

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ KYSLÍKOVÉHO A PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ

COMPARISON OF OXY AND PLASMA CUTTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUBOŠ SOLAŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2009

Zadání

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Předmětem této diplomové práce je porovnání plazmového a kyslíko-acetylenového řezání. V práci je zahrnuta literární studie dané problematiky. Pro technologicko-ekonomické hodnocení byla navržena vzorová součást, aby bylo možné posoudit optimálnost řezného procesu. V závěru práce byly uvedeny dosažené výsledky a jejich srovnání.

Klíčová slova

Plazma, kyslíko-acetylenový plamen, dělení materiálu, rychlost řezání.

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on comparison of plasma and oxygen - acetylene cutting. A literature review of this issue is included in the work. For technological - economic evaluation, there were proposed a sample part to assess how optimal the cutting process is. Observed result and there comparison are stated in conclusion.

Key words

Plasma, oxygene - acetylene flame, parting of material, cutting speed.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOLAŘ, L. *Porovnání technologií kyslíkového a plazmového řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s.57, příloh 10. Vedoucí práce: Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Porovnání technologií kyslíkového a plazmového řezání** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 25.5.2009

.....
Bc. Luboš Solar

Poděkování

Děkuji tímto Doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	9
1 LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ PLAZMOU.....	10
1.1 Úvod do plazmové technologie.....	10
1.1.1 Stručná historie plazmy	10
1.1.2 Princip řezání plazmou.....	10
1.1.3 Fyzikální princip plazmy	10
1.2 Řezání plazmou	11
1.2.1 Plynová plazma	11
1.2.2 Dusíková plazma.....	11
1.2.3 HD plazma.....	12
1.3 Konstrukce plazmového zařízení	13
1.3.1 Konstrukce plazmového hořáku	13
1.3.2 Konstrukce plazmových řezaček	15
1.4 Používané plyny	16
1.5 Volba optimálních parametrů řezání.....	17
1.6 Řezání plazmou- jednotlivé fáze	18
1.6.1 Předfuk.....	18
1.6.2 Pilotní oblouk.....	18
1.6.3 Startování	18
1.6.4 Řezací oblouk	19
1.6.5 Dofuk	19
1.7 Použití	19
2 LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM.....	20
2.1 Stručná historie plamenového dělení	20
2.2 Princip řezání kyslíkem	20
2.3 Podmínky řezatelnosti kovových materiálů.....	21
2.4 Materiály vhodné pro řezání kyslíkem	22
2.5 Plyny pro řezání.....	22
2.6 Parametry řezání.....	24
2.6.1 Základní parametry	24
2.6.2 Doprovodné parametry.....	26
2.7 Tepelně ovlivněná oblast.....	26
2.8 Tvar řezné mezery	26
2.9 Způsob řezání, řezací zařízení	27
2.9.1 Ruční způsob řezání.....	27
2.9.2 Strojní způsob řezání.....	28
3 SHRUTÍ LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM A PLAZMOU.....	29
4 BEZPEČNOST A OCHRANA ZDRAVÍ PŘI PRÁCI	30
4.1 BOZP při řezání plazmou	30
4.2 BOZP při řezání kyslíkem.....	30
5 PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
5.1 Výběr materiálu	31

5.2 Návrh podmínek tepelného dělení	31
5.3 Zhotovení výpalku	32
5.3.1 Vygenerování programu pro plazmové řezání (program Vanad Meffi).....	32
5.3.2 Vygenerování programu pro kyslíkové řezání (ISO kód).....	33
6 TECHNOLOGICKÝ POSTUP výroby vzorků	34
6.1 Postup výroby	34
7 TECHNICKÉ HODNOCENÍ	35
7.1 Cíl	35
7.2 Podmínky měření [ISO].....	35
7.3 Technické hodnocení	35
7.3.1 Typ řezu	35
7.3.2 Šířka řezné spáry, l	35
7.3.3 Skluz, n	36
7.3.4 Úchylka uhlu, kolmosti, u	37
7.3.5 Průměrná výška profilu, Ra	38
7.3.6 Natažení horní hrany ,r.....	39
7.3.7 Drážkování	40
7.3.8 Měření úchylek přímosti	40
7.3.9 Měření rozměrových úchylek vzorků	41
7.3.10 Hodnocení okují a natažených kapek	44
7.3.11 Hodnocení metalografických výbrusů	45
8 Ekonomické HODNOCENÍ.....	47
8.1 Ekonomické porovnání nákladů na zhotovení výpalků.....	47
8.2 Struktura nákladů	49
8.3 Ekonomické porovnání nákladů na pořízení dělicího zařízení	49
8.3.1 Vanad PROXIMA pro plamenové řezání.....	50
8.3.2 Vanad PROXIMA pro plazmové řezání	51
8.4 Souhrn naměřených a vypočtených hodnot:	52
8.5 Značení stupňů jakosti na výkresech.....	52
Závěr	54
Seznam použitých zdrojů:	55
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	56
Seznam příloh	57

ÚVOD

Technologie tepelného dělení materiálu má již přes sto let svůj nezastupitelný význam ve strojírenském průmyslu. Dnes již plně nahrazuje méně produktivní mechanické způsoby dělení materiálu. V současné době jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu a přesnost výpalků, aby již nebylo zapotřebí dalšího dodatečného opracování, které vede k prodražování výroby, což se promítá do konečné ceny výrobků.

K nejčastěji využívaným metodám tepelného dělení patří metoda dělení kyslíko-acetylenovým plamenem, dělení laserovým paprskem, paprskem plazmy, svazkem elektronů apod. K výhodám těchto způsobů dělení patří mj. schopnost produktivně vyrábět i tvarově velmi složité výrobky vysokou řeznou rychlostí a je vhodná jak pro kusovou, tak sériovou výrobu.

Cílem tohoto diplomového projektu je porovnání dvou, v praxi běžně používaných technologií tepelného dělení materiálu. Bude provedeno hodnocení metod dělení vzduchovou plazmou a kyslíko-acetylenovým plamenem na zkušebních vzorcích z hlediska rozměrové a tvarové přesnosti. Dále budou provedeny metalografické výbrusy řezů jednotlivých vzorků pro měření tepelně ovlivněných oblastí. Obě technologie budou posouzeny z ekonomického hlediska.

1 LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ PLAZMOU

1.1 Úvod do plazmové technologie

1.1.1 Stručná historie plazmy

Fyzikální pojem plazma zavedl v roce 1932 L. Langmuir pro speciální stav plynů, někdy označován jako čtvrtý stav hmoty. Plazmové řezání bylo vyvinuto v 50-tých letech dvacátého století. Již v prvních letech průmyslového nasazení se plazma uplatnila pro řezání neželezných kovů a slitinových ocelí. Vyžadovalo to však drahé plazmové plyny (čistý dusík, vodík, argon nebo helium), výkonné zdroje (500A i více) a vodou chlazené trysky^{[1],[5]}.

Dnes, při zlepšení technologie i vlastností materiálů, se plazmové řezání stalo univerzálním pro širokou škálu kovových i nekovových materiálů.

V poslední době dramaticky roste uplatnění plazmy pro řezání na úkor řezání kyslíkem. A to především díky vysoké rychlosti řezání, schopnosti řezat neželezné kovy a malému tepelnému ovlivnění atd.

1.1.2 Princip řezání plazmou

Všechny metody tepelného dělení materiálu využívají soustředěné tepelné energie působící v místě řezu. Zdrojem tepla při plazmovém řezání je zúžený stabilizovaný elektrický oblouk. Plazmové řezání spočívá v lokálním ohřevu materiálu nad tavicí teplotu a odstraňování roztaveného materiálu pomocí ionizovaného plynu o vysoké teplotě v plazmovém hořáku. Od svařování plazmou se liší větší výstupní rychlostí plazmového proudu a větším množstvím přiváděného plynu do hořáku. Na materiál působí kombinace tepelného účinku a dynamického účinku plazmatu^[5].

1.1.3 Fyzikální princip plazmy

Ke vzniku plazmy je nutná ionizace plynu (mechanická nebo tepelná), při které dochází k vyrážení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů atomů. Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud. Ionizované jádro atomu – iont se zbývajících elektrony, má kladný náboj. Navenek se však plazma chová jako elektricky neutrální. Princip řezání plazmou je tedy založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem. U dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík) musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň ionizace je závislý na teplotě, úplná ionizace se dosahuje při teplotách kolem 100 000 K. V oblasti svařování a řezání jsou dosahovány teploty podstatně nižší, plazma je částečně ionizována a pro jednotlivé plyny jsou teploty disociace a ionizace v závislosti na entalpii uvedeny v grafu 1.1. Část plynu, která není ionizována a je chladnější, stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky^[1].

Disociace a ionizace dusíku:



kde: E_{dis} - potřebná energie na disociaci, E_{ion} - je ionizační energie

1.2 Řezání plazmou

Plazmové řezání využívá vysoké teploty a výstupní rychlosti plazmového paprsku. Při zvýšení průtoku a tlaku plazmového plynu se zvýší dynamický účinek vystupující plazmy a dochází k vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry. Při řezání jsou výstupní rychlosti plazmy vyšší a dosahují hodnoty kolem 1500 až 2300 m.s⁻¹. Vysoká teplota plazmového paprsku umožňuje řezat všechny kovové vodivé materiály bez ohledu na jejich řezatelnost kyslíkem^[5].

Rychlost řezání je závislá na výkonu zdroje, tloušťce a druhu řezaného materiálu a jeho fyzikálních vlastnostech. Maximální tloušťka materiálu, kterou lze řezat je cca 250 mm. V praxi je ale běžně řezaná tloušťka do 25 mm. Zdroje pro řezání mají vysoké napětí naprázdno, cca 250 až 350 V, při řezání dosahuje hodnota napětí mezi 110 až 150 V. Na začátku řezání je pomocí VF ionizátoru zapálen tzv. pilotní oblouk, který hoří mezi elektrodou a kovovou hubicí po dobu 6 až 10 vteřin. Pilotním obloukem se zajistí ionizace prostoru mezi elektrodou a řezaným materiálem a tím se vytvoří podmínky pro zapálení hlavního řezacího oblouku. Rychlost řezání tenkých plechů se pohybuje mezi 9 až 12 m.min⁻¹^[5].

Tab. 1.1 Používané plyny pro stabilizaci plazmy.

Typ plazmy	Rychlost řezání	Kvalita řezu
Vzduchová	Vysoká	Průměrná
Plynová	Nízká	Vysoká
Dusíková kombinovaná s vodou	Vysoká	Vysoká
Kyslíková	Vysoká	Vysoká

1.2.1 Plynová plazma

Plynová plazma stabilizovaná směsí Ar + H₂ a wolframová elektroda se používají především pro řezání vysoko legovaných ocelí, niklu, molybdenu, mědi a dalších kovů. Kombinací argonu a vodíku od 5 do 35% lze dosáhnout optimálních výsledků s ohledem na teplotu plazmatu, řeznou rychlost a kvalitu řezné plochy u většiny kovů. Někdy se místo vodíku používá dusík. U malých tloušťek materiálu je řezání plynovou plazmou několikanásobně rychlejší než u řezání kyslíkem a k vyrovnání rychlosti dochází v rozmezí tl. 20 až 35 mm^[5].

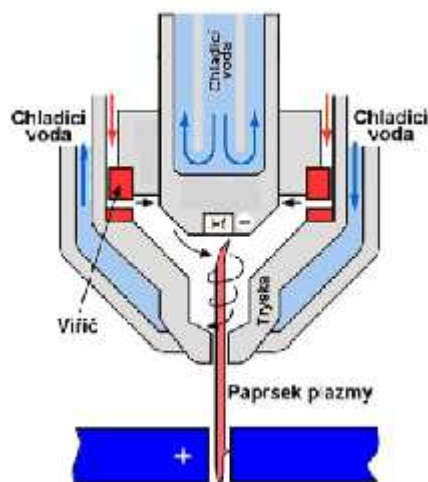
1.2.2 Dusíková plazma

Dusíková plazma kombinovaná s injekčním přívodem vody je určena především pro řezání velkých tloušťek vysokolegovaných ocelí. Konstrukčním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější vrstvy plazmy a dochází k

disociaci vody, čímž se dosahuje jejího zúžení a zvýšení teploty. Dusíková plazma kombinovaná s vodou zlepšuje kvalitu řezných ploch, jejich kolmost a zvyšuje řeznou rychlost. Řezání dusíkovou plazmou lze kombinovat s vodní sprchou, nebo se hořák po zapálení ponoří pod hladinu vody, která výrazně zvyšuje hygienu práce ^[5].

1.2.3 HD plazma

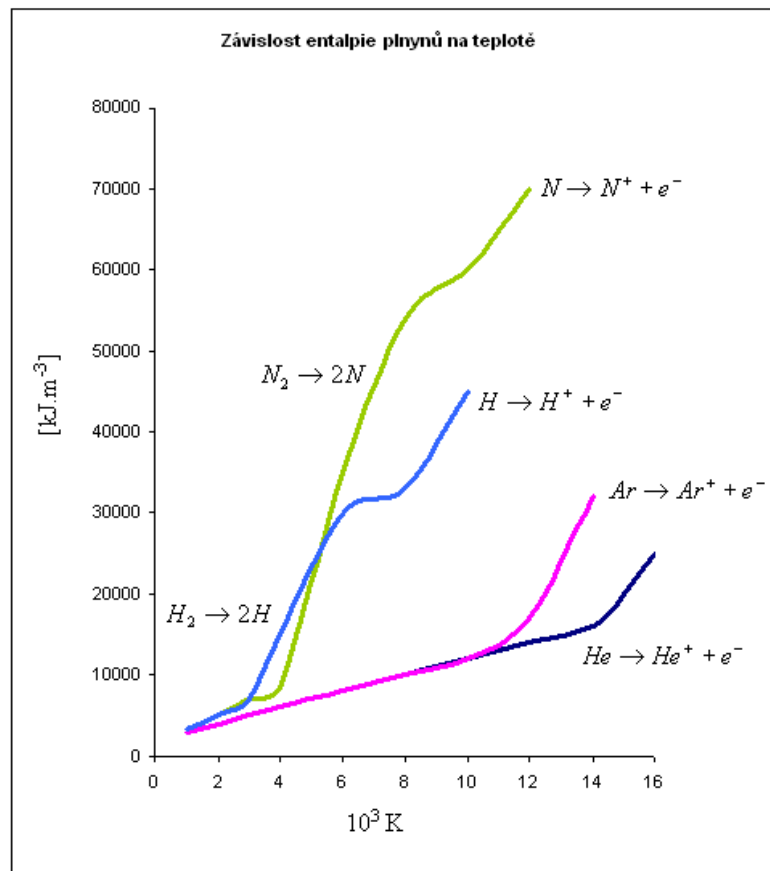
HD - Hy Definition plazma představuje poslední vývojový stupeň plazmového řezání. Celý název zní "High Tolerance Plasma Arc Cutting" a vlastní plazmový hořák patentovala firma Hypertherm. V principu se jedná o velmi intenzivní zúžení plazmového paprsku odvedením vnějšího chladnějšího obalu plazmy. Z hořáku vycházející plazmový paprsek má až trojnásobné zvýšení hustoty energie při současném zvýšení teploty a výstupní rychlosti. Výsledkem je zúžení řezné spáry na polovinu, zvýšení řezné rychlosti a dosažení kolmosti řezných ploch bez otřepu na spodní straně plechu. Při použití vysoce čistého kyslíku (99,95%) jako plazmového plynu, se dosáhne u nelegovaných ocelí kvality řezných ploch srovnatelných s řezáním laserem. Při řezání vysoko legovaných ocelí, hliníku a mědi se používá směs dusíku (99,999%) a kyslíku. HD plazma je velmi vhodná alternativa za řezání laserem s nižšími pořizovacími i provozními náklady ^[5].



Obr.1.1 Princip hořáku Hy Definition plazma^[6].

Tab.1.2 Průměrné teploty plazmy.

Průměrné teploty plazmy:	Teplota [K]
dusíková plazma do	9 000
vodíková plazma	10 000
argonová plazma	16 000
heliová plazma	20 000
plazma stabilizovaná vodou max.	35 000

Graf 1.1 Závislost entalpie plynů na teplotě, ^[1].

Běžná technická plazma se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- Současně s pružnými srážkami molekul (atomů) se v podstatné míře vyskytují i nepružné srážky, které vedou k disociaci a ionizaci plynu.
- Chemicky stejnorodý plyn se mění na směs atomů, iontů, elektronů, fotonů, atd.
- Směs částic v plazmě je kvazineutrální, tzn. počet kladných a záporných částic je přibližně stejný.
- Elektrická vodivost je závislá na pohyblivosti elektronů (100x vyšší než u iontů).
- Na plazmu silně působí elektrické a magnetické pole.

1.3 Konstrukce plazmového zařízení

1.3.1 Konstrukce plazmového hořáku

V plazmovém hořáku dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou energii usměrněného proudu plazmatu. Vlastní princip je odvozený od svařování metodou WIG, kde keramická hubice je nahrazena kovovou tryskou chlazenou vodou nebo plynem. Pro nastartování a zapálení pomocného oblouku se používá VF ionizátor připojený ke kovové trysce. Pomocný (pilotní) oblouk vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního oblouku i na relativně dlouhou vzdálenost. Závislé zapojení se používá především u svařování, navařování a řezání.

Plazmový hořák má zúženou výstupní trysku, která přispívá ke kontrakci plazmového paprsku. Kontrakce je také podporována fokusačním plynem přiváděným k plazmovému paprsku. Jako fokusační plyny se používají směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Dvouatomové plyny s vysokou spotřebou energie na disociaci a velkou tepelnou kapacitou odebírají teplo z vnějších vrstev plazmatu a vysokou tepelnou vodivostí vodíku je tento efekt ještě zesílen. Plazma se tím zužuje, protože musí přenést výkon odpovídající nastaveným hodnotám, zvýší se její teplota a tím i stupeň ionizace a následně elektrická vodivost. Ochlazení plazmy při kontaktu s materiálem vede k opačnému pochodu tzv. rekombinaci, kdy dochází ke slučování elektronů s ionty na atomy. Při rekombinaci se disociací a ionizací akumulované teplo uvolňuje a přenáší do materiálu. Účinnost přenosu tepla se pohybuje kolem 70-80%. Při ohřevu plynu obloukem se mnohonásobně zvyšuje jeho objem a tím výstupní rychlost plazmy dosahuje vysokých hodnot. Dynamická účinnost dopadající plazmy spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknutí paprsku v celém průřezu materiálu. Při svařování musí být dosažena rovnováha mezi tímto dynamickým účinkem a povrchovým napětím taveniny tak, aby nedošlo k vyfouknutí taveniny ze spáry. Výstupní rychlost plazmy při svařování a navařování se pohybuje mezi 200 až 500 m.s⁻¹ [1].

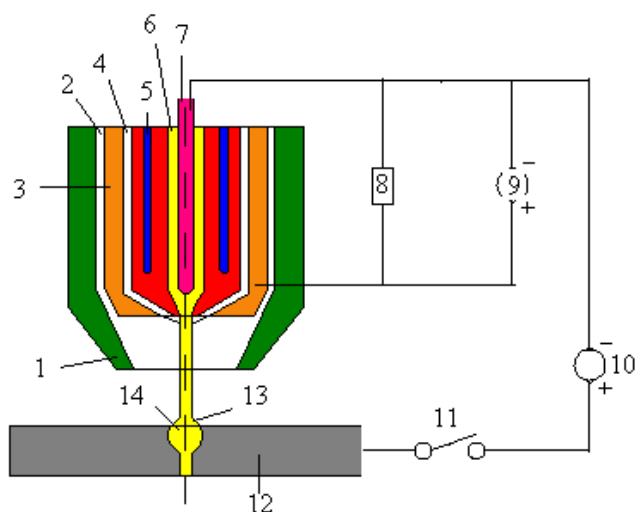
Důležitým parametrem plazmového hořáku je stabilizace elektrického oblouku. Podle druhu použitého stabilizačního média se plazmové hořáky dělí na plazmové hořáky s plynovou stabilizací a plazmové hořáky s vodní stabilizací.

1.3.1.1 Plazmový hořák s plynovou stabilizací může být v provedení:

- s transferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a obráběným materiálem. Používá se pro opracování elektricky vodivých materiálů, především pro řezání ocelí a neželezných kovů.
- s netransferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi vnitřní elektrodou umístěnou v hořáku a výstupní tryskou, která tvoří anodu. Používá se pro obrábění elektricky nevodivých materiálů (např. keramiky) a k nanášení povlaků.

Řezací tryska plazmového hořáku s vodní stabilizací má přídatné kanálky, kterými se přivádí voda do plazmového hořáku. Tyto hořáky se používají pro řezání ocelí a neželezných kovů a k nanášení povlaků. Výhodou je možnost řezat pod vodou, čímž se snižuje hluchost, prašnost a vliv UV záření na obsluhu.

Zapálení elektrického oblouku se u plynových hořáků provádí pomocí vysokofrekvenčního jiskrového výboje nebo mechanicky pomocí zapalovací jehly. Zdroj stejnosměrného elektrického proudu má výkon 0,5 až 250 kW.



1- hubice pro přívod ochranného plynu, 2- ochranný plyn, 3- tryska hořáku, 4- fokusační plyn, 5- vodní chlazení, 6- plazmový plyn, 7- wolframová elektroda, 8- vysokofrekvenční a vysokonapěťový ionizátor, 9- zdroj pomocného oblouku tzv. nezávislé zapojení, 10- zdroj hlavního elektrického oblouku, 11- spínač, 12- řezaný materiál, 13- plazmový paprsek, 14- natavený kov

Obr.1.2 Princip plazmového hořáku.



Obr. 1.3 Hořák při řezání.

1.3.2 Konstrukce plazmových řezaček

Technologické zařízení tvoří: ^[5]

- zdroj elektrického proudu;
- řídicí jednotka;
- plazmový hořák;
- manipulační souřadnicový pracovní stůl, manipulátor nebo robot.

Plazmové řezací stroje jsou zdroje s konstantním řezacím výkonem, které používají jako plazmový plyn v současné době nejčastěji stlačený vzduch nebo dusík. Jsou to zdroje stejnosměrného proudu (DC). Elektroda je záporný pól. Typická plazmová řezačka je vybavena standardně vzduchovým regulátorem, hrubým vzduchovým čističem, olejovým odlučovačem a tlakovým ventilem. Zdroje jsou konstruovány pro užití libovolné kvality vzduchu nebo dusíku. Plazmové řezačky mají vyšší napětí naprázdno i napětí na oblouku, než při plazmovém svařování. Typické je pro ruční řezání 240V napětí naprázdno a 115V při řezání. Z tohoto důvodu musí být konstrukce hořáku bezpečná ^[5].

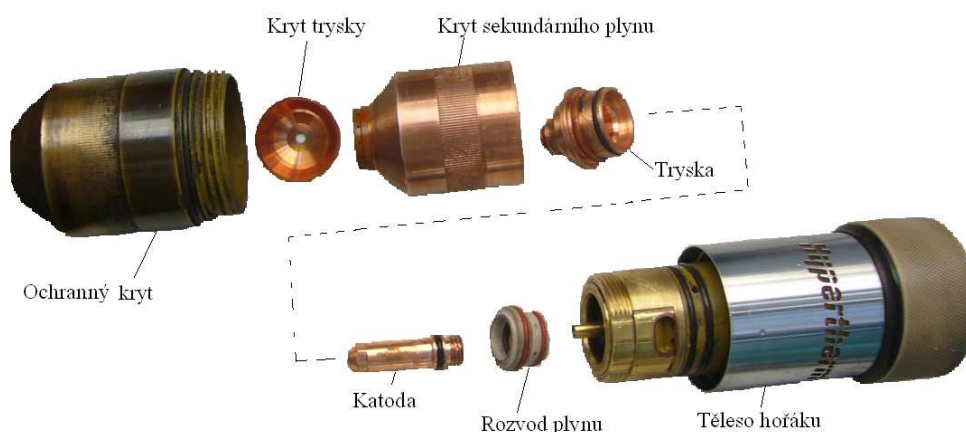
Základní konstrukce hořáku má dvě části: - přívodní kabel
- tělo hořáku

Přívodní kabel obsahuje přívodní vodiče proudu (měděné), plynovou hadici a čtyři řídicí vodiče. Toto vše je zalito v gumě. Řídicí vodiče jsou využity pro dálkové spouštění obvodu, bezpečnostní obvod a řízení obvodu oblouku. Tělo hořáku se skládá ze tří hlavních částí: elektrody, trysky a ochranné části.

Elektroda: elektroda je z mědi, s povrchovou vrstvou niklu s přídavným hafniem. Hafnium je použito proto, že v oxidační atmosféře vzduchu oxiduje mnohem pomaleji než wolfram. Toto je zapříčiněno vysokou teplotou tavení jeho oxidů a nitridů, což vede k ochraně elektrody v procesu řezání ^[5].

Tryska: Plazmová řezací tryska je používána ke zúžení elektricky ionizovaného plynu do úzkého svazku vysoce koncentrovaného plazmového oblouku. Plazmová tryska je konstruována z mědi s povrchem plátovaným niklem pro zvýšení životnosti. Při malých řezacích proudech (pod 30A) se tryska může dotýkat řezaného materiálu, čímž výsledně vzniká úzký řez, vyšší kvalita řezu a pod. Při vyšších proudech (nad 30A) musí být tryska v určité vzdálenosti od materiálu, čímž se zabrání jejímu poškození v důsledku tepelného záření, či kaskádového oblouku.

Ochranný kroužek: je konstruován k přímému chlazení plynu v blízkosti trysky. Přispívá také k fokusaci oblouku. Je vyroben z odolného materiálu, který zabraňuje při normálních podmínkách poškození. Pro řezání proudem nad 30A může pomoci operátorovi v nastavení bezpečné vzdálenosti trysky od řezaného materiálu ^[5].



Obr.1.4 Těleso plazmového hořáku.

1.4 Používané plyny

U plazmových technologií se používají tyto druhy plynů:

- plazmové plyny – jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde dochází k jejich ionizaci a disociaci. Jako plazmový plyn může být používán jednoatomový argon anebo dvouatomové plyny vodíku, dusíku, kyslíku a vzduchu s průtokem 0,5 až 9 l/min⁻¹;
- fokusační plyny – zaostřují paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. Používá se argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku 3 až 18 l/min⁻¹;
- ochranné plyny – obklopují paprsek plazmatu a pracovní místo na obrobku a chrání je před účinkem atmosféry. Používá se argon a dusík. 2 až 20 l/min⁻¹.

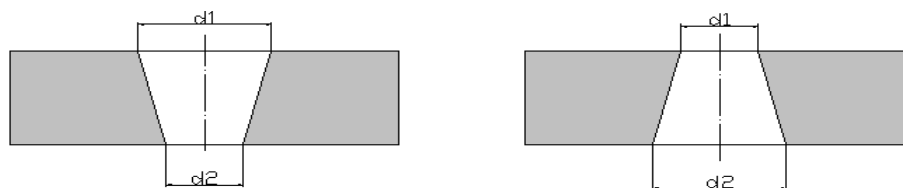
Volba plazmového a asistentního plynu je závislá na typu řezaného materiálu a jeho tloušťce. Kombinace obou plynů je doporučována výrobcem zařízení, viz. tab.1.4.

Tab.1.3 Použití plynů podle druhu materiálu.

Materiál	Plazmový a asistentní plyn
Konstrukční ocel	kyslík, vzduch
Vysoce legovaná ocel	argon/vodík, argon/vodík/dusík, argon/dusík, vzduch, dusík;
Neželezné kovy	argon/vodík, vzduch
Kompozitní materiály	argon/vodík, argon/vodík/dusík, vzduch, kyslík

1.5 Volba optimálních parametrů řezání

Při technicky optimálních parametrech řezání proniká proud plazmatu celou tloušťkou materiálu a anodová skvrna se nachází na úrovni spodního povrchu řezaného kusu. Toto dává optimální jakost řezné plochy a kolmé řezné hrany bez otřepů apod. Při zvětšení optimální rychlosti dochází následně k zmenšení průniku plazmatu, ke zkosení řezných hran apod. (obr.1.5a). Naopak při menší rychlosti dochází k rozšíření řezné spáry ve spodní části řezu (obr.1.5b) [5].



Obr.1.5 Tvar řezné spáry: a) $v_r > v_{opt}$ b) $v_r < v_{opt}$.

Dalším důležitým parametrem je vzdálenost ústí trysky od povrchu materiálu, především u větších výkonů řezání. Při zvětšující se vzdálenosti klesá hloubka protavení, malá vzdálenost naopak může vést ke zničení trysky rozstříkujícím se kovem. Optimální hodnota závisí u konkrétní aplikace na řezné tloušťce. Obecně lze použít k určení optimálních parametrů řezání energetickou bilanci řezání. Teplo potřebné k odtavení a částečnému odpaření kovu z řezné spáry za sekundu [9]:

$$\eta \cdot I_{EO} \cdot U = \rho \cdot Q \cdot s \cdot v_r \cdot b \quad (1.3)$$

kde: η - účinnost přeměny energie, ρ - hustota řezaného materiálu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], s - tloušťka materiálu [cm], v_r - max. řezná rychlost [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$], Q - množství tepla potřebného k odtavení jednotkového objemu materiálu z místa řezu [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$], b - střední šíře spáry $b = (b_1 + b_2)/2$ [cm], I_{EO} - proud na oblouku [A], U - napětí na oblouku [V].

Určení η a Q je velmi obtížné. Při výpočtech se η uvažuje cca 0,4.

$$Q = c_1 \cdot (T_1 - T_0) + q_1 + k \cdot c_2 \cdot (T_2 + T_1) + k \cdot q_2 \quad (1.4)$$

kde: C_1, C_2 - měrné teplo mat. v rozmezí $(T_0 - T_1), (T_1 - T_2)$ [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], T_0 - teplota materiálu na začátku řezání [K], T_1 - teplota tavení [K], T_2 - teplota varu [K], q_1, q_2 - tep.energie kovu při tepl. tavení, resp. varu [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$], k - součinitel vyjadřující podíl vypařeného kovu (0,05 až 0,1), $q_2 = 88 \cdot T_2/m_a$, m_a - atomová hmotnost

Z rovnice (1.4) vyplývá max. rychlost řezání:

$$v_r = \frac{\eta}{\rho \cdot Q} \cdot \frac{E_{EO} \cdot U}{b \cdot s} = k_1 \cdot \frac{I_{EO} \cdot U}{b \cdot s} \quad (1.5)$$

Tab. 1.4 Potřebné hodnoty konstant pro vztah 1.5.

Materiál	m_a	ρ [g.cm ⁻³]	T_1 [K]	T_2 [K]	c_2 [J.g ⁻¹ .K ⁻¹]	q_1 [J.g ⁻¹]	$k_1 \cdot 10^{-6}$ [cm ⁻³ .J ⁻¹]
Al	27	2,7	930	2670	0,5	390	95
Cu	63,5	8,96	1356	2850	0,34	212	17
Fe	55,9	7,86	1810	3170	0,46	270	44

Ze vzorce 1.5 vyplývá, že při dané tloušťce řezaného materiálu můžeme zvýšit výkon - rychlost řezání, pouze zvýšením napětí na elektrickém oblouku (EO) bez zvětšení proudu. Z toho vyplývá vhodnost plynů s vysokou ionizační a disociační energií plazmatu EO (H₂, N₂, O₂) spolu s intenzivním ochlazováním povrchu sloupce EO^[5].

1.6 Řezání plazmou- jednotlivé fáze

1.6.1 Předfuk

Před zapálením vlastního plazmového oblouku se spouští předfuk plazmového plynu. Plazmový plyn je směřován do dvou různých oblastí. V prvním případě je veden vnitřní tryskou a kolem elektrody ven z hořáku. Toto vzduchové proudění tvoří vysoce objemový cirkulující oblak, který je ionizován elektrickým proudem a tvoří plazmový svazek. Druhá oblast, kam je plazmový plyn směřován, je vnější chladicí oblast plazmového hořáku. V tomto případě plazmový plyn působí jako chladicí médium. Odvádí teplo vznikající v plazmovém hořáku, přispívá ke zvýšení životnosti součástí a může působit i na fokusaci plazmového oblouku^[5].

1.6.2 Pilotní oblouk

Předfuk plynu trvá asi 2 sekundy. Po uplynutí této doby je zapálen tzv. pilotní oblouk (Pilot Arc) mezi tryskou a elektrodou vysokým napětím s vysokou frekvencí. Pilotní oblouk usnadňuje zapálení vlastního řezacího oblouku a obvykle trvá, podle konstrukce stroje, 2 až 3 s. Namáhá tepelně trysku, a proto její životnost je dána kromě jiného i počtem startů a délkou hoření pilotního oblouku^[5].

1.6.3 Startování

K nastavení plazmového oblouku je nutné, aby se pilotní oblouk spojil s elektricky uzemněným řezaným materiálem. Při přiblížení hořáku k materiálu se oblouk automaticky přenesse na řezaný kus a je iniciován řezací oblouk o vysokém proudu a relativně nízkém napětí. Startování je třeba dělat ve správné poloze. Při velkém přiblížení může roztavený kov poškodit trysku hořáku. Při příliš velké vzdálenosti od materiálu může vzniknout kaskádový oblouk^[5].

1.6.4 Řezací oblouk

Při hoření řezacího oblouku je velmi důležitá pro dosažení kvalitního řezu řezací rychlost. Toto má také zásadní vliv na životnost součástek hořáku. Na základě praktických zkušeností lze konstatovat, že vhodná řezací rychlost je taková, kdy plazmový oblouk je odkloněn dozadu za pohybující se hořák o 5° až 10°. Při této rychlosti se kov nejen taví, ale i odstraňuje z místa řezu. Pokud je potřeba startovat uprostřed plechu, je vhodné hořák mít nastaven pod úhlem 45° k preventivní ochraně trysky před odletujícími kapkami roztaveného kovu ^[5].

1.6.5 Dofuk

Po skončení řezání probíhá tzv. dofuk plynu. Dochází k chlazení hořáku, elektrody, trysky a prodlužuje se jejich životnost. Nejčastěji dofuk trvá cca 20 sekund ^[5].

1.7 Použití

Plazmová technologie se používá pro řezání, svařování, navařování a stříkání povlaků materiálů požadovaných vlastností na strojní součásti, pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, tavení materiálů v pecích, k vysokoteplotní chemické syntéze plynů a pro rozklad škodlivých průmyslových odpadů.

2 LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM

2.1 *Stručná historie plamenového dělení*

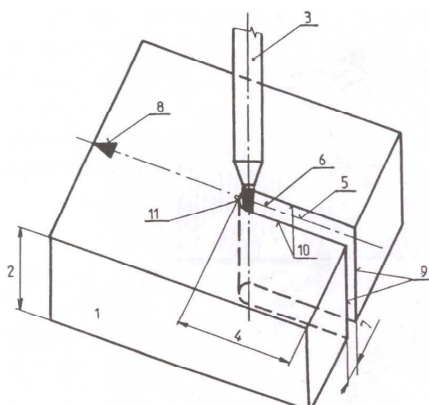
Důležitým mezníkem ve vývoji řezání kyslíkem je rok 1887, kdy Carl von Linde objevil zkapaňování vzduchu. Destilací kapalného vzduchu se umožnila průmyslová výroba kyslíku za velmi nízkých nákladů. V roce 1901 byl v Německu patentován první řezací hořák. Nejvýznamnějším mezníkem v technologii řezání kyslíkem je období mezi světovými válkami, kdy dochází ke značnému pokroku ve vývoji řezacích strojů a uplatňování těchto strojů do široké praxe.

K rychlému rozšíření přispěla velká účinnost tohoto zařízení a zejména nízké pořizovací náklady na zařízení a servis.

I když řezání plamenem patří k nejstarším svařovacím procesům, v současnosti ztrácí na významu. V řadě průmyslových oborů bylo nahrazeno produktivnějšími a přesnějšími řezacími metodami. Řezání plamenem má však stále široké spektrum využití, např. pro vyřezávání otvorů v tlustostěnných nádobách, rourách a jiných konstrukcích ze stavební a konstrukční ocele. Nejvýznamnější využití plamenového řezání je především pro přímé a křivkové řezy, přípravu úkosů pro svařování pomocí současného použití několika hořáků. Umožňuje též snadnou mechanizaci. Všeobecně pro plechy do tloušťky 25 mm se strojní řezací technika posunula od plamene k plazmě a k laseru^[3,11].

2.2 *Princip řezání kyslíkem*

Podstatou řezání kyslíkem je ohřátí kovu na teplotu spalování (např. u oceli 1100°C) a jeho následné spálení v proudu kyslíku. Předehřátí materiálu zajišťuje plamen vytvořený směsí hořlavého plynu a kyslíku. Dalším přívodem proudu kyslíku pak dojde ke spalování řezaného materiálu v úzkém pruhu a tím vzniká řezná spára. Přestože spalováním oceli v proudu kyslíku vzniká velké množství tepla, nemohl by řez pokračovat bez neustálého předehřívání. Struska vznikající při spalování je z řezu tlakem kyslíku vyfukována a částečně ulpívá na hranách řezu. Pro maximální rychlost řezání má rozhodující význam čistota použitého kyslíku. Použitím kyslíku o vysoké čistotě se dosahuje vysoké produktivity. Hořlavý plyn volíme podle požadavků na kvalitu řezu, doby předehřevu a tloušťky materiálu. Stav povrchu řezaného materiálu má značný vliv na kvalitu řezu, například různé druhy nátěrů pro dosažení dočasné ochrany proti korozi^[5].



- 1 - řezaný materiál; 2 - tloušťka řezaného materiálu; 3 - řezací hořák;
 4 - délka řezu; 5 - osa řezu; 6 - řezná mezera; 7 - šířka řezné mezery;
 8 - směr řezání; 9 - řezná plocha; 10 - řezné hrany; 11 - proud řezacího kyslíku

Obr.2.1 Schematické znázornění metody řezání kyslíkem^[1].

2.3 Podmínky řezatelnosti kovových materiálů

Aby byl kov řezatelný kyslíkem, musí splňovat určité podmínky:

1. Při hoření musí kovy vyvinout dostatečné množství tepla, aby se kryly ztráty tepla způsobené vodivostí kovu, zářením a ohříváním zplodin hoření. Tím se udržuje původní teplota a reakce může samočinně pokračovat.
2. Zápalná teplota kovu musí být nižší, nebo maximálně stejná jako jeho teplota tavení. Jinak by došlo pouze k lokálnímu natavení.
3. Tavicí teplota oxidů musí být menší nebo rovna tavící teplotě řezaného kovu. Zápalná teplota železa je asi 1155°C, s rostoucím obsahem uhlíku roste i zápalná teplota.

Tab.2.1 Teplota tavení oxidů.

Oxid	Teplota tavení oxidu	Obsah prvku ve strusce
Oxid železnatý FeO	1370°C	25 – 35 %
Oxid železitý Fe ₂ O ₃	1565°C	cca 15 %
Oxid železnato – železitý Fe ₂ O ₄	1527°C	35 – 45 %
Oxid manganatý MnO	1785°C	
Oxid chromitý Cr ₂ O ₃	2265°C	
Oxid nikelnatý NiO	1990°C	

4. Zplodiny hoření - struska - musí být natolik tekutá, aby ji proud kyslíku z řezné spáry vypudil. Této podmínce nevyhovují hlavně korozivzdorné oceli, jejich struska ulpívá v řezné spáře. Složení strusky při spalování železa je popsáno v tabulce 2.1, zbytek (tedy cca 15%) je nespálený kov.
5. Při řezání musí vznikat dostatečně vysoká teplota, ale odvod tepla do řezaného kovu musí být co nejpomalejší.

2.4 Materiály vhodné pro řezání kyslíkem

Materiály vhodné pro řezání kyslíkem jsou takové, které splňují výše zmíněné podmínky řezatelnosti.

Dobře řezatelné materiály jsou především nelegované, nízkolegované oceli, ale i ocelolitina.

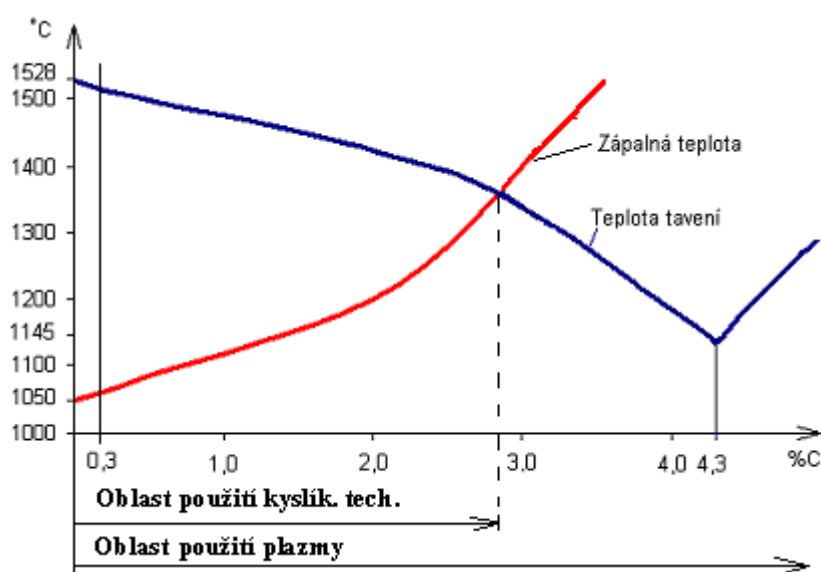
Při vyšším obsahu uhlíku (asi od 0,3 do 0,6 %) se musí materiál vždycky přehřívat nebo žíhat, aby se zabránilo ztvrdnutí a popraskání hran řezu. Přehřívací teplota musí být tím vyšší, čím vyšší je obsah uhlíku a čím silnější je výpalek.

Vysoce legované oceli a litiny jsou řezatelné jen za určitých podmínek. Teplota tavení klesá, i když je bod tavení oxidů kovů o něco vyšší než bod tavení základního materiálu. Tyto materiály vyžadují speciální řezací hořáky.

Řezání kyslíkem se používá pro tloušťky materiálu od 3 mm až do několika metrů.

Materiály, které není možné řezat běžnou technologií, jsou téměř všechny neželezné kovy jako hliník, měď, chrom, nikl, mangan aj.

Graf 2.1 Průběh teploty tavení a spalování železa ^[2]



2.5 Plyny pro řezání

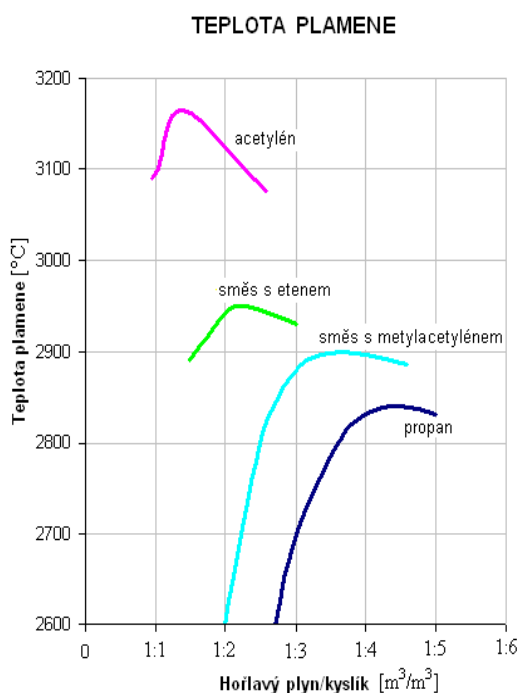
Jako nahřívacího plamene se nejčastěji používá plamene kyslíku a acetylénu, lze použít i jiných plynů jako vodík, propan-butan, zemní plyn, svítiplyn, atd. Předností acetylénu je rychlý a vydatný ohřev, ostatní plyny jsou naopak cenově výhodnější a dosahuje se s nimi čistší řez.

Pro řezací proud se používá vždy kyslík. Kyslík se odebírá buď přímo z láhve, nebo z potrubí napájeného z baterie lahví, odpařovačů, tlakových zásobníků (nádrž 5m³)

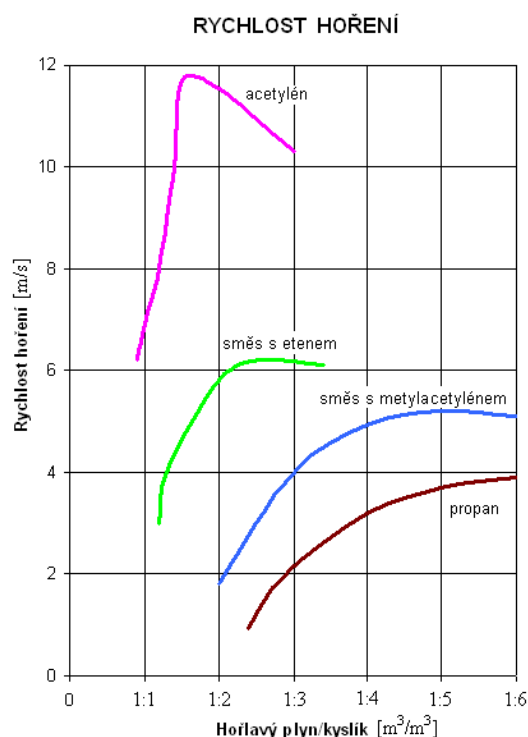
apod. Také acetylén lze odebírat buď z lahví nebo z přenosných či stabilních tlakových zásobníků.

Kyslík je plyn nehořlavý, ale hoření podporuje. Na rozdíl od svařování plamenem je pro řezání nutný kyslík o nejmenší čistotě 98,8 %, optimální čistota je 99,2%. Je-li obsah jiných plynů nad 1,5 %, snižuje se již značně výkon řezání a zhoršuje se jakost řezných ploch. Použijeme-li jiný plyn než acetylén, sníží se náklady, avšak zvětší se spotřeba kyslíku a často se prodlouží i čas nahřívání. Z tabulky 2.1 a grafů 2.2, 2.3 je patrný rozdíl mezi jednotlivými používanými plyny pro řezání. V současnosti se nejvíce využíván acetylén a propan, pod označením APACHE.

Graf.2.2 Závislost teploty plamene na směsi.



Graf 2.3 Závislost rychlosti hoření na směsi.



Tab.2.2 Časy ohřevů oxidů na teplot tavení

Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Čas ohřevu [s]		
	acetylen (C_2H_2)	vodík (H_2)	svítiplyn
20	6-7	10 - 12	10 - 14
50	9-10	14 - 16	18 - 22
100	15 - 17	18 - 22	22 - 27
150	25 - 28	22 - 27	23 - 33
200	300 - 35	28 - 33	35 - 42

Nečistý nebo rezavý materiál vyžaduje vyšší teploty nahřívání a delší čas.

2.6 Parametry řezání

Vhodná volba parametrů řezání výrazně ovlivňuje kvalitu řezných ploch, řezných hran a ekonomiku řezání.

Všechny parametry řezání jsou funkcí tloušťky řezaného plechu. Tyto parametry dělíme na základní a doprovodné.

2.6.1 Základní parametry

2.6.1.1 Rychlost řezání [mm/min]

Tato hodnota bývá zpravidla uvedena v dokumentaci k příslušnému řezáku. U přímých řezů je hodnota rychlosti řezání větší než u řezů tvarových. Velká rychlost řezání může způsobit přerušení procesu řezání. Malá rychlost řezání způsobuje natavování horních hran řezu a v řezné mezeře je přebytek kyslíku. Řezná rychlost tedy významně ovlivňuje výsledek řezání. V tabulce 2.2 a v grafu 2.4 jsou uvedeny hodnoty řezacích rychlostí v ^[1].

Tab. 2.3 Vybrané hodnoty řezacích rychlostí.

Tloušťka řezaného materiálu [mm]	Tlak řezacího kyslíku [MPa]	Rychlost řezání [mm/min]	Spotřeba kyslíku [l/m]	Spotřeba acetylénu [l/m]
5	0,22	550	64,5	13,4
10	0,30	415	112	22,5
40	0,47	250	434	54,0
80	0,60	190	975	83,0
100	0,70	175	1210	114,0

2.6.1.2 Tlak řezacího kyslíku p [MPa]

Tlak řezacího kyslíku je snad nejvíce závislým parametrem řezání na tloušťce řezaného materiálu (ale i na dalších vlivech), např. $p = f(t; v; \text{velikost řezací hubice})$. Pokud neznáme velikost tlaku řezacího kyslíku, např. z prospektu nebo návodu, pak existuje řada empirických vztahů pro první stanovení tlaku řezacího kyslíku. Nejjednodušším z těchto vztahů je následující:

$$p = a \cdot s \quad (2.1)$$

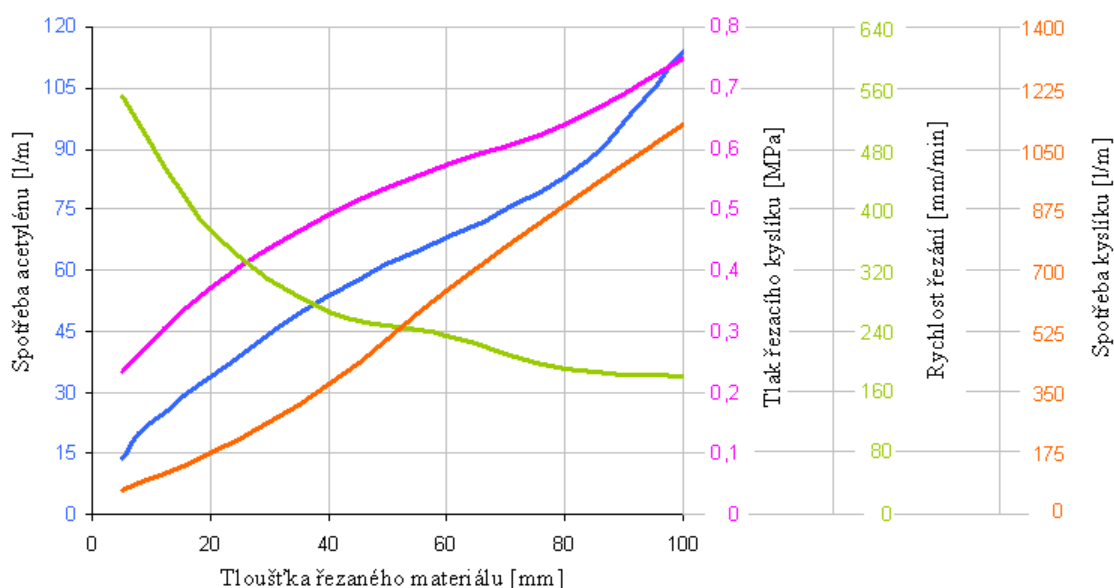
kde: **a** – opravný koeficient (0,6 až 0,8 pro ruční řezání, 0,4 až 0,6 pro strojní řezání), **s** – tloušťka plechu [mm]

Obvykle bývají pracovní tlaky pro řezání oceli kyslíkem nastaveny na pracovním manometru následující:

tlak kyslíku: 0,3 až 0,5 MPa, tlak acetylénu: 0,15 MPa.

Optimální tlak řezacího kyslíku umožňuje dosažení ostrých řezných hran a hladkých řezných ploch. Nadměrné množství kyslíku způsobuje nadměrný odvod tepla do řezaného materiálu, špatnou kvalitu řezu, a v samém závěru snižuje rychlost řezání. Pro řezání se spotřebuje pouze nutné množství kyslíku a přebytek kyslíku způsobuje ochlazování místa řezání se všemi negativními důsledky. Závislost tlaku řezacího kyslíku na tloušťce řezaného materiálu je znázorněn v grafu.2.4.

Graf 2.4 Závislost tloušťky materiálu na základních parametrech a spotřebě plynu



2.6.1.3 Vzdálenost řezací hubice od povrchu řezaného plechu l [mm]

Nejteplejší místo (tj. asi 3000 až 3200°C u kyslíko-acetylénového plamene) je vzdálenost přibližně 3 až 4mm od konce jádra plamene. Délka jádra plamene, tj. také vzdálenost nejteplejšího místa od řezáku se mění podle intenzity a velikosti nahřívacího plamene pro danou tloušťku řezaného materiálu. Příliš velký odstup trysek způsobuje nepřesnost hran řezu, ^[1].

Tabulka 2.4 Vzdálenosti ústí hořáku od povrchu řezaného plechu.

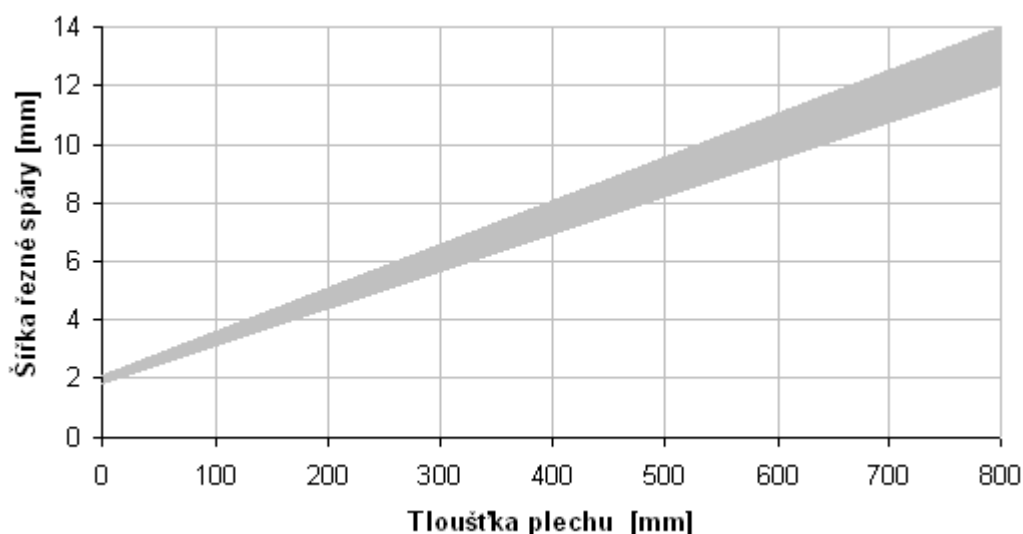
Tloušťka řezaného plechu [mm]	3 až 10	10 až 25	25 až 50	50 až 100	100 až 200	200 až 300	nad 300
Vzdálenost hořáku od řezaného plechu [mm]	2 až 5	3 až 6	3 až 7	4 až 8	5 až 10	7 až 12	8 až 15

2.6.1.4 Šířka dělicí spáry [mm]

Šířka dělicí spáry se zvětšuje při menší postupové rychlosti, při větší vzdálenosti hořáku od plechu, při ručním vedení řezáku, atd. Špatně obroběný nebo neudržovaný povrch díry pro přívod řezacího kyslíku způsobuje, že je nutný vyšší tlak kyslíku a že vzniká větší dělicí spára.

Dodržování předpokládané dělicí spáry má vliv na přesnost rozměrů výpalků. Šířka řezné spáry v závislosti na tloušťce materiálu je znázorněna v grafu 2.5.

Graf 2.5 Závislost tloušťky materiálu na šířce řezné spáry, ^[11].



2.6.2 Doprovodné parametry

- čistota řezacího kyslíku,
- velikost nahřívacího plamene,
- chemické složení řezaného materiálu,
- stav povrchu řezaného materiálu, apod.

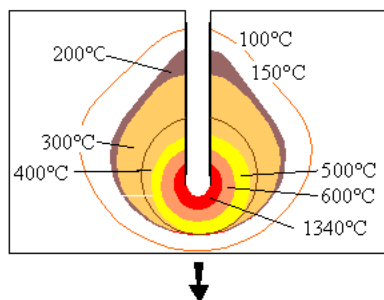
2.7 Tepelně ovlivněná oblast

Nežádoucím jevem při všech svařovacích a řezacích procesech je vznik tepelně ovlivněné oblasti, dále jen TOO. TOO vzniká především nestejnoměrným ohříváním a ochlazováním kovu, apod. Při tomto procesu dochází ke hrubnutí zrn v místech okolí svaru, řezu. TOO se dá zmírnit optimálním nastavením svařovacího - dělicího zařízení, nebo výběrem vhodné technologie. Velikost TOO při řezání kyslíkem, graf 2.6 ^[11].

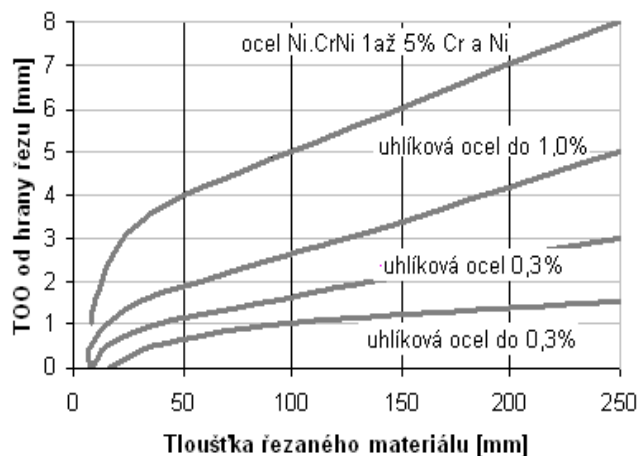
2.8 Tvar řezné mezery

Začátek řezné mezery má zpočátku tvar odpovídající průměru použité řezací hubice, později dochází k mírnému zúžení řezné mezery. Na přední části řezné mezery se tvoří tenká vrstva strusky o tloušťce asi 0,03mm. Důležité je povrchové napětí této strusky, protože má vliv na tvorbu vln.

Graf 2.6 Závislost tloušťky materiálu na TOO.



Obr.2.2 Chladnutí místa řezu .



2.9 Způsob řezání, řezací zařízení

Řezání kyslíkem lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to řezání ruční a řezání strojní. Nelze jednoznačně určit, který z těchto způsobů je častěji využíván, protože každý z nich má své specifické využití.

Nejdůležitější částí řezacího zařízení je řezací tryska. Výkon řezání stoupá se vzrůstající rychlostí výstupu proudu kyslíku a tento zase závisí na konstrukci ústí trysky.



Obr.2.2 Ruční řezací hořáky.



Obr.2.3 Strojní hořák.

2.9.1 Ruční způsob řezání

Řezání plamenem může být prováděno buď ručními řezacími hořáky, nebo přenosnými řezacími stroji. Vedení řezu se může provádět ručně, podle orýsování, výkresu nebo šablony. Podstatnou nevýhodou tohoto způsobu řezání je kvalita řezu, ta je závislá na zručnosti pracovníka. Umožňují řezání materiálu v rozsahu tloušťek od 3 do 80mm.

Řezací hořák se skládá z těla hořáku, do něhož je zašroubována dvoudílná, soustředná nahřívací a řezací hubice. Ruční řezací hořáky se dělí na řezací nástavce a řezací hořáky. Řezací nástavce umožňují řezání rozsahu tloušťek od 3 do 300mm a jsou ve výbavě svařovacích souprav. Vyrábí se samostatné hořáky nebo nástavce k běžnému svařovacímu hořáku, obr.2.2.

- Nevýhody
- poměrně hrubý řez
 - potřeba větších přídavek na dodatečné obrábění výpalků
 - nevhodné pro sériovou výrobu
 - nadměrné namáhání pracovníka (teplo)

- Výhody
- mobilita
 - nízké náklady na pořízení
 - použití v opravárenství

2.9.2 Strojní způsob řezání

Strojní řezání plamenem se provádí na stacionárních řezacích strojích. Používá se pro přesné výpalky i složitých tvarů. Strojní řezák se skládá z válcového těla řezáku, na němž je upevněn ozubený hřeben pro výškové přestavení řezáku a přívodů pro kyslík a hořlavý plyn. Směs se vytváří ve směšovací komoře hořáku. Pro plně automatické řezací stroje s ovládacími řídicími systémy se používají hlavně tlakové řezací hořáky.

- Nevýhody
- vysoké pořizovací náklady
 - vyšší provozní náklady
 - vyšší nároky na odsluhu

- Výhody
- vhodné pro sériovou výrobu
 - přesnější práce → plochy, řez je hladší
 - stroje jsou programově řízené
 - produktivita práce
 - tříosé stroje s automatickým přibližováním při napalování

3 SHRNUÍ LITERÁRNÍ STUDIE – ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM A PLAZMOU

Tab. 3.1 Všeobecné přednosti a nevýhody jednotlivých způsobů dělení

Proces	Výhody	Nevýhody
Kyslíkový	• Pro střední a větší tloušťku materiálu • Hospodárné použití několika hořáků • Malé investiční a provozní náklady • Soupravy až se 3 hořáky v jedné soupravě	• Špatné řezání pod 5mm • Materiálové zakřivení plechu; nutné rovnání • Vysoký přívod tepla, velká tepelně ovlivněná oblast • Malá rozměrová stálost u opakujících se řezů následkem vlivu tepla • Malá řezná rychlost
Plazmový	• Provoz jednoho a více hořáků podle série • Řezání všech elektricky vodivých materiálů • Řezání vysokolegované oceli a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce • Vynikající schopnost u slabých a středních tloušťek konstrukční oceli (do 30mm) • Řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem • Vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než autogenní) • Velmi dobrá automatizace • Řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště	• Omezí použití do 160mm (180mm) u suchého řezání a 120mm u řezání pod vodou • Poněkud širší řezná spára

4 BEZPEČNOST A OCHRANA ZDRAVÍ PŘI PRÁCI

Podobně jako u jiných průmyslových technologických procesů musí být i u plazmového a kyslíkového řezání dodržována bezpečnostní opatření.

4.1 BOZP při řezání plazmou

Operátor u plazmového řezání je vystaven následujícím rizikům^[4]:

- ultrafialovému záření
- dýmu, kouři
- vysoké teplotě
- rozstříku roztaveného kovu
- hluku
- potencionálně vysokému napětí.

Z toho vyplývá:

1. Plazmový oblouk produkuje UV záření, které může poškodit oči a kůži. Je potřeba chránit oči a obličej příslušným filtrem a oblečením. Prostor řezání je třeba ohradit závěsy a vybavit intenzivním odsáváním a filtraci, popřípadě rekuperací.
2. Při plazmovém řezání se produkuje horký kov, struska atd. Ochrana se provádí předepsaným oblečením jako u svařování elektrickým obloukem
3. Při řezání různých materiálů se mohou vyskytovat nebezpečné páry kovů, především olova, berylia, kadmia a rtuť.
4. Vysoký tlak vzduchu vede i k vysoké hladině zvuku. Je potřeba používat chrániče uší.
5. Proti úrazu vysokým napětím se používají dielektrické rukavice.

4.2 BOZP při řezání kyslíkem

Operátor u kyslíkové řezání je vystaven podobným rizikům jako u plazmy především pak:

- vysoké teplotě
- dýmu, kouři
- rozstříku roztaveného kovu
- hluku
- při nedodržení zásad i výbuchu

Při kyslíkovém řezání se stejně jako u plazmy produkuje horký kov, struska, záření atd. Ochrana se provádí předepsaným oblečením a pomůckami jako u svařování plamenem (kožená zástěra, rukavice, tmavé brýle o příslušném průsvitu atd.).

Proudění řezacího kyslíku vede k vysoké hladině zvuku. Je potřeba používat chrániče uší.

Dále je třeba dbát speciálních předpisů při zacházení s hořlavými plyny a kyslíkem. Např. při styku kyslíku s mastnotami a jinými organickými látkami nastává rychlé samovznícení, to se rovná explozi .

Zásobníky s plyny musí být v dostatečné vzdálenosti od otevřeného ohně a nesmí být vystavovány tepelnému záření.

Operátor musí pravidelně kontrolovat stav přívodních hadic a kabelů, především v místech častého namáhání.

Při přerušení řezání se musí okamžitě zastavit řezací kyslík.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem v praktické části bude zhotovení výpalků na plazmovém a kyslíkovém řezacím stroji a následné porovnání výpalků s normou ČSN EN ISO 9013 (viz. kapitola 8). Budou posuzovány geometrické požadavky tvaru, polohy a úchyly, jakosti povrchu, tepelně ovlivněné oblasti – vyhodnocení makrostruktur. Na základě zkoušek bude doporučena vhodná technologie výroby na zhotovení výpalků, uvedené v kapitole 9.

Praktická část se skládá z čtyř částí:

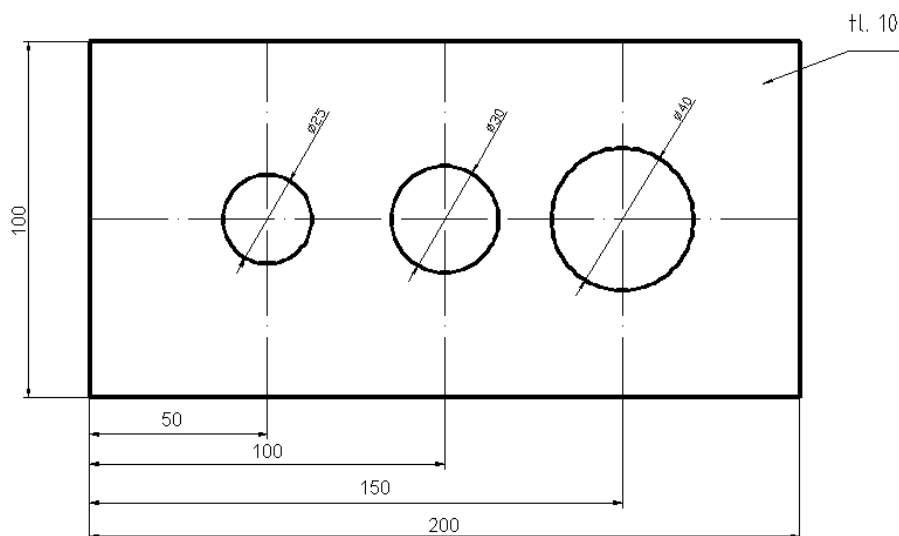
- výběr materiálu
- stanovení podmínek
- zhotovení – výroba
- vyhodnocení (viz. kapitola 8)

5.1 Výběr materiálu

K experimentu byl firmou vybrán materiál S355J2+N (EN 10 025-2, St 52-3N - DIN 17 100), dle ČSN se jedná o „S“ konstrukční ocel tř. 11 503, s mezí kluzu 355MPa, „N“ normalizačně žíhanou.(J2“= nárazová práce 27J při - 20°C). Podrobný popis oceli je v příloze. 8. Polotovarem byl zbytek tabule plechu o rozměrech 4220 x 426mm, tloušťka materiálu 10mm. Atest k materiálu je uveden v příloze 7.

5.2 Návrh podmínek tepelného dělení

Abychom mohli vyhodnotit geometrické přesnosti, jakost povrchu a tepelně ovlivněnou oblast, musíme nařezat vzorky dle rozměrů na následujícím obrázku 5.1, (výkres výpalku v příloze č.1). Vzorek č.3 je nařezán kyslíkovou metodou, za požití topného plynu Apache, rychlostí 500mm/min.Vzorky 1 a 2 budou řezány plazmou, rychlostí 1200mm/min a 1800mm/min. Řezné parametry jsou nastaveny automaticky dle výrobce zdroje - zařízení, které vychází z hodnoty tloušťky a druhu materiálu. (parametry pro plazmový hořák příloha 9).



Obr.5.1 Tvar vzorku 1-3.

5.3 Zhotovení výpalku

5.3.1 Vygenerování programu pro plazmové řezání (program Vanad Meffi)

%	-30+30-30++
3	8
VZOREK2,3	38
100x426x4220	5
S355	+323-630
MGM-PLAZMA	6
*1x 0mm # X 0 0 0 0 0 0 0	29
(0;426)	7
par=16/Fe/80A	7+100
4	-2000+
3	++1000
vzorek –odepsan do spotreby	+2000+
4	+ -1000
40+10	-22-21
5	8
+625-2418	38
6	3
39+1810	@1-K
3	4
@1-Z	0
~5533_1B	/
4	
29+1	
7	
+100+	
++-125++	
-30+30-30++	
8	
38	
5	
+455-30	
6	
29+1	
7	
+100+	
++-150++	
-30+30-30++	
8	
38	
5	
+480-30	
6	
29+1	
7	
+100+	
++-200++	

5.3.2 Vygenerování programu pro kyslíkové řezání (ISO kód)

```
%4560 "VZOREK"  
" FERROS "  
" 10x426x4220 S355 "  
" 1x100mm#10 X 0 0 0 0 0 0 "  
" [0,0] "  
" ---1. p10-VZOREK / --- "  
N1 G90 G23 G00 G41 D02 X62.542 Y60.004  
N2 G01 X10 Y0 M07 M50 F250  
N3 G03 X-25 Y0 I12.5 J0  
N4 G03 X25 I12.5 J0  
N5 G01 X-3.536 Y3.536 M09  
N6 G00 G41 D02 X46.036 Y-3.536  
N7 G01 X10 Y0 M07 M50 F250  
N8 G03 X30 Y0 I-15 J0  
N9 G03 X30 Y0 I15 J0  
N10 G01 X-3.536 Y3.536 M09  
N11 G00 G41 D02 X48.536 Y-3.536  
N12 G01 X10 Y0 M07 M50 F500  
N13 G03 Y0 I-20 J0  
N14 G03 X40 Y0 I20 J0  
N15 G01 X-3.536 Y3.536 M09  
N16 G00 G40 X29.267 Y-26.908  
N17 G00 G41 D01 X29.267 Y -26.908  
N18 G01 X-24.998 Y 0.28 M07 M50 F500  
N19 G01 X-200 Y0  
N20 G01 X0 Y100  
N21 G01 X200 Y0  
N22 G01 X0 Y100  
N23 G01 X0,028 Y-25 M09  
N24 G00 G40 X-209.996 Y-5.004  
N25 M01  
N26 M30
```

*

6 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY VZORKŮ

Výroba vzorků 1-3 byla provedena dne 18.3.2009 ve firmě Ferros Chrlice (Brno), která vlastní dělicí CNC stroje jak pro plazmové, tak pro kyslíkové dělení. Vzorky byly zhotoveny z materiálu o tloušťce 10mm, a na pálicích strojích Vanad Proxima, plazmový zdroj Hypertherm HPR 130, topný plyn u kyslíkového dělení –Apache.

Obsluhu a odborný dohled provedli „kvalifikovaní“ zaměstnanci firmy Ferros.

6.1 *Postup výroby*

Postup výroby je u všech tří vzorků vzorku stejný:

- nákres součásti v CAD programu,
- převedení z CAD programu do programu pro CNC řídící stroj,
- přenesení dat z PC na paměťový disk stroje,
- ustavení polotovaru - plechu na pracovní stůl stroje,
- nastavení nulových bodů polotovaru,
- simulace (laserový světelný paprsek),
- spuštění programu – stroje
- ukončení procesu
- zchlazení výpalku
- odebrání výpalků

7 TECHNICKÉ HODNOCENÍ

7.1 Cíl

V technickém hodnocení bude provedeno porovnání výpalků s normou ČSN EN ISO 9013 a vyhodnocení metalografických výbrusů – tepelně ovlivněné části.

Měření bylo provedeno dne 30.4.2009 ve firmě PBS Velká Bíteš, divize letecké techniky - výstupní kontrola, pod odborným dohledem Ing. Libora Ustohala, CSc.

Vzhledem k tomu, že všechny vzorky po vizuální kontrole neodpovídaly požadované a očekávané kvalitě, budou po domluvě s panem Ing. Ustohalem použity především měřidla pro hrubé měření. Od měření drsnosti a profilu povrchu bylo z tohoto důvodu rovněž upuštěno. (Měřením by došlo k destrukci přesného měřicího hrotu stroje). Měření drsnosti bylo provedeno pouze porovnávací zkouškou, porovnáním mezi vzorky a vzorníkem.



Obr.7.1 Měřidla pro hrubé měření.

7.2 Podmínky měření [ISO]

Měření je prováděno na okartáčovaných řezech, očištěných od oxidů a mimo oblastí s vadami ^[8].

7.3 Technické hodnocení

7.3.1 Typ řezu

U všech tří vzorků jsou provedeny svislé tvarové (kruhové) řezy 31% a přímé řezy 69%.

7.3.2 Šířka řezné spáry, l

Měření šířky řezné spáry se provádí mezi povrchy řezu na horní hraně řezu, bylo provedeno pomocí posuvného kovového měřítka Somet s přesností 0,02mm. U každého ze tří vzorků byla provedena 4 měření a následovně vypočtena průměrná hodnota l.

Tab.7.1 Naměřené hodnoty šířky řezné spáry l.

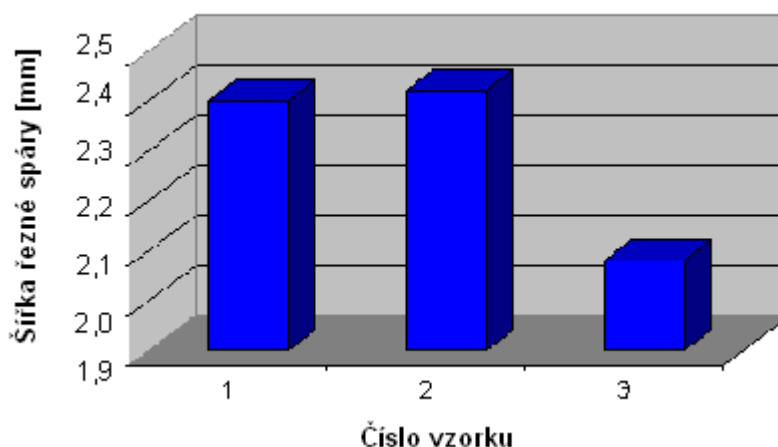
Vzorek	Šířka řezné spáry l [mm]				Průměrná šířka l [mm]
1	2,40	2,42	2,38	2,40	2,40
2	2,44	2,40	2,44	2,38	2,42
3	2,12	2,00	2,06	2,14	2,08

$$l_{1\text{průměrná}} = (l_{11} + l_{12} + l_{13} + l_{14}) / 4 = (2,40 + 2,42 + 2,38 + 2,40) / 4 = 2,40 \text{ mm}$$

$$l_{2\text{průměrná}} = (l_{21} + l_{22} + l_{23} + l_{24}) / 4 = (2,44 + 2,40 + 2,44 + 2,38) / 4 = 2,42 \text{ mm}$$

$$l_{3\text{průměrná}} = (l_{31} + l_{32} + l_{33} + l_{34}) / 4 = (2,12 + 2,00 + 2,06 + 2,14) / 4 = 2,08 \text{ mm}$$

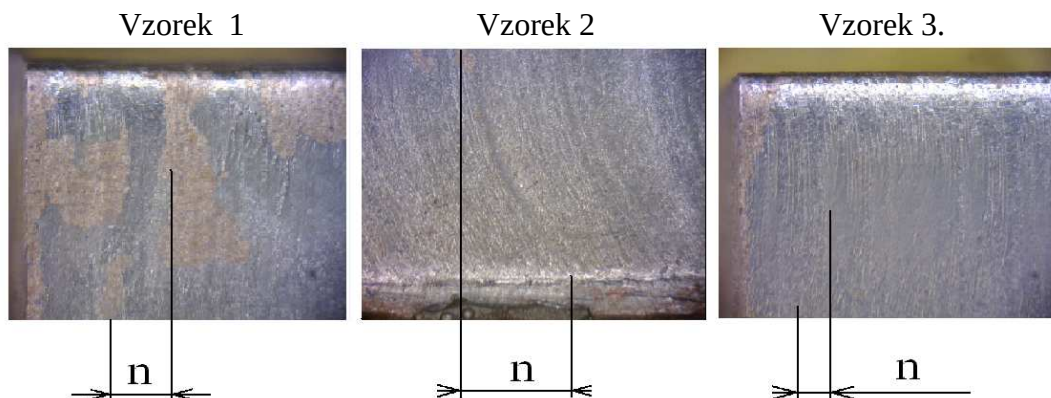
Graf 7.1 Průměrná šířka řezné spáry [mm].



Z tabulky 7.1 a grafu 7.1 je patrné, že při řezání plazmou rychlostí 1200 mm/min a rychlostí 1800 mm/min není výrazný rozdíl v šířce řezné spáry. Rozdíl je mezi kyslíkovou a plazmovou technologií, kyslíková technologie vykazuje menší šířku řezné spáry.

7.3.3 Skluz, n

Pro názornost porovnání hodnot skluzu bylo provedeno 6x zvětšených řezné plochy. Vzhledem k tomu, že snímající zařízení neumožňuje zobrazit celou šířku řezu, byla vždy vybrána ta část řezné plochy, kde byla hodnota skluzu výraznější.



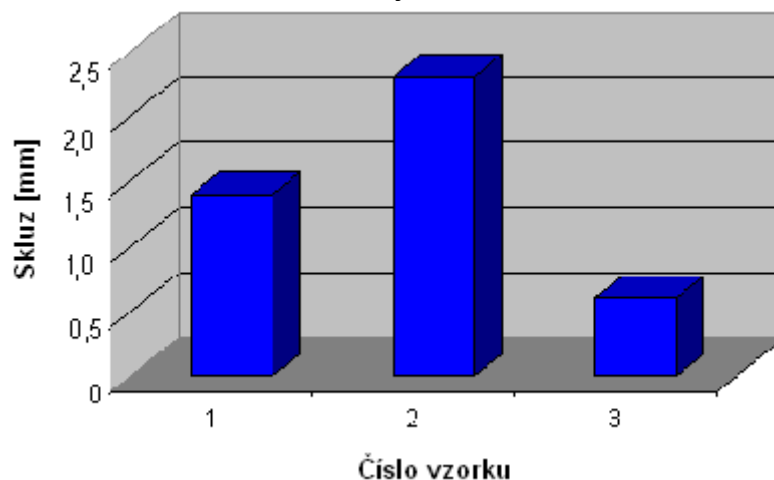
Obr.7.2 Skluz u vzorku 1-3

K měření skluzu byl použit příložený dílenský úhelník. Bylo provedeno vždy po jednom měření. I když se dá z hodnoty skluzu odhadnout např. optimální rychlost řezání, na výsledné hodnocení jakosti povrchu řezu nemá dle ČSN 9013 žádný význam.

Tab.7.2 Naměřené hodnoty skluzu.

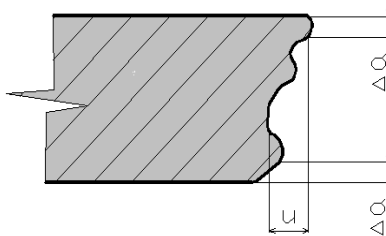
Vzorek	Naměřená hodnota skluzu, n [mm]
1	1,4
2	2,3
3	0,6

Graf 7.2 Hodnoty skluzu [mm].



7.3.4 Úchylka úhlu, kolmosti, u

Měření úchylek přímosti bylo provedeno pomocí ocelových listových spárových měrek Zbrojovka Brno, obsahující 20 listů v rozmezí 0,05-1 mm. Nevýhodou tohoto měření je, že výsledek není příliš přesný, protože tímhle způsobem měření nemusí být naměřeny největší úchylky kolmosti, které se nachází uprostřed řezaného materiálu. Norma uvádí, že měření musí být provedeno na tloušťce z každé strany zmenšené o Δa . Δa je dle ČSN 9013 pro tloušťku materiálu 10 mm = 1mm. U každého vzorku byla provedena 3 měření.



Obr.7.3 Oblast měření úchylky.

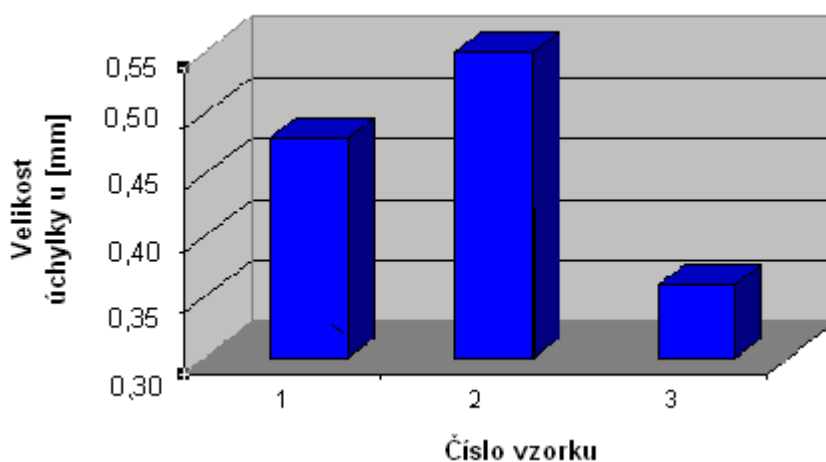
Tab. 7.3 Naměřené hodnoty úchylky kolmosti.

Vzorek	Naměřené hodnoty úchylky kolmosti			Průměrná hodnota u [mm]
1	0,50	0,50	0,45	0,48
2	0,55	0,55	0,55	0,55
3	0,35	0,35	0,40	0,36

$$u_{v1\text{-průměrná}} = (u_{v11} + u_{v12} + u_{v13}) / 3 = (0,50 + 0,50 + 0,45) / 3 = 0,48 \text{ mm}$$

$$u_{v2\text{-průměrná}} = (u_{v21} + u_{v22} + u_{v23}) / 3 = (0,55 + 0,55 + 0,55) / 3 = 0,55 \text{ mm}$$

$$u_{v3\text{-průměrná}} = (u_{v31} + u_{v32} + u_{v33}) / 3 = (0,35 + 0,35 + 0,40) / 3 = 0,36 \text{ mm}$$

Graf 7.3 Průměrné úchyly kolmosti u [mm].

Tab.7.4 Úchylka kolmosti ČSN 9013.

Toleranční pole	Úchylka kolmosti u [mm]
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,40 + 0,010a$
4	$0,80 + 0,020a$
5	$1,20 + 0,035a$

Již po vizuální kontrole je patrné, že technologie plazmy má poměrně velké úchyly kolmosti. Z hodnocení naměřených hodnot s hodnotami v tab.7.4 vyplývá že vzorky 1 a 2 patří do toleranční třídy 4, vzorek 3 do toleranční třídy 3.

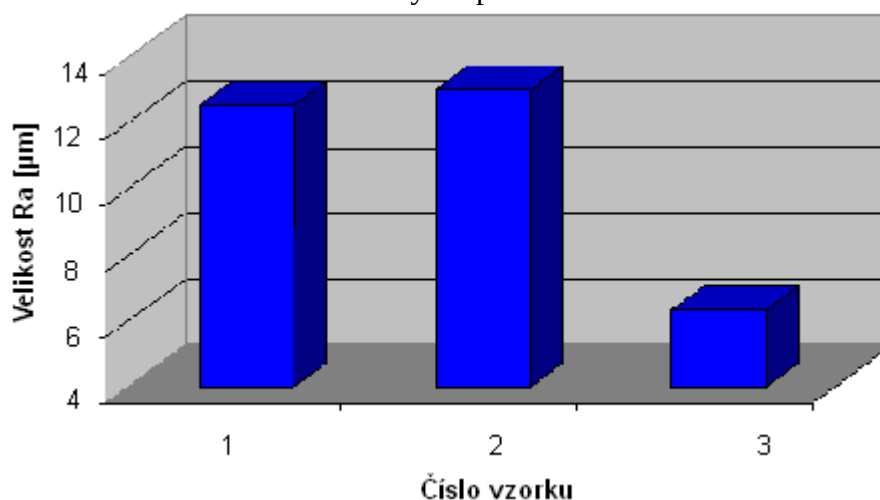
7.3.5 Průměrná výška profilu, R_a

Průměrná výška profilu nebyla měřená, jak již byl popsáno v kapitole 7.1 „cíl“. Výsledky porovnání drsnosti s vzorovými povrchy jsou pouze informativní, ve skutečnosti může dojít ke značné odchylce.

Tab. 7.5 Profil R_a .

Vzorek	Velikost R_a [μm]
1	12,5
2	>12,5
3	6,3

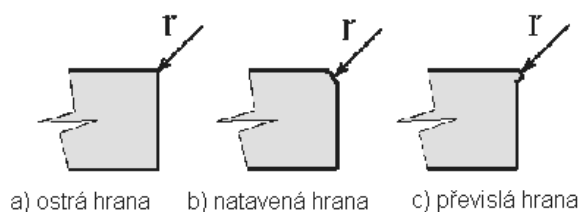
Graf 7.4 Výška profilů Ra.

Tab.7.6 Toleranční pole pro průměrnou výšku profilu^[8]

Toleranční pole	Průměrná výška profilu Ra [μm]
1	10+(0,6a)
2	40+(0,8a)
3	70+(1,2a)
4	110+(1,8a)

Nejnižší výška profilu Ra je v vzorku 3, a naopak nejvyšší u vzorku 2. Dle tabulky 7.6, uvedené v normě ČSN 9013, patří vzorky 1 a 2 do toleranční třídy 2, vzorek 3 do toleranční třídy 1.

7.3.6 Natavení horní hrany ,r



Obr.7.4 Natavení horní hrany.

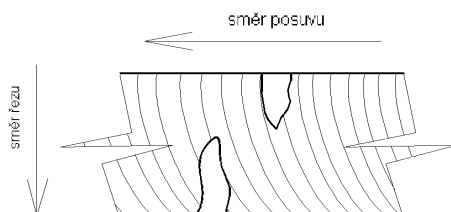
Pomocí měrek poloměru bylo naměřeno u všech tří vzorků natavení horní hrany r, obr.7.4 b. Největší zaoblení bylo naměřeno u vzorku 3.

Tab.7.7 Hodnoty zaoblení horní hrany.

Vzorek	Velikost natavení [mm]
1	0,2
2	0,3
3	0,4

7.3.7 Drážkování

Na vzorku 2 jsou patrné mírné známky drážkování, na vzorcích 1 a 3 nejsou patrné prohlubeniny nebo zářezy nepravidelné šířky, hloubky a nepravidelného tvaru, které by, především ve směru řezné tloušťky, narušovaly stejnorodost povrchu ^[8].



Obr.7.5 Drážkování, ^[8].

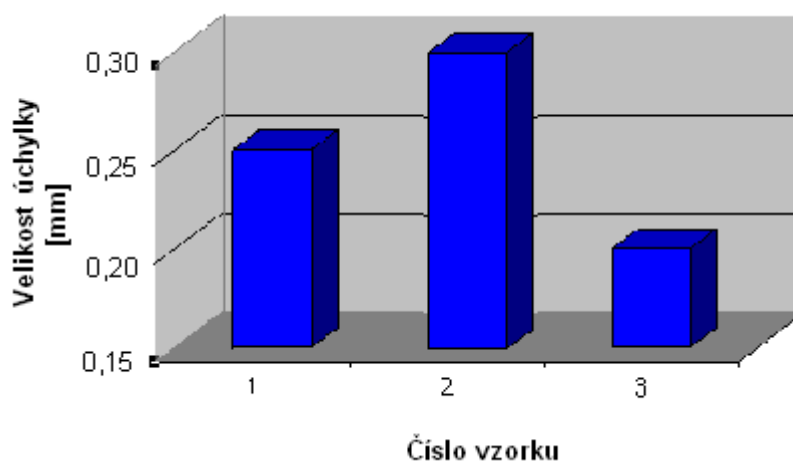
7.3.8 Měření úchylek přímosti

Měření úchylek přímosti bylo provedeno pomocí ocelových listových měrek Zbrojovka Brno, obsahující 20 listů v rozmezí 0,05-1 mm. Měření bylo prováděno na vzorcích v rovinné části řezné spáry mezi nápalý a dírami.

Tab.7.8 Hodnoty úchylky přímosti.

Číslo vzorku	Úchylka přímosti [mm]
1	0,25
2	0,30
3	0,20

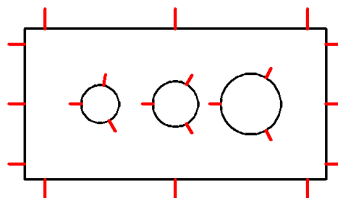
Graf 7.5 Úchylky přímosti.



Vzorky 1-3 vykazují téměř stejné úchylky přímosti.

7.3.9 Měření rozměrových úchylek vzorků

K měření rozměrových úchylek byly použity posuvná měřítka Somet s měřicími rozsahy 0-150 mm a 0-450 mm s přesností 0,02mm. Měřicí místa vnějších i vnitřní rozměrů jsou znázorněna na následujícím obrázku 7.6. Vnitřní průměry byly měřeny třikrát po 120°. Tabulka 7.9 udává velikost úchylek pro měřené hodnoty dle normy ČSN 9013.



Obr.7.6 Měřicí místa na vzorku.

Tab.7.9 Hodnoty mezních úchylek pro dané rozměry, norma ČSN 9013.

Tloušťka, řezaného materiálu	Jmenovitý rozměr		
	≥10<35	≥35<125	≥125<315
>10 ≤50	Mezní úchylky toleranční třídy 1		
	± 0,7	± 0,7	± 0,8
	Mezní úchylky toleranční třídy 2		
	± 1,8	± 1,8	± 1,9

7.3.9.1 Měření vnějších rozměrů

Tab.7.10 Naměřené hodnoty vnějších rozměrů.

	Měření rozměru 200 [mm]			Průměrná hodnota délky[mm]
	1	2	3	
Vzorek 1	199,80	199,94	200,00	199,91
Vzorek 2	200,50	200,70	200,60	200,60
Vzorek 3	198,74	199,20	199,62	199,18
	Měření rozměru 100 [mm]			
	1	2	3	
Vzorek 1	101,00	100,70	100,64	100,78
Vzorek 2	100,60	100,44	100,48	100,50
Vzorek 3	97,62	98,34	99,18	98,38

$$l_{v1-200\text{průměrná}} = (l_{v11} + l_{v12} + l_{v13}) / 3 = (199,80 + 199,94 + 200,00) / 3 = 199,91 \text{ mm}$$

$$l_{v2-200\text{průměrná}} = (l_{v21} + l_{v22} + l_{v23}) / 3 = (200,50 + 200,70 + 200,60) / 3 = 200,60 \text{ mm}$$

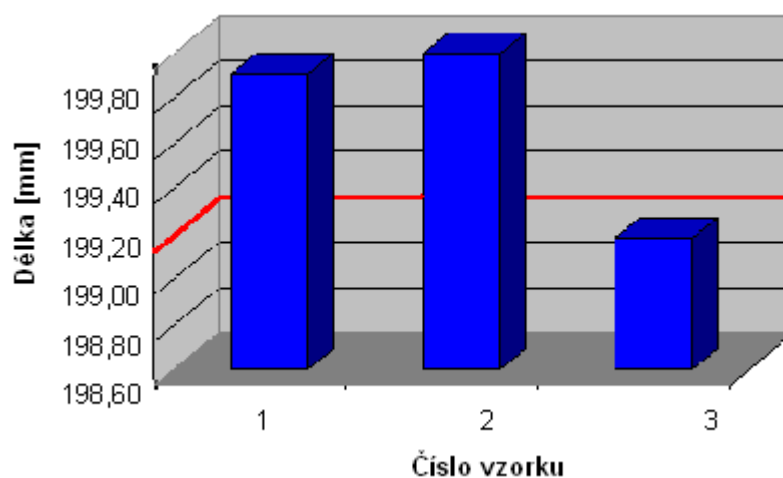
$$l_{v3-200\text{průměrná}} = (l_{v31} + l_{v32} + l_{v33}) / 3 = (198,74 + 199,20 + 199,62) / 3 = 199,18 \text{ mm}$$

$$l_{v1-100\text{průměrná}} = (l_{v11} + l_{v12} + l_{v13}) / 3 = (101,00 + 100,70 + 100,64) / 3 = 100,78 \text{ mm}$$

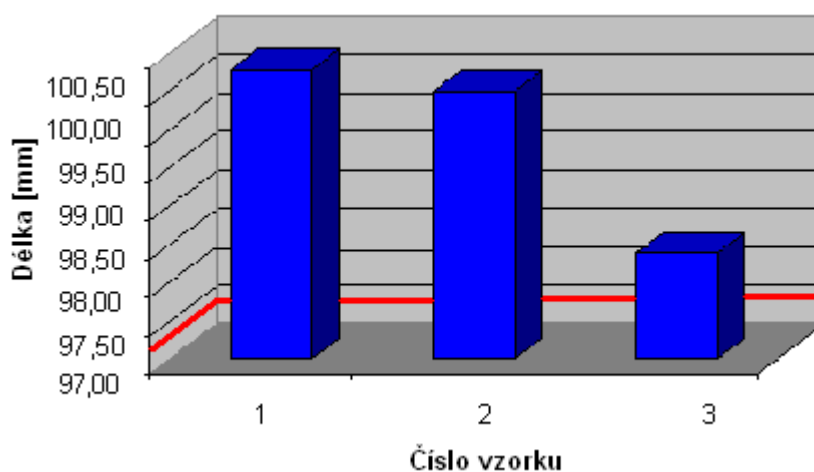
$$l_{v2-100\text{průměrná}} = (l_{v21} + l_{v22} + l_{v23}) / 3 = (100,60 + 100,44 + 100,48) / 3 = 100,50 \text{ mm}$$

$$l_{v3-100\text{průměrná}} = (l_{v31} + l_{v32} + l_{v33}) / 3 = (97,62 + 98,34 + 99,18) / 3 = 98,38 \text{ mm}$$

Graf 7.6 Průměrné hodnoty délky 200 [mm].



Graf 7.7 Průměrné hodnoty délky 100 [mm].



Při srovnávání naměřených průměrných hodnot z tab. 7.10 s hodnotami úchylek z tab. 7.9 uváděných v normě ČSN 9013, je patrné, že u vzorků 1 a 2 nedošlo k výrazným odchylkám od požadovaného rozměru, patří tedy do toleranční skupiny 1, vzorek 3 pak do toleranční skupiny 2.

7.3.9.2 Měření vnějších rozměrů

Tab. 7.11 Naměřené hodnoty vnitřních rozměrů.

	Měření průměru 25 [mm]			Průměrná hodnota průměru [mm]
	1	2	3	
Vzorek 1	24,42	24,40	24,52	24,44
Vzorek 2	24,50	24,54	24,52	24,52
Vzorek 3	24,54	24,68	24,60	24,60

	Měření průměru 30 [mm]			
Vzorek 1	29,50	29,42	29,34	29,42
Vzorek 2	29,70	29,52	29,34	29,52
Vzorek 3	29,60	29,92	29,52	29,68
	Měření průměru 40 [mm]			
Vzorek 1	39,50	39,60	39,24	39,44
Vzorek 2	39,24	39,40	39,40	39,34
Vzorek 3	39,54	39,64	39,64	39,64

$$d_{25v1\text{průměrná}} = (d_{v11} + d_{v12} + d_{v13}) / 3 = (24,42 + 24,20 + 24,52) / 3 = 24,44 \text{ mm}$$

$$d_{25v2\text{průměrná}} = (d_{v21} + d_{v22} + d_{v23}) / 3 = (24,50 + 24,54 + 24,52) / 3 = 24,52 \text{ mm}$$

$$d_{25v3\text{průměrná}} = (d_{v31} + d_{v32} + d_{v33}) / 3 = (24,54 + 24,68 + 24,60) / 3 = 24,60 \text{ mm}$$

$$d_{30v1\text{průměrná}} = (d_{v11} + d_{v12} + d_{v13}) / 3 = (29,50 + 29,42 + 29,34) / 3 = 29,42 \text{ mm}$$

$$d_{30v2\text{průměrná}} = (d_{v21} + d_{v22} + d_{v23}) / 3 = (29,70 + 29,52 + 29,34) / 3 = 29,52 \text{ mm}$$

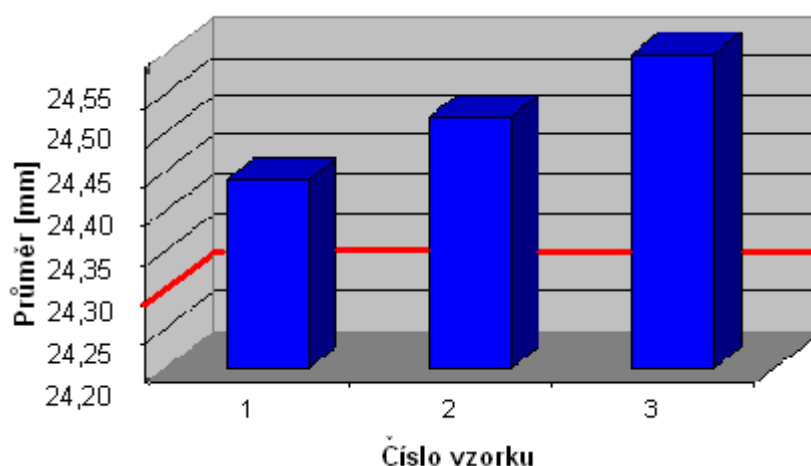
$$d_{30v3\text{průměrná}} = (d_{v31} + d_{v32} + d_{v33}) / 3 = (29,60 + 28,92 + 29,52) / 3 = 29,68 \text{ mm}$$

$$d_{40v1\text{průměrná}} = (d_{v11} + d_{v12} + d_{v13}) / 3 = (39,50 + 39,60 + 39,24) / 3 = 39,44 \text{ mm}$$

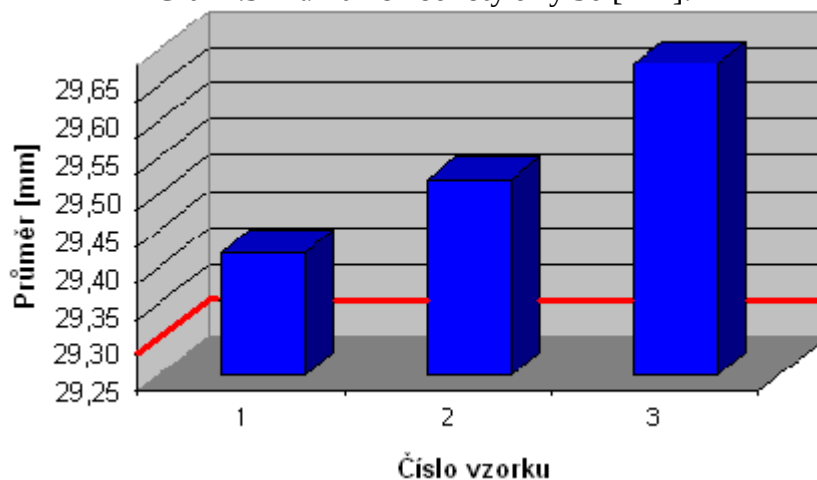
$$d_{40v2\text{průměrná}} = (d_{v21} + d_{v22} + d_{v23}) / 3 = (39,24 + 39,40 + 39,40) / 3 = 39,34 \text{ mm}$$

$$d_{40v3\text{průměrná}} = (d_{v31} + d_{v32} + d_{v33}) / 3 = (39,54 + 36,64 + 39,64) / 3 = 39,34 \text{ mm}$$

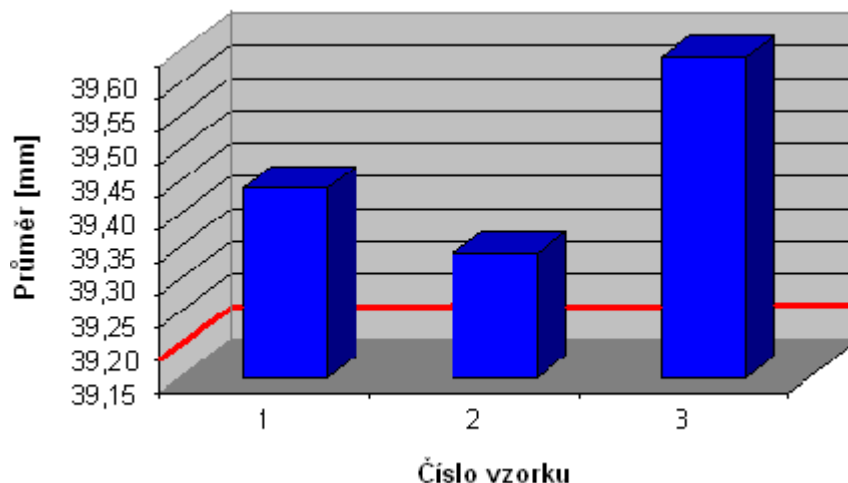
Graf 7.8 Průměrné hodnoty díry 25 [mm].



Graf 7.9 Průměrné hodnoty díry 30 [mm].



Graf 7.10 Průměrné hodnoty díry 40 [mm].



Pro řezání děr o průměru 25mm, 30mm, 40mm můžeme doporučit obě technologie dělení. Mezní úchytky u všech vzorků jsou malé, patří do tolerančního pole 1. Tabulka 7.11 a graf 7.8-7.10.

7.3.10 Hodnocení okují a natavených kapek

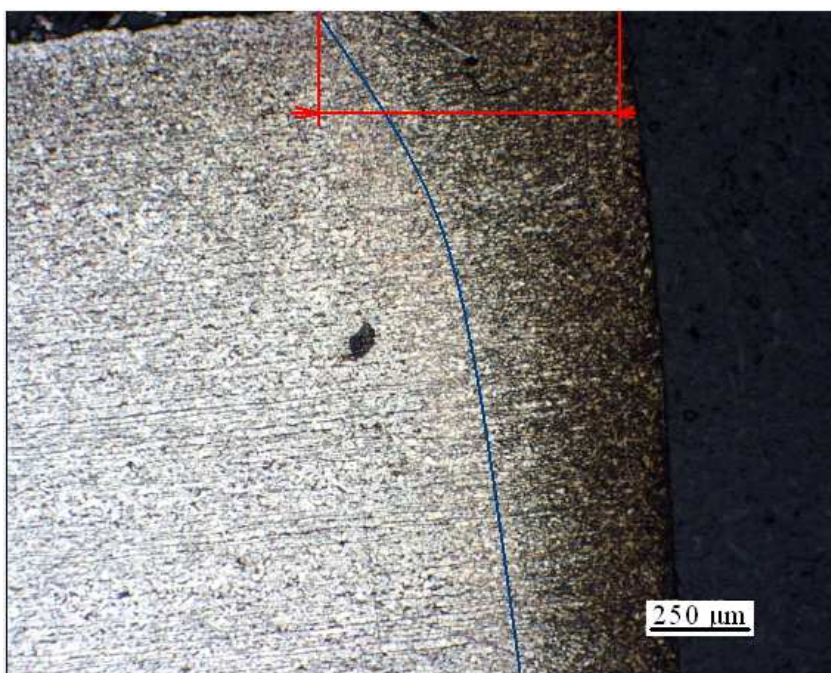
Na vzorcích 1 a 2 se vyskytuje ze spodní strany, podél celé hrany řezu struska - okuje o tloušťce 1,4mm a šířce 2,8 mm. Na vzorku 3 jsou ve stejné části nepravidelné natavené kapky, avšak norma ČSN 9013 nebere v úvahu tyto vady při posuzování jakosti řezů, stejně jako drážkování.



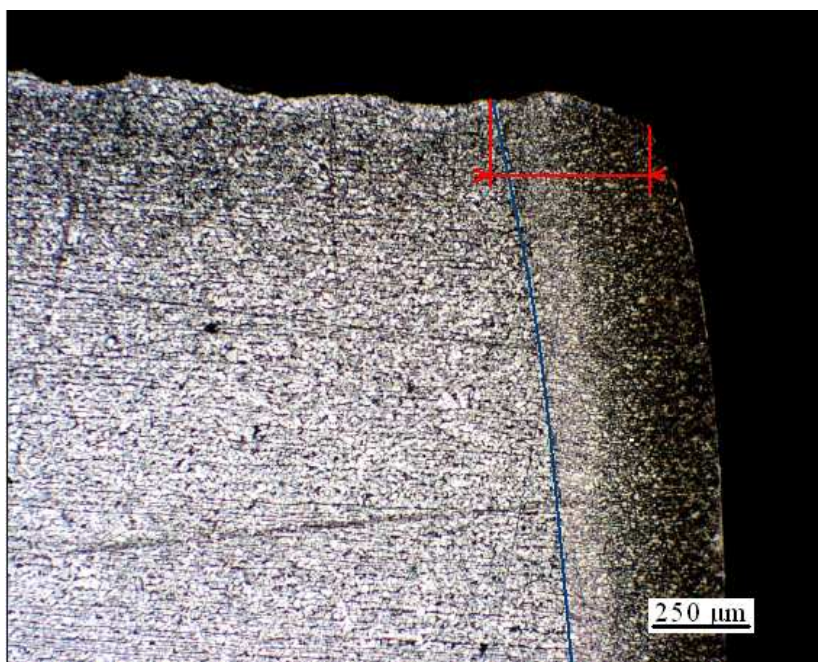
Obr.7.7 Struska.

7.3.11 Hodnocení metalografických výbrusů

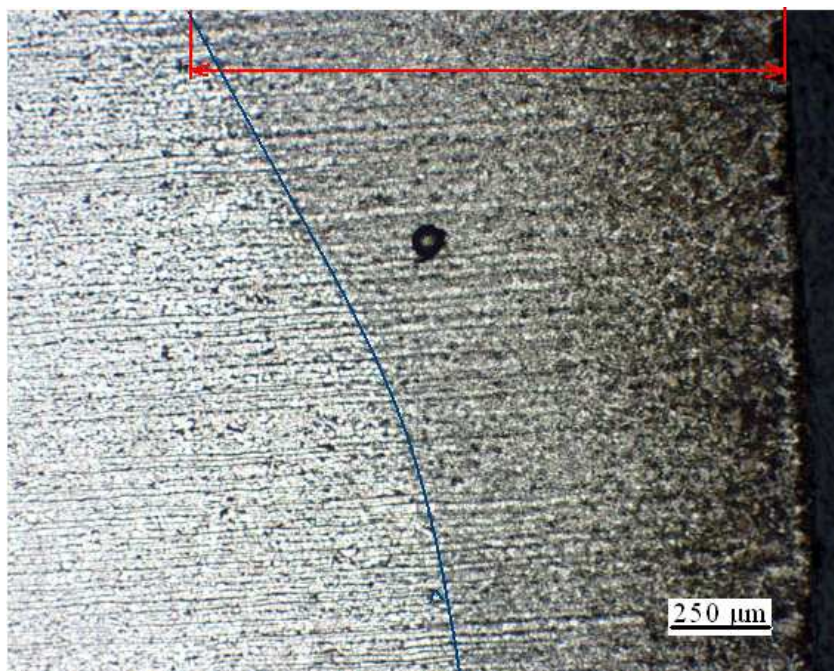
Příprava vzorků a vyhotovení snímků bylo provedeno dne 12.5.2009 paní Jarmilou Houdkovou na Ústavu strojírenské technologie. Výbrusy byly naleptány 2% nitalem. Měření tepelně ovlivněné oblasti bylo provedeno při padesátinásobném zvětšení, v rozích z horní strany řezu (ze strany hořáku). Dá se předpokládat, že hodnota tepelně ovlivněné oblasti v této části bude nejvyšší. Na jednotlivých snímcích (obr 7.8-7.10) je pro lepší viditelnost vyznačena hranice mezi too. a základním strukturou materiálu modrou barvou, červenou barvou je označeno místo nejvyšší hodnoty.



Obr 7.8 Tepelně ovlivněná oblast vzorku 1.



Obr 7.9 Tepelně ovlivněná oblast vzorku 2.



Obr 7.10 Tepelně ovlivněná oblast vzorku 3.

Tab. 7.12 Naměřené hodnoty too.

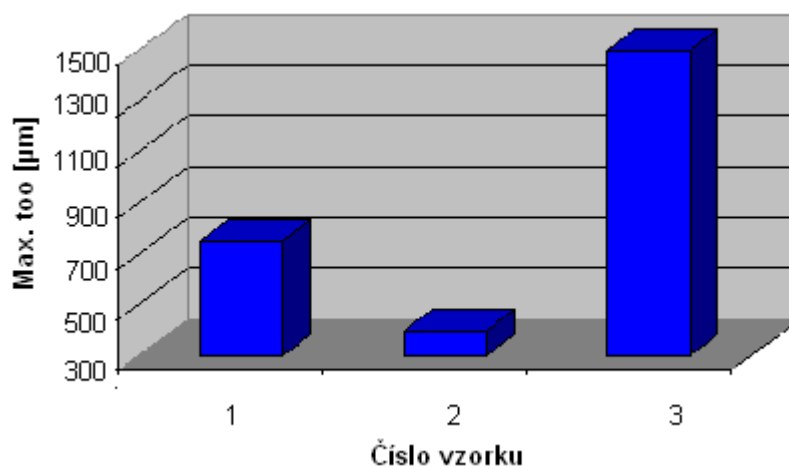
Vzorek	Naměřené hodnoty too			Průměrná too [μm]
1	725	720	740	731,6
2	420	450	430	433,3
3	1505	1490	1480	1491,6

$$too_{v1průměrná} = (too_{v11} + too_{v12} + too_{v13}) / 3 = (725 + 720 + 740) / 3 = 731,6 \text{ μm}$$

$$too_{v2průměrná} = (too_{v21} + too_{v22} + too_{v23}) / 3 = (420 + 450 + 430) / 3 = 433,3 \text{ μm}$$

$$too_{v3průměrná} = (too_{v31} + too_{v32} + too_{v33}) / 3 = (1505 + 1490 + 1480) / 3 = 1491,6 \text{ μm}$$

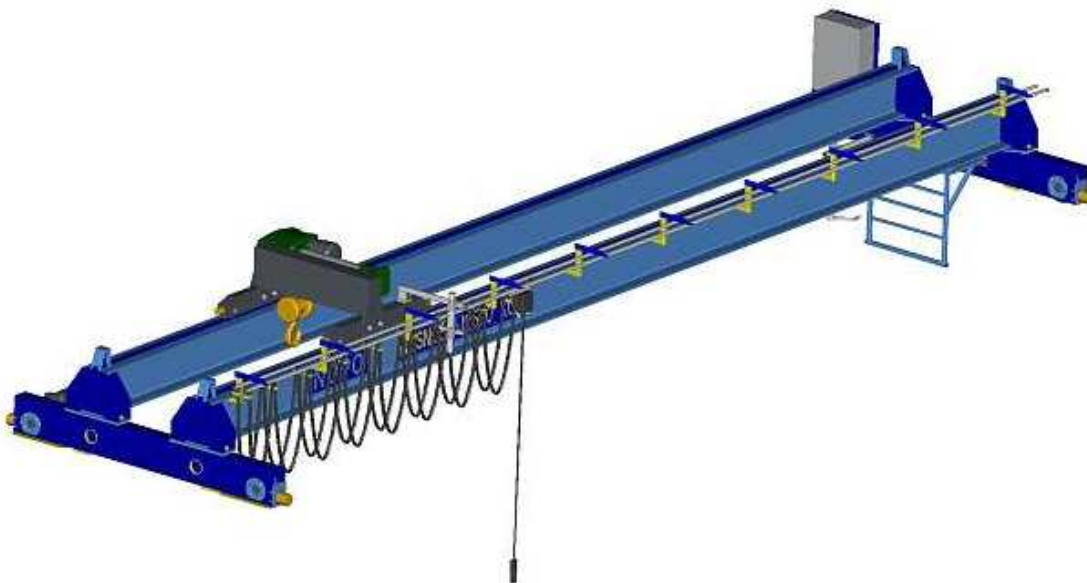
Graf 7.11 Velikost too [μm].



8 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

8.1 Ekonomické porovnání nákladů na zhotovení výpalků

Cílem v této části diplomové práce byl výpočet nákladů řezů na rám halového jeřábu. Jedná se o dvouramenný mostový rám jeřábu o rozpětí 18 metrů a nosnosti 12000kg, který se skládá z pěti segmentu, dvou podélníků (18m), dvou příčníků (6m) a jezdce (obr.8.1). K nařezání všech dílů je zapotřebí provést 531 nápalů a celková délka řezů činí 1126 metrů. Náklady budou vypočteny jak pro plazmovou, tak pro plamenovou technologii řezání. Seznam tvarů výpalků a počet kusů firma z důvodů autorizačních práv neposkytla.



Obr 8.1. Mostový jeřáb.

Při výpočtech nákladů se vycházelo z ceníku firmy Luboš Hertl – Zámečnictví, Golčův Jeníkov, proto ve skutečnosti může dojít k menší odchylce z vypočtené hodnoty. Na cenu výpalků má rozhodující vliv tvarová složitost, velikost výpalku, velikost série a počet nápalů.

Dle firmy Luboš Hertl – Zámečnictví jsou v tabulce uvedeny ceny řezů dle jednotlivých tloušťek plechu za běžný metr řezu, z nichž jsou pak stanoveny celkové náklady dílů rámu.

Tab. 8.1 Výpočet nákladů na zhotovení výpalků plamenem za použití Acetylenu a Apachi.

Tl.mat.[mm]	Kusů	Počet nápalů	Délka obvodu [m]	Cena [Kč] Acetylen	Cena [Kč] Apach
5	12	24	54,87	1694,80	1676,80
8	18	18	12,5	561,00	557,00
10	22	33	179,52	8479,50	8489,50
12	8	8	63,56	3070,80	3049,50
15	45	190	112,00	5868,60	5831,40
20	16	84	27,34	2909,20	2899,40
25	29	34	212,54	12252,54	12181,84

30	20	80	275,65	17565,95	17474,50
35	4	28	23,86	1701,58	1673,76
40	8	32	64,38	4849,00	4840,70
Σ	182	531	1126,22	58952,97	58674,4

Dále bylo provedeno porovnání nákladů na jeden metr řezu dle jednotlivých tloušťek materiálu (viz. příloha 4, 5) a nákladů spojené s provozem (viz. příloha 6) pro technické plyny pro plamenovou technologii (acetylén a Apachi). Vycházelo se z cenové nabídky významnějších dodavatelů technických plynů v ČR z roku 2006, jako je Linde, Air Products a Meeser.

Při porovnání spotřeby plynů, časů, rychlostí, kvality a ceny u kyslíkové technologie mezi plyny Apachi a acetylémem, bylo zjištěno, že:

- doba ohřevu je u acetylénu významně kratší než u propanu,
- cena plynů, propanu tedy Apachi je nižší než cena acetylénu,
- spotřeba plynu na běžný metr řezu je vyšší u propanové směsi,
- při řezání plamenem za použití acetylénu se dosahuje vyšších kvalit řezných ploch,
- rychlost řezání je u Apachi nižší než u acetylénu (za stejného tlaku).

Srovnávání bylo prováděno za stejných podmínek, tedy pro stejný materiál a stejnou tloušťku materiálu (10mm).

Tab. 8.2 Výpočet nákladů na zhotovení výpalků plazmou.

Tloušťka mat.[mm]	Kusů	Počet nápalů	Délka obvodu [m]	Cena [Kč]
5	12	24	54,87	1372,00
8	18	18	12,5	250,00
10	22	33	279,52	6494,96
12	8	8	63,56	2288,48
15	45	190	112,00	4144,00
20	16	84	27,34	1502,00
25	29	34	212,54	17275,20
30	20	80	275,65	31281,50
35				
40				
Σ	150	391	762,33	64608,14

Obecně platí že řezání oceli plazmou je výhodné pro materiály do tloušťky 25mm a plamenové technologie nad 25mm tloušťky materiálu.

Z tabulky 8.1 a 8.2 nelze jednoznačně určit, která z posuzovaných technologií použitých při výrobě rámu mostového jeřábu je levnější (resp. dražší), neboť dělicí plazmové zařízení oslovené firmy neumožňuje dělení materiálů tloušťek nad 30mm.

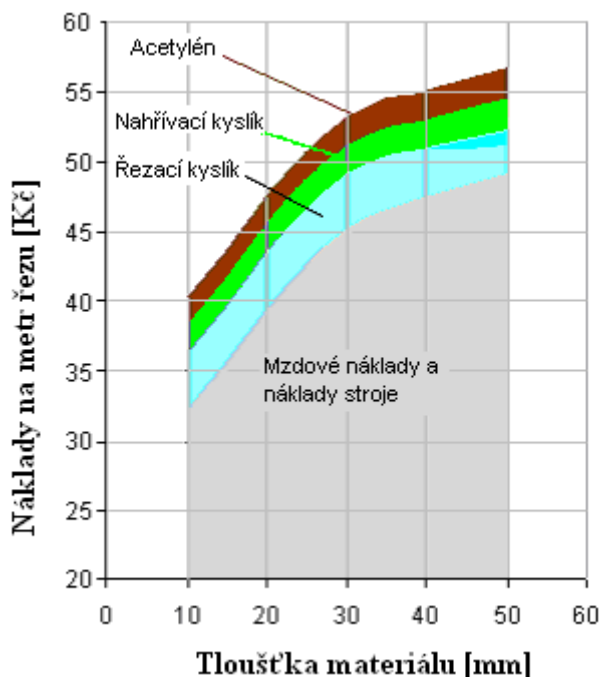
Je ale patrné, že řezání materiálu plazmou nad tuto hranici by bylo ekonomicky značně neefektivní.

V porovnání nákladů na zhotovení výpalků do tloušťky materiálu 30mm, vyšla lépe o 5655 Kč plamenová technologie. Dle firem, které poskytly informace o nákladech, jsou v ceně zahrnuty i odpisy stroje, což znamená, že při pořízení strojního zařízení po pěti letech, kdy budou zaplacen odpisy stroje, budou náklady ještě nižší.

8.2 Struktura nákladů

Struktura jednotlivých položek nákladů je patrná z následujícího grafu 8.1 ^[7].

Graf 8.1 Náklady na řezání plamenem – s acetylénem.



8.3 Ekonomické porovnání nákladů na pořízení dělicího zařízení

Pro ekonomické hodnocení nákladů na pořízení strojů byla oslovena firma Vanad Golčův Jeníkov. Tato firma se dlouhodobě zabývá výrobou CNC strojů jak plazmové tak pro plamenové tvarové řezání materiálu. Vybraný stroj pro posouzení – Vanad Proxima BR 30/120. Portál Proxima umožňuje osazení jak plazmovým zdrojem-zářezem, tak plamenovým systémem. Stroje byly pro hodnocení vybrány záměrně, neboť byl na nich prováděna praktická část diplomové práce a také proto, že jde o tradičního ryze českého výrobce.

Základní parametry strojů a cenové nabídky platné k dubnu 2009 jsou uvedeny níže.

Podrobné popisy a kompletní cenové nabídky včetně montáže a servisu jsou uvedeny v příloze 2 a.3.

8.3.1 Vanad PROXIMA pro kyslíkové řezání



Obr. 8.2 Pálicí stroj Vanad Proxima - plamen,^[10].

Max. řezaná tloušťka mat.:	300 mm
Pracovní rychlost:	10 m/min
Přesuvová rychlost:	15 m/min
Přesnost polohování:	±0.1 mm s korekcí nelinearity
Opakovaná přesnost:	±0.1 mm
Přesnost úhlopříčky:	± 0.5 mm na 1 m
Max. pracovní zrychlení:	800 mm/sec ²
Počet suportů:	4 (plus přídatná zařízení)
Rychlost zvedání hořáků:	1,2 m/min
Základní kapacita paměti:	1,5 GB (možno rozšířit)
Kapacitní regulace výšky hořáku:	± 2 mm, pro plechy do 50 mm
Rozměry polotovaru:	1700 × 3500 až 4200 × 15 000 mm a více

Tab.8.3 Náklady plazmového zařízení

CNC pálicí stroj	1 653 541 Kč
Sekční odsávaný stůl	813 132 Kč
Kompresorová jednotka	164 127 Kč
Odsávání	20 000 Kč
Doprava, montáž, školení	177 384 Kč
Software WRYKRYs	35 000 Kč
Konečná cena pálicího pracoviště (bez DPH)	2 863 148 Kč

8.3.2 Vanad PROXIMA pro plazmové řezání



Obr.8.3 Pálicí stroj Vanad Proxima – plazma ,^[10].

Výkon pohonu:	4 x 350 W – 6 000 ot/min
Maximální pracovní rychlost:	15 m/min
Přednastavená přesuvová rychlost:	25 m/min
Max. přesuvová rychlost při použití optické závory:	45 m/min
Přesnost polohování:	±0,2 mm
Opakovaná přesnost:	±0,1 mm
Přesnost úhlopříčky:	±0,5 mm na 1 m
Max. pracovní zrychlení:	2 0000 mm/sec ²
Rychlost zvedání hořáků:	8,8 m/min plazma
Kapacita volné paměti pro pálicí plány:	cca 1,5 GB
Přesnost nastavení zapalovací výšky plazmy:	±0,1 mm

Plazmový zdroj:

- plazma Hypertherm HPR 130
- vodou chlazený hořák
- plynulá regulace proudového zdroje 30 - 130A, příkon 45 kW
- plazmový plyn O₂, N₂, F₃₅ (65% Ar, 35% H₂), F₅ (95% N₂, 5% H₂) vzduch
- ochranný plyn O₂, N₂, vzduch
- propal 25 mm

Rozměry: 1700 × 3500 až 4200 × 15 000 mm a více

Tab.8.4 Náklady plazmového zařízení.

CNC pálicí stroj	1 703 541 Kč
Plazmový zdroj	912 862 Kč
Sekční odsávaný stůl	813 132 Kč
Kompresorová jednotka	164 127 Kč
Filtrace, odsávání a rekuperace	577 496 Kč
Doprava, montáž, školení	197 384 Kč
Software WRYKRYŠ	35 000 Kč
Konečná cena pálicího pracoviště (bez DPH)	4 403 542 Kč

8.4 Souhrn naměřených a vypočtených hodnot:

Tab.8.5 Souhrnná tabulka ekonomických nákladů.

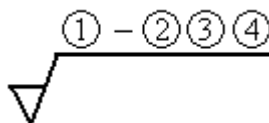
	Plazmové řezání	Kyslíkové řezání
Cena zařízení [Kč]	4 403 542	2 863 143
Náklady na zhotovení výpalků [Kč]	64 608	58 953

Tab.8.6 Souhrnná tabulka naměřených hodnot.

	VZOREK		
	1	2	3
Řezná rychlost [mm/min]	1200	1800	500
Šířka řezné spáry [mm]	2,40	2,42	2,08
Skluz [mm]	1,4	2,3	0,6
Úchylka kolmosti [mm]	Toleranční třída 4	Toleranční třída 4	Toleranční třída 3
Průměrná výška profilu Ra	Toleranční třída 2	Toleranční třída 2	Toleranční třída 1
Natavení horní hrany [mm]	0,2	0,3	0,4
Drážkování	žádné	mírné	žádné
Přímost [mm]	0,25	0,30	0,20
Rozměrové úchylky - délky	Toleranční pole 1	Toleranční pole 1	Toleranční pole 2
Rozměrové úchylky - díry	Toleranční pole 1	Toleranční pole 1	Toleranční pole 1
Velikost tepelně ovlivněné oblasti [μm]	731,6	433,3	1491,6

8.5 Značení stupňů jakosti na výkresech

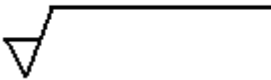
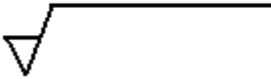
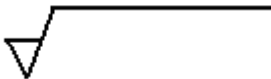
Dle normy ČSN 9013, musí být stupeň jakosti a toleranční třída značená na výkresech dle ISO 1302, pomocí následující značky obr 8.4.



Obr.8.4 Značka stupně jakosti na výkrese, [8].

1- Číslo normy, 2- Číslo tolerančního pole kolmosti, 3- Číslo tolerančního pole průměrné výšky Ra, 4- Číslo tolerančního pole rozměrové úchylky.

Tab.8.7 Značení jakosti vzorků na výkrese

Číslo vzorku	Značení na výkrese
1	ISO 9013- 421 
2	ISO 9013- 421 
3	ISO 9013- 312 

Tab.8.7 Značení jakosti v rohovém razítku na výkrese

Číslo vzorku	Jakost
1	ISO 9013 – 421
2	ISO 9013 – 421
3	ISO 9013 – 312

ZÁVĚR

Cílem diplomového projektu bylo seznámit se s problematikou tepelného dělení běžně používaných uhlíkových ocelí kyslíkovou a plazmovou technologií. Provést experiment - výrobu tvarových součástí a následné technické a ekonomické hodnocení.

Byla provedena literární studie tepelného dělení plazmou a kyslíkem a experiment, při němž byl vyroben jeden vzorek kyslíkovou technologií a dva vzorky technologií plazmovou. Při použití plazmy byl jeden vzorek řezán optimální rychlostí, druhý vzorek rychlostí maximální. Na všech vzorcích, vyrobeny z materiálu S355J2+N, tloušťky 10 mm, byla provedena měření dle ČSN 9013, udávající jakost zhotovených výpalků a povrchů. Souhrnné naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.6, souhrn nákladů na pořízení výpalků a zařízení pracovišť je uveden v tabulce 8.5 v kapitole 8.

Po vyhodnocení všech naměřených hodnot a ekonomických nákladů lze konstatovat:

Obě technologie jsou pro dělení materiálu vhodné.

Plazmovou technologii dosahujeme při optimálních podmínkách řezné rychlosti, podobné kvality řezu jako u technologie kyslíkové. Vážným nedostatkem u plazmy je nedodržení kolmosti při řezání, především při řezání malých otvorů a při řezání vysokou rychlostí, a omezená tloušťka řezaného materiálu. Při řezání plazmou vyšší rychlostí vznikají další vady řezů jako jsou drážkování, velký skluz, dochází i k nepatrnému zvětšení řezné spáry. Vyšší řeznou rychlostí naopak dosahujeme až dvojnásobně nižší hodnotu tepelně ovlivněné oblasti než při optimální rychlosti. Tato technologie je především vhodná pro materiály o tloušťce do 30mm.

Kyslíkovou technologií obecně vykazuje dobré jakosti řezů. Nevýhodou je velikost tepelně ovlivněné oblasti řezů, která dosahuje dvoj až třínásobných hodnot než plazmová technologie. Další nevýhodou je druh řezaného materiálu, můžeme řezat pouze materiály jejichž teplota hoření je vyšší než teplota tavení. Jiné druhy kovových materiálů na rozdíl od plazmy, lze řezat za jiných podmínek nebo nelze řezat vůbec (např. vysokolegovaná ocel, hliník). Kyslíková technologie není z důvodů tvarové stability vhodná pro řezání tenkostěnných materiálů, technologie se používá pro materiály od 5mm do 3metrů. Při ručním způsobu řezání není třeba jiných zdrojů energií.

Při porovnávání nákladů na pořízení výpalků součástí mostového jeřábu vyšla o 5655 Kč levnější technologie kyslíková.

Při porovnávání nákladů na pořízení nového dělicího zařízení pro obě technologie, vyšla o 1 540 399 Kč levněji technologie kyslíková.

Z výsledků tedy vyplývá, že každá technologie má své specifické využití. Při použití kyslíkové technologie pro zhotovení výpalků součástí mostového jeřábu, bylo dosaženo úspor 8,7%, cena nového zařízení vychází rovněž ve prospěch kyslíkové technologie o 34%. Kvalita výpalků, a jakost povrchů je za optimálních podmínek řezání srovnatelná, rychlost řezání je u plazmy několikanásobně vyšší.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:

1. KUBÍČEK, J., KANDUS, B., AMBROŽ, O. *Technologie svařování a zařízení*. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395s., ISBN 80-85771-81-0.
2. Kolektiv autorů *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: ZERROS, 1999. 295s., ISBN 80-85771-85-3.
3. BURKOVIC, J. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.
4. ONDŘEJÍČEK, P. *Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektrodou*. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
5. MINAŘÍK, V. *Tepelné dělení materiálu*. 1.vyd. Praha : České vysoké učení technické, 1993, 50s. ISBN 80-01-01028-7.
6. www.hypertherm.com
7. www.linde-gas.cz
8. ČSN EN ISO 9013 *Svařování a příbuzné procesy - Stupně jakosti a tolerance rozměrů řezů při řezání kyslíkem a plazmou*. Praha: Český normalizační institut, 1999
9. GERYK, P. *Porovnání technických a ekonomických parametrů řezání laserem a plazmou: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 65s., 7 příloh. Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
10. www.vanad.cz
11. KRŇÁK, R. *Kapesní příručka svařování, řezání, pájení*. 2.vyd. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1973. 717 s.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
b	[cm]	Střední šíře spáry
c_1, c_2	$[J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrné teplo materiálu
d	[mm]	Šířka řezné spáry
D	[mm]	Průměr díry
E_1	[J]	Základní hladina energie
E_2	[J]	Excitovaná hladina energie
f_{12}	[Hz]	Frekvence kmitání
f	[mm]	Rozteč skluzových čar
h	[J.s]	Plancova konstanta
I_{EO}	[A]	Proud na oblouku
k	[-]	Součinitel vyjadřující podíl vypařeného kovu
l	[mm]	Délka strany kusu
m_a	[-]	Atomová hmotnost
n	[mm]	skluz
q_1, q_2	$[J \cdot g^{-1}]$	Tep. energie kovu při tepl. tavení, resp.
Q	$[J \cdot g^{-1}]$	množství tepla potřebného k odtavení jednotkového objemu materiálu z místa řezu
r	[mm]	Nastavení horní hrany
Ra	$[\mu m]$	Průměrná výška profilu
Tl.,s	[mm]	Tloušťka materiálu
T_1	[K]	Teplota tavení
T_2	[K]	Teplota varu
u	[mm]	Úchylka kolmosti
U	[V]	Napětí na oblouku
v_r	$[mm \cdot min^{-1}]$	Max. řezná rychlost
η	[-]	Účinnost přeměny energie
ρ	$[g \cdot cm^{-3}]$	Hustota řezného materiálu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Výkres součásti.
Příloha 2	Cenové nabídky strojů Vanad pro kyslíkovou technologii.
Příloha 3	Cenové nabídky strojů Vanad pro plazmovou technologii.
Příloha 4	Náklady na metr řezu acetylenem.dle tloušťky materiálu
Příloha 5	Náklady na metr řezu propanem (Apachi) dle tloušťky materiálu
Příloha 6	Porovnání nakladu různých dodavatelů plynů.
Příloha 7	Atest ocel S355J2+N.
Příloha 8	ČSN41 1503.
Příloha 9	Parametry plazmového hořáku plazmy.
Příloha 10	Zakázková průvodka vzorku.