

Návrh konstrukce plazmového řezacího stroje

Jiří Pokusa

Bakalářská práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří POKUSA

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Návrh konstrukce plazmového řezacího stroje

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracovat rešerši dle dostupných zdrojů a uvést hlavní znaky technologie plazmového řezání.**
- 2. Dle požadavku zadavatele zpracovat blokové schéma zařízení s uvedením parametrů jednotlivých komponentů.**
- 3. Zhotovit výkresy celkové sestavy a podsestav v potřebném rozsahu pro vyráběné strojní části zařízení, maximální velikost plechových polotovarů 2000x4000mm, tloušťka 20mm.**
- 4. Zpracovat hrubou kalkulaci výrobních nákladů pro sériovost 10ks/rok.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

(1) Maňková, I.: Progresívne technológie, Viena Košice, 2000

(2) <http://www.vanad.cz>

(3) <http://www.kjellberg.cz>

(4) <http://www.cebora.cz>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

14. února 2006

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. června 2006

Ve Zlíně dne 18. ledna 2006



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této práce je navrhnout konstrukci plazmového řezacího stroje. Teoretická část se zabývá obecným seznámením čtenáře s plazmovou teorií, všeobecnou problematikou této metody dělení materiálů a například porovnání s ostatními příbuznými způsoby dělení materiálů. Praktická část obsahuje blokové schéma plazmového řezacího stroje včetně hlavních parametrů použitých součástí, hrubou cenovou kalkulaci pro nákladovost deseti vyrobených kusů ročně a výkresovou dokumentaci.

Klíčová slova: plazma, dělení materiálu, cenová kalkulace, technická dokumentace.

ABSTRACT

Object of this project is to design construction of plasma cutting machine. Theoretical part contains general concepts of plasma theory, material cutting problematic and compares other cutting methods. Practical part consists block scheme of plasma cutting machine with used components including all their basic parameters. It also includes approximate value calculation expecting produce of ten machines yearly and technical drawings.

Keywords: plasma, material cutting, value calculation, technical drawing.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. a mému otci ing. Jiřímu Pokusovi za cenné připomínky a důležité rady při vypracování této práce. Díky samozřejmě patří i všem zástupcům společností, které jsem musel kontaktovat za ochotu ke spolupráci a firmě PPT v Přerově, která mi poskytla toto téma.

OBSAH

ÚVOD.....	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ROZDĚLENÍ VÝROBNÍCH PROCESŮ VE STROJÍRENSKÉ VÝROBĚ	10
2 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	13
2.1 KLASIFIKACE PROGRESIVNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	14
2.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění	15
2.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa.....	15
2.1.3 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu	15
2.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PROGRESIVNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	16
2.2.1 Obrobitelnost materiálů.....	16
2.2.2 Tvarová komplexnost součástí	16
2.2.3 Automatizace výroby.....	16
2.2.4 Integrita povrchu a požadavek vysoké přesnosti.....	17
2.2.5 Miniaturizace dílců.....	17
3 VZNIK PLAZMY	21
3.1 PLAZMOVÝ OBLOUK	21
3.2 PLAZMOVÉ PLYNY	22
3.3 PLAZMOVÉ ZAŘÍZENÍ.....	23
3.3.1 Transferovaný oblouk.....	23
3.3.2 Netransferovaný oblouk	24
3.4 PLAZMOVÉ HOŘÁKY	25
3.4.1 Chlazení hořáků	25
3.4.2 Hořáky chlazené vodou	26
3.4.3 Hořáky se stlačeným vzduchem	27
4 MECHANISMUS PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ MATERIÁLŮ	29
4.1 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES ŘEZÁNÍ PLAZMOU	30
4.1.1 Průměr trysky	30
4.1.2 Zdroj výkonu pro oblouk.....	31
4.1.3 Použité plazmové plyny	31
4.1.4 Vzdálenost mezi hořákem a materiálem	31
4.1.5 Řezná rychlost	31
4.1.6 Podřezávání	32
4.1.7 Tvarová přesnost	33
4.1.8 Volba řezací metody.....	35
4.2 OBRÁBĚNÍ PAPERSEM PLAZMY	35
4.3 SOUSTRUŽENÍ PLAZMOVÝM PAPERSEM	36
4.3.1 Plazmový paprsek jako přídavný nástroj.....	36
4.3.2 Plazmový paprsek jako nástroj.....	37
4.4 PŘÍDAVNÁ ZAŘÍZENÍ PRO PLAZMOVÉ ŘEZACÍ STROJE.....	40
4.4.1 Vrtací vřeteník.....	40

4.4.2	Navrtávání propalovaných otvorů	40
4.4.3	Vrtání malých otvorů	40
4.4.4	Značkovací přípravek	41
4.4.5	Najížděcí či nastavovací sondy a digitalizační sondy	41
5	POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ DĚLENÍ MATERIÁLU	43
6	ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI.....	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	49
7	VOLBA KOMPONENTŮ	50
7.1	PLAZMOVÉ ZAŘÍZENÍ	50
7.1.1	HiFocus 80i	50
7.1.2	Kjellberg Percut 80.....	50
7.1.3	Kjellberg PGE 3 – HM.....	51
7.1.4	Kjellberg PBA – H80	51
7.1.5	Prodlužovací paket	51
7.2	PRACOVNÍ ODSÁVACÍ STŮL.....	52
7.3	LINEÁRNÍ VEDENÍ	52
7.3.1	Vedení portálu	52
7.3.2	Vedení plazmové řezací hlavy	53
7.4	POHONY	54
7.5	PRUŽNÉ SPOJKY	54
7.6	GUMOVÉ USTAVOVACÍ PRVKY.....	54
7.7	KONSTRUKČNÍ MATERIÁL	54
7.8	SPOJOVACÍ MATERIÁL	54
8	BLOKOVÉ SCHÉMA	55
9	HRUBÁ KALKULACE VÝROBNÍCH NÁKLADŮ.....	56
9.1	NÁKLADY NA MATERIÁL	56
9.1.1	Náklady na materiál bočnic	56
9.1.2	Náklady na materiál portálu	57
9.1.3	Náklady na materiál vzpěr.....	57
9.1.4	Náklady na materiál krytu	59
9.1.5	Náklady na materiál hřídele	59
9.1.6	Celkové náklady na materiál	59
9.2	NÁKLADY NA PRACNOST	60
9.3	NÁKLADY NA MONTÁŽ	60
9.4	NÁKLADY NA SPOJOVACÍ MATERIÁL.....	60
9.5	NÁKLADY NA NAKUPOVANÉ SOUČÁSTI.....	61
9.6	CELKOVÉ NÁKLADY	62
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	64

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM TABULEK.....	67
SEZNAM PŘÍLOH.....	68

ÚVOD

Současná úroveň výroby vyžaduje, aby aplikované materiály splňovaly ty nejnáročnější kritéria ať už z hlediska dlouhé životnosti a opotřebení, tak i ekonomického. Takové materiály není možné zpracovávat klasickými metodami, které již často nesplňují požadavky na přesnost a rychlost zpracování. Proto se stále častěji setkáváme s metodami, které dovolují za kratší čas dosáhnout lepších výsledků. Mezi tyto progresivní technologie se také řadí obrábění paprskem plazmy. Plazmové způsoby řezání (PBM Plasma Beam Machining anebo PAM Plasma ARC Machining) se začaly používat začátkem 50. let jako alternativní způsoby řezání hliníkových a jiných neželezných materiálů namísto řezání kyslíkovým plamenem. V dnešní době patří mezi nepostradatelné technologie v nejrůznějších oblastech zpracování materiálů, jako je např. nanášení povlaků, svařování, řezání kovových i nekovových materiálů a v neposlední řadě obrábění pomocí plazmového paprsku, kde se využívá jednak jako zdroj lokálního ohřevu materiálu před odřezáním třísky, a také přímému úběru materiálu jeho postupným odtavením.

Přerovská firma Progress Productionstechnik, spol. s r.o. jako jednou z mnoha firem, zabývajících se problematikou progresivních technologií, dala podnět ke zpracování návrhu konstrukce plazmového řezacího stroje, což je hlavní náplní mé bakalářské práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ROZDĚLENÍ VÝROBNÍCH PROCESŮ VE STROJÍRENSKÉ VÝROBĚ

Vývoj silně ovlivňuje rozvoj průmyslové a tedy i strojírenské výroby. Z toho vyplívají i nové přístupy k technologii, konkrétně k technologii strojírenské výroby a její definici, klasifikaci a chápání. Pro lepší přehled jsou dále rozděleny základní pojmy ze strojírenské technologie.

Výroba

– je systém procesů, jejich výsledkem je produkt. Je to posloupnost činností, které vedou k tvorbě produktů zpracováním nebo spojením materiálů a jejich následující montáží do finálního výrobku.

Strojírenská výroba

– výběr výrobních prostředků a výrobních metod za účelem optimalizace použití výrobků podle technologických kritérií. Strojírenská výroba zahrnuje návrh a konstrukci výrobku, technologii výroby a výrobní proces, výrobu nástrojů a zařízení na jejich údržbu a informace potřebné na zabezpečení hospodárnosti a ekonomiky výroby. Technologie a strojírenská výroba jsou vzájemně spojené jako teorie a praxe.

Výrobní proces

– je soubor činností lidí, strojů a procesů, jejichž výsledkem je určitý druh výrobku. Zahrnuje hlavně výrobní procesy (výroba montážních celků, dílců a montáž), pomocné výrobní procesy (opravy, výroba náradí, modelů, náhradních dílů) a vedlejší procesy (skladové hospodářství, doprava, energetické hospodářství, laboratoře, zkušebny ...)

Technologie strojírenské výroby

– je komplexně vědní oblast, jejímž předmětem zkoumání je podstata, vzájemné vztahy a zákonitosti procesu výroby dílců, zařízení a strojů. Posuzuje existující způsob výroby a hledá nové způsoby přeměny materiálu na polotovary, dílce a výrobky. Zabezpečuje po-

žadovanou kvalitu předmětů na požadované ekonomické a ekologické úrovni.

Technologie zpracování materiálu se dělí na šest základních druhů, které se liší způsobem realizace ve výrobě, technologickými zvláštnostmi a výsledným efektem.

A) Procesy dělení materiálů (stříhání, řezání ...)

B) Procesy spojování materiálů (svařování, pájení, lepení, lisování ...)

C) Procesy tvarování materiálů a polotovarů – dále se dělí na:

1) tvarování materiálu v tekutém stavu

2) tvarování materiálů plastickou deformací

3) tvarování práškovou metalurgií

4) tvarování řezáním materiálu

5) tvarování odstraňováním materiálu fyzikálně - chemickým úběrem

D) Procesy změny fyzikálně mechanických vlastností materiálu (tepelné zpracování, galvanizace ...)

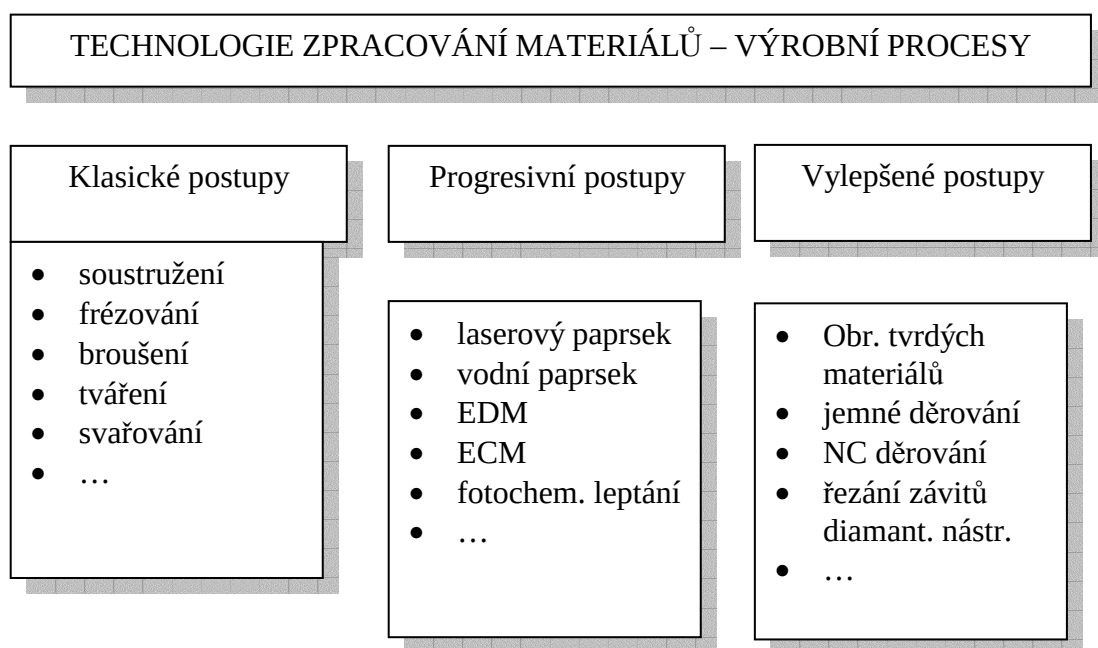
E) Rozměrové zpracování dílců: odstraňují se nepřesnosti po předchozích operacích (lapování, mikrořezání, nanotechnologie ...)

F) Procesy změny stavu povrchu: částečně se prolínají s rozměrovým opracováním dílců, využívají se procesy, které zlepšují a vylepšují kvalitu povrchu nebo i zlepšují rozměrovou přesnost (honování, superpřesné broušení ...)

Z výše uvedeného dělení vyplývá, že existuje široké spektrum technologických procesů

a operací, které je možné dělit podle stupně jejich vývoje a průmyslového použití do třech kategorií na procesy označené jako:

- klasické resp. konvenční technologie založené na mechanické povaze zpracování materiálů.
- doplňkové progresivní založené na fyzikální a chemické povaze dějů při zpracování materiálů
- vylepšené, inovační metody zpracování materiálů



Obr. 1.: Hlavní typy výrobních procesů

2 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Název progresivní způsoby úběru materiálu se používá pro širokou škálu mechanických , elektrických, tepelných a chemických procesů při úběru materiálu.

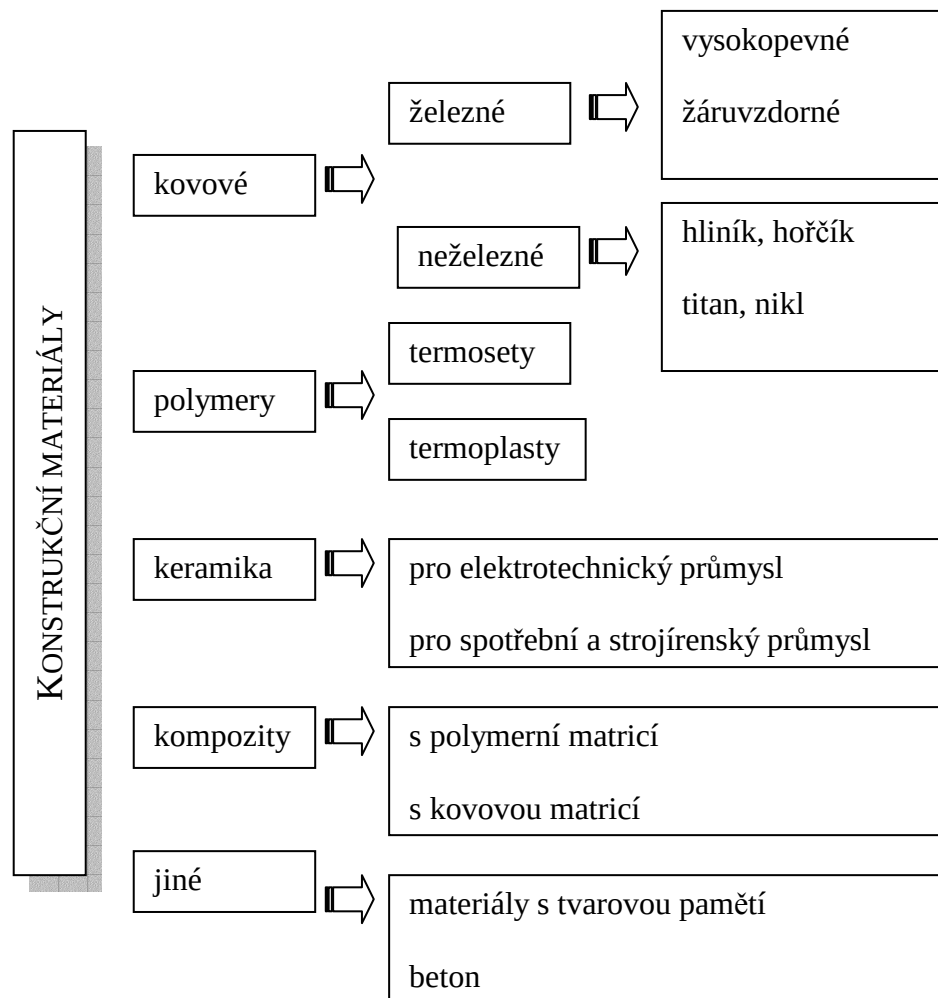
Kvůli širokému spektru procesů se těžko zavádí stručná definice progresivních metod obrábění. V literatuře ale panuje shoda v tom, že do této skupiny patří procesy, které používají běžné formy energie novým způsobem nebo používají energii, která nebyla nikdy před tím použita.

Progresivních metod obrábění se využívá hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžce obrobitelné nebo jsou obrobitelné, jsou to např. kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní keramické materiály, některé polymery apod. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich vysoké tvrdosti, křehkosti , žárupevnosti, nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem, nehomogenní mikrostruktury apod.

Velkou výhodou při použití progresivních metod obrábění, které používají k úběru materiálu jinou než mechanickou energii je řešení problému s opotřebením nástrojů při obrábění.

Z hlediska opotřebením nástrojů se vývoj progresivních metod ubírá dvěma směry:

- I. využívání elektrické, chemické a tepelné energie na podporu klasických metod obrábění s nástrojem jako geometrickým tělesem , které snižují intenzitu jeho opotřebením
- II. využívání elektrické, chemické a tepelné energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů bez použití nástroje jako geometrického tělesa, nebo s jeho použitím ale bez jeho zásahu do procesu obrábění – úběr materiálu je realizován pouze energií jinou než mechanickou.



Obr. 2.: Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění

Dalšími důvody pro použití progresivních způsobů obrábění jsou také zvyšující se požadavky na přesnost, kvalitu, komplexnost tvarů, na dokončení povrchu atd.

2.1 Klasifikace progresivních metod obrábění

Systematickou klasifikaci těchto technologií je možné zpracovat podle různých hledisek. Obvykle se používá toto dělení:

2.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění

Dělení podle hlavního energetického zdroje úběru resp. podle použité energie je nejvíc rozšířené. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálu a to na:

- mechanické procesy
- chemické procesy
- elektrické nebo elektromechanické procesy
- tepelné nebo elektrotepelné procesy

2.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa

Dělení podle přítomnosti nástroje vychází ze směrů vývoje technologií. Slovo nástroj je uvedené pouze z důvodu, že se používá, ale na úběru materiálu se vůbec nepodílí. V přeneseném smyslu se tedy používá z těchto důvodů:

- Při vysvětlování teorie úběru materiálu se o nástroji mluví všeobecně jako o prostředku, který je příčinnou úběru materiálu např. laserový nástroj. V tomto případě ale nástrojem není tuhé geometrické těleso.
- Nástroj jako tuhé geometrické těleso, které na rozdíl od klasického řezání a broušení není v přímém kontaktu s obráběným materiálem, ale v procesu úběru materiálu podléhá opotřebení. V tomto případě slouží na zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečení optimálního průběhu procesu. Nástroj je jako podpůrného geometrického tělesa se používá v těchto procesech:
 - o ultrazvukové obrábění
 - o elektrochemické obrábění
 - o elektrojiskrové obrábění

2.1.3 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu

- procesy s převládajícím brusným účinkem: ultrazvukové obrábění, obrábění proudem brusiva
- procesy s erozivním účinkem: obrábění vodním paprskem
- procesy chemického rozpouštění materiálu: chemické frézování, fotochemické a elektrochemické obrábění

- procesy s převládajícím tepelným účinkem na úběr materiálu: elektrojiskrové obrábění, laserové, plazmové a elektronové paprsky

2.2 Základní charakteristiky progresivních technologií

Původně byly progresivní metody obrábění vyvinuté jako alternativní způsoby. V současnosti představují v mnohých případech běžný způsob obrábění a v některých případech také jako jedinou možnost pro opracování daného materiálu.

Jejich používání je podpořeno výhodami, mezi které patří:

2.2.1 Obrobitelnost materiálů

Tento pojem je charakteristický pro řezání a broušení materiálů a je založený na mechanických vlastnostech materiálu jako je tvrdost, pevnost a houževnatost. V případě progresivním metod obrábění ztrácí svůj význam. Důležitou úlohu zde hrají další vlastnosti jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, atomové číslo, lomové vlastnosti apod.

2.2.2 Tvarová komplexnost součástek

Zvyšující se požadavky na tvarovou složitost vyráběných dílců upřednostňují používání nových metod pro obrábění. Příkladem může být vrtání. Je snadné vyvrtat kruhový otvor konvenčním způsobem, ale čtvercový otvor nebo jiný nerotační tvar není možné zhotovit klasickým postupem. Zde se uplatňuje elektrojiskrové a elektrochemické obrábění.

2.2.3 Automatizace výroby

Automatizace výrobního systému a informační tok ve výrobním procesu redukuje výrobní časy, snižuje výrobní náklady atd. Tento aspekt účinně působí při použití NC a CNC strojů a zavádění CAD/CAM systémů do výroby s konečným vyústěním do počítačově integrované výroby CIM. Obecně platí, že zavádění progresivních metod obrábění do tohoto systému je jednodušší než u klasických metod obrábění.

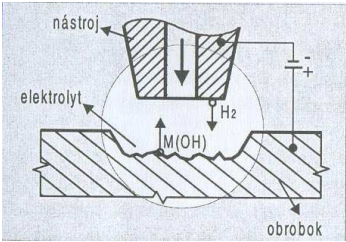
2.2.4 Integrita povrchu a požadavek vysoké přesnosti

Povrchy opracované řezáním nebo broušením vykazují stopy silného mechanického působení (zpevnění, povrchové napětí, mikronerovnosti ...), které mohou mít nepříznivé účinky na užitné vlastnosti obrobků. Také řezání a broušení materiálu jako je např. keramika nebo vláknové kompozity přináší řadu neřešitelných problémů. U těchto materiálů představují progresivní metody jedinou možnost opracování a dosažení požadovaného povrchu. Přesnosti úběru v oblasti atomových a molekulárních vrstev dokáže zabezpečit např. iontové a elektronové procesy.

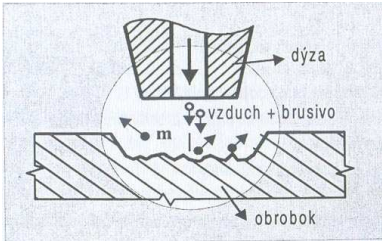
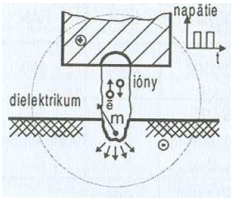
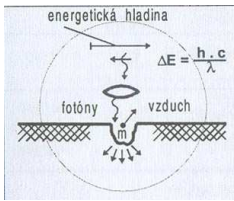
2.2.5 Miniaturizace dílců

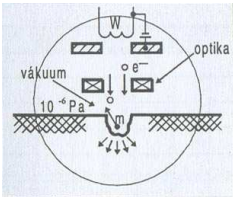
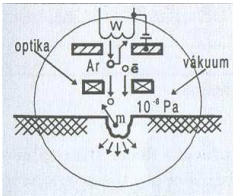
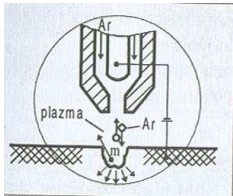
Trendy zmenšování rozměrů dílců zvyšují potřebu používání nových procesů, které umožňují úběr materiálů nejen v oblasti mikrorozměrů a dokonce úběr několika molekulárních a atomových vrstev. Ultra malé rozměry ($10 \div 100\mu\text{m}$) otvorů není možné vrtat běžnými technologiemi, ale technologie mikrochemického obrábění, obrábění svazkem elektronů a iontů řeší tyto problémy.

Tab. 1.: Znázornění principu technologie a stručná charakteristika

	<u>Elektrochemické obrábění ECM</u> Obrábění tvarů, složitých profilů a otvorů s větší intenzitou úběru. Použití pouze pro vodivé materiály Nevýhody: požadavek vstupních technologických zkoušek pro určení vhodných parametrů procesu, vysoké náklady na zařízení, vysoká energetická náročnost MRR: $2,5 \div 12 \text{ mm/min}$ v závislosti na hustotě proudu
---	--

	<u>Chemické obrábění CM</u> Chemické působení na úběr materiálu. Použití: pro skoro všechny kovy, tvrdé, křehké a nevodivé materiály Nevýhody: maximální hloubka odleptání materiálu do 12 mm, Výhody: nízké náklady na zařízení MRR: 0,0025 ÷ 1mm/min
	<u>Ultrazvukové obrábění USM</u> Úběr materiálu pomocí abrazivní suspenze která proudí v mezeře mezi kmitajícím nástrojem a obrobkem. Použití: tvorba plytkých nerovnoměrných profilů do tvrdých a křehkých materiálů. Nevýhody: vysoké náklady, malý úběr materiálu MRR: 0,4 ÷ 1,6 mm/min
	<u>Vodní a vodní abrazivní paprsek WJM/AWJ</u> Není limitované vlastnostmi materiálu, je doporučeno zejména pro opracování těžkoobrobitelných mat. – keramika a kompozitní materiály do hloubky 25mm. Výhody: technologie šetří životní prostředí Nevýhody: vysoká hlučnost MRR: mění se podle druhu materiálu obrobku

	<u>Technologie abrazivního paprsku AJM</u> Používá stlačený plyn, obvykle vzduch na urychlení proudění pevného brusiva Použití: pro čištění povrchů a oddělování velmi malých dílců z křehkých materiálů Nevýhody: pomalý úběr materiálu, nízký výkon zařízení
	<u>Elektroerozivní obrábění EDM</u> Pro elektricky vodivé a tvrdé materiály, vysoké náklady a malá životnost nástroje elektrody, nutnost výroby vždy nové elektrody při změně profilu dílce EDM zvyšuje tvrdost vytvářené povrchové vrstvy a redukuje mez únavy MRR: okolo 0,15 cm³/min
	<u>Technologie laserového paprsku LBM</u> Široce aplikovatelná technologie pro všechny druhy materiálů, nedoporučuje se pro velmi tenké dílce a pro velmi malé úběry. Nevýhodou je tepelně ovlivněná zóna, nerovnoměrnost řezu a vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu Nevýhody: drahé zařízení, energeticky náročné MRR: 0,006 cm³/min

	<u>Elektronový paprsek EBM</u> Vyžaduje vakuové prostředí, vhodné pro vrtání otvorů a tvarování mikro rozměrů. Nevýhodou jsou vysoké náklady na zařízení, rozměry omezená použitelnost (vrtání do hloubky 6mm), nízká produktivita a tepelné ovlivnění vytvářeného povrchu MRR: $0,0008 \div 0,002 \text{ cm}^3/\text{min}$
	<u>Technologie iontového paprsku IBM</u> Vyžaduje se vakuové prostředí, vhodné pro tvarování mikro a nano rozměrů a velmi jemné opracování povrchů Nevýhody: vysoké náklady, omezená použitelnost dané rozměrem vakuové komory Povrchy nejsou ovlivněny teplem
	<u>Obrábění plazmovým paprskem PAM</u> Vhodné pro opracování všech kovových materiálů vysokou rychlostí úběru Nevýhody: vysoké provozní náklady, náklady na zařízení a tepelné ovlivnění místa řezu

3 VZNIK PLAZMY

Plazma je pojem zavedený pro osobitý stav plynů, při kterém se stávají vodivými ionizací atomů. Je to směs elektronů a kladných iontů, která je většinou rozložená uvnitř plynu z neutrálních částic. Jako celek je plazma v ustáleném stavu elektricky neutrální. Může být částečně nebo úplně ionizovaná. Teplota částečně ionizované plazmy je 5000 – 15000° K, teplota úplně ionizované asi 100 000° K.

Plazma je elektricky vodivá a podléhá účinkům elektrického a magnetického pole. Nejčastěji se plazma může tvořit ohřevem látky na vysokou teplotu nebo elektricky obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami, případně mechanicky kompenzovaným iontovým svazkem. Jako zdroj tepla pro ionizaci plynů se v technické praxi nejvíc používá elektrický oblouk.[1]

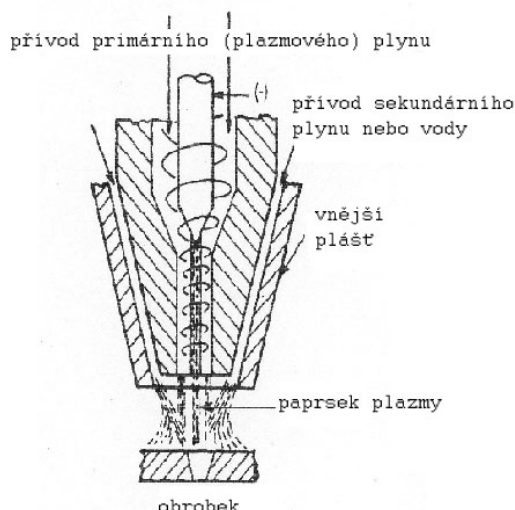
3.1 Plazmový oblouk

Na vytvoření vhodného stavu plazmového oblouku se zažil název stabilizace oblouku. Stabilizace oblouku znamená udržení paprsku plazmy v určitém požadovaném tvaru, což se dá zabezpečit tvarem trysky plazmového hořáku, proudícím plynem a vodou. Pro řezací proces je nejdříve zapálen pilotní oblouk mezi tryskou a katodou prostřednictvím vysokého napětí. Tento energeticky slabší pilotní oblouk připraví částečně ionizací dráhu mezi plazmovým hořákem a obráběným předmětem. Dotykem pilotního oblouku s obráběným předmětem (letmé naříznutí, letmý propich) je automaticky zvýšen výkon hlavního oblouku.[1]

Plazma se vytváří rozkladem molekul plynů za vysokého vývinu tepla, při přechodu elektrickým obloukem, který hoří mezi netavící se elektrodou (obvykle zápornou netavící se katodou) a řezaným materiálem (kladnou anodou). Při základní konfiguraci plazmového hořáku výboj vzniká mezi záporně nabitou elektrodou a kladně nabitým materiálem.

Na dosažení technicky kvalitní plazmy je zapotřebí sledovat parametry tvořící se plazmy:

- teplotu a elektrickou vodivost (zvyšováním velikosti proudu se zvyšuje teplota a elektrická vodivost plazmy)
- hustotu proudu plazmy
- průměr paprsku.



Obr. 3. Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk. Záporně nabitá elektroda a kladně nabitý obrobek tvoří oblouk. Plazmový plyn je ionizovaný a ohříván na vysokou teplotu. Sekundární přívod plynu chrání oblast tavení materiálu.

3.2 Plazmové plyny

Plyny používané pro plazmové řezání mají vysoký vliv na kvalitu řezání a podle funkce se dělí na:

- **plazmové plyny**, které jsou přiváděny přímo do oblouku, kde dochází k jejich ionizaci (argon, argon + vodík, helium, dusík, CO₂, vzduch)
- **fokusační plyny**, které slouží ke zužování paprsku na výstupu z trysky plazmového hořáku (argon, argon + vodík, argon + dusík, dusík)
- **ochranné plyny**, které obklopují plazmový paprsek a oblast tavení materiálu a chrání je před účinky atmosféry (obvykle argon)

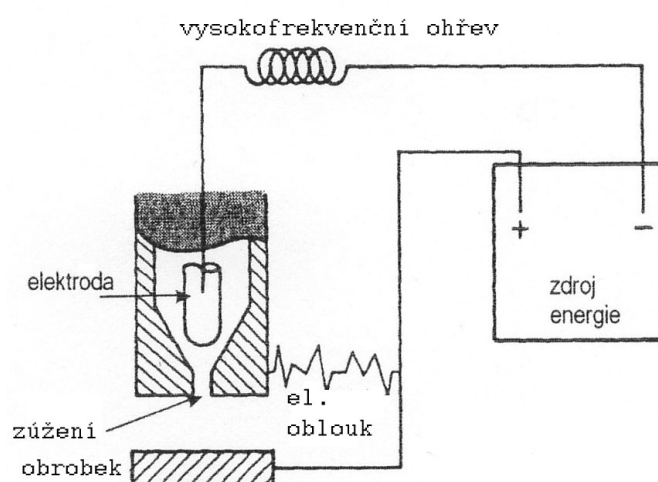
Tab. 2. Použité plazmové plyny podle druhu řezaného materiálu

Materiál	Použitý plyn
Konstrukční ocel	kyslík, vzduch
Vysoce legovaná ocel	Argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík
Lehké kovy	Argon/vodík, vzduch
Barevné kovy	Argon/vodík
Kompozitní materiály	Argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík

3.3 Plazmové zařízení

Plazmové zařízení se skládá ze zdroje energie, ionizátoru, plazmového hořáku a řídicí jednotky (obvykle NC nebo CNC řízení). Plazmové zařízení se dělí na dva základní typy, které používají přenesený (transferovaný) a nepřenesený (netransferovaný) oblouk.

3.3.1 Transferovaný oblouk

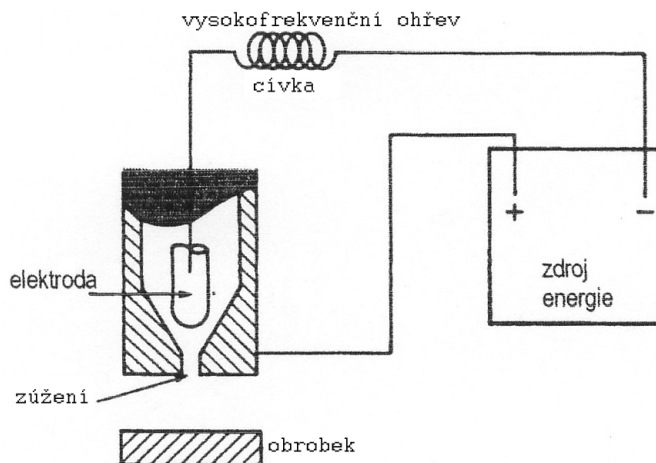


Obr. 4. Transferovaný plazmový oblouk

Transferovaný oblouk se tvoří mezi elektrodou uvnitř plazmového hořáku a materiálem. Pro takový plazmový paprsek se zaužívalo označení plazmový oblouk (plasma arc).

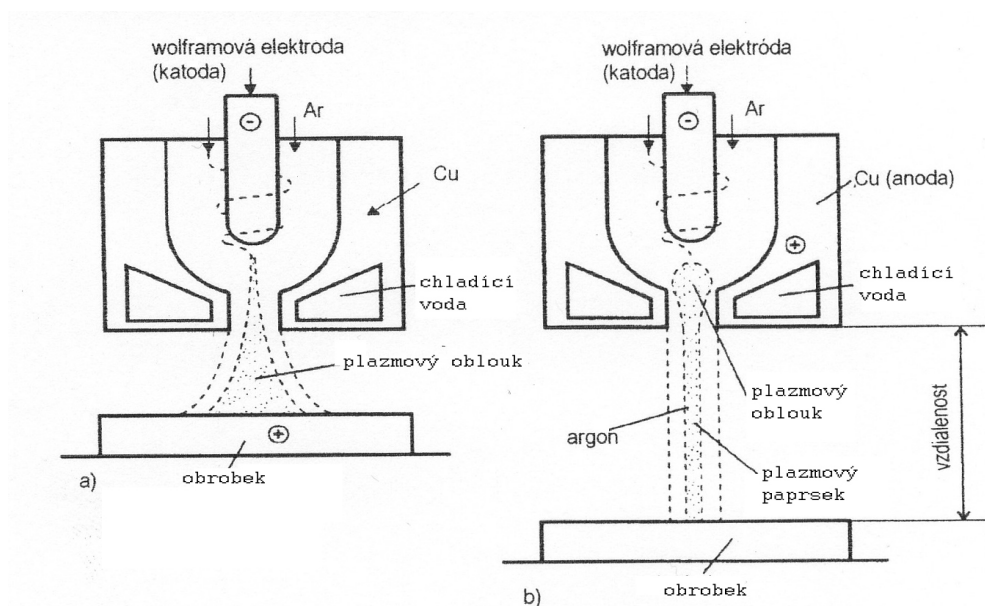
Obvykle se v tomto případě pro plazmové obrábění používá označení PAM (Plasma Arc Machining). Používá se pro vodivé materiály. V takovém plazmovém hořáku je tryska méně tepelně namáhána.

3.3.2 Netransferovaný oblouk



Obr. 5. Netransferovaný plazmový oblouk

Netransferovaný oblouk se tvoří pouze v samotném plazmovém hořáku mezi dvěma elektrodami. Pro ionizovaný plyn resp. plazmu se užívá označení plazmový paprsek (plasma jet), mezinárodní zkratka pro opracování plazmovým paprskem je PBM (Plasma Beam Machining). Používá se pro nevodivé materiály.



Obr. 6. a) Plazmový oblouk – plasma arc b) plazmový paprsek – plasma jet

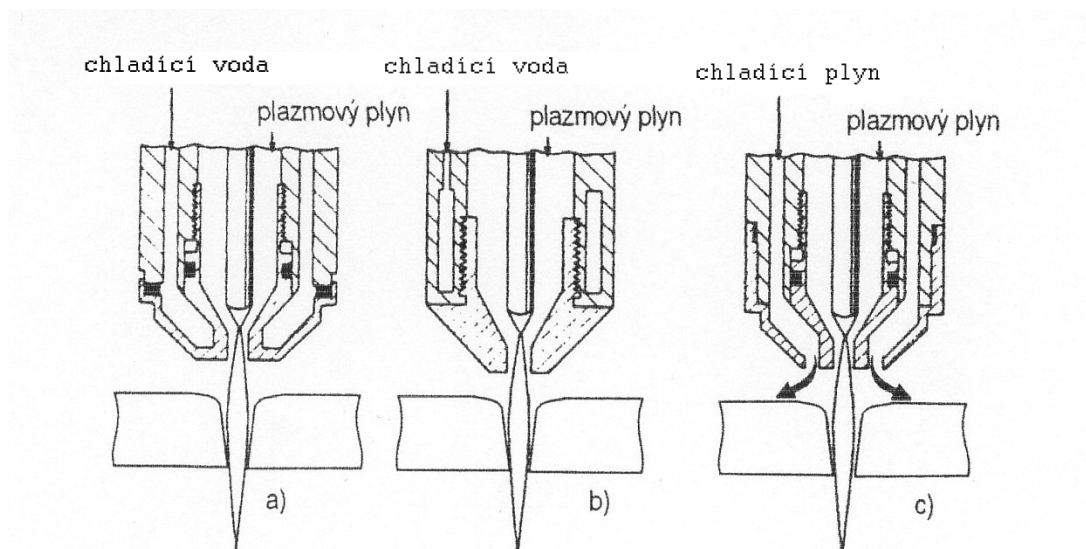
3.4 Plazmové hořáky

Plazmové hořáky musí zabezpečovat přívod všech pracovních plynů, přívod proudu na elektrodu, tvarování plazmového oblouku a usměrnění paprsku na místo řezání. Jsou nedílnou součástí plazmového zařízení a můžeme je rozdělovat podle:

- výkonu (je udaný součinem proudu a napětí oblouku)
- způsobu chlazení (přímé chlazení vodou, nepřímé chlazení vodou a chlazení plynem)
- složení plazmového plynu (oxidační, neoxidační)
- druhu materiálu katody (wolfram, zirkon...)
- pracovního systému hořáků (na principu stlačeného vzduchu, vstřikování vody atd.)
- způsobu použití (pro ruční nebo strojní řezání)

3.4.1 Chlazení hořáků

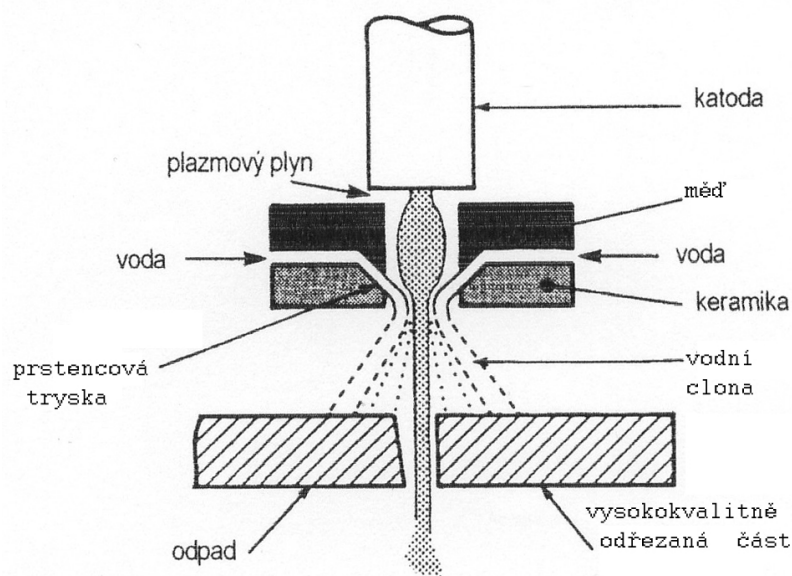
Intenzivní chlazení je nevyhnutelné na dosáhnutí úzkého svazku plazmy. Chlazení se zajišťuje konstrukcí plazmových hořáků. Hořák je chlazený chladicí kapalinou, obvykle vodou, anebo plynem. Výtoková tryska je odizolovaná od vodivých částí hořáku.



Obr. 7. a) přímé chlazení vodou b) nepřímé chlazení vodou c) chlazení plynem

3.4.2 Hořáky chlazené vodou

Pro plazmové řezání se používají plazmové oblouky stabilizované vodou nebo směsí plynů. Řezání pomocí plynem stabilizované plazmy je často doprovázené vznikem dýmu, prachu, hluku a UV záření. Dochází ke vzniku velkého množství zdraví škodlivých oxidů dusíku, které musí být odsávané. Řezání plynem stabilizovanou plazmou je ekonomicky náročné (použití inertních plynů) a doporučuje se pro řezání materiálů jako jsou korozi-vzdorné oceli, hliník a neželezné kovy. Z těchto důvodů se do popředí zájmu dostávají hořáky se stlačeným vzduchem (air plasma system) a plazmové hořáky se vstřikováním vody (water – injected plasma), které jsou ekonomicky méně nákladné a jsou vhodné i pro řezání nízkolegovaných ocelí. Jako plazmový plyn se používá dusík a fokusační plyn nahrazuje voda, která je vstřikována přes přidavné radiální kanálky trysky do plazmového paprsku. Ochrannou clonu okolo zónu okolo místa řezu tvoří opět voda.[1]

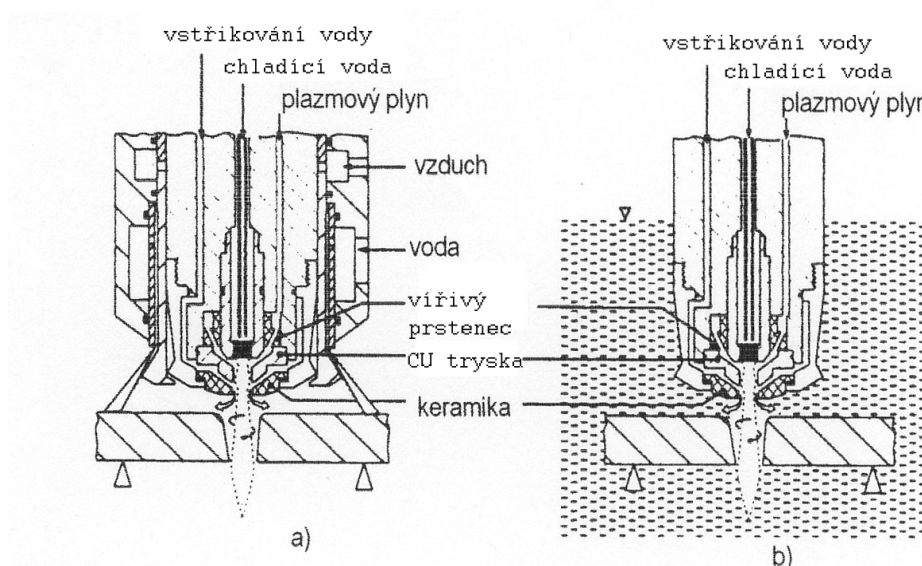


Obr. 8. systém plazmového hořáku se vstřikováním vody

Chlazení vodou příznivě ovlivňuje šířku řezu a samotnou kvalitu řezu. V novějších konstrukčních provedeních těchto typů hořáků se používá vířivé vstřikování vody do plazmového oblouku, což způsobí, že při vysokých teplotách kolem 50 000 K, voda vytvoří okolo oblouku tenký film namísto toho, aby se odpařovala. Při tomto způsobu se odpařuje asi 10 % vody, zbytek vychází z trysky ve formě kužele (vodní clona) a má chladicí účinek na povrch materiálu a zároveň zabraňuje tvoření oxidů v této zóně.

Tyto hořáky mají oproti hořákům na plyném principu několik výhod:

- zvýšení stability oblouku
- zvýšení trvanlivosti trysek
- zvýšení rychlosti řezání a dosahované pracovní proudy okolo 600 A
- vysoká kvalita řezu, téměř pravoúhlé hrany řezu, snížení tepelného ovlivnění povrchu
- méně výparů a dýmů
- možnost řezání pod hladinou vody, čímž se snižuje hluk a výpary ze zóny řezu a řezání méně znečišťuje životní prostředí



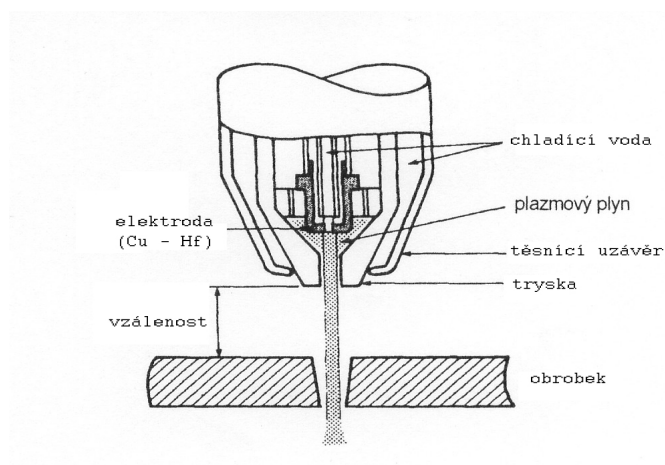
Obr. 9 a) plazmový hořák se vstřikováním vody a vířivým prstencem

b) plazmové řezání pod vodou (hořák je ponořen asi v 80 mm hloubky)

3.4.3 Hořáky se stlačeným vzduchem

Jako plazmový plyn se používá stlačený vzduch, který se působením vysokých teplot v elektrickém oblouku rozkládá na svoje elementární složky. Kyslík jako jedna složka stlačeného vzduchu je v prostředí plazmy vysoko reaktivní a působí oxidačně při řezání většiny kovových materiálů, zároveň se zvyšuje rychlost řezání o 25 %. Pracovní wolframová elektroda je v tomto případě nahrazená elektrodou zirkonovou nebo měď- hafniovou. Pro řezání se stlačeným vzduchem jsou vhodné elektricky vodivé materiály , například korozi-

vzdorné oceli, chrom – niklové legované ocele, hliník a jeho slitiny, měď a její slitiny.



Obr. 10. Systém plazmového řezání se stlačeným vzduchem

Tab. 3. Porovnání provozních charakteristik jednotlivých systémů plazmového řezání

Parametr	[]	Plynem stabilizovaný systém			Vstřikování vody			Stlačený vzduch		
Tl. materiálu	mm	3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9	3,2	6,4	15,9
Řezná rychlost	mm/s	106	51	32	74	64	34	106	95	32
Výkon	kW	15	15	15	58	70	89	49	58	64
Proudová intenzita		150	150	150	300	350	400	200	235	250
Průtok vzduchu	m ³ /h	/	/	/	/	/	/	2,8	2,8	2,8
Průtok dusíku	m ³ /h	1,7	1,7	1,7	4,7	4,7	4,7	/	/	/
Průtok CO ₂	m ³ /h	5,9	5,9	5,9	/	/	/	/	/	/
Lineární intenzita řezání	m ³ /h	381	183	114	267	229	107	381	343	114

4 MECHANISMUS PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ MATERIÁLŮ

Princip plazmového řezání spočívá v tavení děleného materiálu extrémně vysokými teplotami, které se tvoří vznikem plazmy. Vysoké teploty (17 000 – 33 000 °C) a vysoká intenzita přenosu tepla do materiálu (24,1 – 68,7 MW/m²) charakterizují přednosti plazmového řezání v porovnání s řezáním plamenem. Teplota kyslík – acetylenového plamenu je okolo 2 900 °C, maximální intenzita přenosu tepla je v rozmezí 8 – 19 MW/m², což je v porovnání s plazmou o mnoho nižší. Při styku plazmy s povrchem tuhého materiálu nastává vlivem vysoké teploty tavení materiálu, odtékání, odstříkávání, odpařování, sublimace nebo rozprašování. Tyto jevy se potom využívají pro technologické procesy tavení, svařování, řezání materiálů nebo tvoření povlaků.

Teoretické základy úběru materiálu při plazmovém řezání je založená na předpokladu, že materiál obrobku absorbuje všechnu tepelnou energii, kterou plazma uvolňuje při styku s materiálem. Úběr materiálu nastává jeho tavením a následným odplavením ve formě jemné rozprášené tekutiny, nebo odpařením materiálu, případně chemickou reakcí mezi materiálem a plazmou.

Intenzita přenosu energie E z plazmového oblouku do materiálu je dána rozdílem energie mezi dopadajícím paprskem plazmy a energií potřebnou na tavení materiálu. Když paprsek plazmy o teplotě T_1 (K) má energii h_1 (J/s), natavený a odtékající kov má teplotu T_2 (K) a absorbovaný obsah tepla je H_2 (J/m³), potom intenzita přenosu energie se určí:

$$E = K.h_1 - H_2.V \quad (1)$$

kde K je konstanta (< 1), která zahrnuje ztráty a V je rychlost proudění plazmy (m³ /s). Z toho vyplývá vztah pro energii potřebnou na řezání / dělení materiálu:

$$E = c. t. v. \rho. L \quad (2)$$

kde c je šířka řezné spáry, t je tloušťka materiálu, v je rychlost řezání, ρ je hustota materiálu (kg/m³), L je celková energie potřebná pro proces řezání na natavení jednotkového množství materiálu (J/kg¹).[1]

4.1 Parametry ovlivňující proces řezání plazmou

U plazmového pálení se slučuje větší počet skutečností a jevů, které generují chyby. Vznikají na straně pálicího stroje a také na straně plazmové technologie. Při práci celku se sčítají, a tím určují i přesnost celého zařízení. Jako každá technologie má i plazmové dělení svá omezení a „vrozené“ nedostatky. Na druhé straně ale přináší mnohé zcela mimořádné vlastnosti, kterých lze využít ke zkvalitnění produkce a ke značnému zrychlení přípravy výroby i výroby samotné. Plazmová technologie výrazně snižuje náklady na dělení kovů ve výrobní fázi a je mnohdy zcela nezastupitelnou.

Při řezání plazmou je kvalita povrchu řezu určena zejména charakteristikou plazmy. Základním faktorem je dosažená koncentrace energie v 1 mm^3 sloupce plazmy. Exaktně nepřesné, ale v praxi zcela dostatečné je hodnocení průměru plazmy ve svazku v závislosti na výkonu v kW. Průměr plazmy je proměnný s použitým řezným proudem a průměrem trysky. Jakost povrchu řezu závisí především na symetrii svazku a klesá s blížícím se koncem životnosti spotřebních dílů. Jestliže nesymetrie svazku je při použití nových dílů maximálně 0,05 mm, ke konci životnosti je až 0,3 mm – to způsobuje zhoršenou kvalitu povrchu řezu.

Použijeme-li jako médium ke zplazmování vzduch, má svůj značný význam i jeho kvalita. Je zřejmé, že vlhkost vzduchu způsobuje zhoršení kvality řezu. Při použití jiných plynů lze kvalitu řezu značně zlepšit, ovšem pouze pro určité materiály. Kupříkladu pro řezání chromniklové oceli se vzhledem ke kvalitě jeví použití kyslíku jako média, ale při řezání žárupevné oceli jsou výsledky zcela katastrofální. Naopak velmi dobré výsledky v obou případech přináší dusík. S použitým plynem lze operovat i v závislosti na síle řezaného materiálu.

Faktorem přímo ovlivňujícím kvalitu řezu je také chvění pohonů a mechanická tuhost zavěšení hořáku. Důvodem je velmi tenký řezný svazek, který naprosto přesně kopíruje všechny záchvěvy pohonů a konstrukce přenesené na hořák.[3]

4.1.1 Průměr trysky

Kvalita řezu závisí na tepelné intenzitě, na dosažení co nejvyšší teploty je zapotřebí velmi

malý průměr trysky. Naopak velmi malé průměry trysek snižují jejich životnost (zvyšuje se sklon k opálení výstupního otvoru trysky). Používané průměry trysek jsou udávány v rozsahu 0,79 – 6,35 mm.

4.1.2 Zdroj výkonu pro oblouk

Užitečný výkon pro řezání plazmou je okolo 250 kW pro proudy v rozsahu 50 – 1000 A a napětí 100 – 250 V. Potřebný výkon se mění v závislosti na druhu a tloušťce řezaného materiálu.

4.1.3 Použité plazmové plyny

Plazmové plyny - argon, helium, dusík atd., ovlivňují svojí cenou náklady na proces. Podílí se především na kvalitě řezu, rychlosti řezání a životnosti trysek.

4.1.4 Vzdálenost mezi hořákem a materiálem

Kvalita řezné spáry se zlepšuje se snižováním vzdálenosti a zvyšováním teploty. Větší vzdálenost mezi zdrojem a materiálem zvyšuje nároky na výkon paprsku. Hořák vyžaduje přesné vedení výšky řezu nad materiálem. Každá úchylka od ideálního stavu vede ke změně charakteristik a k podřezávání. Ideální výška souvisí s řezným proudem a pohybuje se v rozmezí od 2,5 mm do 4,5 mm. Přesnost vedení nemá být horší než 15 % ideální výškové hodnoty. Každá nepřesnost vyvolává změnu napětí, a tím i změnu řezných výsledků. Banální a přitom opomíjený požadavek je i dokonale kolmé ustavení hořáku vzhledem k materiálu. Konstantní výšku zajišťuje systém, který pohybuje hořákem ve svislé ose na základě údajů pocházejících ze zařízení pro kontrolu řezné výšky. Způsobů kontroly je více, ale nejčastěji je využíván jev změny napětí na hořáku v nelineární závislosti výšky hořáku nad materiálem. Jde o metodu poměrně přesnou, ale má některé nedostatky, a proto je často kombinována s jinými snímacími systémy.

4.1.5 Řezná rychlost

Pro plazmový stroj je ideální stále stejná rychlost řezu. Tento požadavek ale není možno dodržet z důvodu dynamického namáhání konstrukce pálicího stroje. Proto se problémy tvarové přesnosti dotýkají zejména pálicího stroje. Při řezné rychlosti přesahující 4 m/min přináší změna pohybu o 90° tíhové zpomalení přesahující hodnotu 20 g. Je zřejmé, že

možnosti konstrukce nedovolují ekonomickou výrobu takového zařízení, a proto vznikají při náhlých přechodech tvarů zákmity způsobené tímto tíhovým zpomalením. Tyto nepřesnosti jsou značně redukovány plynulou změnou řezné rychlosti těsně před dosažením bodu změny pohybu. Tím ale není dodržen základní předpoklad konstantní rychlosti posuvu hořáku pro kvalitní řez. V rohu nebo i při malém poloměru tedy vznikne vada. Faktem je, že moderní pálicí stroje mají vysokou tuhost konstrukce a výkonné pohony snižující tyto vady na minimum. Jednou z možných cest je regulace řezného proudu v závislosti na tvaru výpalku a momentální poloze hořáku. Další specifickou skupinou potíží jsou nedostatky programování, zaokrouhlením při matematickém výpočtu dráhy, vektorováním tvarů apod.[5]

4.1.6 Podřezávání

Z hlediska plazmy jsou nepřekonatelným problémem jevy vyplývající ze samé podstaty média. Plazma je totiž nesmírně neustáleným a nevypočitatelným skupenstvím hmoty. Přesto je jí pro účely dělení kovů využíváno se značnou spolehlivostí. Potíž vzniká především ve směřování paprsku a zajištění dočasné stability. Základem je připojení řezaného materiálu na + pól(kladný) a elementární využití směru toku. Směřování samotného paprsku v plazmatickém skupenství začíná v bodě elektrody, na kterou je přiveden – pól (záporný). Tento bod je zhotoven ze vzácného kovu a do tělesa ze speciální slitiny mědi je nalisován. Mimořádný význam má perfektní souosost všech částí hořáku, které se podílejí na přenosu energie a aerodynamické přípravě média ke zplazmování. To je bod, kdy vstupují na scénu dva zcela protichůdné požadavky:

-Jedním je rychlost otáčení plazmového plynu. Čím je vyšší vzhledem k rychlosti pohybu plazmy, tím větší má plazma stabilitu v podélné ose.

-Druhým požadavkem je co nejmenší ztráta homogenity svazku vzhledem ke vzdálenosti od trysky. Odstředivá síla působící na otáčející se svazek plazmy způsobuje rozpínání svazku a stoupá spolu s hmotností svazku a s jeho otáčkami.

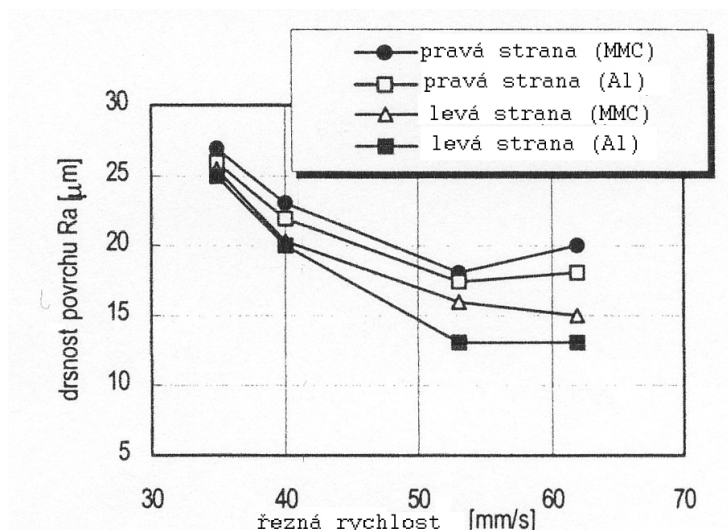
Je zřejmé, že jde o protichůdné požadavky, které musí být předmětem optimalizace tak, aby si plazma ponechala maximální výhody jednoho i druhého aspektu. Každopádně však

platí, že čím je svazek tenčí, tím má menší hmotnost, a tím i menší tendenci k odstředování. Největší problém je koncentrovat do svazku o co nejmenším průměru energii potřebnou k odpaření potřebného objemu kovu.[3]

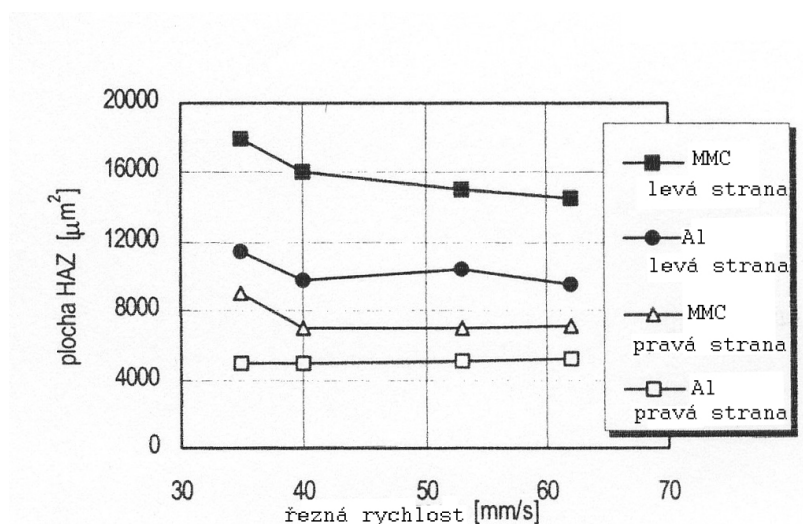
4.1.7 Tvarová přesnost

Díky již zmiňované tendenci plazmové technologie podřezávat, vznikají při vypalování otvorů o malém průměru vady, kdy bývá otvor stažen a na spodní straně má menší průměr. Pokud se rozdělené kusy používají pro svařování, je to naopak výhodou (plazmové řezání se používá např. pro zkosení hran materiálů před svařováním při výrobě kolejových podvozků pro vagóny). Stejně potíže vznikají u malých poloměrů. Jedním z problematických míst je pravoúhlý přechod z roviny X do roviny Y. Náhlá změna poměrů, zákmit vedení hořáku a snížení rychlosti vede ke zhoršení jakosti řezu v takovém místě. Stejně tak bod zapálení a bod ukončení řezání přináší kvalitativní potíže. Při zapálení dochází k natavení materiálu, které je větší nežli následující řezná spára. To se většinou řeší programem, který počíná řez mimo finální produkt a taktéž i ukončení je mimo. Určitému přimknutí oblouku ale v mnoha případech není možno zabránit. Možným řešením je zdrojem řízený úsek náběhu a poklesu proudu, které přináší zlepšení tohoto problému.

Zajímavostí při plazmovém řezání je skutečnost, že tvar hran po řezání je odlišný na pravé a levé straně. Pravá strana má obvykle menší sklon, asi 3° . Levá strana dosahuje někdy sklonu až 15° . Tento jev je způsobený vířivým pohybem plynu ve směru hodinových ručiček. Natavený materiál je z místa řezu odváděn plynem s vysokou průtokovou rychlostí, což má za následek tvoření čistého hladkého povrchu na levé straně řezu. Pod touto hladkou povrchovou vrstvou se nachází tepelně ovlivněná oblast (HAZ), jejíž tloušťka se udává v rozsahu 0,25 – 1,25 mm. Výrazné chlazení oblasti řezu má vliv na tvoření a šíření jemných trhlin za tepelně ovlivněnou oblastí, často až do hloubky 1,6 mm.



Obr. 11. Závislost dosahované drsnosti povrchu na levé a pravé straně děleného materiálu na rychlosti řezání. Kompozitový materiál MMC (Metal Matrix Composite) i Al slitina patří za těžkoobrobitelné materiály.



Obr. 12. Tepelně ovlivněná plocha na pravé a levé části rozřezaného materiálu v závislosti na změně řezné rychlosti

4.1.8 Volba řezací metody

V oboru plazmového řezání tenkých plechů ze stavebních ocelí je možno docílit při použití jemného plazmového paprsku s čistým kyslíkem řezné plochy, jejichž tolerance z hlediska pravouhlosti, kolmosti a drsnosti vyhovují předpisům laserové normy. S ohledem na tento další technologický vývoj byly v posledních dvou letech přednostně diskutovány otázky výběru způsobu tepelného dělení z hlediska materiálového, kvalitativního a ekonomického. Otázky řezivosti materiálu a působení řezných plynů na materiál na řezných hranách hrály v publikacích jen podřadnou roli.

Při výběru vhodné řezací metody je třeba zohlednit, aby požadovaná kvalita byla dosažena s minimálními náklady. Kvalita řezu se zatím posuzovala pro jednotlivé druhy tepelného řezání odděleně podle různých norem. V současné době je v závěru zpracování norma EN ISO 9013, která umožní jednoznačné posuzování bez ohledu na proces a na materiál.

4.2 Obrábění paprskem plazmy

Jak už bylo řečeno, plazma jako nástroj pro zpracování materiálů nachází v současné době široké využití v oblasti svařování, řezání materiálů, nanášení povlaků na bázi keramiky. Z pohledu obrábění je využití plazmového paprsku velmi malé. Kategorie plazmového obrábění zahrnuje:

- řezání materiálů a vyřezávání profilů do desek a plechů různé přípustné tloušťky
- tvoření mělkých drážek do hloubky asi 2 mm
- soustružení plazmovým paprskem

Technologie řezání je nejvíc rozšířená a je vhodná pro elektricky vodivé materiály jako jsou mosaz, bronz, nikl, wolfram, hliník, molybden, titan, hořčík, měď, korozi-vzdorné oceli, litiny, monel, inconel, uhlíkové oceli a jiné. Proces dělení se využívá pro různé operace, jako je řezání a vyřezávání profilů různých tvarů, tvoření mělkých drážek, ražení, děrování, tepelné vrtání, srážení hran.

4.3 Soustružení plazmovým paprskem

Soustružení pomocí plazmového paprsku je vhodné pro všechny druhy kovových materiálů. Hospodárné využití představuje při obrábění těžkoobrobitelných materiálů jako jsou žáruvzdorné oceli, tvrzené korozivzdorné oceli, oceli typu Inconel a Hastelloy. Plazmové soustružení je proces hrubování, po kterém musí následovat dokončování povrchů. Hloubka odebírané vrstvy je ovlivnitelná výkonem plazmového hořáku nebo rychlostí rotace obrobku.

Mezi výhody plazmového opracování patří až desetkrát rychlejší úběr při hrubování těžkoobrobitelných materiálů v porovnání s klasickým soustružením nástroji ze slinutých karbidů. Opracování není omezené mechanickými vlastnostmi materiálů (tvrdost, houževnatost) a není potřebné zajistit vysoce spolehlivé upínání rotujícího obrobku, protože na obrobek nepůsobí řezná síla a deformace vlivem mechanického zatížení.

K nevýhodám metody patří metalurgické změny v povrchové vrstvě, zpevnění povrchu do výrazné hloubky (udává se až 0,7 mm). Profil vytvořeného povrchu závisí na rychlosti posuvu paprsku a může být tvořený výraznými stopami po plazmovém paprsku nebo vysoce hladký. Hladký povrch se dosáhne při použití chlazení okolí řezu. Oxidaci povrchové vrstvy je možno eliminovat používáním vhodné ochranné atmosféry. Celková hloubka ovlivněné vrstvy může být až do 1,20 mm v závislosti na druhu materiálu. Uplatnění se nachází hlavně pro hřídele z tvrzených materiálů, při hloubení drážek kladek a pro soustružení velkých obrobků jako jsou válce pro válcovací stolice.[1]

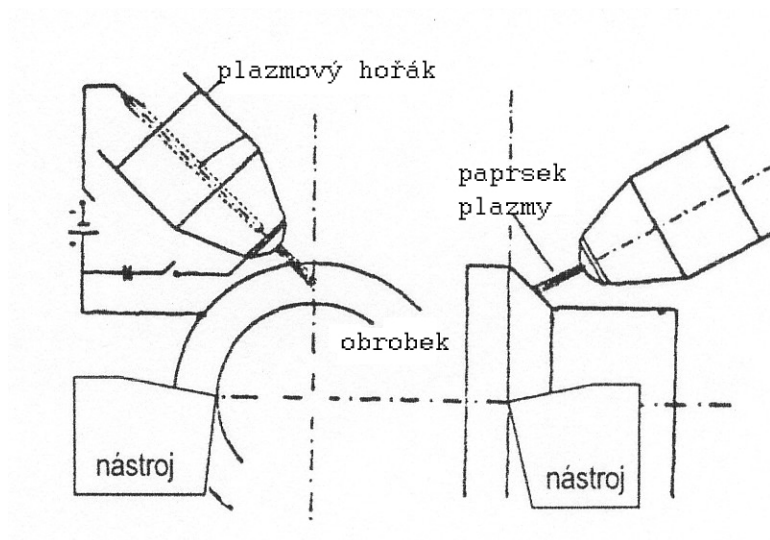
Plazmový paprsek se pro obrábění používá ve dvou základních modifikacích:

- jako přídavný nástroj a zdroj lokálního ohřevu povrchu obrobku pro zlepšení obrobitelnosti materiálu a lámání třísky
- jako samostatný nástroj pro úběr materiálu

4.3.1 Plazmový paprsek jako přídavný nástroj

Plazmový paprsek se v tomto případě používá jako nástroj na podporu řezného procesu,

na zvýšení účinnosti řezného procesu a hlavně na ulehčení řezání těžko obrobitelných materiálů jako jsou manganové austenitické oceli, žárupevné oceli a slitiny (přímý ohřev kořenu třísky v oblasti primární plastické deformace). Ohřev pomocí plazmového paprsku je dobře regulovatelný a nastavitelný do oblasti před řeznou hranu nástroje a tím je omezený vliv tepla na případné strukturální změny v povrchu obrobku. Lokální teplo působí pouze na tvarování třísky.



Obr. 13. Soustružení přídavným ohřevem. Lokální ohřev zabezpečuje plazmový paprsek. Jako řezný nástroj se používají keramické řezné destičky.

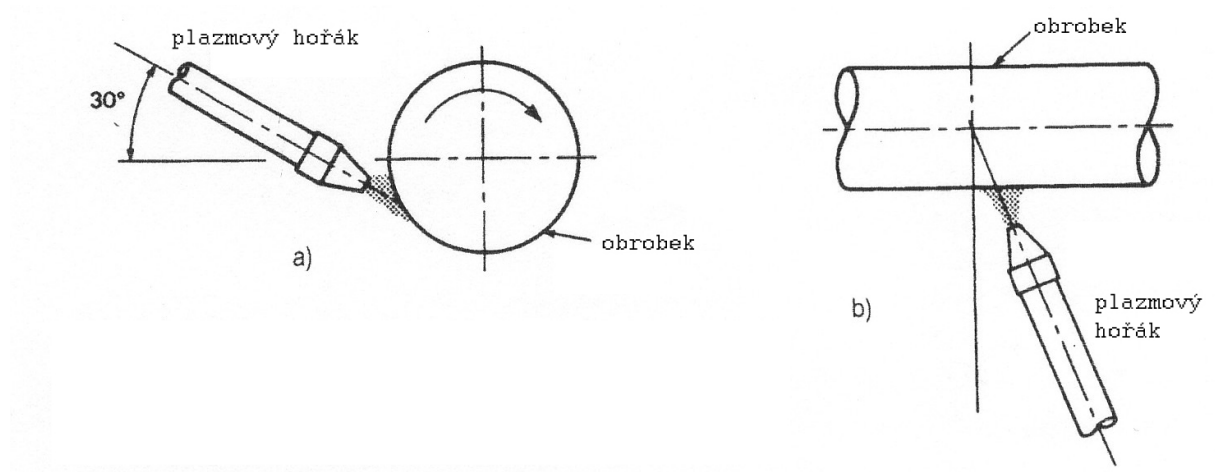
Mezi základní přínosy tohoto způsobu obrábění patří zvýšení trvanlivosti nástroje (udává se až 400 %) a zvýšení rychlosti úběru materiálu až o 60 %. Jako nástroje se používají destičky z řezné keramiky na bázi oxidů hliníku.

Mezi nevýhody této metody se řadí vznik dlouhé plynulé třísky, která je nevhodná z hlediska bezpečnosti práce a možnosti automatizace procesu řezání.

4.3.2 Plazmový paprsek jako nástroj

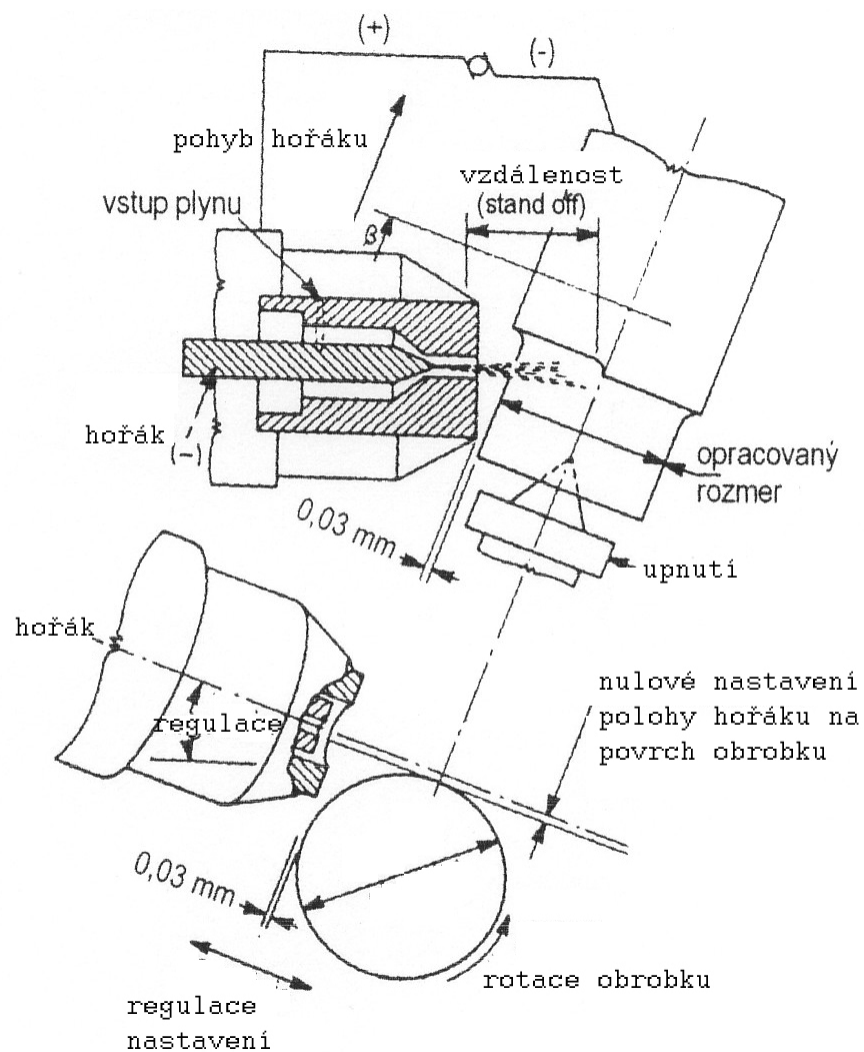
Jedná se o soustružení plazmovým paprskem bez přítomnosti klasického nástroje. V tomto případě se plazmový paprsek používá pro obrábění (úběr materiálu) rotačních ploch. Plazmový paprsek spolu s rotujícím obrobkem simulují klasické soustružení. Při rotačním

pohybu obrobku se plazmový hořák posouvá paralelně s osou obrobku (rychlost posuvu 5 mm).



Obr. 14. a) bokorys b) nárys vzájemné polohy rotační plochy a nástroje – plazmového hořáku při soustružení pomocí plazmového paprsku

Plazmový paprsek dopadá na povrch v tangenciálním směru a ubírá povrchovou vrstvu materiálu. Obrobek vykonává rotační pohyb jako při klasickém soustružení (asi 2 m/min). Vzájemná poloha obrobku a hořáku musí být nastavena tak, aby natavený materiál mohl být odváděn ze zóny řezu, aniž by ovlivňoval opracovávaný povrch.



Obr. 15. Přesnost nastavení a vymezení vzájemné polohy hořáku a rotační plochy obrobku

4.4 Přídavná zařízení pro plazmové řezací stroje

Moderní plazmové pálicí stroje mohou být vybaveny speciálním supportem, který umožní užití dalších pomocných technologických zařízení přímo v procesu pálení. Jako druhá technologie může být použit vrtací či frézovací vřeteník, značkovací nebo popisovací zařízení nebo nastavovací či měřicí sonda. Použití druhé technologické hlavice vyžaduje konstrukční úpravy suportu hořáku, které musí zajistit výměnu hořáku za hlavici ve velmi krátkém čase, a to výškovým přesazením a současnou korekcí polohy. Tyto hlavice musí být obvykle osazeny samostatným čidlem, které umožní rychlé najetí hlavice až ke skutečnému povrchu plechu. Řídící systém stroje musí umožnit ovládat potřebné funkce druhé technologie (řídit velikost posuvu, provádět vrtací cykly, generovat znaky pro popisování, řídit vyhledávací a skenovací pohyby apod.).[2]

4.4.1 Vrtací vřeteník

Může mít řadu funkcí. Především umožňuje navrtávat otvory pro usnadnění propalu, dále umožňuje vrtat malé otvory, které nelze v uspokojivé kvalitě vypálit, a neposlední řadě slouží k naznačení (navrtání) otvorů pro další vrtací či jiné technologie. Používají se vřeteníky o výkonu do 500W s jedním až dvěma tisíci otáček pro upnutí vrtáků do 10mm.

4.4.2 Navrtávání propalovaných otvorů

Používá se v tlustších materiálech (nad 15 mm), kdy je propal již poměrně problematický nebo dokonce nemožný. Zvyšuje se tím značně životnost komponentů hořáku a snižuje se riziko zničení hořáku rozstříkujícím materiálem při obtížném propalu. Vlastní propal je pak podstatně kratší, ale celková doba je delší, neboť čas potřebný pro navrtání otvoru je poměrně dlouhý. Snížení rizika zničení hořáku je ale tak výrazné, že prodloužení technologické doby díky vrtání je přesto velmi ekonomické. Průměr navrtání stačí několik milimetrů, obvykle 4 – 6mm (teoreticky by stačil otvor i menšího průměru, ale vrtání je pak značně náročnější – vrták se často zlomí), hloubka vrtání pak postačí asi do dvou třetin tloušťky plechu. Vrtání „skrz“ není většinou potřebné, dokonce může negativně ovlivnit životnost vrtáku.

4.4.3 Vrtání malých otvorů

Další aplikace vrtacího vřeteníku. Obvykle mají průměr menší než je tloušťka materiálu,

kdy je kvalita otvoru po propálení velmi špatná (nevyhoví většinou ani požadavku na poměrně velké tolerance otvorů pro průchozí šrouby). Přídavné vrtací vřeteníky ale obvykle nedisponují automatickou výměnou nástrojů. Proto bývá problematické vyhovět požadavkům výkresu součásti. Otvory je nutno vrtat jediným průměrem vrtáku. Přesto i to je značná technologická úspora, neboť při následném obrábění polotovaru na vrtačce již není nutné pracné narýsování ani předvrtávání otvorů. Otvory, které je nutno vrtat menším průměrem, se pouze upraví převrtáním na potřebný průměr. Někdy se pro zkrácení technologických časů používá pouze malé navrtání otvorů krátkým vrtákem či středícím vrtákem a vlastní vrtání se ponechá na výkonný vrtací stroj. Často se tímto způsobem označují důležitá místa výpalku pro orientaci při dalších operacích, například místa pro ohyby, polohy dalších svařovaných dílů, případně se vytvoří orientační body pro usazení v přípravku.

4.4.4 Značkovací přípravek

Umožňuje označit výpalky zvoleným kódem. Principy značkovacích přípravků jsou jednak mechanické, plazmové, laserové nebo tryskací s barvou. **Mechanické značkovače (důlčíkovače)** umístěné na pomocném suportu lze s výhodou využít pro značení tlustých plechů (od tloušťky asi 5 mm). Jejich nevýhodou je značná hlučnost, poněkud nižší rychlost a nevratné poškození povrchu, výhodou nízká cena, malá prostorová náročnost a vysoká odolnost v náročném prostředí pálicího stroje. **Plazmové značkovače** mohou teoreticky využívat vlastní pálicí agregát. Omezuje to nároky na další přídavná zařízení, avšak snížit výkon na úroveň vhodnou pro značkování a zajistit přitom dobrou životnost hořáku je velmi obtížné, a proto je prakticky vždy nutné použít další speciální plazmový agregát pouze pro značkování. Ten je pak umístěn na samostatném výměnném suportu.

Tryskací značkovací zařízení jsou výhodná pro svou značnou rychlost, dobrou čitelnost, nenarušují vlastní pálený materiál, značení je dobře odstranitelné. Nevýhodou je poměrně složité zařízení s vysokou cenou, které vyžaduje vlastní elektronické zařízení, které musí komunikovat s řídicím systémem stroje, a poměrně malá odolnost proti prachu, chvění stroje, teplotě a mechanickému poškození.

4.4.5 Najížděcí či nastavovací sondy a digitalizační sondy

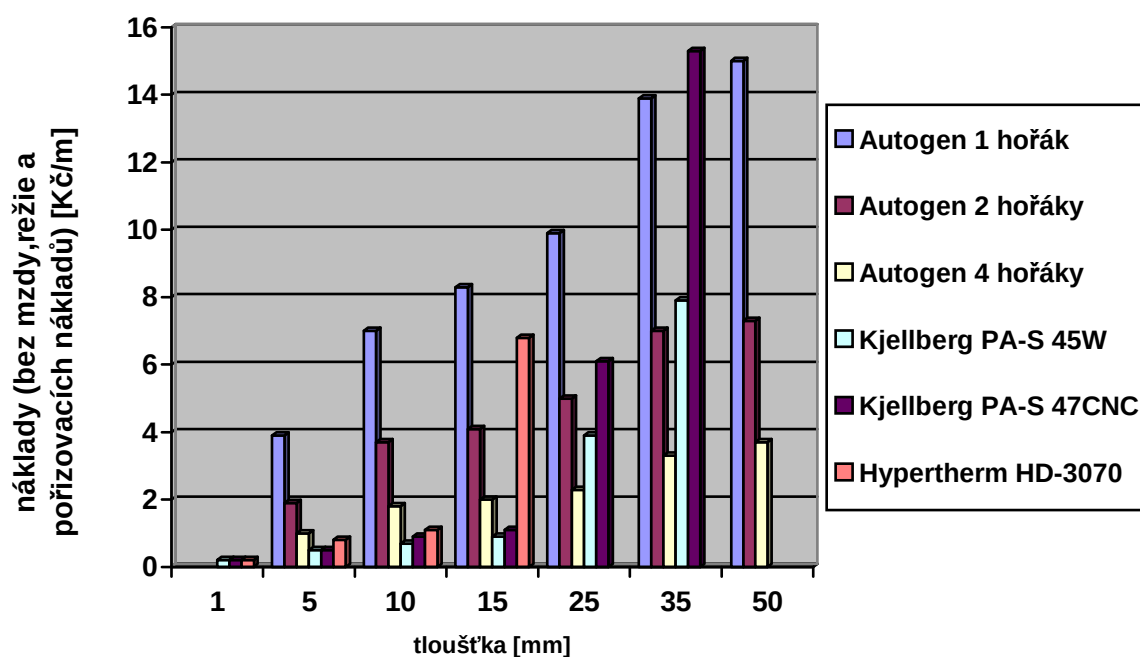
Pro nastavení polohy hořáku na kraj plechu nebo k přípravku se používá buď optického najíždění na světelný bod, který vysílá zdroj umístěný na hlavici, nebo dotyková sonda

(s elektrickým nebo mechanickým dotykem). Ta může v automatickém cyklu nejen vyhledat roh, ale i zjistit polohu hrany plechu a provést potřebné natočení pálicí sestavy dle skutečné polohy. Další aplikací sondy je digitalizace obvodu v případě, že není znám geometrický tvar modelu či výpalku. Řídící systém stroje (nebo připojený počítač) pak ze změřených dat vytvoří pálicí program.

Rozsáhlé příslušenství zvýší technologickou flexibilitu (zařízení na kolečkách, výbava pro vyřezávání kruhových tvarů, pojezdové zařízení, distanční držáky, buben pro odvíjení dlouhého přívodu hořáku, vyměnitelná tryska atd.)

5 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ DĚLENÍ MATERIÁLU

Plazmové řezání je alternativou dělení materiálů plamenem. Patří mezi procesy využívající tepelnou energii na úběr materiálu. Z uvedených důvodů se při hodnocení procesu srovnávají jeho přednosti a nevýhody s procesem laserového a autogenního dělení materiálů.



Obr. 16. Porovnání nákladů dělení plazmou a plamenem

Mezi výhody plazmového řezání v porovnání s řezáním plamenem a laserem patří lepší kvalita řezu při řezání silných materiálů (v porovnání s plamenem), rychlejší řezání než při řezání plamenem, pro řezání tenkých plechů je levnější než laser.

Naopak mezi hlavní nevýhody patří vyšší náklady než při řezání plamenem a méně kvalitní hrany v porovnání s laserem.

Tab. 4. Porovnání předností a nevýhod jednotlivých způsobů dělení materiálu

Všeobecné přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení		
Proces	Výhody	Nevýhody
Autogenní (vhodné jen pro konstrukční ocel)	Pro střední a větší tloušťku materiálu Hospodárné použití několika hořáků Malé investiční a provozní náklady Fasenschneiden s až 3 hořáky v jedné soupravě	Špatné řezání pod 5 mm Materiálové zakřivení v dolním rozmezí plechu; nutné rovnání Vysoký přívod tepla, velká tepelně ovlivněná oblast Malá rozměrová stálost u opakujících se řezů následkem vlivu tepla Malá řezná rychlost
Plazma	Provoz jednoho a více hořáků podle série Řezání všech elektricky vodivých materiálů Bez alternativy při řezání vysokolegované oceli a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce Vynikající schopnost u slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30 mm) Řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem Vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než autogenní) Libovolné zpracování kvalitního řezu u středních a silných rozměrů plechů s technologií vířivého plynu ve spojení s technickými plyny Velmi dobrá automatizace Řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště	Omezení použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou Poněkud širší řezná spára

Laser	Vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálu Řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, ostroúhlých tvarů; výroba komplexních obrysových dílů Pravoúhlá řezná hrana Velmi dobrá automatizace Velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu Velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm) Vysoká řezná rychlost u tenkých materiálů	Vysoké investiční a provozní náklady (vysoká spotřeba plynů) Omezení tloušťky materiálu: Konstrukční ocel: 20- (25) mm Vysokolegovaná ocel: 15 mm Hliník: 10 mm U středně tlustých materiálů žádná přímá hladká řezná plocha Nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku Omezení stability paprsku u řezání konstrukční oceli s normálním Si a P obsahem Snížení stability procesu u řezání lesknoucích se povrchů materiálu Menší účinnost (CO₂-laser max. 10%)
Vodní paprsek	Řezání od kovových, nekovových a kompozitních materiálů; velkých materiálů a tloušťek Žádné metalurgické změny na řezné ploše; žádný přívod tepla Úzká řezná spára, vertikální řezání, vysoká rozměrová stálost obráběných předmětů, vynikající kvality řezu Dobrá Automatizace průběhu řezání Podle druhu také provoz s více řezacími hlavami Propojení vzduchové mezery	Vysoké investiční a provozní náklady (ve srovnání s plazmou: provozní náklady 1:5 až 1:20 podle materiálu a tloušťky) Relativně malá řezná rychlost u "tvrdých" materiálů Hlučný a mokvý způsob řezání Nemožnost použití pro ruční řezání a jen omezeně v 3-D rozměrech

Plazma stejně jako ostatní tepelné procesy dělení materiálů (laser, plamen) výrazně

ovlivňuje pracovní prostředí. Natavený a odpařovaný materiál produkuje škodlivé výpary nebezpečných a rizikových látek ve formě jemně rozptýlených částic nebo plynů. Kvalita pracovního ovzduší je posuzována podle maximální přípustné koncentrace škodlivin v ovzduší MAK (něm. Maximale Arbeitsplatzkonzentration, angl. Maximum workplace concentration) a technicky přípustnou koncentrací TRK (něm. Technische Richtkonzentration, angl. Technical recommendation concentration), které tyto pravidla používají.

Tab. 5. Nejdůležitější přípustné koncentrace podle MAK / TRK.[1]

Škodlivá látka	Účinek	Proces/druh materiálu	Přípustná hodnota
částice oxidů kovů			
oxidy hliníku	dráždí plíce	plazma,lazer pro Al slitiny	6 mg/m ³
oxidy železa	dráždí plíce	plazma,lazer pro oceli	6 mg/m ³
oxidy zirkonu	toxický	povlakované materiály	5 mg/m ³
oxidy kadmia	karcinogenní	povlakované materiály	0,015 mg/m ³
ohrom (4-mocný)	karcinogenní	vysocelegované oceli	0,05 mg/m ³
oxid niklu	karcinogenní	vysocelegované oceli	0,5 mg/m ³
vznikající plyny			
CO	toxický	kyslíkový plamen	33 mg/m ³
CO ₂	toxický	kyslíkový plamen	9000 mg/m ³
ozon	toxický	plazma	0,2 mg/m ³
NO	toxický	plazma,lazer,plamen	30 mg/m ³
NO ₂	toxický	plazma,lazer,plamen	9 mg/m ³
fosgen	toxický	řezání plastů PVC	0,4 mg/m ³

Tab. 6. Porovnání možnosti využití jednotlivých způsobů

Srovnání postupů: Autogenní - Laser - Vodní paprsek - Plazma

**Možnosti využití způsobu dělení při hodnocení
kvality, produktivity a hospodárnosti
(1 = nejlepší způsob, 4 = nevhodný způsob)**

Požadavek	Tolerance	Autogenní	Laser	Vodní paprsek	Plazma
Konstrukční ocel < 5 mm	do $\pm 0,5$ mm	3	2	4	1
Konstrukční ocel < 5 mm	do $\pm 0,1$ mm	ne	1	2	2
Konstrukční ocel 5 - 20 mm	do $\pm 0,5$ mm	2	3	4	1
Konstrukční ocel 5 - 15 mm	do $\pm 0,2$ mm	2	1	3	1
Konstrukční ocel 15 - 25 mm	do $\pm 0,5$ mm	2	3	3	1
Konstrukční ocel 25 - 45 mm		1	ne	3	1 (O ₂)
Konstrukční ocel > 45 mm		1	ne	2	2
Vysocelegované oceli		ne	ano	ano	ano
Hliník		ne	(ano)	ano	ano
Umělé hmoty		ne	ano	ano	ne

6 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

V teoretické části mé bakalářské práce jsem se zabýval všeobecnou problematikou nej-používanějších metod dělení materiálů. Zaměřil jsem se na obecné seznámení čtenáře s progresivními způsoby obrábění a porovnání výhod a nevýhod jednotlivých způsobů dělení materiálů. Hlavní pozornost jsem pochopitelně věnoval problematice plazmového páprsku a jeho použití pro dělení a obrábění materiálů, aby pro budoucího čtenáře bylo snadnější pochopit základní princip funkce plazmového řezacího stroje.

V praktické části se budu věnovat návrhu konstrukce plazmového řezacího stroje pro maximální velikost zpracovávaných plechových polotovarů 2000 x 4000mm, tloušťka 20 mm.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 VOLBA KOMPONENTŮ

Prvním úkolem praktické části bylo dle požadavků zadavatele zpracovat blokové schéma zařízení s uvedením základních parametrů jednotlivých komponentů.

Bylo zapotřebí vybrat součásti z nabídek jednotlivých výrobců a dodavatelů a ve většině případů výrobce kontaktovat a zjistit potřebné údaje pro vypracování nejen blokového schéma, ale i celkové výkresové dokumentace a hrubé cenové kalkulace, jak stanoví zadání práce.

7.1 Plazmové zařízení

Součásti pro plazmové řezání jsem se rozhodl vybrat z nabídky firmy Kjellberg, která patří mezi špičku v oboru svařování a dělení materiálů plazmovým paprskem. Tradice firmy Kjellberg sahá až do roku 1908, kdy Švéd Oscar Kjellberg získal říšský patent č. 231 733 "Obalovaná elektroda" a tím položil základy pro rozvoj svařování elektrickým obloukem.[7]

7.1.1 HiFocus 80i

Zcela moderní, plně elektronický zdroj proudu s mikroprocesorovým řízením, založený na osvědčené primárně taktované Soft-Switch invertorové technice, zaručuje zdroj HiFocus 80i zatěžovatel 100% v rozsahu výkonu do 80 A. Společně s plazmovým hořákem PerCut 80 zajišťují v širokém rozsahu bezotřepový kvalitní řez podobný laseru, s velmi nepatrnou tolerancí kolmosti a nejvyšší hladkost povrchu.

7.1.2 Kjellberg Percut 80

Výkonová rezerva plazmového hořáku PerCut 80, pro kyslík jako plazmový plyn, zajišťuje dlouhou životnost trysky a katody (s až 1200 zápaly při toleranci kolmosti pod 3°), a tím velmi malé náklady na spotřební díly a minimální vedlejší časy pro jejich výměnu. Technickým předpokladem pro vysokou produktivitu procesu plazmového řezání je optimalizace funkčních částí systému vytváření plazmového paprsku, ve spolupráci s mikroprocesorovým řízením průběhů.

7.1.3 Kjellberg PGE 3 – HM

Jednotka nastavení plazmových plynů (viz. P1)

7.1.4 Kjellberg PBA – H80

Jednotka připojení plazmového hořáku (viz. P1). Pro návrh portálu bylo zapotřebí zjistit základní rozměry PBA – H80. Konkrétně rozměry a možnosti připojení k lineárnímu vedení a výšku pro návrh celkové výšky portálu. Dále bylo nutné zjistit hmotnost pro odhad přibližné hmotnosti portálu → volba pohonů.

7.1.5 Prodlužovací paket

Jako výkonový celek nabízí společnost Kjellberg konfiguraci zařízení se spojovacím mezi-paketem s délkou až 15m, která zajišťuje použití pro CNC pálicí stroje do velikosti stolu 2,5 x 6 m a vysokou flexibilitu pro rozmanité podmínky nasazení v robotice.

Tab. 7. Základní parametry plazmového zdroje Kjellberg HiFocus – 80i

připoj. napětí (V)	3x 400 (50 Hz)
pojistka, pomalá (A)	25
příkon (kVA)	17
krytí	IP 22
napětí naprázdno (V)	400(DC)
řezací proud (A)	10 ... 80
zatěžovatel (%ED)	80A/100 %ED
tloušťka řezu - dělicí řez mm	25
- kvalitní řez mm	20
plazmový plyn	kyslík, vzduch
sekundární plyn	kyslík, dusík, vzduch
chlazení	Kjellfrost
zapalování	vysokonapěťové
hmotnost (kg)	161
rozměry skříně d/s/v (mm)	970 x 510 x 970

7.2 Pracovní odsávací stůl

Pracovní odsávací stůl je základní prvek odsávacího systému pálicích strojů pro uložení materiálu a současné odsávání škodlivých látek, při dodržení hygienických předpisů a zákona o životním prostředí.

Zvolil jsem jeden z produktů tábořské společnosti TAMOZ, odsávací stůl EKON 210/2 (viz. P2). Stůl je konstrukčně dělen na montážní a skladebné moduly a zároveň rozdělen na několik odsávacích sekcí, jejichž velikost je zvolena s přihlédnutím na dosažení minimálního nutného odsávaného množství při zachování vysoké účinnosti vzhledem k hygienickým a jiným předpisům v závislosti na použité metodě termického dělení. Odsávací sekce jsou otevírány prostřednictvím mostu pálicího stroje vždy v závislosti na poloze hořáku. Proud zplodin je schytáván v optimální výšce stolu a odváděn systémem otvorů a kanálků do hlavního sběrného kanálu a odtud potrubním rozvodem k odsávacímu zařízení.

Odsávací zařízení je třeba volit s ohledem na možnosti a potřeby každé jednotlivé dílny, proto jsem nevybíral žádné.

7.3 Lineární vedení

Pro konstrukci plazmového stroje jsou zapotřebí alespoň tři lineární vedení. Dvě na rámu pro vedení portálu a jedno na portálu pro vedení plazmové řezací hlavy. Zvolil jsem lineární vedení ALUROL (viz. P3) od společnosti T.E.A. Technik.

7.3.1 Vedení portálu

Pro vedení portálu jsem zvolil lineární vedení Alurol AD 210M LAT, což je lineární vedení poháněné ozubeným řemenem s nosnou deskou na straně vedení (snadnější uchycení k rámu). Na doporučení výrobce bude mít vedení na jedné straně rámu vodící rolny a na druhé straně budou podpůrné rolny. Tímto lze z části vyrovnat montážní tolerance a odchylky v rovnoběžnosti.

Vedení č. 1:

AD 210M LAT : L = 4300mm

Vodící kolejnice D10 L = 4300mm

1 nosná deska M 210A

2 vodící rolny C210

2 vodící rolny E210

Vedení č. 2:

AD 210M LAT : L = 4300mm

Vodící kolejnice D10 L = 4300mm

1 nosná deska M 210A

2 podpůrné rolny CC210

2 podpůrné rolny EC210

7.3.2 Vedení plazmové řezací hlavy

Pro vedení plazmové řezací hlavy jsem také zvolil lineární vedení AD 210M LAT, pouze jiné délky a vybavené jen vodícími rolnami.

Vedení č. 3:

AD 210M LAT : L = 2600mm

Vodící kolejnice D10 L = 2600mm

1 nosná deska M 210A

2 vodící rolny C210

2 vodící rolny E210

7.4 Pohony

Pro pohon portálu jsem se rozhodl použít pouze jeden motor (u vedení s vodícími rolnami) s hnací hřídelí propojenou k vedení na druhé straně portálu. Toto řešení značně usnadňuje celé řešení pohonu, protože odpadá náročnost seřízení stejnoměrného chodu obou vedení. Také to znamená nezanedbatelné snížení celkových nákladů na výrobu plazmového řezacího stroje.

Pohony jsem vybíral z nabídky společnosti SEW – Eurodrive. Rozhodl jsem se zkontaktovat zástupce této společnosti a na základě rad a doporučení jsem použil kuželočelní převodovku s synchronním servomotorem, včetně frekvenčního měniče a dalšího nutného příslušenství (viz. P4).

7.5 Pružné spojky

Pružné spojky je nutné použít k vymezení případných nesouosostí hnacích hřídelí. Použil jsem pružné spojky Giflex GF – 14 (viz. P6)

7.6 Gumové ustavovací prvky

Ustavovací prvky jsou nezbytné pro tlumení vibrací stroje a pro vymezení případných nerovností v podlaze. Použil jsem výrobky společnosti TST Servis, patky Alta/model 2 (viz. P5).

7.7 Konstrukční materiál

Pro celkovou konstrukci rámu a portálu jsem volil běžné konstrukční polotovary společnosti FERONA :

Jäkl 100x100x4

Jäkl 150x100x5

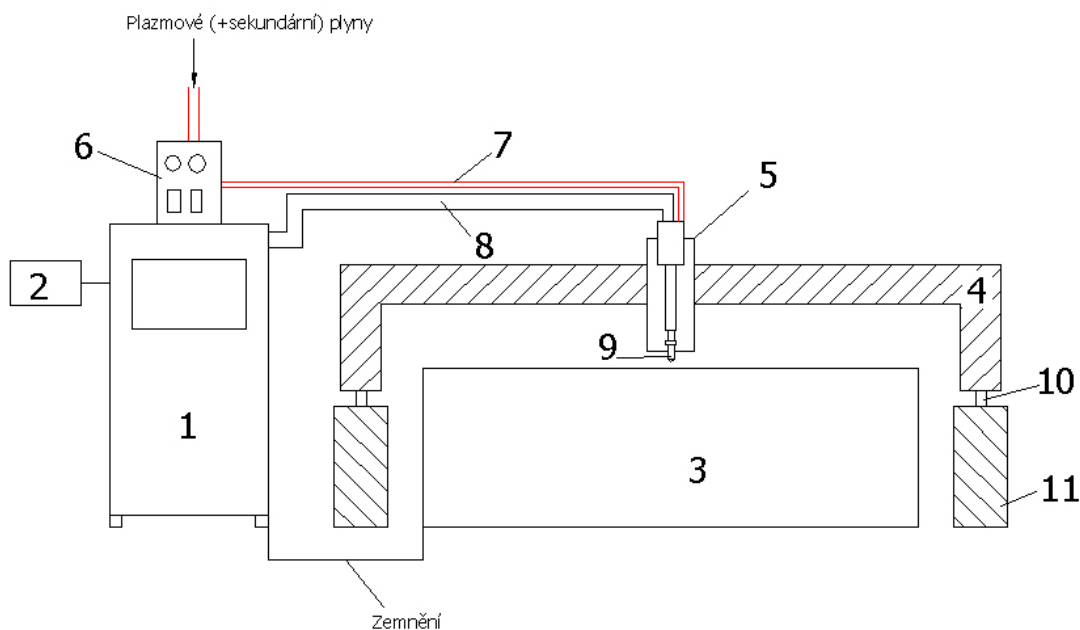
Jäkl 140x100x5

7.8 Spojovací materiál

Používal jsem běžné normalizované šrouby, podložky a matice (viz. P7). Normalizovaný není pouze kolík určený pro přesnou montáž rámu (viz. P8).

8 BLOKOVÉ SCHÉMA

Na základě prostudované literatury a výše uvedených komponentů jsem navrhl následující blokové schéma a dále návrh konstrukce plazmového řezacího stroje, jenž je součástí přílohy.



Obr. 17. Blokové schéma plazmového řezacího stroje

- 1) Plazmové řezací zařízení – např. Kjellberg HiFocus 80i
(10 – 80A, 450 – 5000 mm/min)
- 2) CNC řídící centrum
- 3) Pracovní odsávací stůl – např. Tamoz Ekon 210/2
- 4) Portál
- 5) Jednotka připojení plazmového hořáku – např. Kjellberg PBA – H80
- 6) Jednotka nastavení plazmových plynů – např. Kjellberg PGE 3 – HM
- 7) Plynové hadice
- 8) Prodlužovací paket
- 9) Hořák – např. Kjellberg Percut 80
- 10) Lineární vedení – např. T.E.A. Technik - AD 210M LAT
- 11) Rám

9 HRUBÁ KALKULACE VÝROBNÍCH NÁKLADŮ

Posledním úkolem praktické části je spočítat hrubou kalkulaci výrobních nákladů pro sériovost 10 ks/rok. Z důvodů časové náročnosti výroby navrženého zařízení není v současné době možno provést přesnou kalkulaci výrobních nákladů, bude se tedy jednat jen o stanovení přibližné ceny zařízení. Zařízení ještě nebude vybaveno řídicím centrem, elektroinstalacemi a dalšími součástmi, které přísluší jiným oborům studia.

Rovněž nebyla dořešena problematika povrchové úpravy, toto téma jsem nechal otevřené pro požadavky zákazníka.

9.1 Náklady na materiál

U všech uzavřených profilů jsem počítal s cenou 18 Kč/kg, u pásových polotovarů 16 Kč/kg, u tyče na hřídel 30 Kč/kg a u plechů 16 Kč/kg.

9.1.1 Náklady na materiál bočnic

Na bočnice jsou použity tyto materiály: Jäkl 150 x 100 x 5, Jäkl 100 x 100 x 4 (Viz. P9)

Jäkl 150 x 100 x 5 $L = 4500 \text{ mm}$

$$m = 18,334 \text{ kg/m}$$

$$\text{polotovar Jäkl } 150 \times 100 \times 5 \quad L = 12 \text{ m}$$

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 20 ks bočnic $\rightarrow 20 \cdot 4500 = 90\,000 \text{ mm}$

$$90\,000 / 12\,000 = 7,5 \rightarrow 8 \text{ ks polotovarů}$$

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 12 \cdot 8 \cdot 18,334 = 1760,064 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 1760,064 \cdot 18 = 31\,681,152 \text{ Kč}$$

Jäkl 100 x 100 x 4 $L = 475 \text{ mm}$

$$m = 11,374 \text{ kg/m}$$

$$\text{polotovar Jäkl } 100 \times 100 \times 4 \quad L = 6 \text{ m}$$

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 20 ks bočnic $\rightarrow 20 \cdot 475 = 47\,500 \text{ mm}$

$$47\,500 / 6000 = 7,91 \rightarrow 8 \text{ ks polotovarů}$$

Hmotnost polotovaru = $6.8.11,374 = 545,952 \text{ kg}$

Cena polotovaru = $545,952.18 = 9827,136 \text{ Kč}$

9.1.2 Náklady na materiál portálu

Na portál jsou použity tyto materiály: Jäkl 100 x 100 x 4 (Viz. P10)

Jäkl 100x100x4 L = 2834 mm

$$m = 11,374 \text{ kg/m}$$

$$\text{polotovar Jäkl } 100 \times 100 \times 4 \quad L = 6 \text{ m}$$

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 10 ks portálů $\rightarrow 10.2834 = 28\,340 \text{ mm}$

$$28\,340/6\,000 = 4,72 \rightarrow 5 \text{ ks polotovarů}$$

Hmotnost polotovaru = $6.5.11,374 = 341,22 \text{ kg}$

Cena polotovaru = $341,22.18 = 6141,96 \text{ Kč}$

Jäkl 100 x 100 x 4 L = 440 mm

$$m = 11,374 \text{ kg/m}$$

$$\text{polotovar Jäkl } 100 \times 100 \times 4 \quad L = 6 \text{ m}$$

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 10 ks portálů $\rightarrow 10.2.440 = 8800 \text{ mm}$

$$8800/6000 = 1,47 \rightarrow 2 \text{ ks polotovarů}$$

Hmotnost polotovaru = $6.2.11,374 = 136,488 \text{ kg}$

Cena polotovaru = $136,488.18 = 2456,784 \text{ Kč}$

9.1.3 Náklady na materiál vzpěr

Na vzpěry jsou použity tyto materiály: Jäkl 140 x 100 x 5, pásovina 100 x 5, (Viz. P11 a P12)

Jäkl 140 x 100 x 5 L = 2230 mm a L = 2240 mm

$$m = 17,549 \text{ kg/m}$$

polotovar Jäkl 140 x 100 x 5 L = 12 m

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 40 ks vzpěr $\rightarrow 40 \cdot 2230 = 89\,200 \text{ mm}$

$$89\,200 / 12\,000 = 7,43 \rightarrow 8 \text{ ks polotovarů}$$

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 12 \cdot 8 \cdot 17,549 = 1684,704 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 1684,704 \cdot 18 = 30\,324,672 \text{ Kč}$$

Pásovina 100 x 5 L = 230 mm

$$m = 3,925 \text{ kg/m}$$

polotovar pásová ocel 100 x 5 L = 6 m

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 20 ks vzpěr¹ $\rightarrow 20 \cdot 2 \cdot 230 = 9200 \text{ mm}$

$$9200 / 6000 = 1,53 \rightarrow 2 \text{ ks polotovarů}$$

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 6 \cdot 2 \cdot 3,925 = 47,1 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 47,1 \cdot 16 = 753,6 \text{ Kč}$$

Pásovina 100 x 10 L = 140 mm

$$m = 7,85 \text{ kg/m}$$

polotovar pásová ocel 100 x 10 L = 6 m

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 20 ks vzpěr² $\rightarrow 20 \cdot 2 \cdot 140 = 5600 \text{ mm}$

$$5600 / 6000 = 0,933 \rightarrow 1 \text{ ks polotovaru}$$

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 6 \cdot 1 \cdot 7,85 = 47,1 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 47,1 \cdot 16 = 753,6 \text{ Kč}$$

9.1.4 Náklady na materiál krytu

Na kryt jsou použity tyto materiály: plech tl.2 (Viz P 13)

Plech 330 x 2420 x 2

$$m^2 = 16 \text{ kg}$$

polotovar plech 1250 x 2500 x 2 $\rightarrow$ 1 tabule = 3 kryty

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 10 ks krytů $\rightarrow$ 4 tabule

$$\text{Plocha polotovaru} = 1,25 \cdot 2,5 \cdot 4 = 12,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 12,5 \cdot 16 = 200 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ Kč}$$

9.1.5 Náklady na materiál hřídele

Na hřídel jsou použity tyto materiály: kruhová tyč průměr 14 mm (Viz. P14)

Průměr 14 L = 2360 mm

Polotovar průměr 14h11 L = 3 m

$$m = 1,208 \text{ kg/m}$$

Na výrobu 10 ks zařízení je potřeba 10 ks hřídelí $\rightarrow$ 10 polotovarů

$$\text{Hmotnost polotovaru} = 10 \cdot 3 \cdot 1,208 = 36,24 \text{ kg}$$

$$\text{Cena polotovaru} = 36,24 \cdot 30 = 1087,2 \text{ Kč}$$

9.1.6 Celkové náklady na materiál

$$\text{Celková hmotnost Jáklů} = 1760,064 + 545,952 + 341,22 + 136,488 + 164,704 = 2948,43 \text{ kg}$$

$$\text{Celková hmotnost plechů a pásovin} = 47,1 + 47,1 + 200 = 294,2 \text{ kg}$$

$$\text{Celková hmotnost tyčí} = 36,24 \text{ kg}$$

$$\text{Celková hmotnost všech polotovarů} = \underline{3278,87 \text{ kg}}$$

$$\text{Celková cena Jäklů} = 31\,681,152 + 9827,136 + 6141,96 + 2456,784 + 30\,324,672 =$$

$$= 80\,521,704 \text{ Kč}$$

$$\text{Celková cena plechů a pásovin} = 753,6 + 753,6 + 3200 = 4707,2 \text{ Kč}$$

$$\text{Celková cena tyčí} = 1087,2 \text{ Kč}$$

$$\text{Celková cena všech polotovarů} = \underline{86\,316,104 \text{ Kč}}$$

9.2 Náklady na pracnost

Náklady na pracnost jsem počítal 70 Kč/kg a 300 Kč/hod.

$$\text{Náklady na pracnost pro Jäkly} = 2948,43 \cdot (70-18) = 153\,318,36 \text{ Kč}$$

$$\text{Náklady na pracnost pro plechy a pásoviny} = 294,2 \cdot (70-16) = 15\,886,8 \text{ Kč}$$

$$\text{Náklady na pracnost pro tyče} = 36,24 \cdot (70-30) = 1449,6 \text{ Kč}$$

$$\text{Náklady na celkovou pracnost} = \underline{170\,654,76 \text{ Kč}}$$

$$\text{Časová náročnost} = 170\,654,76/300 = \underline{568,85 \text{ hod}}$$

9.3 Náklady na montáž

Cena montáže byla odhadnuta na 500 Kč/hod a časová náročnost montáže byla odhadnuta na 16 hodin práce dvou dělníků → 32 hodin.

$$\text{Cena montáže} = 32 \cdot 500 = 16\,000 \text{ Kč}$$

$$\text{Cena montáže deseti kusů} = \underline{160\,000 \text{ Kč}}$$

9.4 Náklady na spojovací materiál

Šroub M6x12	12 ks	$0,30 \times 12 = 3,6 \text{ Kč}$
Šroub M8x18	28 ks	$0,70 \times 28 = 19,6 \text{ Kč}$
Šroub M10x110	8 ks	$3,50 \times 8 = 28 \text{ Kč}$
Šroub M12x30	16 ks	$4 \times 16 = 64 \text{ Kč}$
Šroub M12x120	32 ks	$10 \times 32 = 320 \text{ Kč}$
Matice M8	28 ks	$0,50 \times 28 = 14 \text{ Kč}$
Matice M12	16 ks	$1 \times 16 = 16 \text{ Kč}$

Matice M16	20 ks	$2 \times 20 = 40$ Kč
Podložka 6	12 ks	$0,20 \times 12 = 2,4$ Kč
Podložka 8	28 ks	$0,30 \times 28 = 8,4$ Kč
Podložka 10	8 ks	$0,30 \times 8 = 2,4$ Kč
Podložka 12	48 ks	$0,50 \times 48 = 24$ Kč
Pero 5h9x5h9x16	3 ks	$1,5 \times 3 = 4,5$ Kč

Celkové náklady na spojovací materiál pro výrobu jednoho stroje jsou 546,9 Kč.

Celkové náklady na spojovací materiál pro výrobu deseti strojů jsou 5 469 Kč.

9.5 Náklady na nakupované součásti

Pružné spojky Giflex GF – 14 – $2 \times 396 = 792$ Kč

Pracovní odsávací stůl EKON 210/2 – 242 444 Kč

Jednotka připojení plazmového hořáku PBA – H80 – 1460 € → cca 41 220 Kč

Jednotka nastavení plazmových plynů PGE 3 – HM – 3220 € → cca 90 920 Kč

Plazmový zdroj HiFocus 80i – 13 620 € → cca 384 560 Kč

Hořák Percut 80 – 2950 € → cca 83 300 Kč

Lineární vedení Alurol AD 210M LAT – 33 543 Kč

Kuželočelní převodovka s synchronním servomotorem (Viz. P4) – 2×1308 € = 2616 € →
→ cca 73 870 Kč

Frekvenční měnič MOVIDRIVE – 879 € → cca 24 820 Kč

Brzdový odpor BW 100-003 – 31 € → cca 875 Kč

Rozšiřující karta pro čidlo DER 11B – 139 € → cca 3925 Kč

Patka Alta/model 2 – $10 \times 457 = 4570$ Kč

Celkové náklady na nakupované součásti pro jeden vyrobený stroj činí asi 984 839 Kč.

Celkové náklady na nakupované součásti pro deset vyrobených strojů činí asi 9 848 390 Kč.

9.6 Celkové náklady

Celkové náklady = celkové náklady na materiál + náklady na pracnost + náklady na montáž
+ náklady na spojovací materiál + náklady na nakupované součásti

$$\begin{aligned}\text{Celkové náklady} &= 86\,316,104 + 170\,654,76 + 160\,000 + 5\,469 + 9\,848\,390 \\ &= \underline{\underline{10\,271\,000 \text{ Kč}}}\end{aligned}$$

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vypracovat blokové schéma plazmového řezacího stroje a rovněž provést předběžný návrh konstrukce tohoto zařízení včetně zpracování hrubé kalkulace výrobních nákladů pro sériovost výroby 10 ks / rok.

Podle požadavků uvedených v zadání jsem vypracoval rešerši s důrazem na hlavní znaky technologie plazmového řezání, součástí literární studie je rovněž srovnání jednotlivých metod progresivních technologií. Na základě těchto poznatků jsem provedl návrh plazmového řezacího stroje. Jedná se o předběžný návrh, který musí projít schvalovacím řízením. Dokumentace není zcela kompletní, stroji prozatím chybí jakékoliv řídicí centrum, kompletní elektroinstalace a další důležité součásti, tato problematika však nespádala do náplně mé práce.

Výstupem cenové kalkulace, která byla zpracována pro sériovost 10 ks / rok, a která zahrnuje náklady na materiál, náklady na pracnost, náklady na montáž, náklady na spojovací materiál a náklady na nakupované součásti je výsledná částka rovna hodnotě = 10 271 000 Kč.

Z důvodů co nejjednoduššího návrhu zařízení byly konstrukčně složitější součásti voleny z nabídek jiných strojírenských společností. Domnívám se, že vlastní vývoj těchto prvků, ať už převodovek či lineárních vedení, by se na celkových nákladech na výrobu projevoval pouze negativně, proto jsem se rozhodl pro navrženou variantu. Je na posouzení odborníků, zdali se potvrdí moje předpoklady jako oprávněné.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Maňková, I. *Progresívne technológie*. Vienaľa Košice, 2000.
- [2] *DSSM-dělení, spojování a svařování materiálů*. 2000-, Vydával Image Interier Praha, s.r.o..2000-, č.10-, 6x ročně. ISSN 1214-7990
- [3] *MM Průmyslové spektrum*. 2002-, Vydává Industria Press, s.r.o.. 2002-, č.10-, 12x ročně. ISSN 1212-2572
- [4] *Spektrum*. 2004-, Vydává ESAB Vamberk, s.r.o., marketing. 2004-, č.1-, 4x ročně
- [5] *Svět svaru*. 2003-, Vydává Hadyna – International, spol. s r.o., č.11-, 4x ročně
- [6] <http://www.vanad.cz>
- [7] <http://www.kjellberg.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AJM		Technologie abrazivního paprsku
AWJ		Obrábění abrazivním paprskem
CM		Elektrochemické obrábění
CNC		Počítačově řízený stroj
E	J/kg ¹	Intenzita přenosu energie
EBM		Obrábění elektronovým paprskem
ECM		Elektrochemické obrábění
EDM		Elektroerozivní obrábění.
HAZ	mm	Tepelně ovlivněná oblast
IBM		Technologie iontového paprsku
LBM		Technologie laserového paprsku
MAK	mg/m ³	Maximální přípustná koncentrace škodlivin v ovzduší
NC		Číslicově řízený stroj
PAM		Obrábění plazmovým paprskem (Plasma Arc Machining)
PBM		Opracování plazmou (Plasma Beam Machining)
TRK	mg/m ³	Technicky přípustná koncentrace škodlivin v ovzduší
USM		Ultrazvukové obrábění
WJM		Obrábění vodním paprskem

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Hlavní typy výrobních procesů.....	12
Obr. 2. Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění.....	14
Obr. 3. Základní konfigurace hořáku pro plazmový oblouk.....	22
Obr. 4. Transferovaný plazmový oblouk.....	23
Obr. 5. Netransferovaný oblouk.....	24
Obr. 6. a)Plazmový oblouk b)Plazmový paprsek.....	24
Obr. 7. Chlazení hořáků.....	25
Obr. 8. Systém plazmového hořáku se vstřikováním vody.....	26
Obr. 9. a)Plazmový hořák se vstřikováním vody b)Plazmové řezání pod vodou.....	27
Obr. 10. Systém plazmového řezání se stlačeným vzduchem.....	28
Obr. 11. Závislost dosahovaného povrchu na levé a pravé straně děleného materiálu na rychlosti řezání.....	34
Obr. 12. Tepelně ovlivnitelná plocha na pravé a levé straně děleného materiálu v závislosti na změně řezné rychlosti.....	34
Obr. 13. Soustružení přídatným ohřevem.....	37
Obr. 14. a)Bokorys b)Nárys vzájemné polohy rotační plochy a nástroje – plazmového hořáku při soustružení pomocí plazmového paprsku.....	38
Obr. 15. Přesnost nastavení a vymezení vzájemné polohy hořáku a rotační plochy obrobku.....	39
Obr. 16. Porovnání nákladů dělení plazmou a plamenem.....	43
Obr. 17. Blokové schéma plazmového řezacího stroje.....	55

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Znázornění principu technologie a stručná charakteristika.....	17
Tab. 2. Použité plazmové plyny podle druhu řezaného materiálu.....	23
Tab. 3. Porovnání provozních charakteristik jednotlivých systémů plazmového řezání.....	28
Tab. 4. Porovnání předností a nevýhod jednotlivých způsobů dělení materiálů.....	44
Tab. 5. Nejdůležitější přípustné koncentrace škodlivin podle MAK/TRK.....	46
Tab. 6. Porovnání možností využití jednotlivých způsobů dělení materiálů.....	47
Tab. 7. Základní parametry plazmového zdroje Kjellberg HiFocus – 80i.....	25

SEZNAM PŘÍLOH

- P 1 : Základní parametry a rozměry produktů společnosti Kjellberg
- P 2 : Základní parametry odsávacího stolu EKON 210/2
- P 3 : Základní parametry lineárního vedení AD 210M LAT
- P 4 : Základní parametry pohonů SEW - Eurodrive
- P 5 : Základní rozměry ustavovacích patek Alta/model 2
- P 6 : Nabídkový list pružných spojek Giflex
- P 7 : Výkres číslo 1: Sestava
- P 8 : Výkres číslo 2: Kolík
- P 9 : Výkres číslo 3: Bočnice
- P 10 : Výkres číslo 4: Portál
- P 11 : Výkres číslo 5: Vzpěra 1
- P 12 : Výkres číslo 6: Vzpěra 2
- P 13 : Výkres číslo 7: Kryt
- P 14 : Výkres číslo 8: Hřídel
- P 15 : Výkres číslo 9: Vzpěra 3