



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VLIV OPOTŘEBENÍ TRYSKY PLAZMOVÉHO HOŘÁKU U TECHNOLOGIE PBM NA NOVĚ VZNIKLÝ POVRCH.

EFFECT OF A PLASMA TORCH JET WEAR ON A NEWLY INCURRED SURFACE WHILE USING  
PBM TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ MUDRA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slaný

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Mudra

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

**Vliv opotřebení trysky plazmového hořáku u technologie PBM na nově vzniklý povrch**

v anglickém jazyce:

**Effect of a plasma torch jet wear on a newly incurred surface while using PBM technology**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Během procesu obrábění technologií PBM dochází vlivem proudění plasmatu tryskou k jejímu opotřebení, což může vyústit ve změnu rozměrové a tvarové přesnosti nově vzniklého děleného povrchu. Práce se zaměří na sledování vlivu opotřebení a změnu geometrie ústí trysky plazmového hořáku u nekonvenční technologie PBM na nově vzniklý povrch a na základě provedených měření na testovacích vzorcích budou vyvozeny závěry.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce bude řešení problematiky opotřebení trysek u plazmových hořáků a následná optimalizace řezných podmínek a servisních intervalů pro zachování vhodných geometrických i rozměrových vlastností nově vzniklého povrchu po celou dobu životnosti trysky. Očekávaným výsledkem by mělo být snížení tvorby vadných dílců a zvýšení produktivity ve zvolené firmě.

Seznam odborné literatury:

MAŇKOVÁ, I. *Progressivne technológie*. Košice : Technická univerzita Košice, Strojnícka fakulta - edícia vedeckej a odbornej literatúry, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4

BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. 1. vydání. Praha : SNTL, 1989. 340 s. typ. č.: L13-B2-IV-41/22881

VASILKO, K. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov : Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, 2007. 338 s

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Slaný

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na metody tepelného dělení materiálu, jejich stručný popis a porovnání. Podrobněji je rozebráno plazmové řezání a vliv provozních parametrů na kvalitu řezu a životnost spotřebních dílu. V praktické části je sledován vliv opotřebení trysky a elektrody plazmového hořáku na kvalitu řezu. V závěru jsou uvedeny některé konstrukční řešení trysky a elektrody prodlužující jejich životnost.

**Klíčová slova**

Tepelné dělení, plazmové řezání, opotřebení, kvalita řezu

**ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with methods of thermal cutting, describes them briefly and compares them. For more detail plasma arc and the impact of operational parameters on the quality of the cut and on the lifetime of consumables are described. The experiment is concerned with the influence of the plasma torch nozzle and electrode wear on the cut quality. Finally there are mentioned some construction solutions to increase the lifetime of the nozzle and electrode.

**Key words**

Thermal cutting, plasma arc cutting, wear, cut quality

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MUDRA, Ondřej. *Vliv opotřebení trysky plazmového hořáku u technologie PBM na nově vzniklý povrch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 44 s. Vedoucí práce Ing. Martin Slaný.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv opotřebení trysky plazmového hořáku u technologie PBM na nově vzniklý povrch vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, dne:

.....  
Ondřej Mudra

## **Poděkování**

Děkuji tímto Ing. Martinovi Slanému za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Marku Mertovi a Vítu Mudrovi za cenné rady a připomínky, týkající se zpracování bakalářské práce a umožnění provedení praktické části.

**OBSAH**

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah .....	7
Úvod.....	8
1 Řezání materiálu plazmou .....	9
1.1 Schéma plazmového hořáku .....	10
1.2 Zdroje pro plazmové řezání .....	11
1.3 Způsoby řezání plazmou .....	12
1.4 Používané plyny.....	13
2 Další technologie tepelného dělení materiálu .....	14
2.1 Řezání materiálu kyslíkem .....	14
2.2 Řezání materiálu laserem.....	15
2.3 Porovnání metod tepelného dělení materiálu .....	16
3 Kvalita řezu plazmovým paprskem.....	18
3.1 Parametry plazmového řezání.....	18
3.2 Hodnocení kvality řezu.....	22
3.2.1 Veličiny určující kvalitu řezu.....	22
3.3 Způsoby měření kvality řezu .....	24
4 Experimentální měření kvality řezu .....	26
4.1 Popis a cíle experimentu .....	26
4.2 Trysky použité v experimentu .....	27
4.3 Elektrody.....	28
4.4 Popis Pracoviště.....	29
4.4.1 CNC řezací stroj PIERCE RUR 2500P .....	29
4.4.2 Plazmový zdroj Hypertherm HD 4070 .....	30
4.5 Podmínky experimentu .....	31
4.6 Vyhodnocení řezů.....	31
4.6.1 Vzorek č. 1 .....	31
4.6.2 Vzorek č. 2 .....	33
4.6.3 Vzorek č. 3 .....	34
4.6.4 Vzorek č. 4 .....	36
4.6.5 Vzorek č. 5 .....	36
4.6.6 Vzorek č. 6 .....	37
4.7 Mechanismus opotřebení (vypalování) emisivní vložky .....	38
4.8 Možnosti zvýšení životnosti spotřebních dílů .....	39
5 Závěr.....	40
Seznam použité literatury.....	42
Seznam použitých symbolů a zkratk .....	44

## ÚVOD

Tepelným dělením se rozumí proces, pracující na principech lokálního tavení, odpařování nebo spalování materiálu, popř. kombinaci těchto jevů, kdy je potřebná energie dodávána různými tepelnými zdroji. Mezi nejčastěji používané metody patří řezání plazmou, kyslíkem a laserem. Každá metoda má svou specifickou oblast použití, své výhody a nevýhody.

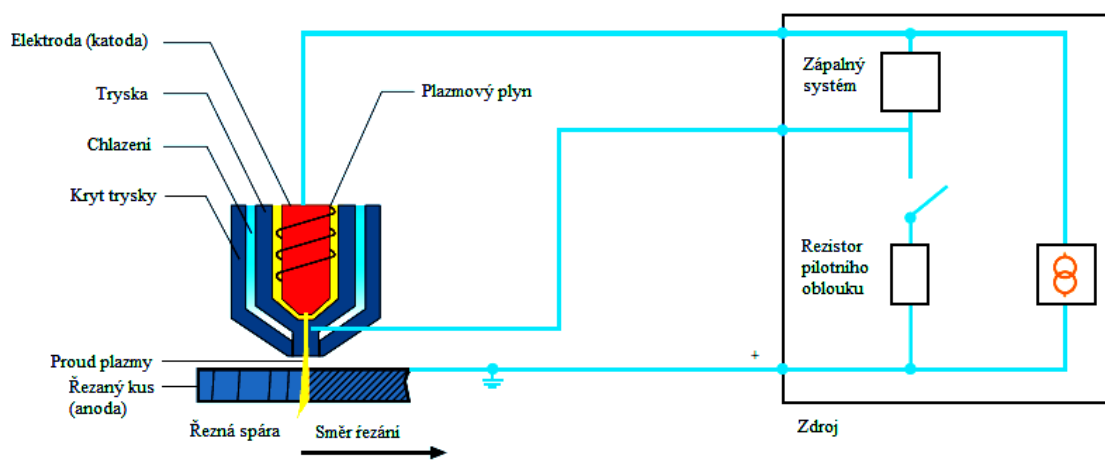
Obecně lze říci, že tepelné dělení materiálu je dnes nepostradatelnou součástí výrobního procesu strojírenského průmyslu. Řezný proces může být v dnešní době snadno automatizován, což umožňuje řezat tvarově složitě součástí v relativně krátkých časech. I když se tepelné dělení řadí mezi přípravné operace, je díky neustálému vývoji a zdokonalování řezacích pracovišť možno za určitých podmínek řezat materiál ve vysoké kvalitě bez nutnosti dalšího opracování.

Samotné řezání plazmou bylo vyvinuto kolem roku 1950 hlavně k řezání materiálu, které nebylo možno řezat kyslíkem. Vyznačuje se vysokými řeznými rychlostmi (až 6x větší než u řezání kyslíkem) a dobrou kvalitou řezu. V podstatě lze řezat všechny elektricky vodivé materiály ve velkém rozsahu tloušťek.

## 1 ŘEZÁNÍ MATERIÁLU PLAZMOU

Plazma je elektricky vodivý plyn o vysoké teplotě složený z kladně a záporně nabitých částic a excitovaných atomů a molekul [1]. Princip řezání plazmou (obr. 1.1) je založen na hoření elektrického oblouku mezi elektrodou (katodou) a řezaným materiálem (anodou) za současného přivádění plazmového plynu, kdy vzniká tzv. plazmový oblouk. Ten svou vysokou teplotou (až 20 000° C) [2] natavuje a částečně vypařuje řezaný materiál, který je vyfukován ven dynamickým účinkem plazmy při výstupní rychlosti až 2000 m.s<sup>-1</sup>. [2]

Elektrický oblouk hořící mezi elektrodou a řezaným materiálem je používán nejčastěji a nazývá se tzv. přenesený oblouk. Oblouk může také hořet mezi elektrodou a tryskou – tzv. nepřenesený oblouk, tímto způsobem lze dělit elektricky nevodivé materiály, tato metoda se však v praxi používá jen velmi zřídka.



Obr. 1.1 Princip řezání plazmou [1]

### Výhody:

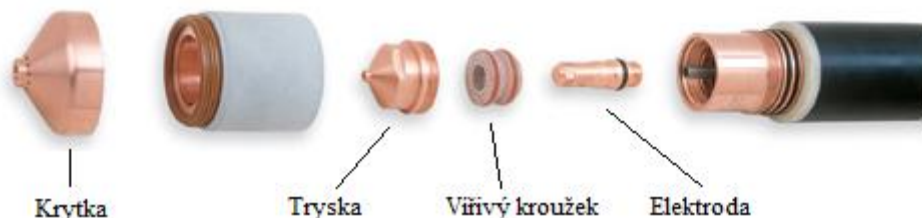
- + Vysoké řezné rychlosti (až 6 m.min<sup>-1</sup>) [7]
- + Vynikající řezné vlastnosti tenkých a středně tlustých tloušťek materiálu [7]
- + Úzká tepelně ovlivněná oblast
- + Schopnost řezat vysokolegované oceli a hliník
- + Dlouhá životnost spotřebních dílů

### Nevýhody:

- Omezení řezání na malé a střední tloušťky materiálu (0,5 až 180 mm) [1]
- Úhel podkosení řezné hrany
- Hlučnost procesu
- Produkce škodlivých emisí

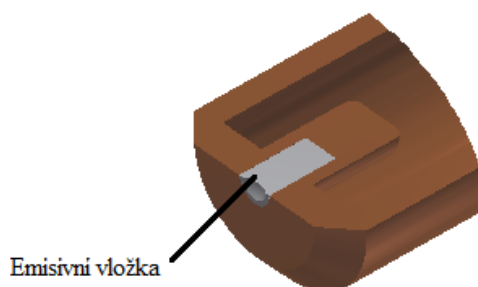
## 1.1 Schéma plazmového hořáku

Plazmový hořák (obr. 1.2) se skládá z těchto částí:



Obr. 1.2 Plazmový hořák [4]

- **Elektroda** – je nejdůležitější částí hořáku. Vede proud až k řezanému materiálu. Je vyrobena z dobře tepelně vodivých materiálů (obvykle z mědi, slitin mědi nebo také stříbra) a intenzivně chlazena buď plynem, nebo nejčastěji vodou. V čele elektrody je tzv. emisivní vložka (obr. 1.3), mezi ní a řezaným materiálem hoří samotný plazmový oblouk. Je vyrobena z materiálu s vysokou teplotou tavení (hafnium, wolfram), chrání tedy elektrodu před rychlým opotřebením. V emisivní vložce je již při výrobě vyrobena malá jamka, aby řezací oblouk začal hořet v jejím středu.

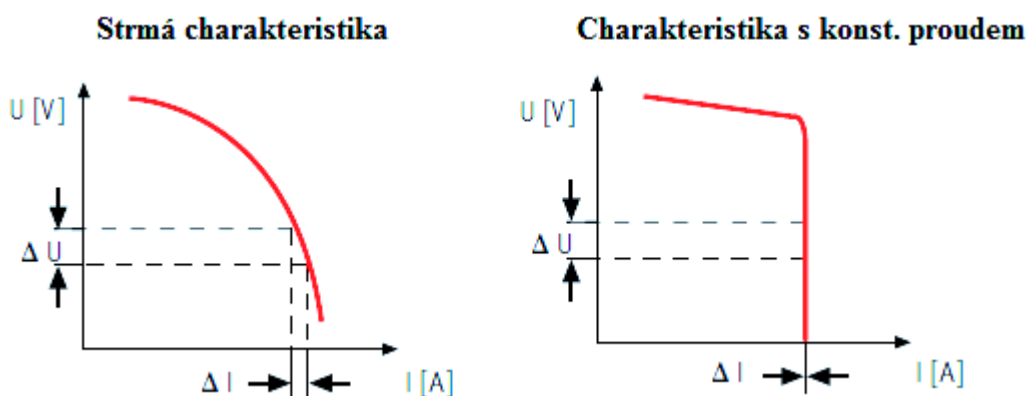


Obr. 1.3 Emisivní vložka v čele elektrody

- **Tryska** – její hlavní funkci je usměrnění plazmového oblouku. Oblouk usměrněný do menšího průměru má podstatně vyšší teplotu než neusměrněný, což má vliv na řeznou rychlost a kvalitu řezu. Tryska je stejně jako elektroda vystavena velkému tepelnému namáhání, proto je chlazena vodou nebo plynem.
- **Vířivý kroužek** – vytváří vířivý proud plynu okolo elektrody. Vířením se dosahuje stejnoměrné distribuce plynu na jedné straně řezu v celé tloušťce [3], důsledkem čehož je podkosení na této straně minimální. Při správné údržbě může vířivý kroužek vydržet výměnu 10 až 15 trysek a elektrod. [4]
- **Krytka** – chrání trysku před zpětným rozstříkem nataveného materiálu.

## 1.2 Zdroje pro plazmové řezání

Plazmový zdroj musí zajišťovat dostatečné napětí a proud pro hlavní (řezací) a pomocný (pilotní) oblouk. Z konstrukčního hlediska se používají zdroje buď se strmě klesající voltampérovou charakteristikou, nebo s konstantním proudem (obr. 1.4). Napětí zdrojů pro plazmové řezání se pohybuje mezi 240 až 400 V [1].



Obr. 1.4 Zdroje pro plazmové řezání [1]

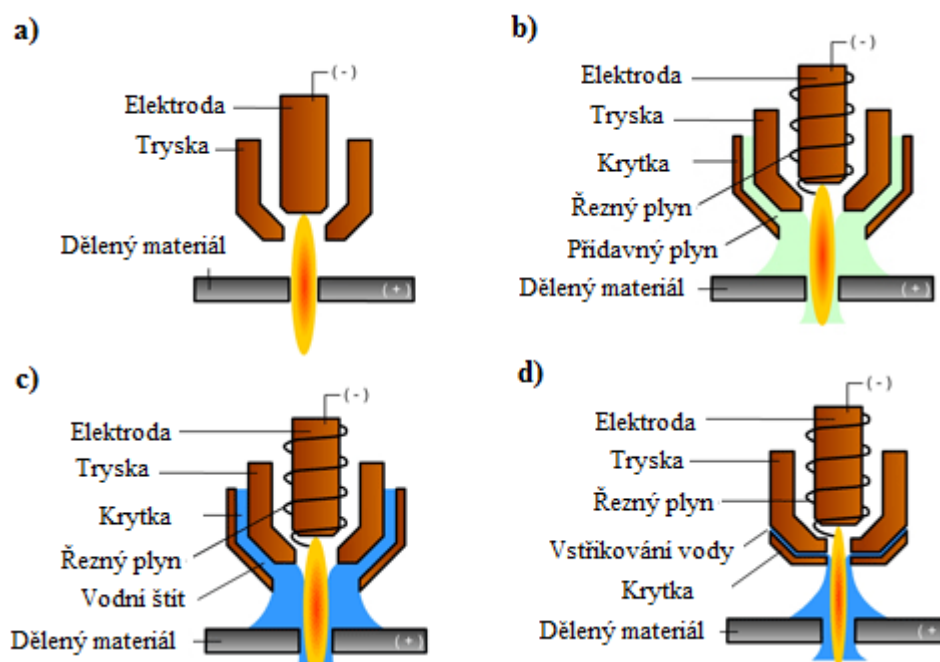
### Jednotlivé fáze plazmového řezání:

- Startovací impuls dá podnět k přivedení napětí do otevřeného obvodu, zároveň plyn proudí hořákem a ven z něj (tzv. předfuk).
- Jakmile se proud plynu stabilizuje, je na trysku přivedeno vysoké napětí, které zapálí pilotní oblouk mezi tryskou a elektrodou. Vlivem energie pilotního oblouku se plazmový plyn ionizuje, tedy se stává elektricky vodivým a tím vytváří elektricky vodivé prostředí mezi tryskou a řezaným materiálem.
- Vlivem proudění plazmového plynu je pilotní oblouk přenesen na řezaný materiál (hoří mezi elektrodou a řezaným materiálem) - vytváří se řezací oblouk. Obvod je nyní uzavřen, protéká jím stejnosměrný proud a zároveň je automaticky vypnuto vysoké napětí.
- Řezací oblouk natavuje materiál, propaluje se skrz něj (proudící plyn vyfukuje natavený materiál) a hořák se začíná pohybovat – začíná samotný řezný proces.

### 1.3 Způsoby řezání plazmou

Existuje několik odlišných způsobů řezání plazmou, které byly postupně vyvinuty a jsou neustále zdokonalovány na základě požadavku zvýšení kvality řezu, zvětšení rozsahu řezané tloušťky a také jakosti materiálu. Mezi nejpoužívanější metody patří:

- **Konvenční řezání plazmou** – konstrukce hořáku je poměrně jednoduchá, používá se zde pouze jediného plynu - plazmového plynu (většinou je to vzduch) a chladicího média (voda nebo vzduch). Plazmový oblouk je usměrňován pouze pomocí vnitřního průměru otvoru trysky, což způsobuje nežádoucí podkosení řezné hrany řezu. Výhodou je jednoduchá konstrukce a nízké provozní náklady. Tato metoda je v praxi používána k řezání materiálu do tloušťky materiálu přibližně 160 mm [1]. Princip je znázorněn na obr. 1.5a.
- **Řezání plazmou s přídavným médiem** – jako médium se používá buď plyn, nebo voda.
  - **Plyn** – také nazýván jako fokusační, dále usměrňuje (fokusuje) plazmový oblouk, tím se dosahuje zlepšení kvality řezu a je možno použít vyšší řezné rychlosti. Přídavnému plynu se také říká ochranný, protože okolo místa řezu vytváří specifické prostředí, které chrání řez od okolní atmosféry. Metoda se používá k řezání materiálu do tloušťky až 75 mm [1]. Princip je znázorněn na obr. 1.5b.
  - **Voda** – neusměrňuje plazmový oblouk, pouze kolem něj vytváří tzv. vodní štít. Díky redukční schopnosti vodíku vytváří lesklý povrch na hraně řezu, a proto se s výhodou používá např. k řezání hliníku. Princip je znázorněn na obr. 1.5c.
- **Řezání plazmou se vstříkáváním vody** – vstříkovaná voda usměrňuje plazmový oblouk. Jen malá část vody se vypařuje, zbytek chladí hořák a místo řezu a tím prodlužuje životnost spotřebních dílů. Tato metoda se používá k řezání materiálu tloušťky v rozmezí 3-75 mm [1], v poslední době je však využívána ne příliš často a je spíše nahrazována výše uvedenou metodou s přídavným plynem. Princip je znázorněn na obr. 1.5d.
- **Řezání plazmou pod vodou** - tato metoda snižuje hlučnost procesu, zmenšuje prašnost a tím pádem šetří životní prostředí. Touto metodou lze řezat konstrukční oceli do tloušťky 15 mm [1] a vysokolegované oceli do tloušťky 20 mm [1].



Obr. 1.5 Způsoby řezání plazmou [5]

## 1.4 Používané plyny

Používané plyny se dělí na tyto druhy:

- **Plazmové plyny** – všechny plyny, které jsou schopny tvořit plazmu, jsou to vzduch, kyslík, argon, vodík, dusík.
- **Fokusační plyny** – chladí hořák a především usměřují paprsek plazmy. Používá se např. argon, vodík nebo dusík popř. přímo směsi těchto plynů.
- **Zápalný plyn** – slouží k zapálení plazmového oblouku, např. argon.

Volba správného plazmového a fokusačního plynu má velký vliv na kvalitu řezu, řeznou rychlost a také na životnost spotřebních dílů a hořáku. Jaký plyn bude pro danou aplikaci nejvhodnější závisí především na jakosti materiálu a na jeho tloušťce. Vlastnosti a použití plazmových plynů jsou uvedeny níže:

- **Vzduch** – je to v podstatě směs kyslíku a dusíku, která neumožňuje příliš kvalitní řez. Vzduch je jako plazmový plyn používán hlavně pro ruční řezání nelegovaných až vysoce legovaných ocelí a hliníku, kde proud nepřesahuje 200 A [6].
- **Kyslík** – více natavuje řezaný materiál, to znamená lepší kvalitu řezu a možnost použití vysokých řezných rychlostí a s tím související menší tepelně ovlivněná oblast. Kyslík se používá k řezání nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Proudy pro řezání se pohybují běžně do 400 A [6].

- **Argon** – díky schopnosti být snadno ionizován se čistý argon používá hlavně jako zápalný plyn. Není to však úplně ideální plazmový řezný plyn kvůli jeho malé tepelné vodivosti. Ta způsobuje nekvalitní řez a možnost použít nízké řezné rychlosti. Argon se hlavně používá ve směsích s jinými plazmovými plyny.
- **Vodík** – způsobuje lepší natavení materiálu a činí ho tekutějším, ale stejně jako argon není čistý vodík ideální plazmový plyn. S výhodou se používá směs argonu a vodíku, kde jsou kombinovány schopnost vodíku dobře tavit materiál a velká kinetická energie argonu.
- **Dusík** – svými fyzikálními vlastnostmi se pohybuje někde mezi argonem a dusíkem, může tedy být použit jako samostatný plazmový plyn. Dosahuje velkých řezných rychlostí, avšak kvalita řezu není příliš dobrá – jen stěží lze dosáhnout kolmého řezu. Používá se pro řezání proudy 20 – 750 A [6].
- **Směs argon – vodík (H35)** – dosahuje se nejlepší kvality řezu na hliníku a nerezových ocelích o tloušťce nad 8 mm, také příznivě ovlivňuje životnost elektrody. Nevýhodou je vysoká cena v porovnání s ostatními plazmovými plyny. Řeže se proudy o velikosti 80 – 260 A [6].
- **Směs dusík – vodík (F5)** – používá se stejně jako směs argonu a vodíku k řezání hliníku a nerezových ocelí o tloušťce 2 až 8 mm [6]. Taktéž jako H35 příznivě ovlivňuje životnost elektrody, ale úhel zkosení hrany je poměrně velký. Velikost proudu se pohybuje do 80 A [6].

## 2 DALŠÍ TECHNOLOGIE TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLU

### 2.1 Řezání materiálu kyslíkem

Metoda spočívá ve spalování řezaného materiálu kyslíkem. Materiál se zahřeje hořlavým plynem (např.  $C_2H_2$ ) ve směsi s kyslíkem na zápalnou teplotu a následně je vpuštěn tzv. kyslík 2.5 (čistota alespoň 99,5%) [7], který materiál spaluje. Produkty hoření (oxidy) jsou vyfukovány proudem kyslíku ven ve formě strusky a vzniká řezná spára. Pro docílení kvalitního řezu musí být splněny následující podmínky:

- Zápalná teplota materiálu musí být nižší než jeho teplota tavení
- Tavicí teplota oxidů musí být nižší než tavicí teplota materiálu
- Při hoření kovu se musí uvolnit dostatečné množství tepla pro udržení řezného procesu
- Zplodiny hoření musí být dostatečně tekuté [7]

#### Výhody:

- + Schopnost řezat nelegované oceli o tloušťce až 2000 mm [2]
- + Malé investiční a provozní náklady v porovnání s plazmou

**Nevýhody:**

- Vhodné pro řezání pouze nelegovaných ocelí
- Nízké řezné rychlosti (max.  $800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ) [7]
- Velká tepelně ovlivněná oblast (0,1- 8 mm pro tloušťky 5- 250 mm) [2]
- Nevhodné pro řezání tloušťek menších než 5 mm [8]

## 2.2 Řezání materiálu laserem

Princip metody je založen na dopadu svazku laseru o vysoké energii na malou plochu na materiálu, což umožňuje jeho natavení popřípadě až vypaření. Metody používané při řezání laserem jsou:

- **Sublimační** – materiál se z místa řezu vypařuje
- **Tavné** – natavený materiál je vyfukován ven kinetickou energií asistenčního plynu
- **Pálení** – materiál shoří podobně jako u řezání kyslíkem

**Výhody:**

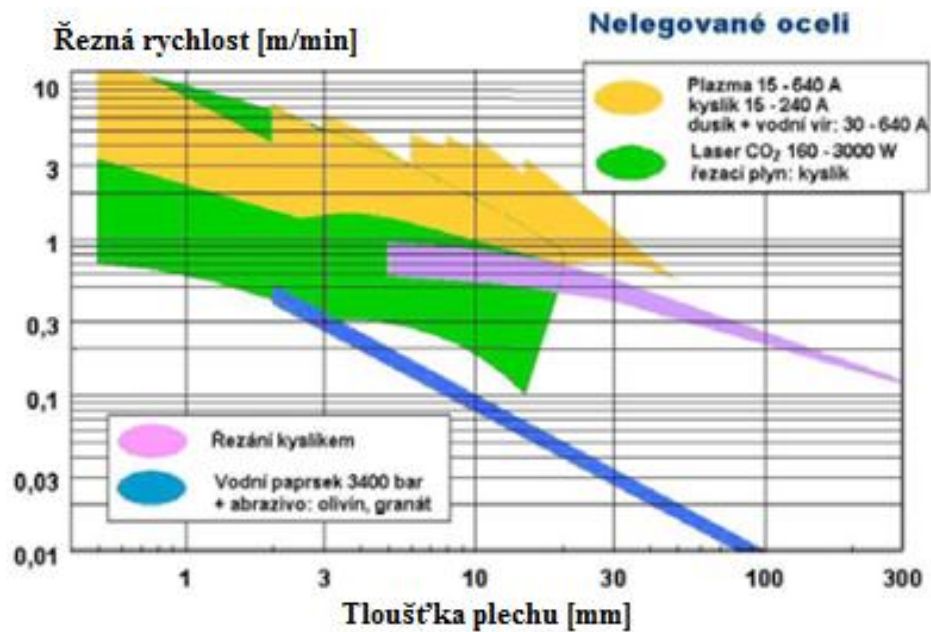
- + Vysoké řezné rychlosti (až  $12 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ )
- + Vynikající přesnost řezaných dílců
- + Pravoúhlá řezná hrana
- + Malá tepelně ovlivněná oblast (0,05 – 0,2 mm) [8]
- + Lze řezat téměř všechny materiály (plast, dřevo, pryž atd.) [2]

**Nevýhody:**

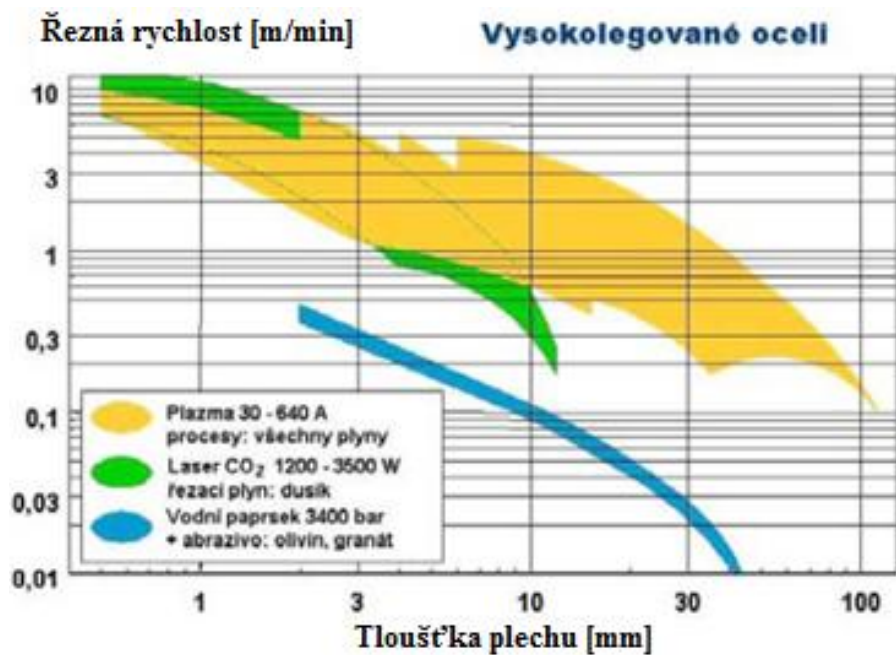
- Omezení tloušťky řezaného materiálu (nelegované oceli do 25 mm, korozivzdorné oceli a hliník do 15 mm)
- Vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynu)
- Snížena stabilita řezání lesknoucích se povrchů [8]

### 2.3 Porovnání metod tepelného dělení materiálu

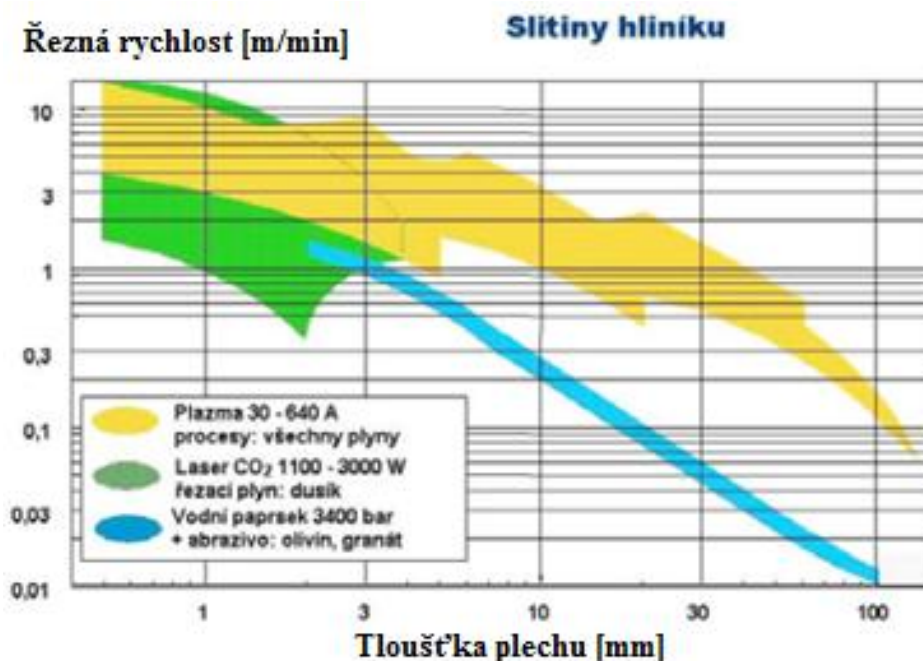
Na obr. 2.1, 2.2 a 2.3 je porovnání dosažitelných řezných rychlostí pro nelegované, vysokolegované oceli a slitiny hliníku. V tab. 2.1 je potom porovnání přibližné ceny za metr řezu, řezné rychlosti a pořizovací ceny stroje pro nelegovanou ocel tloušťky 12 mm.



Obr 2.1 Řezné rychlosti pro nelegovanou ocel [9]



Obr 2.2 Řezné rychlosti pro vysokolegovanou ocel [9]



Obr 2.3 Řezné rychlosti pro slitiny hliníku [9]

Tab. 2.1 Porovnání metod tepelného dělení

	Plazma	Laser	Kyslík
<b>Cena za metr řezu [Kč]</b>	32	45	45
<b>Řezná rychlost [mm.min<sup>-1</sup>]</b>	2000	900	400
<b>Cena pracoviště 2x4 m [mil Kč]</b>	2 až 2,5	10 až 15	1,5 až 2

Obecně lze říci, že plazma poskytuje kombinaci vysoké produktivity a přijatelné kvality řezu. Její další předností oproti jiným metodám je schopnost řezat jak nelegované a legované oceli tak i hliník. Investiční náklady jsou dle tab. 2.1 v porovnání s kyslíkem jen o něco málo vyšší, v porovnání s laserem podstatně nižší. Řezné rychlosti dosažitelné plazmou jsou pro plech tloušťky 12 mm 5x vyšší než při řezání kyslíkem a 2x vyšší než při řezání laserem.

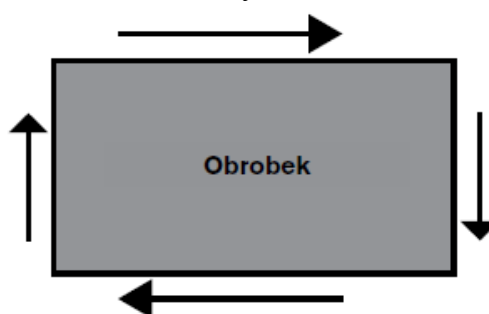
### 3 KVALITA ŘEZU PLAZMOVÝM PAPSKEM

#### 3.1 Parametry plazmového řezání

Na kvalitu řezu plazmou má vliv několik parametrů, které jsou nastavovány před samotným začátkem řezání v závislosti na jakosti a tloušťce materiálu. Jejich nesprávné nastavení se může projevit na kvalitě řezu a životnosti spotřebních dílů. Jsou to tyto parametry:

##### Směr řezání:

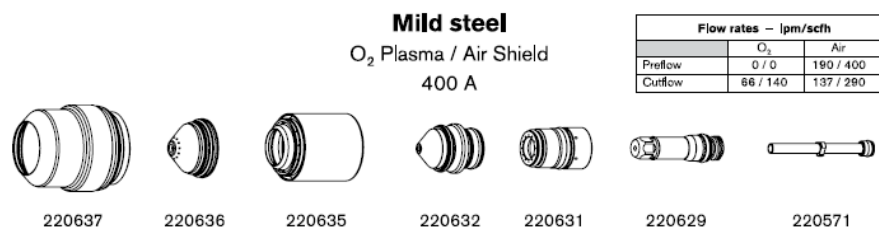
Ideálně pravoúhlého řezu se dosahuje na pravé straně vzhledem k dopřednému pohybu hořáku (obr. 3.1). [10] Je to dáno tím, že plazmový oblouk při běžné konstrukci hořáku rotuje ve směru hodinových ručiček.



Obr. 3.1 Směr řezu [10]

##### Spotřební díly:

Typ trysky, elektrody, vířivého kroužku a krytka se určí v závislosti na řezaném materiálu a proudu použitým při řezání. Je důležité, aby byly použity správné díly sady. Při použití nesprávných dílů, např. jiného vířivého kroužku se nedosáhne požadovaného proudění a tlaku plazmového plynu, což se projeví na kvalitě řezu. Příklad tabulky pro výběr dílů pro řezání nelegované oceli proudem 400 A je na obr. 3.2. Dále jsou na obrázku doporučené hodnoty výšky hořáku, řezné rychlosti apod.



##### **Metric**

Select Gases		Set Preflow		Set Cutflow		Material Thickness	Arc Voltage	Torch-to-Work Distance	Cutting Speed	Initial Pierce Height		Pierce Delay Time
Plasma	Shield	Plasma	Shield	Plasma	Shield					mm	Factor %	
O <sub>2</sub>	Air	24	50	60	50	12	139	3,6	4430	7,2	200	0,4
						15	142		3950			0,5
						20	146		2805			0,7
						25	150	4,0	2210	8,0	0,9	
						30	153	4,6	1790	9,2	1,1	
						40	158		1160	11,5	250	1,9
						50	167	5,3	795	19,1	360	5,2
						60	173	6,4	580	Edge start		
						70	183		380			
						80	197	7,9	180			

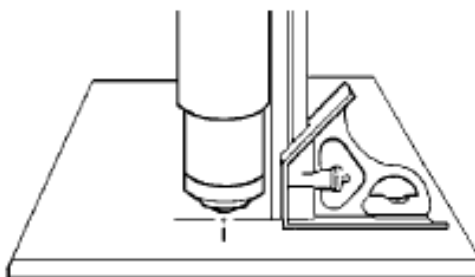
Obr 3.2 Spotřební díly

**Proud:**

Platí, že při menších proudech je dosahováno lepší jakosti povrchu a úhel podkosení je menší. Menšími proudy lze však řezat jen menšími rychlostmi a při řezání legovaných ocelí se vyskytnou větší otřepy na spodní straně řezaného materiálu. Použití větších proudů naopak znamená větší tepelné zatížení dílů hořáku a jejich rychlé opotřebení.

**Nastavení hořáku:**

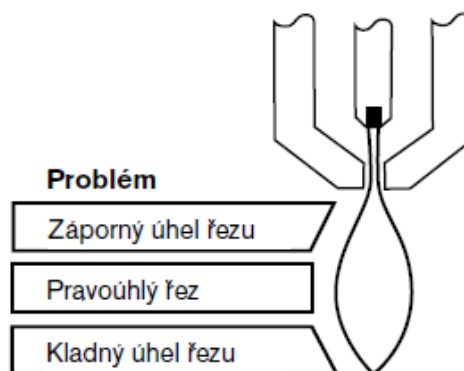
Hořák musí být vzhledem k řezanému materiálu v pravém úhlu (obr. 3.3). Při jeho náklonu se zvětšuje podkosení hrany.



Obr. 3.3 Úhel hořáku [10]

**Výška hořáku:**

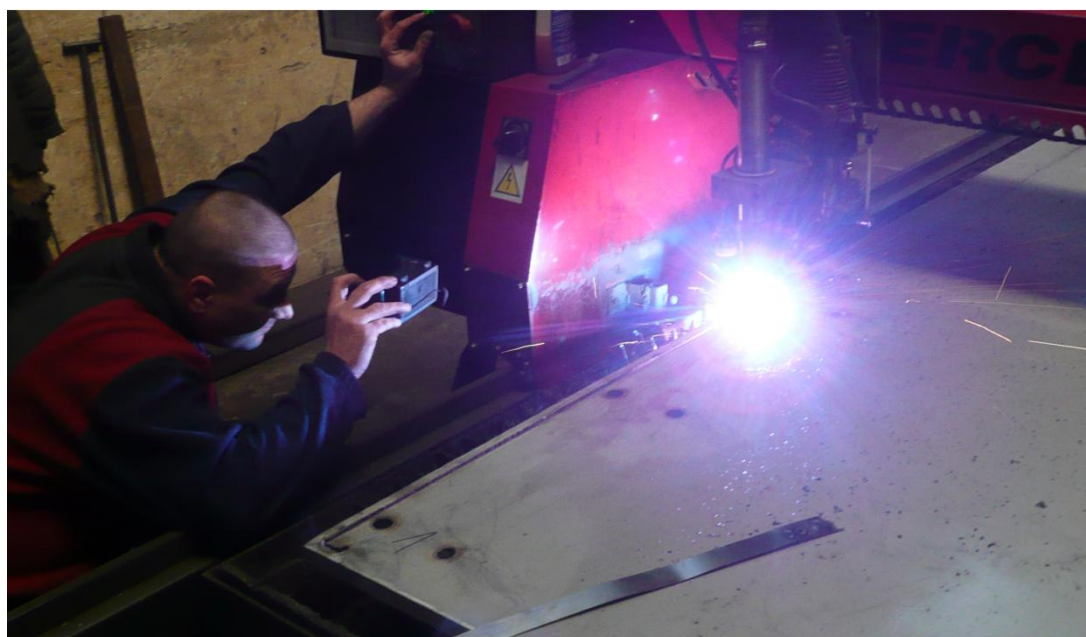
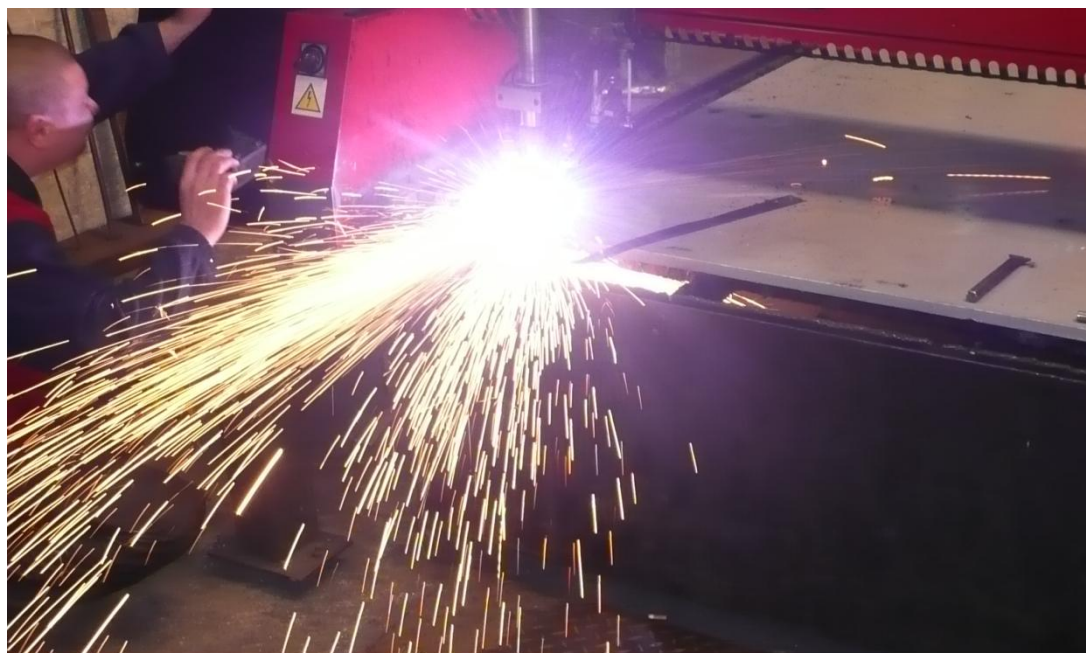
Z obr. 3.4 je patrné, že řezná (pracovní) výška hořáku má vliv na úhel podkosení řezné hrany. Při příliš malé výšce je úhel řezu záporný, naopak při příliš velké výšce kladný a také se nemusí podařit zapálit řezací oblouk během startu, kdy pilotní oblouk hoří v hořáku po delší dobu a může poškodit jeho díly. Výška hořáku je během řezání tzv. napětově hlídána.



Obr. 3.4 Výška hořáku [10]

Kromě pracovní výšky hořáku se nastavuje ještě startovací výška (pro první propálení materiálu v celé tloušťce). Ta je větší než pracovní výška, při propalování totiž jistou chvíli, než dojde k propálení materiálu v celé tloušťce, dochází k vyfukování nataveného materiálu směrem proti hořáku, tzv. zpětnému rozstříku (obr. 3.5 nahoře). Natavený materiál může poškodit krytku hořáku, nebo samotnou trysku.

Po propálení celé tloušťky materiálu je již natavený materiál vyfukován ven z řezné spáry směrem dolů (obr. 3.5 dole).



Obr. 3.5 průběh řezání

Nahoře – zpětný rozstřík materiálu při startu (tzv. propich materiálu)

Dole – průběh řezání

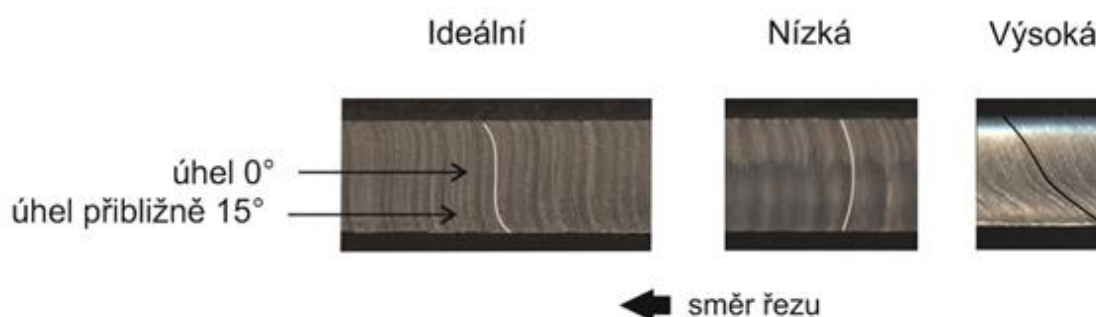
**Řezná rychlost:**

Řezná rychlost má vliv na jakost povrchu, velikost řezné spáry a velikost tepelně ovlivněné oblasti. Doporučenou řeznou rychlost lze najít v tabulkách dodávaných výrobcem spotřebních dílů (obr. 3.2).

Při nižších rychlostech se zvětšuje jakost povrchu, ale zvětšuje se také řezná spára, tedy zmenšuje se výpalek. Při nižší řezné rychlosti se do řezu přivádí více tepla, tzn. že se zvětšuje tepelně ovlivněná oblast.

Při vysokých řezných rychlostech se zmenšuje řezná spára, zhoršuje se jakost povrchu, ale také se zmenšuje tepelně ovlivněná oblast.

Ideální řeznou rychlost lze poznat na hraně řezu dle skluzové rýhy, která má tvar podle obr. 3.6 vlevo. Příliš nízká rychlost způsobuje zahnutí skluzové rýhy ve směru řezu (obr. 3.6 uprostřed), naopak při příliš vysoké řezné rychlosti je skluzová rýha zkosená o větší úhel (obr. 3.6 vpravo). Na obrázku je tvar skluzové rýhy zvýrazněn bílou nebo černou barvou.



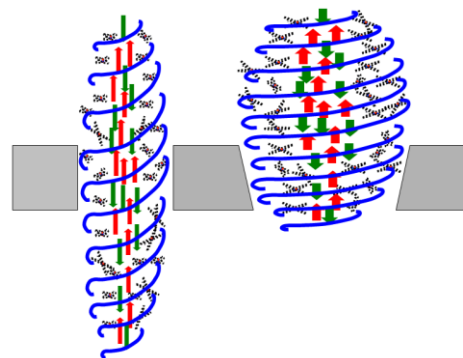
Obr. 3.6 Tvar skluzové rýhy v závislosti na rychlosti

Další indikaci nízké řezné rychlosti jsou okraje, je to v podstatě natavený materiál, který ulpěl na spodní straně výpalku. Při vysoké řezné rychlosti naopak nemusí oblouk být schopen propálit materiál v celé tloušťce.

**Tlak plynu:**

Obecně platí, že čím menší je tlak plynu, tím hůře se usměrňuje plazmový oblouk. Na obr. 3.7 vlevo je plazmový oblouk při ideálním tlaku plynu, který je ideálně usměrněn a způsobuje jen minimální podkosení hrany a řezná spára je úzká. Na obr. 3.7 vpravo je plazmový oblouk při nízkém tlaku plynu, který není ideálně usměrněn – podkosení řezné hrany a řezná spára jsou větší.

Špatný tlak plynu může vést k předčasnému opotřebení trysky. Při malém průtoku plazmového plynu pilotní oblouk hoří mezi elektrodou a otvorem trysky po delší dobu, než je přenesen až na řezaný materiál. Tento jev může vést ke zničení trysky během několika málo startů.



Obr. 3.7 Tlak plynu [11]  
Vlevo – ideální tlak plynu  
Vpravo – nízký tlak plynu

## 3.2 Hodnocení kvality řezu

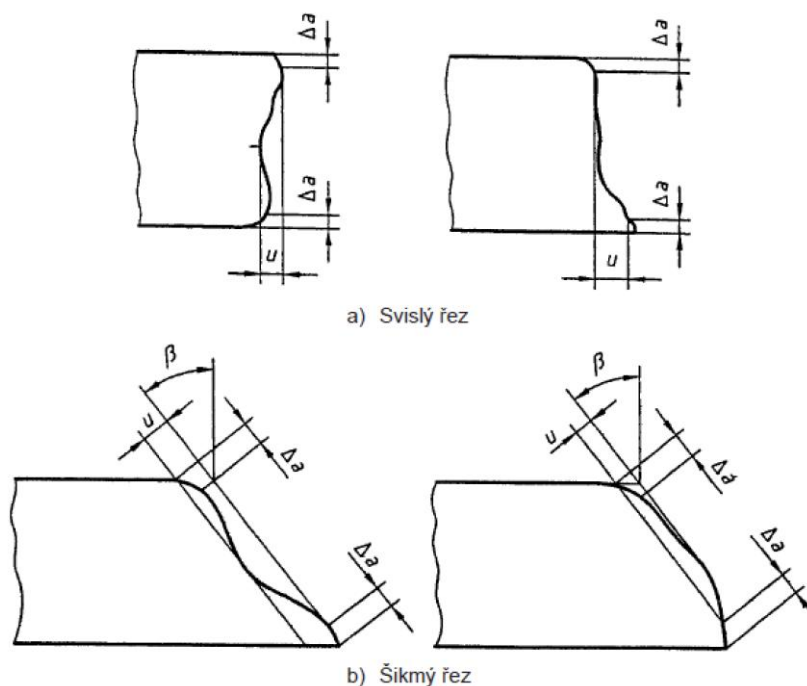
Hodnocením kvality řezu řezaného materiálu se zabývá norma ČSN EN ISO 9013 (dále jen norma), která stanoví požadavky na klasifikaci výrobků a řezů při použití různých metod tepelného dělení. Stanovuje geometrické požadavky na výrobky a úchyly jakosti řezu při tepelném dělení. V úvodní části normy je stanovena a vysvětlena používaná terminologie. V dalších kapitolách jsou stanoveny úchyly tvaru a polohy pro zpracováváný kus a úchyly jakosti řezu. Dále jsou stanoveny používané měřicí postupy a zařízení pro měření jednotlivých úchylek. V závěru normy je stanoven způsob značení požadavků této normy na výkresech. Informativní "Příloha A" uvádí informace o dosažitelné jakosti povrchu při použití různých metod tepelného dělení a informativní "Příloha B" popisuje principy jednotlivých metod tepelného dělení.

### 3.2.1 Veličiny určující kvalitu řezu

Charakteristické veličiny určující kvalitu řezu jsou: úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka  $u$  a průměrná výška prvků profilu  $Rz5$ , navíc se také mohou hodnotit tyto veličiny: skluz  $n$ , natavení horní hrany  $r$  a možný výskyt okujů nebo natavených kapek na dolní straně řezu.

#### Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu $u$ :

Je to „vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami (dotýkajícími se řezaného povrchu), mezi které je vepsán profil povrchu řezu. Přímkami svírají s povrchem řezaného materiálu určený úhel (tj.  $90^\circ$  v případě svislých řezů).“ [12] Princip měření úchylky kolmosti je na obr. 3.8. Oblast měření se musí zmenšit o  $\Delta a$  od horní a dolní hrany řezu, důvodem je dovolené natavení hrany. Velikost  $\Delta a$  závisí na tloušťce materiálu a určí se dle tab. 3.1.



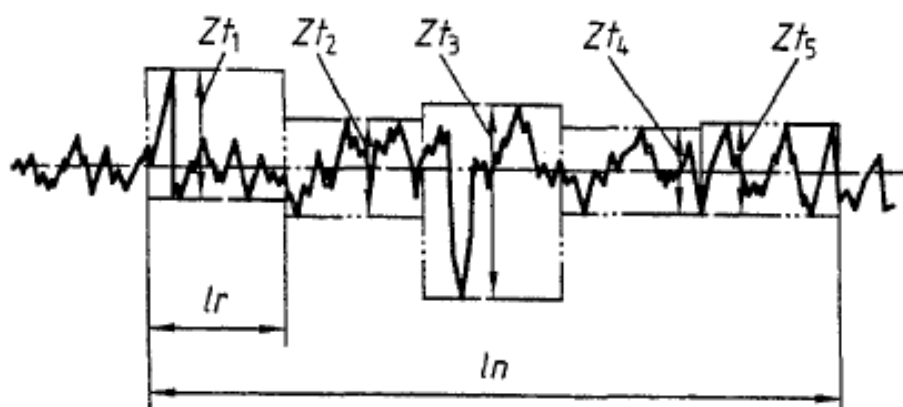
Obr. 3.8 Úchylka kolmosti nebo úchylka úhlu  $u$  [12]

Tab. 3.1 Velikost  $\Delta a$  [12]

Tloušťka řezu, $a$ [mm]	$\Delta a$ [mm]
$\leq 3$	0,1a
$>3 \leq 6$	0,3
$>6 \leq 10$	0,6
$>10 \leq 20$	1
$>20 \leq 40$	1.5
$>40 \leq 100$	2
$>100 \leq 150$	3
$>150 \leq 200$	5
$>200 \leq 250$	8
$>250 \leq 300$	10

**Průměrná výška profilu  $Rz5$ :**

Určí se jako „aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách (obr 3.9).“ [12]



kde:

$Zt_1$  až  $Zt_5$  charakterizuje jednotlivé prvky profilu;

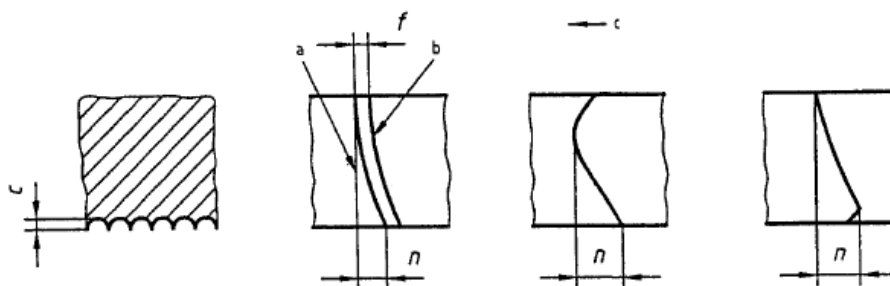
$l_n$  je celková vyhodnocovaná délka;

$l_r$  je základní délka ( $1/5$  z  $l_n$ ).

Obr. 3.9 Průměrná výška profilu  $Rz5$  [12]

**Skluz  $n$ :**

„Průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové rýhy ve směru řezání (obr 3.10).“ [12] Tvar skluzové rýhy závisí na řezné rychlosti (viz kapitola 3.1).

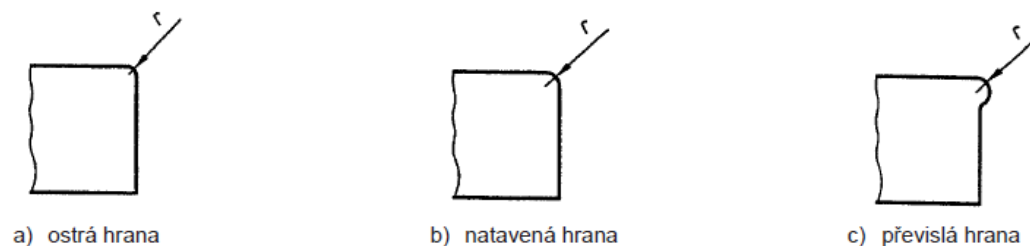


- a Referenční přímka
- b Skluzová rýha
- c Směr posunu

Obr. 3.10 Skluz [12]

**Natavení horní hrany  $r$ :**

„Je to veličina charakterizující tvar horní hrany řezu.“ [12] Možné tvary natavení horní hrany jsou uvedeny na obr. 3.11.



Obr. 3.11 Natavení horní hrany [12]

**3.3 Způsoby měření kvality řezu**

Všechna měření se musí provádět na kartáčovaných řezech, očištěných od oxidů a mimo oblasti s vadami. [12] V normě jsou uvedeny příklady měřidel pro přesné a hrubé měření. V tomto experimentu byly použity tyto měřidla:

- Digitální posuvné měřítko (obr. 3.12) pro měření rozměrové přesnosti
  - Měřicí rozsah 0 – 150 mm
  - Rozlišení 0,01 mm
  - Chyba měřidla  $\pm 0,03$  mm
  - Opakovatelnost 0,01 mm
  - S pohybovým kolečkem



Obr. 3.12 Digitální posuvné měřítko [13]

- Univerzální digitální úhloměr (obr. 3.13) pro měření podkosení řezné hrany
  - Rozsah  $-360^\circ$  až  $360^\circ$
  - Rozlišení  $0,008^\circ$  nebo  $30''$
  - Přesnost  $\pm 0,5'$  nebo  $\pm 0,08^\circ 4$
  - Přepínání směru čítání

*Pozn.: pro kontrolu a zpřesnění měření úhlové úchylky byly vzorky naskenovány do počítače a byly provedeny přibližné měření pomocí software CorelDRAW X5.*



Obr. 3.13 Digitální úhloměr

- Digitální drsnoměr CVR-130 (obr. 3.14) pro měření drsnosti povrchu řezné hrany
  - Měření Ra i Rz
  - Rozlišení  $0,1 \mu\text{m}$
  - Měřicí rozsah Ra  $0,03 - 6,35 \mu\text{m}$   
Rz  $0,2 - 25,3 \mu\text{m}$

*Pozn.: měření drsnosti povrchu Rz5 bylo provedeno ve spolupráci se společností VUHŽ a.s.*



Obr. 3.14 Drsnoměr CVR-130 [13]

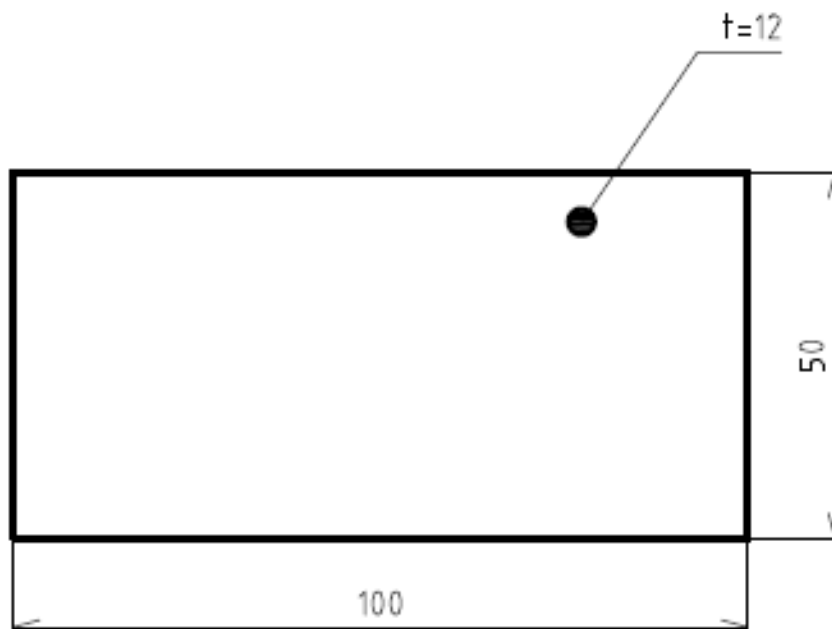
## 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ KVALITY ŘEZU

### 4.1 Popis a cíle experimentu

Nejsledovanějšími částmi hořáku z hlediska životnosti jsou tryska a elektroda. Obecně platí, že tryska by měla být vyměněna za novou, jestliže vnitřní průměr otvoru (jeho kruhovitost) nezajišťuje dostatečné usměrnění plazmového oblouku. Informativně platí, že elektroda by měla být vyměněna, jakmile jamka v emisivní vložce (obr. 1.3) je tak hluboká jako její šířka. Ve skutečnosti je však potřeba se řídit předepsanými hodnotami konkrétního výrobce plazmového hořáku. K dosažení co nejlepší kvality řezu by měly být tryska a elektroda vyměňovány v poměru 1:1, tzn., že k nové trysce by měla být použita nová elektroda a naopak.

Cílem experimentu je právě zkoumání vlivu opotřebení trysky plazmového hořáku na kvalitu řezu. Vlivem hoření plazmového oblouku se postupně mění tvar vnitřního otvoru trysky a zároveň se zvětšuje jeho průměr, to se projeví na schopnosti trysky usměrnit plazmový oblouk. Důsledkem toho může být zhoršena kvalita řezu, především větší úchylka kolmosti  $u$ , drsnost povrchu Rz5 (kapitola 3.2.1) a horší rozměrová přesnost. Právě tyto 3 parametry byly sledovány.

Z tabule plechu bylo vyřezáno několik kusů (výpalků) dle obr. 4.1, materiál odpovídá dle normy ČSN značení 11 375. Řezy byly provedeny spotřebními díly firmy Thermacut určenými k řezání proudem 130 A. Každý výpalek byl řezán pomocí jinak opotřebované trysky nebo elektrody a následně změřeny sledované parametry a porovnány. K vyhodnocení byly použity krajní naměřené hodnoty, tzn. maximální nebo minimální rozměr, maximální úhel zkosení. Průměrná výška profilu byla vyhodnocována na delší straně řezu přibližně uprostřed tloušťky materiálu.

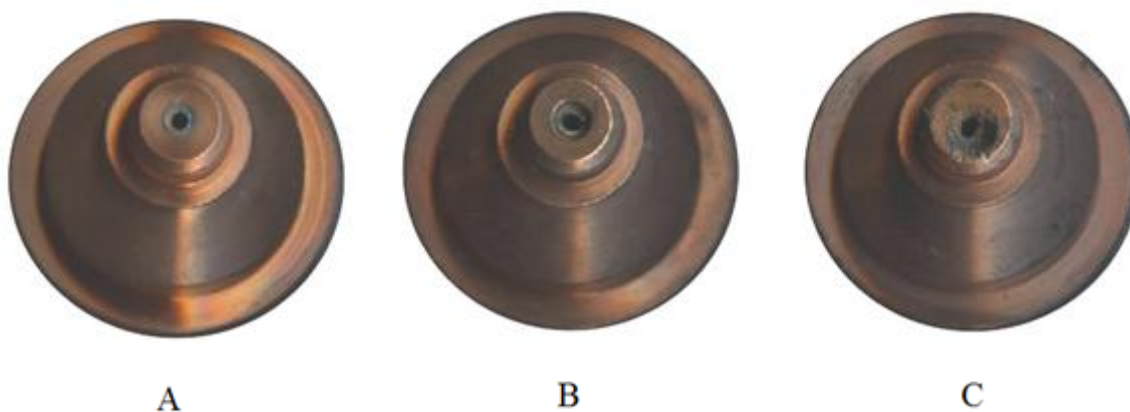


Obr. 4.1 Výpalek

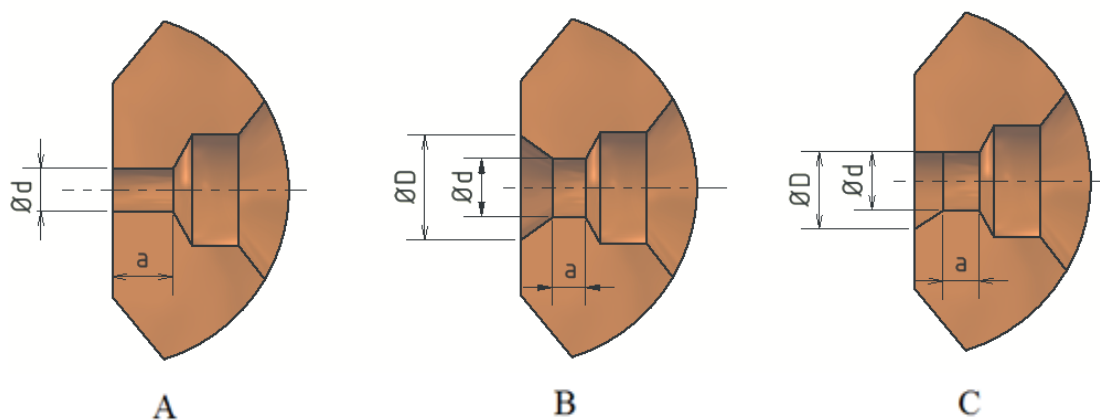
## 4.2 Trysky použité v experimentu

V experimentu byly použity 3 různě opotřebované trysky, které jsou znázorněny na obr. 4.2, na obr. 4.3 byly pomocí programu Autodesk Inventor vymodelovány přibližné tvary ústí trysek v průřezu, trysky byly pro experiment označeny písmeny A, B a C:

- **Tryska A** je na obrázku po jednom startu. Má ideální tvar, průměr ústí  $\varnothing d$  a délku ústí  $a$ , to ji umožňuje optimálně usměrnit plazmový oblouk.
- **Tryska B** má opotřebované ústí, které je v porovnání s tryskou A širší a kratší, tzn. že plazmový oblouk usměřňuje na menší vzdálenosti a větším průměru než tryska A. Oblouk při výstupu z trysky nebude optimálně usměrněn.
- **Tryska C** má rovněž opotřebované ústí, které je však zřetelně vypálené více na jedné straně. To mohlo být způsobeno nataveným materiálem, který se do trysky dostal zpětným rozstříkem a vychyloval plazmový oblouk. Změnil se také tvar ústí – z původně kruhového se stalo oválné.



Obr 4.2 Trysky použité pro experiment



Obr 4.3 Detail ústí trysek

### 4.3 Elektrody

Pro experiment byly použity 2 elektrody (obr. 4.4), které byly značeny čísly 1 a 2:

- **Elektroda 1** byla na začátku experimentu úplně nová.
- **Elektroda 2** je již na konci své životnosti, lze to poznat podle roztavené špičky. To znamená, že emisivní vložka již byla zcela vypálena a plazmový oblouk přišel do přímého styku s měděnou částí elektrody.



Obr. 4.4 Elektrody použité pro experiment

## 4.4 Popis Pracoviště

Pracoviště se skládá z těchto částí:

- Řezací stroj PIERCE RUR 2500P
- Plazmový zdroj HD 4070
- Odsávaný řezací stůl 2100 x 6100 mm
- Odsávací a filtrační jednotka TAMOZ

### 4.4.1 CNC řezací stroj PIERCE RUR 2500P

CNC řezací stroj RUR (obr. 4.5) od firmy Pierce Control Automation s.r.o. je portálový řezací stroj určený pro autogenní nebo plazmové řezání. Vyznačuje se velmi pevným kompaktním rámem, kabelovými rozvody v energetických řetězech, digitální synchronizací pohybu levé a pravé strany portálu a vysokým stupněm automatizace. Svou konstrukcí a dynamikou je vhodný pro instalaci velmi přesných a výkonných plazmových zdrojů. Některé parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4.1.

CNC řídicí systém je datově propojen s PC, na kterém se v CAD/CAM systému připravují data. Řezaná materiál je ukládán na pálicí stůl, který je konstrukčně řešen tak, aby zajišťoval odsávání dýmu a prachu, vznikajících při procesu řezání. Odsáté plodiny jsou filtrovány filtrační jednotkou.

Tab. 4.1 Technické parametry stroje [16]

<b>Řezací šířka</b>	2100 mm
<b>Řezací délka</b>	6100 mm
<b>Řezná rychlost</b>	0-12 000 m/min
<b>Řídicí systém</b>	BURNY 10 LCD plus

Mezi základní vybavení řezacího stroje patří také automatické nastavení počáteční výšky hořáku, napěťové hlídání výšky hořáku a antikolizní systém.



Obr 4.5 CNC řezací stroj Pierce RUR 2500P [16]

#### 4.4.2 Plazmový zdroj Hypertherm HD 4070

Řezací stroj je osazen plazmovou jednotkou firmy Hypertherm HD 4070 (obr. 4.6). Tento zdroj, resp. jeho plazmový hořák byl upgradován na novější technologii HPR (HyPerformance). Tato technologie zvyšuje kvalitu řezu, produktivitu, životnost spotřebních dílů. V tab. 4.2 jsou uvedeny některé parametry stroje.

Tab. 4.2 základní specifikace zdroje:

<b>Max tloušťka řezaného materiálu – konstrukční ocel</b>	25 mm
<b>Max tloušťka řezaného materiálu – legovaná ocel a hliník</b>	20 mm
<b>Hlavní přívod</b>	3x 400 V
<b>Maximální napětí naprázdno</b>	311 V
<b>Řezací proud</b>	30-200 A
<b>Plazmové plyny</b>	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , F5, H35, vzduch
<b>Ochranné plyny</b>	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , vzduch
<b>Tlak plazmového plynu</b>	8,3 ± 0,7 bar
<b>Tlak ochranného plynu</b>	8,3 ± 0,7 bar
<b>Rozměry</b>	1000 x 615 x 1283 mm
<b>Váha</b>	485 kg



Obr 4.6 Plazmový zdroj HD 4070 s upgradovou sadou HPR [17]

## 4.5 Podmínky experimentu

Parametry byly nastaveny dle tabulky dodané výrobcem spotřebních dílů pro řezání nelegované oceli proudem 130 A a jsou uvedeny v tab. 4.3. Tlak plynů byl nastaven automaticky plazmovým zdrojem po zadání jakosti řezaného materiálu a tloušťky.

Tab. 4.3 Parametry experimentu

<b>Tloušťka materiálu</b>	12 mm
<b>Řezná rychlost</b>	2000 mm.min <sup>-1</sup>
<b>Proud</b>	130 A
<b>Napětí</b>	132 V
<b>Plazmový plyn</b>	O <sub>2</sub>
<b>Ochranný plyn</b>	Vzduch
<b>Zapalovací výška hořáku</b>	6,6 mm
<b>Pracovní výška hořáku</b>	3,2 mm

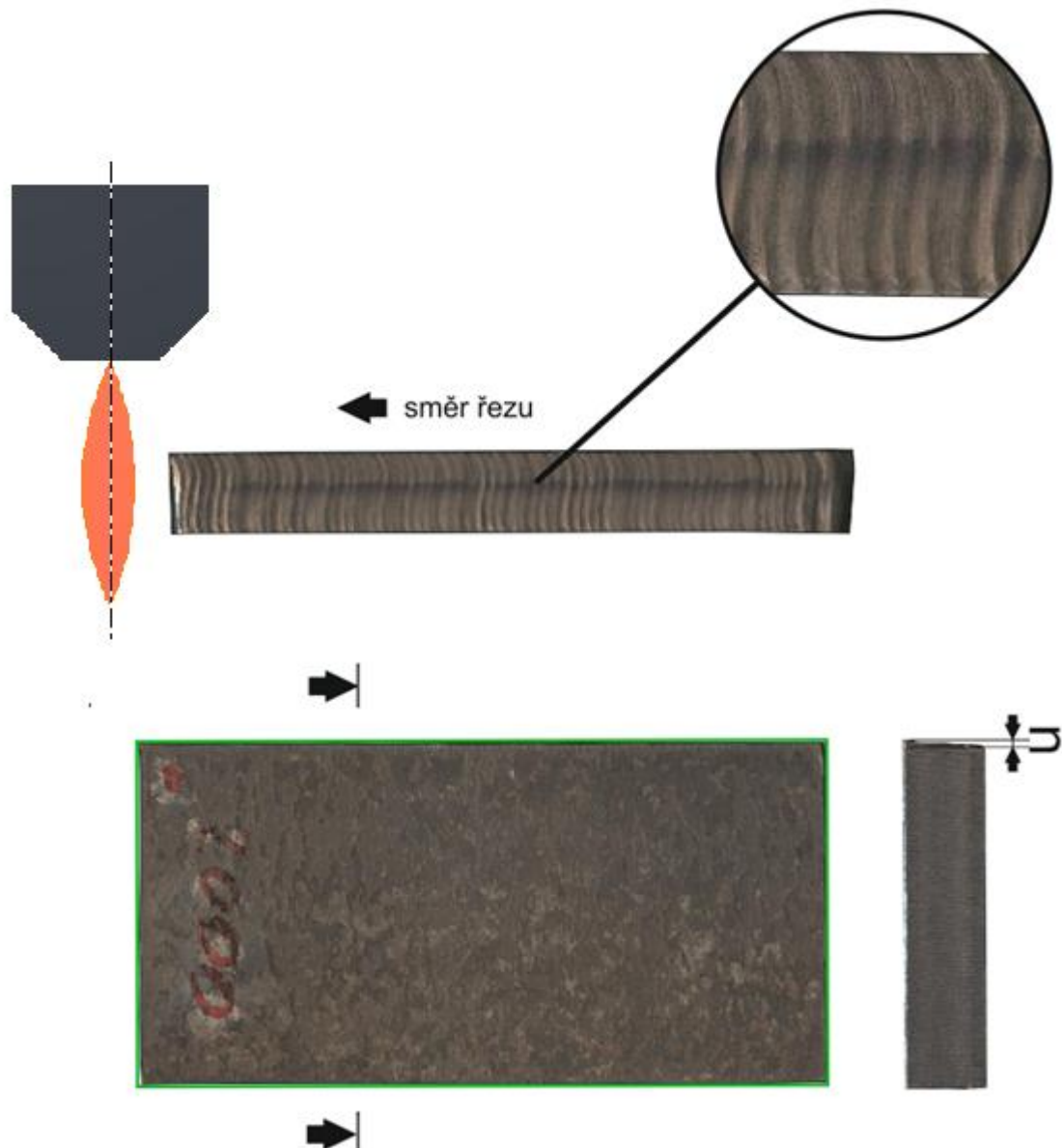
## 4.6 Vyhodnocení řezů

### 4.6.1 Vzorek č. 1

První vzorek byl vyřezán jako referenční, za podmínek uvedených v tab. 4.4. Na obr. 4.7 je samotný vzorek, pohled na hranu řezu, detail hrany řezu (3x zvětšený) a průřez v místě s předpokládanou největší úhlovou úchylnou  $\alpha$ , která byla měřena v oblasti zmenšené o  $\Delta\alpha$  od horní i dolní strany ( $\Delta\alpha$  pro materiál tloušťky 12 mm je 1 mm). Zelený obdélník značí požadované rozměry výpalku.

Tab. 4.4 Podmínky řezu 1

<b>Použitá tryska</b>	A
<b>Použitá elektroda</b>	1
<b>Řezná rychlost [mm.min<sup>-1</sup>]</b>	2000



Obr. 4.7 Vzorek č. 1 se znázorněnými požadovanými rozměry a detailem řezné hrany

Již na první pohled je z obrázku patrné, že výpalek má jen malé rozměrové mezní úchytky a malou hodnotu úhlové úchytky. Na řezné hraně jsou patrné skluzové rýhy, které v porovnání se skluzovou rýhou na obr. 3.6 vlevo mají přibližně stejný tvar. Dá se tedy říci, že řez byl proveden optimální rychlostí. Na obrázku je také znázorněn přibližný tvar usměrněného plazmového oblouku. V tab. 4.5 je zařazení výpalku do tolerančních tříd dle normy.

Tab. 4.5 Hodnocení výpalku

	Naměřená hodnota	Tol. třída
Minimální rozměr na horní hraně – šířka [mm]	49,11	2
Maximální rozměr na dolní hraně – šířka [mm]	50,23	1
Minimální rozměr na horní hraně – délka [mm]	99,35	1
Maximální rozměr na dolní hraně – délka [mm]	100,42	1
Rz5 [ $\mu\text{m}$ ]	24,8	2
u [mm]	0,7	4

#### 4.6.2 Vzorek č. 2

Druhý řez byl proveden za podmínek uvedených v tab. 4.6, tedy již značně opotřebenou tryskou, novou elektrodou a doporučenou řeznou rychlostí.

Tab. 4.6 Podmínky řezu 2

Použitá tryska	B
Použitá elektroda	1
Řezná rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	2000



Obr. 4.8 Vzorek č. 2 - průřez



Obr. 4.9 Vzorek č. 2

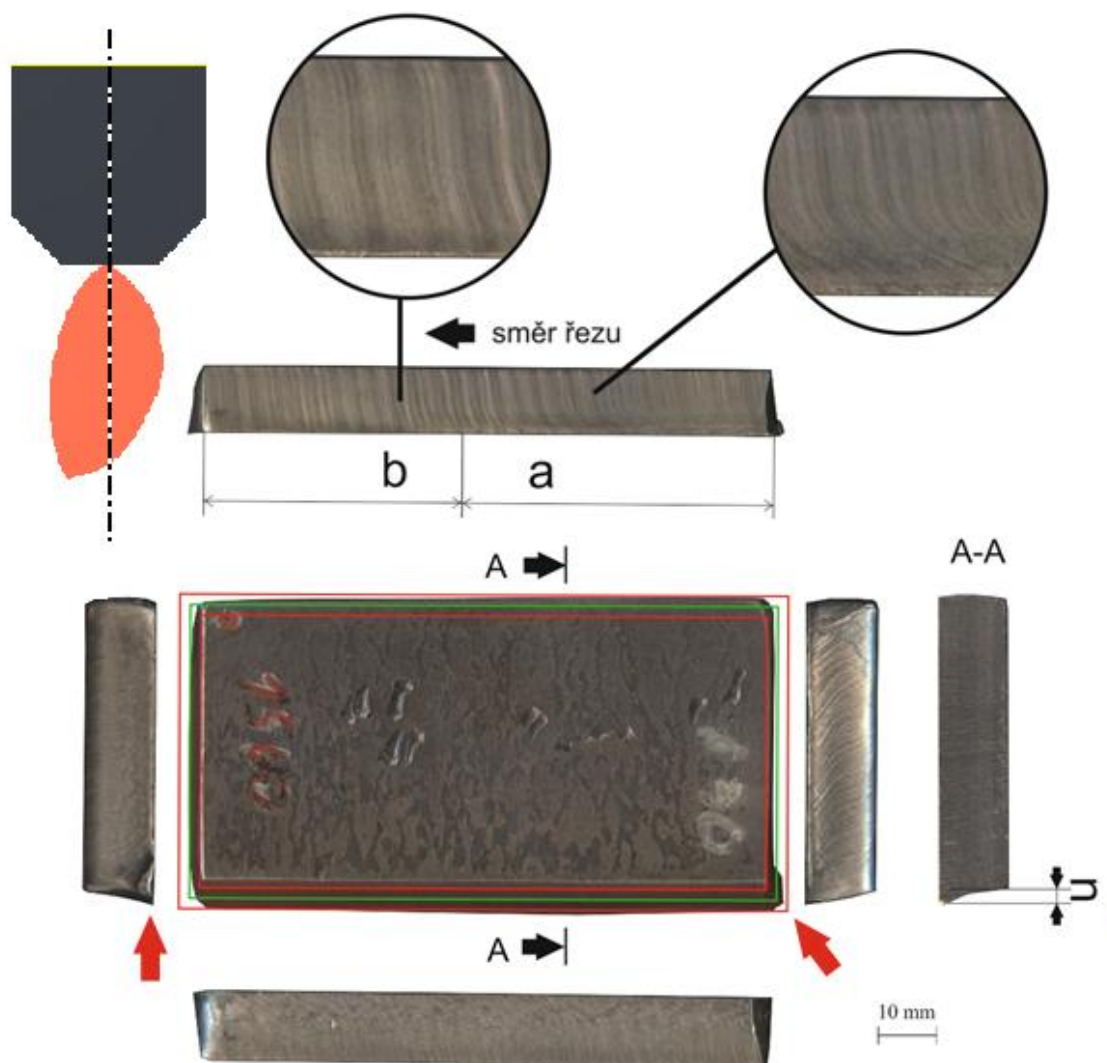
Z obr. 4.8 je vidět, že při použití této sestavy tryska-elektroda nebyl plazmový oblouk schopen propálit materiál v celé tloušťce. Trysky nebyla schopna oblouk dostatečně usměrnit, ten proto neměl při zvolené rychlosti dostatečnou teplotu k propálení materiálu. Tento jev doprovází stříkání materiálu proti hořáku, stejně jako při zpětném rozstříku. Na obr 4.9 je vidět natavený materiál okolo řezné spáry.

#### 4.6.3 Vzorek č. 3

Tento vzorek byl řezán za použití stejných dílů jako vzorek č. 2, avšak za použití nižší řezné rychlosti. Přehled podmínek řezání je v tab. 4.7.

Tab. 4.7 Podmínky řezu 3

<b>Použitá tryska</b>	B
<b>Použitá elektroda</b>	1
<b>Řezná rychlost [mm.min<sup>-1</sup>]</b>	1500



Obr. 4.10 Vzorek č. 3 s požadovanými rozměry, tol. polem a detaily

Vzorek se za snížené řezné rychlosti skutečně podařilo uřezat, avšak z obr. 4.10 jsou patrné velké rozměrové úchyly, které nespadají ani do toleranční třídy 2 dle normy. Toleranční pole třídy 2 dle normy je na obrázku znázorněno červenou barvou a má pro danou tloušťku materiálu mezní úchyly  $\pm 1,8\text{mm}$ .

Po celém obvodu výpalku jsou patrné skluzové rýhy, které jsou značně zkoseny. Tzn., že ani při snížené rychlosti nedodal oblouk do řezu potřebné množství tepla, v jednom místě (označeno červenou šipkou) dokonce nebyl materiál propálen v celé tloušťce.

Zajímavý jev nastal na dolní hraně, kdy v oblasti **a** se skluzové rýhy zpozdují a v oblasti **b** jsou téměř kolmé. Lze říci, že plazmový oblouk hořel na této hraně nerovnoměrně – v oblasti **b** byl usměrněn lépe než v oblasti **a**.

Vlivem špatného usměrnění oblouku jsou řezné hrany značně podkoseny – největší naměřená úhlová úchylka  $u$  dosáhla hodnoty 2,4 mm. Na obrázku je znázorněno, jak by přibližně mohl vypadat špatně usměrněný oblouk. Krajiní rozměry výpalku a zařazení do tolerančních tříd je v tab. 4.8.

Tab. 4.8 Hodnocení výpalku

	Naměřená hodnota	Tol. třída
Minimální rozměr na horní hraně – šířka [mm]	48,46	2
Maximální rozměr na dolní hraně – šířka [mm]	52,53	-
Minimální rozměr na horní hraně – délka [mm]	98,10	-
Maximální rozměr na dolní hraně – délka [mm]	100,88	2
Rz5 [ $\mu\text{m}$ ]	7,5	1
u [mm]	2,4	-

#### 4.6.4 Vzorek č. 4

Tento výpalek byl řezán tryskou C a novou elektrodou 1. Vzhledem ke značnému opotřebení trysky byla použita hned při prvním řezu menší řezná rychlost (tab. 4.8).

Nastala stejná situace jako v případě vzorku č. 2, v důsledku špatného usměrnění oblouku nebyl materiál propálen v celé tloušťce. Proto byla řezná rychlost ještě dále snížena na  $1000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , avšak ani při téhle rychlosti nebyl materiál propálen.

Lze tedy říci, že způsob opotřebení trysky C je horší než u trysky B.

Tab. 4.8 Podmínky řezu 4

Použitá tryska	C
Použitá elektroda	1
Řezná rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	1500, 1000

#### 4.6.5 Vzorek č. 5

Tento vzorek byl řezán za použití nové trysky, ale elektrody s již vypálenou emisivní vložkou. Řez byl proveden menší rychlostí než doporučenou (tab. 4.9).

Tab. 4.9 Podmínky řezu 5

Použitá tryska	A
Použitá elektroda	2
Řezná rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	1500

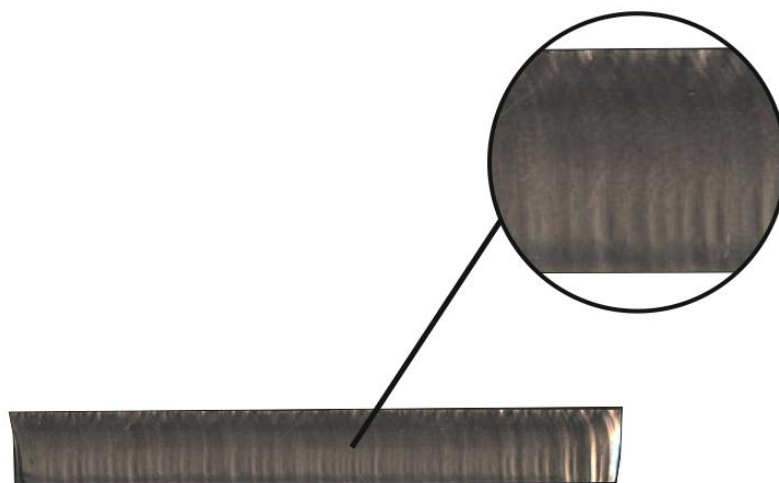
V důsledku již vypálené emisivní vložky vycházel oblouk z okraje měděné elektrody. Tento jev doprovází vyfukování kapek natavené mědi do trysky, která je tím poškozována. Při delším řezu za těchto podmínek by mohl oblouk přijít až do přímého kontaktu se samotným hořákem a zničit celou sestavu, proto byl řez krátce po nepovedeném startu zastaven. [18]

#### 4.6.6 Vzorek č. 6

Tento vzorek byl uřezán k porovnání drsnosti povrchu **Rz5** při řezání novou a opotřebovanou tryskou. Podmínky řezu jsou shrnuty v tab. 4.10, na obr. 4.11 řezná hrana s detailem.

Tab. 4.10 Podmínky řezu 6

<b>Použitá tryska</b>	A
<b>Použitá elektroda</b>	1
<b>Řezná rychlost [mm.min<sup>-1</sup>]</b>	1500



Obr. 4.11 řezná hrana s detailem

Již na první pohled v porovnání s obr. 4.7 jsou na obr. 4.11 méně patrné skluzové rýhy. Dala se tedy očekávat menší průměrná výška profilu **Rz5**, což potvrdilo měření, při kterém bylo **Rz5** rovno 6,1  $\mu\text{m}$ .

#### 4.7 Mechanismus opotřebení (vypalování) emisivní vložky

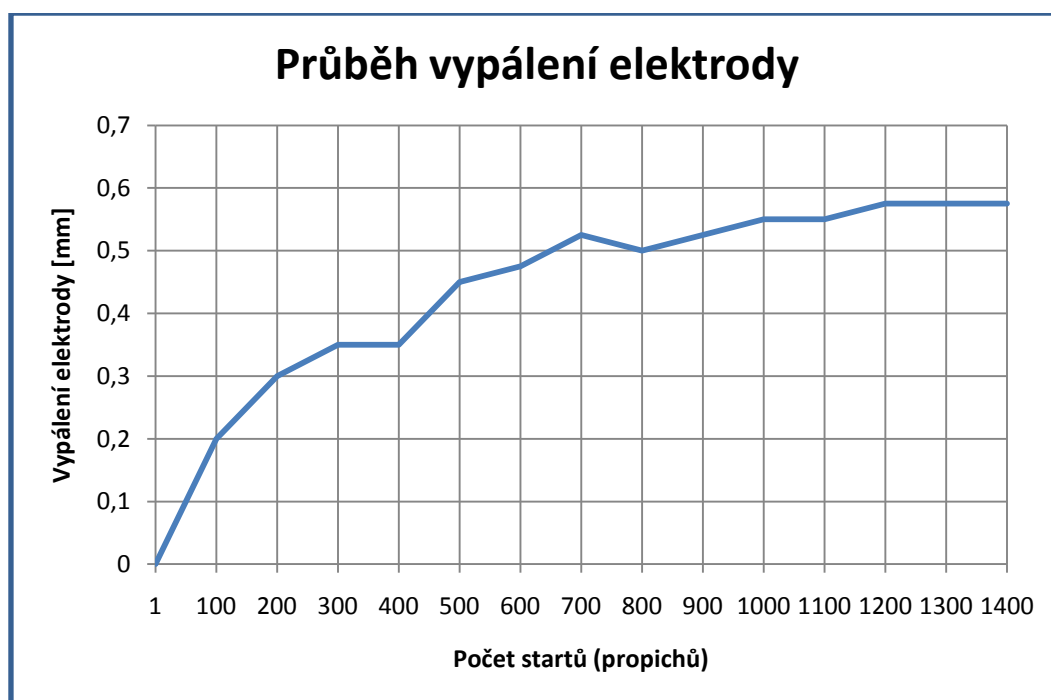
Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, emisivní vložka chrání elektrodu před přímým stykem s plazmovým obloukem a jejím rychlým opotřebením. Vložka je vypalována teplotou oblouku a prouděním plazmového plynu, ale nejvíce je namáhána během startu a zhasnutí oblouku, kdy dojde k jejímu zahřátí a následně rychlému ztuhnutí.

Na obr.4.13 je znázorněn průběh vypalování emisivní vložky, při řezání malých výpalků tvaru čtverec o rozměrech 50 x 50 mm z plechu tloušťky 3 mm a jakosti 11 375 dle ČSN proudem 80 A. Vypálení elektrody (hafnia) bylo měřeno po každém 50tém startu pomocí přístroje k tomu určeného (obr. 4.12). Po celou dobu řezání bylo dosahováno srovnatelné kvality řezu, kdy se rozměry výpalků pohybovaly v tol. třídě 2 určené normou, s mezními úchytkami  $\pm 0,7$  mm.

Dovolené vypálení hafnia pro kyslíkovou plazmu a měděnou elektrodu se pohybuje v rozmezí 1 až 2 mm. [19] Během řezání dosáhlo hodnoty 0,57 mm, lze tedy tvrdit, že elektroda by vydržela podstatně více startů. Z obr. 4.13 je také patrné, že k největšímu opotřebení (úbytku hafnia) dochází během několika prvních startů, poté se vypaluje pozvolněji.



Obr. 4.12 Měření vypálení elektrody



Obr. 4.13 Průběh vypálení elektrody

#### 4.8 Možnosti zvýšení životnosti spotřebních dílů

Pro zvýšení životnosti trysky přišla firma Thermacut s konstrukčním řešením, kdy je do měděného základu trysky vložena wolframová vložka (obr. 4.14). Čistý wolfram je extrémně pevný, odolný a má nejvyšší teplotu tání ze všech neslitinových kovů. [20] Díky tomu v porovnání s celoměděnou tryskou vydrží podstatně déle.



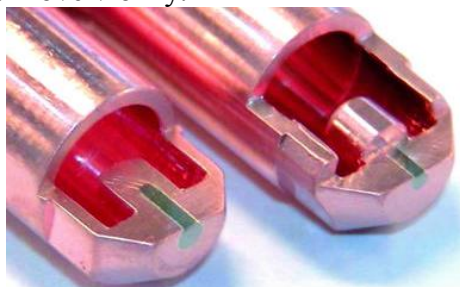
Obr. 4.14 Tryska s wolframovou vložkou [20]

Při výrobě elektrody ze stříbra a speciálních slitin se dosahuje zvýšení řezné rychlosti až o 40%. [21] Stříbro je lepším vodičem tepla než měď, proto je do řezu dodáváno podstatně více energie a zároveň se snižuje tepelné namáhání hořáku, což zvýší životnost spotřebních dílů. Ukázka stříbrných elektrod je na obr. 4.15.



Obr. 4.15 Stříbrná elektroda [21]

Dalším způsobem zvýšení životnosti elektrody je zasazení hafniové vložky do stříbrné fólie (obr. 4.16). [22] Tímto se nedosahuje takových výkonů jako u celostříbrných elektrod, nicméně stříbrná vložka svou dobrou tepelnou vodivostí snižuje tepelné namáhání hafniové vložky.



Obr. 4.16 Elektroda se stříbrnou vložkou [22]

## 5 ZÁVĚR

Tepelné dělení materiálu plazmou má zcela jistě své nezpochybnitelné výhody, mezi které patří hlavně produktivita, univerzálnost z hlediska jakosti materiálu a relativně nízké provozní náklady. Plazma je nenahraditelným prostředkem pro řezání tvarově složitých výpalků z materiálu o tloušťce v rozsahu 0,5 až 180 mm, kdy rozsah tloušťek také závisí na použité metodě (viz kapitola 1.3), v dobré kvalitě a produktivitě. Právě produktivita a kvalita řezu je ovlivňována mnoha již zmiňovanými faktory. Změnami parametrů lze dosáhnout buď větší produktivity při snížené kvalitě řezu, nebo naopak vyšší kvality na úkor produktivity. Záleží jen na požadavku zákazníka nebo technologa – jestli je potřeba vyrobit danou součást v krátkém čase, nebo pomaleji ale ve větší kvalitě.

Doporučené hodnoty parametrů řezu jsou uváděny v tabulkách dodávaných výrobcí spotřebních dílů hořáku, nicméně je třeba si uvědomit, že jsou uváděny pro ideální podmínky, které mohou být v běžném provozu rozdílné. Například kvalita pohybu stroje se časem snižuje, čistota plynu není často optimální a také záleží na kvalitě řezaného materiálu. Všechny tyto faktory dále ovlivňují kvalitu řezu. K odladění parametrů v daných podmínkách se provádí sledování několika prvních řezů, přičemž jsou postupně optimalizovány parametry (nejčastěji řezná rychlost podle tvaru skluzové rýhy – viz kapitola 3.1).

Jedním z nejsledovanějších faktorů ovlivňujících kvalitu řezu jsou právě spotřební díly, především tryska a elektroda. Jejich životnost je v dnešní době až několik tisíc startů v závislosti na jakosti řezaného materiálu (obr. 4.13), nicméně také může dojít k jejich zničení již během několika málo startů. Nejčastější důvody předčasného opotřebení jsou: řezání větší tloušťky než je sestava schopna uřezat, nesprávná výška hořáku, špatný tlak plynu, příliš vysoký proud a špatné chlazení.

Experimentální část se zaměřila na zkoumání vlivu opotřebení trysky na kvalitu řezu. Na sérii řezů byl ukázán vliv opotřebení ústí trysky na schopnost usměrnit plazmový oblouk. Při řezech vzorku č. 2,4 a 5 při zvolených řezných rychlostech nevnese špatně usměrněný oblouk do řezu potřebné množství tepla k protavení celé tloušťky materiálu, bylo tedy potvrzeno, že oblouk usměrněný do většího průměru má nižší teplotu. Vzorek č. 3 byl vyřezán nižší řeznou rychlostí, čímž se dá kompenzovat nižší teplota oblouku, nicméně jeho špatné usměrnění se projevilo na rozměrech a podkosení výpalku. Nejvyšší mezní rozměr byl naměřen na spodní hraně výpalku a měl hodnotu 52,53 mm, což je o 2,53 mm větší než rozměr požadovaný a je mimo toleranční třídy určené normou. Úhlová úchylka  $u$  dosáhla hodnoty 2,4 mm, což je taky mimo toleranční třídy určené normou. Průměrná výška profilu prvku **Rz5** byla naměřena 7,5  $\mu\text{m}$  a zařazena do toleranční třídy 1. Jakost povrchu je srovnatelná s jakostí vzorku č. 6 (6,1  $\mu\text{m}$ ), který byl řezán stejnou řeznou rychlostí (1500  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ), ale za použití nové trysky. Z provedených měření lze tedy říci, že schopnost trysky usměrnit oblouk má zásadní vliv na rozměrovou přesnost a podkosení řezné, avšak nemá příliš velký vliv na jakost povrchu řezu.

V praxi se velikost opotřebení trysky neměří, během samotného řezu lze poznat konec životnosti trysky jen podle materiálu stříkajícího nahoru proti hořáku, kdy nedojde k propálení celé jeho tloušťky, nebo podle tvaru oblouku při pohledu přes svářečské brýle. Mnohem objektivnější je však porovnat samotné rozměry, podkosení a jakost řezné hrany výpalku. Každý několikátý výpalek by měl tedy být podroben kontrole, kdy interval kontroly závisí na tloušťce a jakosti materiálu. V kapitole 4.7 je ukázáno, že při malých tloušťkách vydrží sestava až přes tisíc startů, naproti tomu

např. při řezání hliníku o tloušťce 25 mm proudem 200 A musela být sestava tryska-elektroda vyměněna za novou již po méně než 80 startech, kdy nebyla schopna propálit řezaný materiál.

Opotřebením (vypálením) elektrody se dá měřit pomocí přístroje k tomu určeného. Avšak nedoporučuje se hořák rozebírat, jen stěží se totiž dosáhne smontování dílů do pozic, v kterých byly předtím, nehledě na to, že každým rozebráním a smontováním se do hořáku dostávají nečistoty. Tohle může, byť jen nepatrně, ovlivnit čistotu a proudění plazmového plynu, což vyústí ve zhoršenou kvalitu řezu.

Výsledky experimentu také potvrzují, že řezání plazmou nepatří mezi nejpřesnější metody dělení materiálu, kdy i při doporučených parametrech řezu vzorek č. 1 dosáhl mezní hodnoty na horní hraně 49,11 mm, což je o 0,89 mm menší než rozměr požadovaný. Nicméně výpalky se běžně používají na svařované konstrukce, kde je přesnost plazmového dělení dostačující a produktivita, v porovnání s ostatními metodami tepelného dělení, nepřekonatelná.

### Seznam použité literatury

- [1] LINDE. *Facts about. Plasma technology*. Linde Gas Division, Linde Gas Headquarters, Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach, Germany. [pdf dokument].
- [2] DVOŘÁK, M. a kol. *Technologie II*. CERM, s.r.o. Brno, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [3] IDA Control. *Whatever you might not know about plasma cutting and wish to be informed about!* [online].[cit. 17.5.2011] Dostupné z WWW: <<http://www.idacontrol.com/articles.php?nid=11>>.
- [4] PARKER, P. Optimizing consumable life in mechanized plasma cutting : Identifying and correcting typical problems. *The Fabricator*. [online]. 2004. [cit. 22.3.2011]. Dostupný z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/optimizing-consumable-life-in-mechanized-plasma-cutting> >.
- [5] HYPERTHERM. *What is plasma?*. [online].[cit. 5.3.2011]. Dostupné z WWW: <[http://hypertherm.com/en/Training\\_and\\_Education/What\\_is\\_Plasma/what\\_is\\_plasma.jsp](http://hypertherm.com/en/Training_and_Education/What_is_Plasma/what_is_plasma.jsp)>.
- [6] HYPERTHERM. *Mechanized plasma cutting*. [pdf dokument].
- [7] KAŠPAR, J. Tepelné dělení materiálu kyslíkem. *MM Průmyslové spektrum*. [online]. Duben 2004. [cit. 9.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-deleni-materialu-kyslikem> >.
- [8] PLAZMA CZ s.r.o. *Plazma přednosti a nevýhody*. [online]. [cit. 18.4.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody>>.
- [9] ROUBÍČEK, M. *Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení materiálů*. [online]. [cit. 4.3.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf> >.
- [10] HYPERTHERM. *Jak zlepšit kvalitu řezu*. [online]. [cit. 4.3.2011]. Dostupné z WWW: <[http://www.froweld.cz/fotky3812/fotos/\\_s\\_101QSC\\_89337G.pdf](http://www.froweld.cz/fotky3812/fotos/_s_101QSC_89337G.pdf)>.
- [11] HYPERTHERM. *On-site Operator Training*. [online]. [cit 5.3.2011]. Dostupné z WWW:<<https://www.hypertherm.com/Xnet/library/library.jsp?file=HYP103694&format=ppt>>.
- [12] ČSN EN ISO 9013. *Tepelné dělení – Klasifikace řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*. Říjen 2003. 26s.
- [13] UNIMETRA. *Pusuvná měřítka*. [online]. [cit. 26.4.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.unimetra.cz/web/file.php?id=436>>.

- [14] UNIMETRA. *Úhlooměry*. [online]. [cit. 26.4.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.unimetra.cz/web/file.php?id=491>>.
- [15] PROINEX INSTRUMENT. *Drsnoměry*. [online]. [cit. 26.4.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.proinex.cz/inspekni-pristroje/priprava-povrchu/drsnomery.html>>.
- [16] PIERCE CONTROL AUTOMATION. *Řezací stroje s příslušenstvím*. [online]. [cit. 13.3.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.pierce.cz/produkce/rezaci-stroje-s-prislusenstvim.htm>>.
- [17] CITY PLASMA SERVICES. *Upgrade your HyDefinition HD4070 torch to...* [online]. [cit. 13.3.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.cityplasma.co.uk/hd4070.pdf>>.
- [18] WHITING, T. Starting from scratch: plasma arc cutting basics and operator guidelines. *The Fabricator*. [online]. 2006. [cit. 12.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/starting-from-scratch>>.
- [19] HYPERTHERM. *The hows and whys of electrode wear and lessons we can get to help improve system performance*. [online]. [cit. 12.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.idacontrol.com/support.php?nid=28>>.
- [20] THERMACUT. *TungstenEX wolframové trysky*. [online]. [cit. 6.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://thermacut.cz/Articles/1084-2.aspx>>.
- [21] THERMACUT. *SilverEX celostříbrné elektrody*. [online]. [cit. 6.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://thermacut.cz/Articles/738-2.aspx>>.
- [22] LAPČÍK, Z. Prodloužení životnosti elektrod pro plazmové řezání. *MM Průmyslové spektrum*. [online]. Říjen 2007. [cit. 6.5.2011]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prodlouzeni-zivotnosti-elektrod-pro-plazmove-rezani>>.

**Seznam použitých symbolů a zkratek**

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
PBM		Plasma beam machining
Rz5	$\mu\text{m}$	průměrná výška profilu prvku
D		průměr ústí opotřebené trysky
a		délka ústí trysky
č.		číslo
d		průměr ústí trysky
max.		maximální
n	mm	skluz
např.		například
tol.		toleranční
tzn.		to znamená
tzv.		takzvaný
r	mm	natavení horní hrany
u	mm	úhlová úchylka
$\Delta a$	mm	dovolené natavení horní hrany