Graf 6 - Četnost hodnot největší výšky profilu Rz	61

Seznam elektronických příloh

Příloha 1 - Protokol měření z měřicího souřadnicového CMM stroje