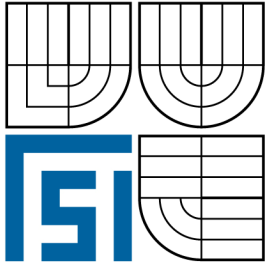


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ

OPTIMIZATION OF PLASMA CUTTING PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB VACULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Vacula

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Optimalizace parametrů plazmového řezání.

v anglickém jazyce:

Optimization of plasma cutting parameters.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvalita řezné plochy při tepelném dělení materiálu plazmou je závislá na nastavených provozních parametrech řezacího zařízení a tloušťce a chemickém složení oceli. Optimální parametry řezání zaručují kromě vhodné geometrie řezu také minimální šířku tepelně ovlivněné oblasti.

Cíle diplomové práce:

Na základě experimentálního měření stanovit optimální technologické parametry plazmového řezání oceli. Porovnat metodu plazmového řezání s řezáním kyslíkem jak z hlediska kvality, tak z hlediska ekonomického.

Seznam odborné literatury:

1. TURŇA, M. Špeciálne metódy zvarovania. 1.vyd. Bratislava: Alfa. 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9
2. <http://hypertherm.com>
3. Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. 1.vyd. Ostrava: ZEROSS. 2001. 396 s. ISBN 80-85771-81-0
4. ČSN EN ISO 9013

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 6.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

VACULA Jakub: Optimalizace parametrů plazmového řezání.

Diplomová práce prezenčního studia magisterského programu – Strojní inženýrství, obor strojírenská technologie. Akademický rok 2008 / 2009. Fakulta strojního inženýrství VUT Brno, Ústav strojírenské technologie.

Diplomová práce se zabývá tepelným dělením materiálu, konkrétně plazmovým řezáním. Sleduje vliv provozních parametrů tohoto procesu na výslednou kvalitu řezu a cílem je tyto parametry z kvalitativního hlediska optimalizovat. Experiment byl proveden na plazmovém řezacím zařízení Fine Focus 800 firmy KJELLBERG s použitím materiálu S 690 QL. Na základě literární studie problematiky tepelného dělení materiálů bylo též popsáno porovnání plazmového řezání s metodou dělení materiálu kyslíkem jak z hlediska kvality, tak z hlediska ekonomického.

Klíčová slova: plazma, tepelné dělení, tepelně ovlivněná oblast, ocel S 690 QL

ABSTRACT

VACULA Jakub: Optimization of plasma cutting parameters

Diploma thesis of the attendance engineer's study – Mechanical Engineering, specialization Machinery Technology. Academic year 2008/2009. Faculty of Mechanical Engineering of University of Technology in Brno, Institute of the Manufacturing Technology.

The Diploma thesis is concerned with the thermal division of a material, concretely by the plasma cutting. It monitors the operational parameters influence of this process to the result quality of cut and the purpose is to optimize these parameters from the qualitative standpoint. The experiment was executed at the plasma cutting equipment Fine Focus 800 of the company KJELLBERG with the utilization of the material S 690 QL. On the base of the literary study of the thermal division of the materials problems it was also described the comparison of the plasma cutting with the method of the division of materials by the oxygen, both from the point of view of the quality, and from the economical point of view.

Key words: plasma, thermal cutting, heat-affected zone, steel S 690 QL

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VACULA, J. *Optimalizace parametrů plazmového řezání..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 51 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 29.5.2009

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1. ÚVOD.....	8
1.1 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	9
2. FYZIKÁLNÍ TEORIE PLAZMY [1] [2].....	10
2.2 ELEKTRICKÝ OBLOUK A JEHO STABILIZACE [1] [5]	11
3. PRINCIP A KONSTRUKCE PLAZMOVÝCH ŘEZACÍCH HOŘÁKŮ [1] [2] [3] [5]	11
4. TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ PLAZMOU	17
4.1 STABILIZAČNÍ MÉDIA [2] [3] [4]	17
4.2 JEDNOTLIVÉ FÁZE ŘEZÁNÍ [3].....	19
4.3 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY PLAZMOVÝCH ŘEZACÍCH ZAŘÍZENÍ [5]	20
4.4 VOLBA OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ ŘEZÁNÍ [1] [3] [10]	20
4.5 BEZPEČNOST PRÁCE PŘI ŘEZÁNÍ PLAZMOU [5] [10]	22
5. POROVNÁNÍ METOD ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM A PLAZMOU.....	23
5.1 TEPELNÉ DĚLENÍ MATERIÁLU KYSLÍKEM [2] [3] [13] [14].....	23
5.2 POROVNÁNÍ KYSLÍKOVÉHO A PLAZMOVÉHO ŘEZÁNÍ [12] [14]	25
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
6.1. CÍL A PROGRAM EXPERIMENTU	30
6.2 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ [16] [17].....	31
6.3 ŘEZANÝ, EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL [15].....	35
6.4 PRŮBĚH EXPERIMENTU A PARAMETRY ŘEZÁNÍ.....	36
7. VYHODNOCENÍ KVALITY ŘEZU [11].....	39
8. METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ VZORKŮ	43
8.1 MAKROSKOPICKÉ HODNOCENÍ VZORKŮ - TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST.....	43
8.2 MIKROSTRUKTURA.....	46
8.3 MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI	48
8.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ	49
9. ZÁVĚR.....	50

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

1. ÚVOD

Aplikace široké škály nejrůznějších materiálů používaných v průmyslové praxi je podmiňována, krom jiného, i zvládnutím zpracování problematiky a technologie jejich dělení, a to jak dělení mechanického, tak i tepelného. Způsoby tepelného dělení materiálů si pro svoji jednoduchost našly, a stále nachází, v moderní průmyslové výrobě velmi široké uplatnění a jen stěží si dnes můžeme představit jakékoliv průmyslové odvětví bez jejich využití.

Tepelné dělení materiálů lze v rámci strojírenské výroby zařadit mezi operace přípravy materiálu. Pod tímto pojmem rozumíme technologii řezání, pracující na principech lokálního tavení, spalování nebo odpařování, případně kombinace těchto jevů, kdy energie potřebná k inicializaci procesu a jeho průběhu je dodávána různými tepelnými zdroji. Obecně lze tepelné dělení materiálů aplikovat na celou škálu konstrukčních materiálů: nelegované a nízkolegované oceli, vysokolegované oceli a slitiny na bázi niklu, neželezné kovy a jejich slitiny, vysoce reaktivní materiály a jejich slitiny citlivé na kyslík, nekovové materiály (plasty, kompozity, dřevo, papír, sklo, ...). V průmyslové praxi jsou používány tři základní metody tepelného řezání: kyslíkem, plazmou a laserem. Všeobecně jsou tyto metody považovány za produktivnější ve srovnání s běžně používanými mechanickými způsoby dělení a řezání materiálů. Nasazením metod používajících koncentrovaný zdroj energie, tj. především laseru a plazmy, se tepelné dělení stalo prostředkem nejenom k dělení materiálu, ale i způsobem umožňujícím tvorbu zcela nových konstrukčních variant. Intenzivní rozvoj strojírenství vede k používání stále kvalitnějších a různorodějších materiálů. Ne všechny lze však dělit klasickým řezáním kyslíkem, který je dosud jedním z nejpoužívanějších způsobů tepelného dělení. Jsou tedy hledány cesty vedoucí k rozšíření možností řezatelnosti mnoha nových kovových i nekovových konstrukčních materiálů a k dosažení větších řezacích rychlostí, vedoucích ke zvýšení produktivity a snížení tepelného ovlivnění materiálu. Nezanedbatelná je též snaha o dosažení vysoké kvality řezné plochy, přesnosti řezání, možnosti řezání libovolných tvarů a v neposlední řadě snaha o snížení ekonomické náročnosti řezacího procesu a pořizovacích nákladů zařízení.

Jedním ze způsobů řešení této problematiky je použití řezání plazmou, které se začalo uplatňovat především u elektricky vodivých materiálů neřezatelných nebo obtížně řezatelných kyslíkem. Technologií tepelného dělení vzduchovou plazmou, při které teplota řezacího média dosahuje až 30 000 K, je dosahováno uspokojivých výsledků, srovnatelných v řadě případů s řezáním laserem i při řezání tvarově složitých dílů. Tato technologie je pro uživatele perspektivní především díky svým technicko-ekonomickým přednostem jako je: vysoká efektivita, možnost dělit všechny elektricky vodivé materiály, relativně dobrá kvalita řezných ploch a úzká tepelně ovlivněná oblast řezaného materiálu, vysoká provozní spolehlivost zařízení a jeho poměrně snadná obsluha a mobilita.

Především díky své nenáročnosti, možnosti řezat širokou škálu různých materiálů a kvalitě řezných ploch i hran, je tato technologie hojně využívána jak ve velkých výrobních nebo skladových provozech, tak i ve vybavení menších dílen, kde nachází zvláště vhodné uplatnění. Na základě současného ekonomického trendu, zohledňujícího nízké pořizovací a provozní náklady, lze v blízké budoucnosti předpokládat ještě větší rozšíření této progresivní technologie.

Fyzikální podstata a teorie plazmy není předmětem této práce a proto je jí věnována pozornost pouze v rozsahu nezbytně nutném k objasnění zákonitostí stabilizovaného plazmového paprsku.

1.1 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je seznámení se s problematikou tepelného dělení materiálu plazmou. Porovnání této metody s metodou dělení materiálu kyslíkem jak z hlediska kvality, tak z hlediska ekonomického.

Kvalita řezné plochy při tepelném dělení materiálu plazmou je kromě tloušťky a chemického složení oceli závislá na provozních parametrech řezacího zařízení. Na základě experimentálního měření bude sledován vliv těchto technologických parametrů na geometrii a kvalitu řezu a na šířku tepelně ovlivněné oblasti materiálu. Cílem je stanovit optimální technologické parametry, které povedou k nejkvalitnějšímu řezu a nejmenší tepelně ovlivněné oblasti. Tyto hodnoty budou sledovány a optimalizovány na řezacím zařízení, kterým budou nařezány také zkušební vzorky pro vyhodnocování experimentálních zkoušek v laboratoři.

2. FYZIKÁLNÍ TEORIE PLAZMY [1] [2]

Plazma je zvláštní stav plynu, kdy se tato látka stává elektricky vodivou. Dodáváme-li plynu energii, zvyšuje se kinetická energie jeho molekul a atomů, a tím i jeho teplota. Se stoupající teplotou roste pohyb molekul, až může nastat stav, kdy při vzájemných srážkách bude nárazová energie větší, než vazební energie molekuly a ta se rozštěpí na atomy. Tento proces se nazývá disociace plynu. Při teplotě 10 000 K je v disociovaném stavu už 99% molekul. Příklad disociace dvouatomové molekuly plynu lze vyjádřit schématem:



Současně s disociací probíhá také ionizace plynu. Při dalším dodávání tepelné energie roste intenzita srážek, až při dosažení určité energetické hladiny dojde k odštěpení elektronu z obalu atomu. Vznikne tak záporný volný elektron a kladný iont. Podle počtu odštěpených elektronů se určuje stupeň ionizace. Stupeň ionizace (podíl volných elektronů) je závislý na druhu plynu a teplotě. Podle stupně ionizace může být plazma plně nebo částečně ionizované. Pro představu, při 30 000 K tvoří plazmu dusíku 60% volných elektronů. Úplná ionizace nastává až při teplotách kolem 100 000 K. Schématický příklad ionizace helia:



Netečné plyny jako helium, argon, neon, mají uzavřenou valenční sféru, proto u nich probíhá pouze ionizace a je u nich pro zionizování potřeba méně energie. Plazma je tedy soustava kladně a záporně nabitých částic a částic neutrálních. Důležitou vlastností plazmy je kvazineutralita. To znamená, že počet kladně nabitých částic je v jednotce objemu stejný jako záporně nabitých a globálně se plazma k okolí chová jako elektromagneticky neutrální. Uvnitř plazmy ovšem neutralita fungovat nemusí. Plazma obsahuje volné elektrické náboje, proto je elektricky vodivé. Díky elektrické vodivosti působí na plazma, na rozdíl od běžných plynů, silně elektrické a magnetické pole.

Plazma lze tedy definovat jako soustavu elektricky nabitých a neutrálních částic, v různých stavech a formách, které na sebe navzájem působí. V této práci se vzhledem k řešené problematice budeme dále zabývat pouze plazmatem vznikajícím v elektrickém oblouku, tedy technickým plazmatem.

2.2 Elektrický oblouk a jeho stabilizace [1] [5]

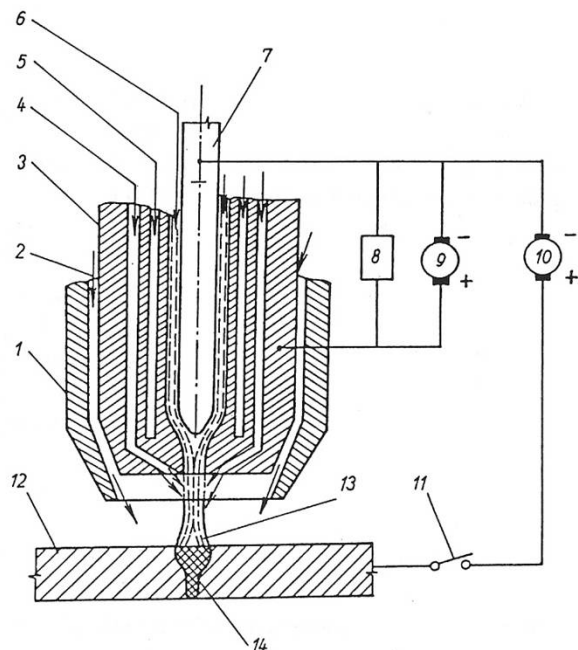
Elektrickým obloukem se rozumí elektrický výboj v plynu schopný samostatné existence. Oblouk se skládá ze 3 základních částí: Katodová oblast, anodová oblast a pozitivní sloupec oblouku, tvořený plazmatem s dobrou elektrickou vodivostí. Průchod proudu obloukem je zprostředkován především elektrony uvolněnými termickou emisí z povrchu zahřáté katody, které jsou urychlovány směrem k anodě. Gradient intenzity el. pole je ve sloupci oblouku relativně nízký a na jeho hodnotu má vliv velikost proudu protékajícího obloukem, druh plynu a jeho tlak, materiál elektrod, chlazení oblouku, vnější magnetické síly. Druh plynu, ve kterém oblouk hoří, má vliv na napětí na oblouku.

Oblouky podle druhu napájení rozdělujeme na stejnosměrné a střídavé. Tyto můžeme rozdělit dále na oblouky volně hořící a stabilizované. V průmyslové praxi se pro náš obor zájmu, tedy řezání materiálu, využívá oblouku stabilizovaného. Stabilizací se rozumí vymezení prostoru, ve kterém oblouk hoří, a její vliv se projevuje především usměrněním výbojové dráhy. Díky ochlazování vnějších vrstev stabilizovaného oblouku jsou jeho charakteristické znaky zúžení a vyšší teplota než u volně hořícího oblouku. Většina zařízení pro plazmové řezání je napájena stejnosměrným proudem většinou s přímou polaritou a proudění plazmatu je urychlováno směrem k anodě.

Elektrický oblouk lze v plazmovém hořáku stabilizovat několika způsoby: stěnou, plynem, vodou, vzduchem a jejich kombinací.

3. PRINCIP A KONSTRUKCE PLAZMOVÝCH ŘEZACÍCH HOŘÁKŮ [1] [2] [3] [5]

Zdrojem tepla pro plazmové řezání je energie plazmového paprsku, který vzniká ionizací plazmového plynu v elektrickém oblouku a je koncentrována stěnou trysky hořáku, ochranným (fokusačním) plynem nebo vodním vírem. Důsledkem zkoncentrování proudu plazmatu je získání vysoké hustoty energie (až $2 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) a následně vysokých teplot (podle použitého stabilizačního média 9 000 až 30 000 K). Tento proud plazmatu vystupuje z trysky hořáku s velkou kinetickou energií nadzvukovou rychlostí 1500 až 2300 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, kterým je řezaný materiál taven a tavenina vyfukována z řezné spáry pryč. Proces je tedy založen na tepelném a dynamickém účinku plazmatu. Od svařování plazmou se proces odlišuje větší výstupní rychlostí plazmového proudu a větším množstvím přiváděného plynu do hořáku. Vlastnosti procesu jsou dány výkonem proudového zdroje (125 A, 300 A, 600 A), konstrukcí hořáku a typem procesu (jednoplynová, dvouplynová, s vodním vírem, HD plazma) a druhem plazmového a fokusačního plynu.



- 1 – hubice pro přívod ochranného plynu
- 2 – ochranný plyn
- 3 – tryska hořáku
- 4 – fokusační plyn
- 5 – vodní chlazení
- 6 – plazmový (stabilizační) plyn
- 7 – elektroda
- 8 – vysokofrekvenční zdroj napětí (ionizátor)
- 9 – zdroj pomocného el. oblouku (nezávislý)
- 10 – zdroj hlavního el. oblouku (závislý)
- 11 – spínač
- 12 – řezaný materiál
- 13 – plazmový paprsek
- 14 – roztavený kov v řezné spáře

Obr. 3.1 – Schéma plazmového hořáku a jeho zapojení [2]

Nejdůležitější části hořáku, o kterých je nutné se zmínit, jsou elektroda a tryska.

Elektroda:

Je to nejdůležitější a tepelně nejvíce namáhaná součást hořáku. Bývá připojena na záporný pól jako katoda. Zprostředkovává přívod proudu ke sloupci oblouku a tvoří tepelně izolační přechod mezi horkým plazmatem a ostatními částmi elektrického obvodu oblouku. Z důvodu velkého tepelného namáhání musí být chlazena. Elektrody u systémů do 100 A používající jeden plyn jsou ve většině případů chlazeny vzduchem nebo plazmovým plynem. U systémů s vyšším řezacím proudem, tzv. „dvouplazmových systémů“, jsou elektrody chlazeny kapalinou. Elektroda je nejčastěji z mědi nebo měděné slitiny (nejmodernější ze stříbra), ve které je nalisována emisivní vložka. Tato vložka musí být z materiálu s velmi vysokou teplotou tavení, jako wolfram (čistý nebo legovaný thoriem). Wolfram se dá ale použít pouze v případě použití neaktivního plazmového plynu ($\text{Ar} + \text{H}_2$, N_2). Při použití kyslíku nebo vzduchu ke stabilizaci by wolframová elektroda v jejich agresivní, oxidační atmosféře měla příliš krátkou životnost. Proto se u těchto aktivních plynů používá v elektrodě emisivní vložky z hafnia, která má vysokou teplotu tavení a vydrží velké zatížení při vysokých teplotách plazmového oblouku.

Tryska:

Slouží k zúžení elektricky ionizovaného plynu do úzkého svazku vysoce koncentrovaného plazmového oblouku. Bývá zkonstruována z mědi s povrchem plátovaným niklem pro zvýšení životnosti. Při malém řezacím proudu do 30A, se tryska může dotýkat řezaného materiálu. Při vyšších proudech musí být tryska od materiálu v určité vzdálenosti, čímž se zabrání jejímu poškození v důsledku tepelného záření či kaskádového oblouku. Tryska je taktéž velmi tepelně namáhaná, proto musí být intenzivně chlazena. Zejména při tzv. nezávislém zapojení hořáku, kdy tryska tvoří anodu. V tomto zapojení má tryska délku 10-12mm. Při tzv. závislém zapojení je tryska kratší, neboť jinak hrozí nebezpečí, že oblouk zevnitř na trysku přeskočí. Důležitým parametrem trysky je její výstupní průměr, který odpovídá za fokusaci plazmového paprsku. Čím menší průměr, tím užší paprsek.

Pro vytvoření plazmového paprsku se používá různých typů plazmových hořáků. Konstrukce plazmového hořáku je závislá na mnoha faktorech jako např. druh stabilizace, způsob chlazení, způsob jeho využití aj. Podle toho, jak oblouk v hořáku vzniká, lze tyto rozdělit na:

1.) Hořák s nezávislým (nepřeneseným) obloukem.

Oblouk v tomto případě hoří mezi elektrodou (katoda) a tryskou hořáku (anoda), při zapojení zdroje proudu 9 z obrázku 3.1. Oblouk je tedy zcela nezávislý na řezaném materiálu. Toto zapojení se používá pro řezání kovů jenom výjimečně, běžně jsou používány pro řezání elektricky nevodivých materiálů. Tryska je extrémně tepelně namáhána, a proto musí být intenzivně chlazena. Jako plazmového plynu lze použít pouze inertní plyn, nebo s minimem aktivních plynů a obsah vodíku nesmí překročit 10%, jinak by životnost trysky byla velmi krátká.

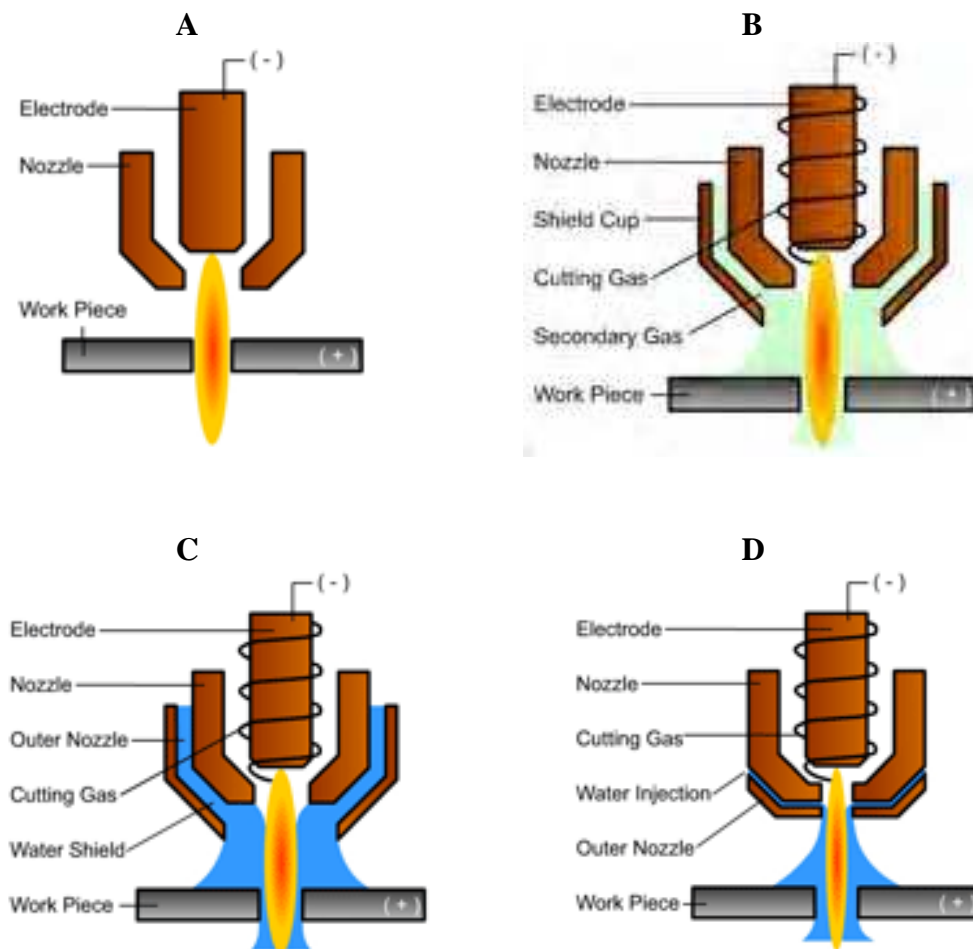
2.) Hořák se závislým (přeneseným) obloukem.

Oblouk vzniká mezi elektrodou (katoda) a základním materiálem, který je zapojený jako anoda, při zapojení zdroje proudu 10 podle obrázku 3.1. Přítomnost sloupce oblouku a anodové oblasti v řezné spáře mění podstatně tepelné poměry ve srovnání s nezávislým obloukem. K rychlosti posuvu ovlivňující kvalitu řezu přistupují další vlivy jako charakteristika zdroje a intenzita ofukování oblouku médiem. Tryska je v tomto případě méně tepelně namáhána a má delší životnost. Hořáky s tímto zapojením mají lepší celkovou účinnost a používají se pro svařování, řezání a navařování.

3.) Hořák s kombinovaným zapojením.

Je kombinací obou dříve uvedených, při zapojení obou zdrojů 9 i 10 z obrázku 3.1. Používá se dvou oblouků. Jeden je pomocný (nezávislý) a vzniká pomocí vysokofrekvenčního výboje v mezeře trysky a hoří mezi elektrodou a tryskou, která tvoří anodu. Plazmový plyn, který proudí mezerou trysky, se v oblasti nezávislého oblouku rychle zahřeje na tak vysokou teplotu, že dojde k jeho ionizaci, dostane se do plazmatického stavu a je vyfukován z trysky. Tento pomocný plazmový oblouk rychle ionizuje prostředí mezi spodní hranou hubice hořáku a řezaným materiálem a umožní snadné vytvoření hlavního, nezávislého oblouku po přiblížení hořáku k materiálu na dostatečnou vzdálenost a zapnutí spínače. Nezávislý pomocný oblouk hoří většinou i po zapálení závislého oblouku.

Typy plazmových hořáků:



Obr. 3.2 – Varianty řezacích hořáků [12]

- A – Hořák pro konvenční řezání jedním plynem (vzduch, dusík), nejčastěji u ručních hořáků
- B – tzv. Dual gas plazma: Proces používá dvou plynů, jeden plazmový a druhý ochranný. Ochranný plyn chrání oblouk před atmosférou, což způsobuje čistší okraj řezu. Nejoblíbenější způsob plazmového řezání, široká možnost použití.
- C – Hořák s použitím ochranného proudu vody: Varianta dual gas hořáku s použitím vody místo plynu. Proces zajišťuje lepší chlazení trysky a řezaného materiálu, což zapříčiňuje lepší kvalitu řezu u korozivzdorných ocelí. Pouze pro mechanizované aplikace.
- D – Hořák s injekčním přívodem vody: Hořák využívá jednoho plazmového plynu s radiálním, nebo injekčním, vířivým přívodem vody přímo na oblouk. Díky tomu dochází ke značnému zúžení plazmového paprsku a vysoké kvalitě řezu. Pouze pro mechanizované aplikace.

Pro výsledek řezání je důležitá hustota proudu plazmatu, průměr paprsku a jeho maximální teplota. Snahou je dosažení co největšího zúžení paprsku a udržení tohoto zúžení i po výstupu z trysky. Tím je řezná spára užší a taky teplota v ose paprsku z důvodu zachování energetického toku vzrůstá. Záleží tedy na stupni fokusace paprsku. Je vyvinuto několik řešení fokusace proudu plazmatu, která jsou založena na mechanicko-fyzikálním ochlazovacím efektu vystupujícího proudu plynů. K fokusaci paprsku dochází ještě před výstupem z trysky hubice. Primárně je využit tvar trysky, která paprsek zužuje mechanicky pomocí svého tvaru. Ochlazení vnějších vrstev proudícího plynu chlazeným pláštěm hubice vytvoří podél stěn vrstvu poměrně chladného, neionizovaného plynu, sníží se elektrická vodivost vnějších vrstev a zmenší se průřez vodivého jádra. Nemá-li tedy klesnout přenášený výkon, musí se zvýšit teplota paprsku. Velmi důležité je zachovat fokusaci i po jeho výstupu z hubice, aby bylo dosaženo výhod, které tato fokusace přináší.

Nejjednodušším případem, který se používá, jsou ochranné atmosféry s vysokým ochlazovacím účinkem. Obklopují-li paprsek víceatomové plyny jako vodík, dusík, které se obtížně ionizují, nemůže docházet k jejich ionizaci, ale jen k disociaci molekul, čímž tato disociace v okrajové zóně sloupce plazmatu má značný význam. Tento disociační proces dovoluje přenést teplo potřebné k tavení na materiál. Vodík potřebuje k disociaci velké množství tepla, které odebírá z okrajové vrstvy plazmového paprsku, ochlazuje ji, elektrická vodivost se snižuje. Tím se vytvoří kolem plazmového paprsku plášť, kde nemůže dojít snadno k ionizaci a paprsek se nerozšiřuje, naopak zužuje.

K dosažení fokusace se taky používá fokusační plyn, který paprsek geometricky mění. Fokusační plyn se přivádí (jak je vidět na obrázku 3.1) pod určitým úhlem k plazmovému paprsku, který tím zaostřuje, zužuje. Přivádí se tak, aby plazmový paprsek protínal ještě před jeho stykem s řezaným materiálem.

Z funkčního hlediska se do hořáku přivádějí 3 druhy plynů:

- **plazmový**, je přiváděn do elektrického oblouku, kde dochází k jeho ionizaci a disociaci a vytváří tak plazmový paprsek. (argon, vodík, dusík, kyslík, vzduch)
- **fokusační**, zaostřuje paprsek plazmatu po jeho výstupu z trysky hořáku. (argon, dusík nebo směs argonu a vodíku, popř. argonu a dusíku)
- **ochranný**, obklopuje paprsek plazmatu a pracovní místo na obrobku a chrání je před účinkem atmosféry. (argon, dusík)

K základním fyzikálním parametrům plazmy, které jsou kritériem výkonnosti řezacích hořáků, patří teplota a rychlost plazmového paprsku. Teplotní poměry v paprsku jsou ovlivněny druhem použitého plynu, geometrickými poměry v hořáku a konstrukčním uspořádání katody a anody. Teplota plazmy je určována zpětnými vazebnými procesy, při kterých je teplo uvolňováno. Charakterem těchto rekombinačních procesů, energetickými parametry plazmy, druhem plynu a jeho kinetickou energií je dána výše teploty paprsku.

Střední teplotu lze stanovit za určitých zjednodušujících podmínek pomocí rovnice 3.1.

$$T_{str} = \frac{E.I}{\pi.\alpha.d.l} \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi.\alpha.d.l}{C_p.Q_m}\right) \right] \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.1)$$

kde: T_{str} - střední teplota plazmy [$^{\circ}\text{C}$]
 E - střední gradient poklesu napětí na délce oblouku [V]
 I - proud el. oblouku [A]
 α - součinitel sdílení tepla od plazmatu do kanálu trysky [$\text{W.m}^{-2}.\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 d - průměr trysky, v níž hoří oblouk [mm]
 c_p - měrná tep. kapacita plazmového plynu [$\text{J.kg}^{-1}.\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]
 Q_m - hmotnostní průtok plazmového plynu [kg.s^{-1}]

Střední výtokovou rychlost dusíkového a argonvodíkového plazmového paprsku při výstupu z trysky lze vypočítat ze vztahu 3.2.

$$w = \frac{Q_m}{\pi.R^2.\rho} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (3.2)$$

kde: Q_m - hmotnostní průtok plazmového plynu [kg.s^{-1}]
 R - poloměr výstupního otvoru anody plazmového hořáku [m]
 ρ - průměrná hustota plazmatu [kg.m^{-3}]

4. TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ PLAZMOU

4.1 Stabilizační média [2] [3] [4]

Pro řezání má největší uplatnění stabilizace plyny kombinovaná se stabilizací stěnou.

a) Stabilizace plynem (argon, vodík, dusík, kyslík, a jejich kombinace)

Nejčastěji se používá kombinace argon + vodík. Argon díky své nízké ionizační energii zajišťuje dobré podmínky pro zapalování a stabilitu oblouku.

Vodík má mimořádně vysokou tepelnou vodivost, což se příznivě projevuje na přenosu tepla na řezaný materiál. Kombinací argonu s vodíkem lze dosáhnout optimálních výsledků s ohledem na řezné rychlosti a kvality řezu u většiny materiálů, zejména vhodné pro řezání vysokolegovaných ocelí, niklu, mědi a dalších kovů.

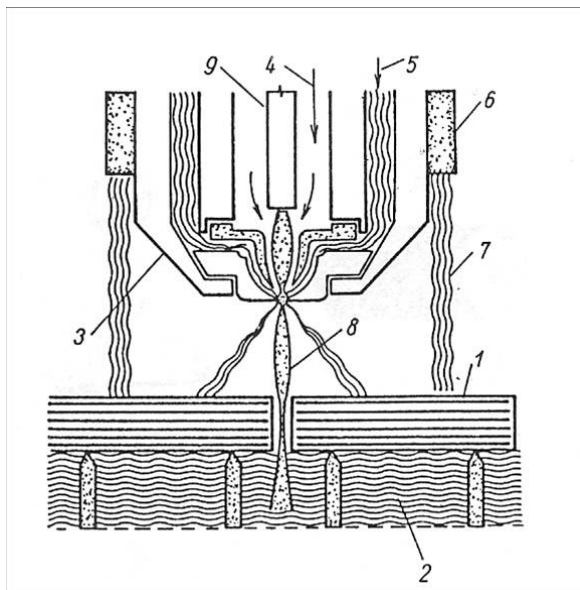
Dusíková plazma se používá nejvhodněji pro řezání vysokolegované oceli velkých tloušťek. Konstrukčním uspořádáním hořáku se k okrajovým vrstvám plazmového paprsku tangenciálně přivádí voda (někdy oxid uhličitý). Vytváří se vodní vír, který ochlazuje vnější vrstvy plazmy, a dochází k disociaci vody, čímž se dosahuje jejího zúžení a zvýšení teploty. Při použití argonu s dusíkem není uspokojivá kvalita řezu, neboť struska je vlivem toho, že chybí kyslík, málo tekutá a ulpívá na spodní hraně řezu. Při použití dusíku je pozitivní dlouhá životnost elektrody.

Kyslíková plazma je velmi podobná vzduchové, má však vyšší entalpii a hustotu. Kyslík dává vysokou rychlost řezání, čisté řezy bez ulpívajících oxidů a zvýšení kvality řezu s malým deviačním úhlem a jemnou strukturou povrchu. Použití především pro uhlíkovou ocel.

b) Stabilizace vodou, příp. kombinace plyn+voda:

Hořák s vodní stabilizací se více osvědčuje při stříkání plazmatem. Ke stabilizace je použita voda. Hořáky v tomto případě mívají robustnější konstrukci a je s nimi horší manipulace.

Pro řezání korozivzdorných ocelí se někdy používá hořáku s vodní sprchou. Jedná se o kombinaci stabilizace voda+ plyn (N_2). Na hořáku je upevněn prstenec, do něhož se přivádí voda, která tvoří kolem plazmového svazku sprchový plášť. Přívod vody se dostává k okrajovým vrstvám plazmového paprsku a tím se díky ochlazení dosáhne jeho zúžení a navíc se disociací vody ve vodík a kyslík vytváří vhodná plynová směs. Tato technologie přináší výrazné zlepšení kvality povrchu řezných ploch a vysokou řezací rychlost. Řezaný materiál je umístěn tak, že spodní strana se dotýká vodní hladiny (tzv. vodní lůžko). Výhoda je v oblasti hygieny práce, ale i technologické. Vodní clonou jsou odváděny vznikající škodlivé, toxické plyny a snižuje se hlučnost i záření do okolí. Řezaný materiál zůstává studený, což příznivě ovlivňuje šířku TOO a snižuje pnutí deformace plechu. Úpravou hořáku lze řezat i pod vodou asi do 10m.



- 1- dělený materiál
- 2- voda
- 3- hubice plazmometu
- 4- plazmový plyn (N_2)
- 5- voda
- 6- vnější plášť hubice pro přívod vody
- 7- vodní sprcha- clona
- 8- plazmový paprsek
- 9- wolframová elektroda

Obr. 4.1- Princip plazmového hořáku s vodní sprchou [2]

c) Stabilizace stlačeným vzduchem:

V současnosti nejčastěji používaná koncepce plazmových řezaček. Používají se téměř pro všechny materiály, především uhlíkovou ocel do 40mm. Aby se zlevnil provoz řezání konstrukčních ocelí, byly vyvinuty hořáky, u kterých se používá ke stabilizaci oblouku vzduch. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa) o vysokém průtočném množství až 130 l/min. Část kyslíku ze vzduchu se zúčastňuje exotermické reakce se železem a zvyšuje rychlost řezání. Určité zvýšení rychlosti oproti argonovodíkovému řezání lze přičíst i příznivým vlastnostem dvouatomových plynů, kdy dochází k uvolňování tepla rekombinací atomu v molekuly a současně vyššímu tepelnému obsahu vzduchového plazmatu ($N_2 + O_2$). Zvyšování průtoku stabilizačního plynu, což je u vzduchu ekonomicky únosné, způsobuje intenzivnější zúžení sloupce oblouku, a tím snížení teploty povrchových vrstev sloupce plazmatu, což má za následek větší rychlost řezání, užší řeznou spáru a lepší kvalitu řezných ploch. Díky kyslíkové oxidaci na chladnější spodní hraně řezu se netvoří pevně lpící krápníky z nataveného kovu. Hlavní úskalí vzduchové plazmy je rychlé opotřebení dílů vystavených oxidaci, především elektrody.

4.2 Jednotlivé fáze řezání [3]

1. Předfuk

Před zapálením vlastního plazmového oblouku se spouští předfuk plazmového plynu. Ten je směřován do dvou různých oblastí. V prvním případě je veden vnitřní tryskou a kolem elektrody ven z řezacího hořáku. Toto vzduchové proudění tvoří vysoce objemový cirkulující oblak, který je ionizován elektrickým proudem a tvoří plazmový paprsek. Druhou oblastí, kam je plazmový plyn směřován, je vnější chladicí oblast plazmového hořáku. V tomto případě plazmový plyn působí jako chladicí médium. Odvádí teplo vznikající v hořáku, přispívá ke zvýšení životnosti součástí a může přispívat i k fokusaci plazmového oblouku. Předfuk plynu trvá obvykle kolem 2 sekund.

2. Pilotní oblouk

Po uplynutí doby předfuku je zapálen tzv. pilotní oblouk mezi elektrodou a tryskou vysokým napětím o vysoké frekvenci. Pilotní oblouk usnadňuje zapálení vlastního řezacího oblouku. Pilotní oblouk trvá podle konstrukce stroje 2 až 3 sekundy. Jeho nevýhodou je tepelné namáhání trysky. Její životnost je kromě jiného dána i počtem startů a délkou hoření pilotního oblouku.

3. Startování

K nastartování plazmového oblouku je nutné, aby se pilotní oblouk vodivě spojil s elektricky uzemněným řezaným materiálem. Při přiblížení řezacího hořáku k materiálu se oblouk automaticky přeneseme na řezaný předmět a je zapálen řezací oblouk o vysokém proudu a relativně nízkém napětí. Startování je nutno provádět ve správné poloze. Při velkém přiblížení může roztavený kov poškodit trysku hořáku. Naopak při příliš velké vzdálenosti od materiálu může vzniknout nežádoucí kaskádový oblouk.

4. Řezací oblouk

Při hoření řezacího oblouku je velmi důležitá pro dosažení kvalitního řezu plynulá řezací rychlost. Tato skutečnost má také zásadní vliv na životnost součástí řezacího 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. V situaci, kdy je zapotřebí startovat uprostřed plechu, je vhodné mít hořák nastaven pod úhlem 45° k preventivní ochraně trysky před odletujícími kapkami roztaveného kovu.

5. Dofuk

Po ukončení řezání probíhá tzv. dofuk plynu. Jeho účelem je chlazení řezacího hořáku, elektrody, trysky a prodlužování jejich životnosti. Obvykle trvá asi 20 sekund.

4.3 Technologické parametry plazmových řezacích zařízení [5]

Parametry plazmového řezacího zařízení lze rozdělit do tří kategorií. První kategorie zahrnuje, uživatelem většinou neovlivnitelné, nebo jen obtížně ovlivnitelné, vnitřní parametry zařízení – jedná se o parametry konstrukční.

Ve druhé kategorii jsou parametry pohotově zaměnitelné uživatelem – tzv. technologické parametry. Mezi ně patří:

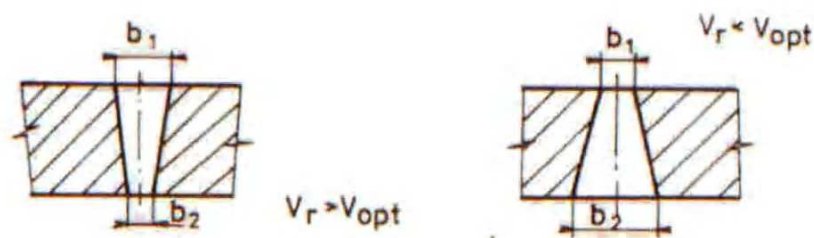
- a) Výstupní výkon – diskrétně, nebo plynule měnitelný od nuly po maximum. U plazmových řezacích zařízení je nastavitelné proudové zatížení.
- b) Vzdálenost nastavení – vzdálenost mezi výstupní tryskou a děleným materiálem. Volí se co možná nejmenší, aby nedocházelo k rozptylu paprsku s ohledem na minimální vzdálenost trysky od materiálu z důvodu ochrany trysky před roztaveným kovem. Toto opatření taky umožní lepší dodržení tvarové přesnosti děleného materiálu.
- c) Rychlost posuvu hořáku, tzv. rychlost řezání. Je závislá na děleném materiálu, jeho tloušťce, požadované kvalitě řezu aj. Optimální rychlost posuvu se často získává z experimentálních hodnot.
- d) Tlak plazmového plynu
- e) Objemový průtok plynu – závisí na průměru výstupu trysky a hodnotě tlaku plynu.

Třetí kategorie zahrnuje parametry výrobku, řezaného materiálu. Ten je charakterizován vstupními a výstupními parametry. Vstupními parametry jsou druh materiálu, chemické složení, tloušťka a tvar, chemické, fyzikální a jiné vlastnosti. Nás však budou zajímat především výstupní parametry, jako interakce plazmový paprsek-řezaný materiál. Jsou to parametry: tvar a rozměr součástí, velikost tepelně ovlivněné oblasti, drsnost řezné plochy, vlnitost, tvrdost, šířka řezné spáry, změny chemického složení, nerovnosti povrchu, množství ulpívající strusky.

4.4 Volba optimálních parametrů řezání [1] [3] [10]

Optimální řezné parametry jsou takové, které vedou k uspokojení požadavků uživatele. Jako hlavní požadavky jsou obvykle uváděny kvalita řezných ploch, geometrická přesnost řezů, úzká řezná spára, co nejmenší oblast tepelného ovlivnění materiálu a v neposlední řadě produktivita práce, spojená s rychlostí řezání.

Na kvalitu řezu má vliv rozložení tepelného toku v řezné spáře. Dobré kvality řezu se dosáhne rovnoměrným přívodem tepla po celé tloušťce materiálu, kdy se anodová skvrna nachází na spodním okraji řezu. To dává optimální jakost řezné plochy a kolmé hrany bez otřepů. Hlavní vliv na správném rozložení tepla má řezací rychlost. Optimální rychlost je obvykle určována experimentálně. Je-li posuv příliš rychlý, oblouk se nestíhá natáhnout až ke spodní hraně a horní části řezu je odevzdáváno více tepla. To způsobuje širokou spáru na horním okraji a zkosení řezné spáry do tvaru V. Naopak při příliš nízké rychlosti dochází k přebytku vneseného tepla do materiálu, zejména u spodní hrany. Výsledkem je příliš široká spára, ještě rozšířená v dolní části a široká tepelně ovlivněná oblast.



Obr. 7.2 – Tvar řezné spáry: b – šířka spáry, v_r – řezná rychlost [3]

Důležitým parametrem je vzdálenost ústí trysky od materiálu při řezání, především u větších řezacích výkonů. Z hlediska dodržení fokusace paprsku je tendence snižovat tuto vzdálenost. S rostoucí vzdáleností klesá hloubka protavení. Při větších řezacích výkonech je naopak nutnost držet hořák v určité minimální výšce kvůli ochraně trysky proti rozstříkujícímu se natavenému materiálu. Optimální výška souvisí s řezacím proudem a tloušťkou materiálu. Pohybuje se od 2,5 do 7 mm. Hořák vyžaduje přesné vedení konstantní výšky nad materiálem. Každá úchylnka od ideálního stavu vyvolává změnu napětí na hořáku a tím změnu výsledků řezání. Konstantní výšku zajišťuje systém, který pohybuje hořákem ve vertikální ose na základě údajů pocházejících ze zařízení. Způsobů kontroly je více, ale nejčastěji je využíván jev změny napětí na hořáku v nelineární závislosti výšky hořáku nad materiálem.

Šířka řezné spáry závisí na řezné rychlosti, na vzdálenosti trysky od materiálu a na výstupním průměru trysky. Při optimálním seřizení je šířka 1,5 až dvojnásobek průměru trysky.

Šířka tepelně ovlivněné oblasti je závislá na množství vneseného tepla do materiálu, což souvisí především s řeznou rychlostí. Hloubka tepelně ovlivněné oblasti vykazuje u plazmového řezání poměrně přijatelných hodnot. U moderních plazmových zařízení s vysokým stupněm fokusace plazmového paprsku se pohybuje v závislosti na tloušťce řezaného materiálu od 1 do 5 mm, což je asi polovina toho co u řezání kyslíkem.

Metoda plazmového řezání má i svoje komplikace vyplývající ze samotné fyzikální podstaty média kdy dochází k tvarové nepřesnosti. Při větších tloušťkách řezaného materiálu se neubráníme určitému vydutí řezné plochy – nepřesnost kolmosti. Díky tendenci plazmy podřezávat vznikají při vypalování otvorů o malém průměru vady, kdy bývá otvor stažen a na spodní hraně má menší průměr. Bod zapálení a bod ukončení řezu přináší taktéž kvalitativní potíže. Při zapálení dochází místně k natavení materiálu, které je větší než následující řezná spára. To se řeší přesunutím zápalného i ukončovacího bodu mimo finální produkt.

4.5 Bezpečnost práce při řezání plazmou [5] [10]

Provoz a údržba plazmových řezacích zařízení s sebou nese i potenciální riziko nebezpečí úrazu pracovníka a možnost poškození zařízení. Proto, podobně jako u jiných průmyslových technologických procesů, musí být i u plazmového řezání dodržována bezpečnostní ustanovení pro práce s plazmovými technologiemi. Existuje široká škála metod a ochranných pomůcek, které tato rizika minimalizují nebo zcela eliminují.

Hlavní zdravotní rizika při svařování a dělení materiálů:

- **Ultrafialové a infračervené záření:** Ultrafialové a infračervené záření se vyskytuje ve všech typech obloukového svařování a plazmového řezání. Viditelné světlo může poškodit sítnici, ultrafialové vyzařování může způsobit tzv. "nablýskání v očích" a úžeh. Kvalitní svařovací kukla je nejlepším preventivním prostředkem před zářením.
- **Popáleniny:** Popáleniny bývají nejčastěji způsobeny rozstříkem rozžhaveného kovu z tavné nebo řezné lázně. *Způsoby osobní ochrany* - pro ochranu těla je bezpodmínečně nutné použít dobrý, nehořlavý pracovní oděv.
- **Dýmy, zplodiny, aerosoly:** Část materiálu, který se svařuje nebo řeže, se v důsledku vysokých teplot odpařuje. K dýmu který vzniká, se přidávají nečistoty z vrstev na materiálu, např. barva, čisticí prostředky, oleje a plyn, který případně používáme. Vznikající dýmy, aerosoly a plyny mají rozličné chemické složení, vždy však jsou zdraví škodlivé. *Způsoby osobní ochrany* - zplodiny a kouř lze odvést mnoha způsoby. Nejefektivnějším způsobem je centrální odsávání každého pracoviště nebo používání mobilních odsávacích jednotek s mechanickou i chemickou filtrací.
- **Hlučnost:** Vysoká hlučnost, které je člověk vystaven po dlouhou dobu, způsobuje trvalé poškození sluchu. Úroveň hlučnosti závisí na pracovním prostředí a metodě řezání. Při plazmovém řezání se stlačeným plynem se hladina hluku pohybuje až kolem 110 dB.
- **Další nebezpečí při řezání plazmou** může číhat ve vysoké teplotě oblouku nebo vysokému napětí.

5. POROVNÁNÍ METOD ŘEZÁNÍ KYSLÍKEM A PLAZMOU

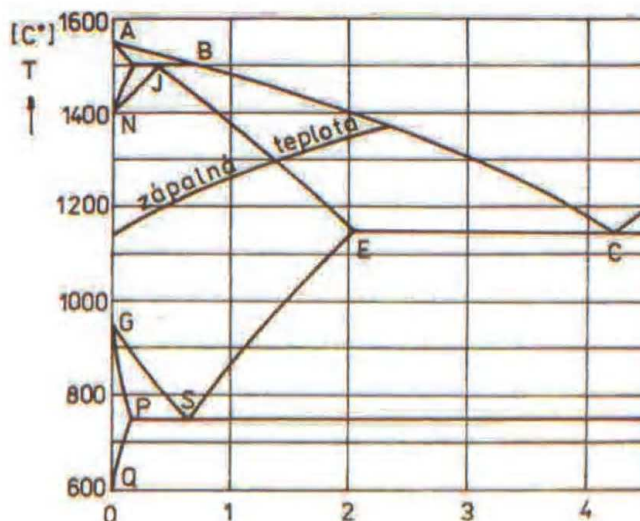
5.1 Tepelné dělení materiálu kyslíkem [2] [3] [13] [14]

Řezání kyslíkem patří k nejstarším a nejrozšířenějším metodám tepelného dělení materiálu, zejména pro uhlíkové oceli. Podstatou této metody je spalování řezaného materiálu, předehřátého na zápalnou teplotu nahřívacím plamenem.

Použitelnost metody:

Ne každý konstrukční materiál používaný ve výrobě lze tepelně dělit kyslíkem. Použití metody je omezeno samotným principem oxidace kovu. Musí být splněny základní podmínky řezatelnosti kyslíkem:

- Zápalná teplota řezaného kovu musí být nižší, než jeho teplota tavení (viz obr.5.1) Není-li splněna tato podmínka, nedochází k hoření kovu, ale pouze k jeho odtavení a povrch je pak velmi nekvalitní.
- Při hoření musí být vyvinuto dostatečné množství tepla, aby došlo ke krytí tepelných ztrát odvodem tepla a reakce mohla samovolně pokračovat.
- Materiál se musí během řezání plynule předehřívát v celé řezané tloušťce, minimálně na zápalnou teplotu.
- Teplota tavení strusky musí být nižší, než teplota tavení řezaného kovu a musí být natolik tekutá, aby byla snadno odstranitelná přetlakem proudícího kyslíku z řezné spáry.



Obr. 5.1- Závislost hodnoty zápalné teploty na obsahu uhlíku u oceli [3]

Uvedeným podmínkám pro řezatelnost vyhovují z běžně používaných materiálů pouze železné kovy s omezeným obsahem legur. V praxi lze tedy kyslíkem efektivně řezat především konstrukční, uhlíkové, popřípadě nízkolegované oceli. Její zápalná teplota je v rozmezí 1150 až 1300 °C podle obsahu uhlíku a ostatních prvků,

teplota tavení nad 1500°C. Shoří-li 1 kg železa, uvolní se asi 4800 KJ tepla, což spolu s přehřevem stačí, aby reakce samovolně pokračovala. Teplota tavení vzniklé strusky je 1350 až 1400 °C, je tedy oproti nižší, než teplota tavení řezaného kovu. Neželezné kovy, vysokolegovaná ocel a šedá litina uvedené podmínky nesplňují, a proto je kyslíkem řezat nelze.

V některých případech, především u značně znečištěných materiálů struskou, nebo jinými nekovovými vměstky, se řeže kyslíkem s přidáváním ocelového prášku. To umožňuje řezat i materiály běžně kyslíkem neřezatelné. V oblasti menších tloušťek nepatří tato metoda k nejrychlejším, nicméně kvalita řezu a jedinečnost při řezání velkých tloušťek jí zajišťuje stabilní místo ve strojírenství. Výhodou metody je téměř neomezená tloušťka řezaného materiálu.

Princip řezání kyslíkem:

Proces spočívá v přehřátí řezaného materiálu na zápalnou teplotu (1150 °C pro železo) a následném přivedení kyslíku pod tlakem, který zajistí spalování kovu a vyfukování spalin z vytvořené řezné spáry. Zápalná teplota je teplota, při které kov intenzivně reaguje s kyslíkem a za jednotku času je množství uvolněného tepla větší, než tepla odvedeného. U ocelí se zápalná teplota mění především na obsahu uhlíku. Zdrojem energie pro proces řezání je jednak nahřívací plamen tvořený spalováním hořlavého plynu v kyslíku a exotermická reakce mezi prvky obsaženými v oceli a kyslíkem. Teplo z nahřívacího plamene nestačí energeticky pokrýt celý průřez řezu. U větších tloušťek (cca nad 30 mm) narůstá význam tepla vznikajícího z probíhající reakce mezi kyslíkem a materiálem. Množství tepla, které tato reakce vyvine, musí stačit na ohřev okolního materiálu na zápalnou teplotu.

Základní parametry, které nás zajímají u tepelného dělení - rychlost řezání a kvalita řezu, jsou ovlivněny souborem faktorů: úroveň stroje, kvalita a zkušenosti obslužného personálu, typ řezacího hořáku a trysky, čistota a tlak řezacího kyslíku, druh hořlavého plynu či správné nastavení parametrů procesu. Za předpokladu kvalitního stroje a jeho zkušené obsluhy je význam soustředěn do kombinace tryska – kyslík – hořlavý plyn. Řezací kyslík ovlivňuje proces zásadním způsobem. Jde především o jeho čistotu, tlak a průtočné množství danou tryskou. Pro získání kvalitních řezů je potřeba používat vysoce čistý kyslík min. 99,5%.

Hořlavý plyn je zdrojem podstatné části energie procesu. Rozhodujícími vlastnostmi hořlavého plynu jsou rychlost hoření, výkon v primárním pásmu spalování a teplota plamene. Tyto vlastnosti významně ovlivňují dobu ohřevu materiálu na zápalnou teplotu, v kombinaci s tryskou rychlost řezání, velikost tepelného ovlivnění a deformace materiálu. Jako topný plyn se používá např. acetylen, vodík, propan, MAPP. Ideální a nejpoužívanější je acetylen, který má největší rychlost hoření a tím vytváří největší koncentraci tepla.

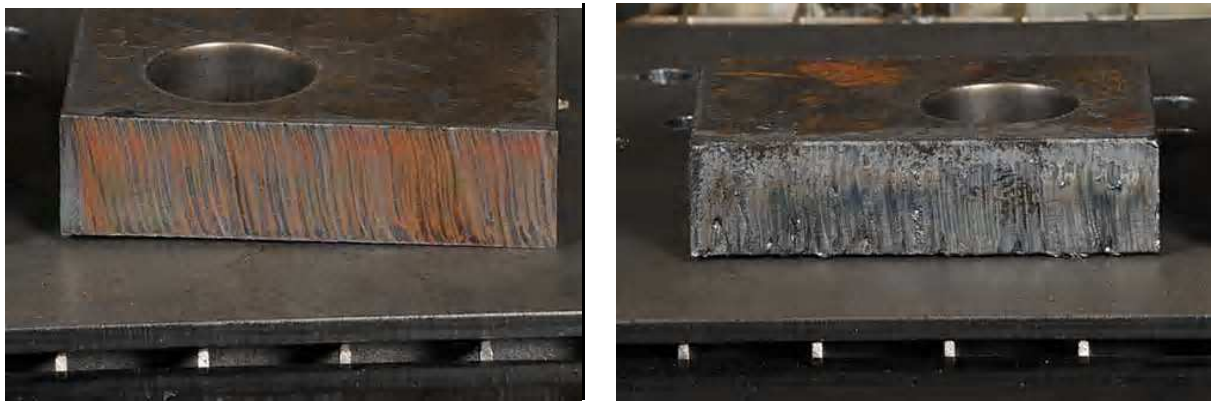
5.2 Porovnání kyslíkového a plazmového řezání [12] [14]

Při porovnávání metod je zájem soustředěn především na hodnocení kvality řezu, použitelnost metody pro různé materiály a ekonomické hledisko, které je spjata především s rychlostí řezání.

Z hlediska použitelnosti metody nabízí plazma pestřejší nabídku materiálů. Lze jí řezat prakticky všechny elektricky vodivé materiály. Kvalitní tvarové řezy řeže plazma asi do tloušťky 120mm pro ocel, dělicí řezy u největších výkonů až do cca 180mm. Použitelnost kyslíkového řezání je omezena jeho samotným principem (viz výše), a proto je metoda vhodná pouze k řezání nízkolegované konstrukční oceli s teoreticky neomezenou tloušťkou.

Porovnání kvality řezu je zřejmé z obrázků:

Řezná plocha u plazmového řezu je hladká a bez znečištění struskou, kdežto u kyslíkového řezu je natavená plocha hrubá se sporadickou struskou.



Obr. 5.2 – Porovnání kvality řezu [12]

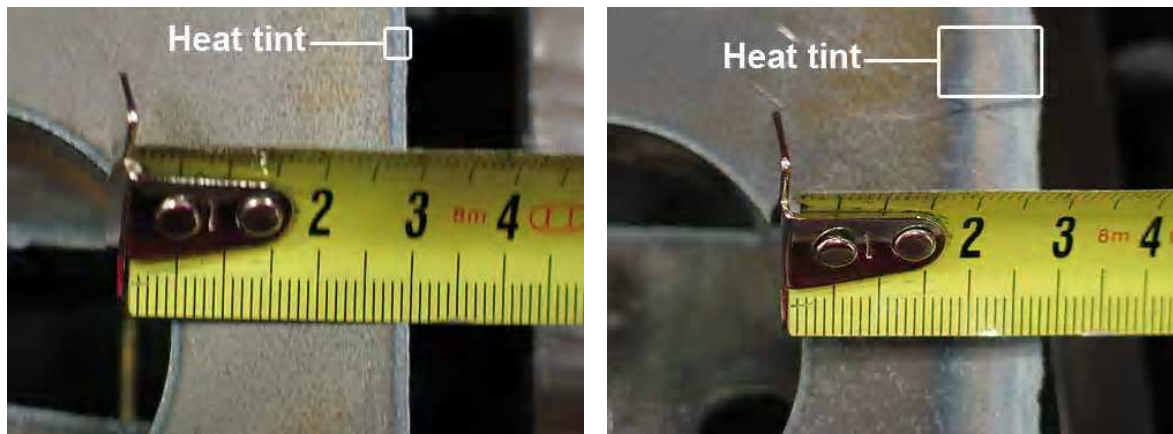
Vlevo – řezná plocha ručním plazmovým hořákem Powermax, tloušťka 30mm

Vpravo – řezná plocha ručním kyslíkovým hořákem, tloušťka 30mm

Tepelně ovlivněná oblast kolem řezu:

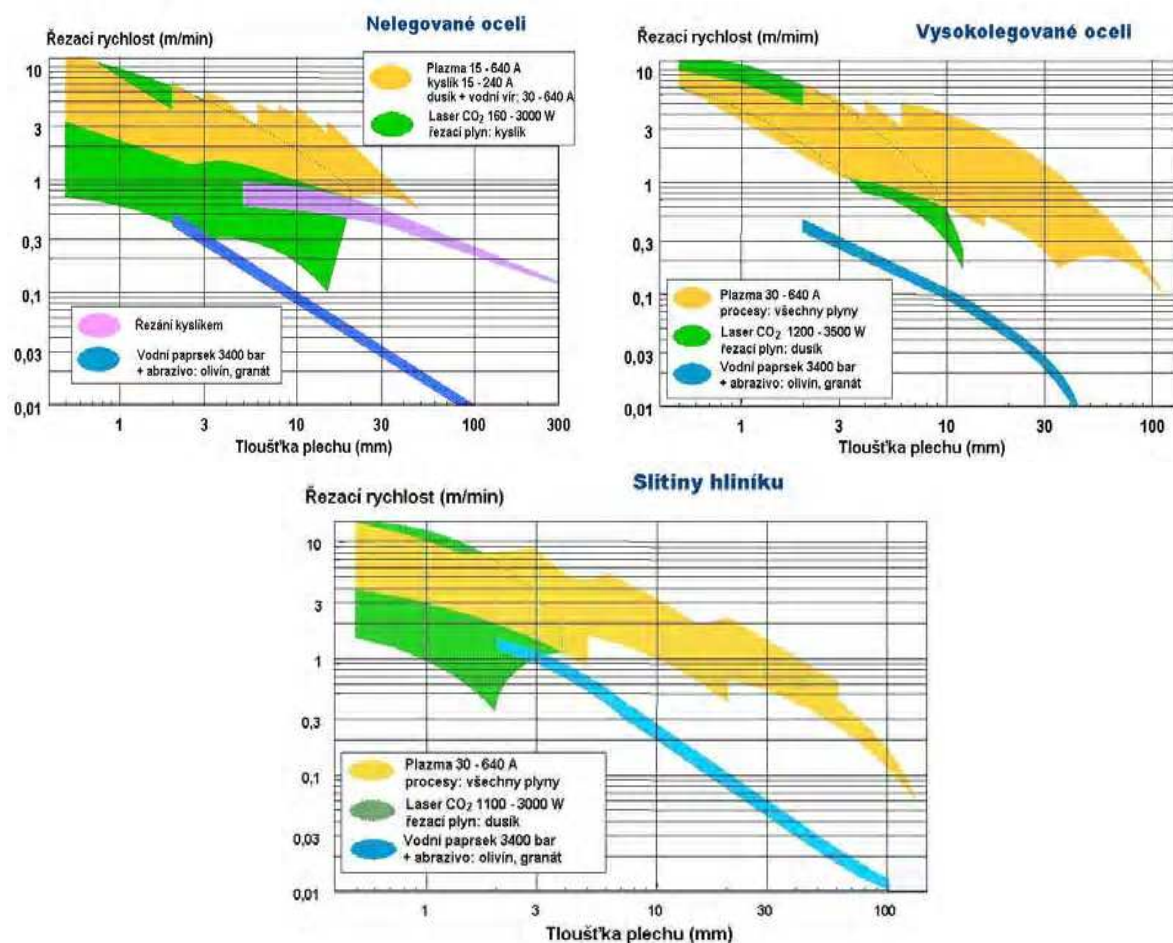
Kvůli množství vneseného tepla při tepelném dělení je úzká oblast materiálu kolem řezu tepelně ovlivněna. V této oblasti dochází k nežádoucí změně vlastností materiálu (zakalení, vznik trhlin, změna obsahu prvků a jiné). Hloubka tepelně ovlivněné oblasti je závislá především na množství vneseného tepla do materiálu. Zvětšuje se s rostoucí tloušťkou řezaného materiálu, obsahem legujících prvků nebo klesající řeznou rychlostí.

Při řezání kyslíkem je do materiálu přivedeno mnohem víc tepla, což má za následek větší tepelně ovlivněnou oblast. Pohybuje se běžně od 4 do 15mm v závislosti na tloušťce řezaného materiálu a rychlosti řezání. Při plazmovém řezání je hloubka TPO zpravidla menší (1-5mm). Na obrázku vidíme velikost tepelně zbarvené, oxidické oblasti při řezech na materiálu tloušťky 30mm při plazmovém a kyslíkovém řezání. Toto povrchové zbarvení není tepelně ovlivněná oblast, ale je závislé na množství vneseného tepla do materiálu, takže s hloubkou tepelně ovlivněné oblasti částečně koresponduje.

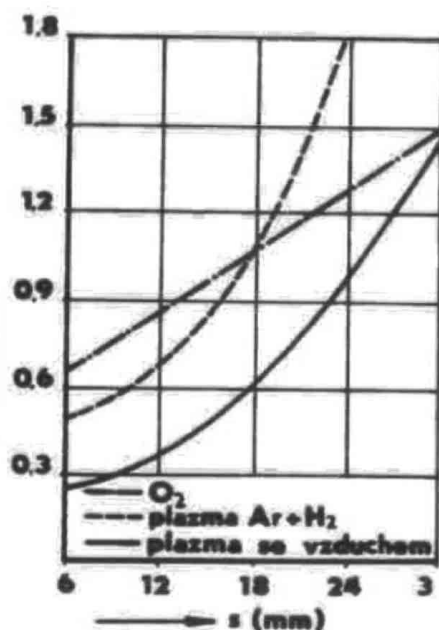


Obr. 5.3 - Porovnání velikosti tepelně zbarvené, oxidické vrstvy [12]
 Vlevo – řez ručním plazmovým hořákem Powermax, tloušťka 30mm, hl. = 2mm
 Vpravo – řez ručním kyslíkovým hořákem, tloušťka 30mm, hl. = 10mm

Následující grafy ukazují porovnání dosahovaných řezných rychlostí na řezané tloušťce materiálu při použití různých metod dělení kovu pro nelegovanou ocel, vysokolegovanou ocel a pro slitinu hliníku. Pro tuto práci je podstatné porovnání kyslíkového řezání (fialově) a plazmového řezání (žlutě). Navíc je možno porovnat s výkony řezání laserem (zeleně), případně vodním paprskem (modře).



Obr. 5.4 - Dosahované řezné rychlosti různými metodami dělení materiálu [14]
 a) nelegovaná ocel, b) vysokolegovaná ocel, c) slitina hliníku



Obr. 5.5 – Závislost provozních nákladů na řezané tloušťce [4]

Pro porovnání nákladů na dělení materiálu v kooperaci byl vytvořen malý experiment.

Z nabídky ceníků čtyř různých tuzemských firem byla získána data k porovnávání nákladů na dělení 1m oceli při různých tloušťkách materiálu pro plazmové a kyslíkové řezání. Tyto ceny byly porovnávány a porovnání je graficky vyjádřeno.

Tab. 5.1 – Vybraní poskytovatelé řezání plechů na zakázku

Označení	Poskytovatel
Cena 1	INPRO Čáslav s.r.o.
Cena 2	METALCUT s.r.o.
Cena 3	IDEA marketing Olomouc s.r.o.
Cena 4	Luboš Hart – Zámečnictví, Jeníkov

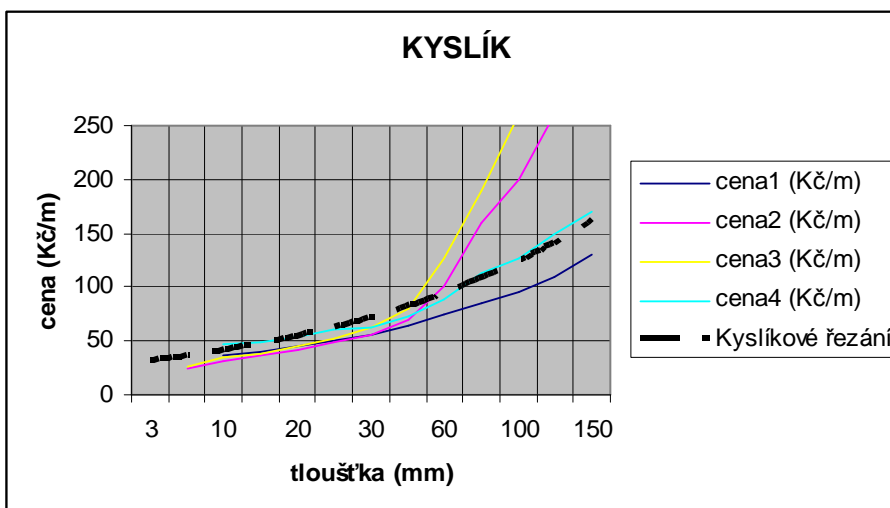
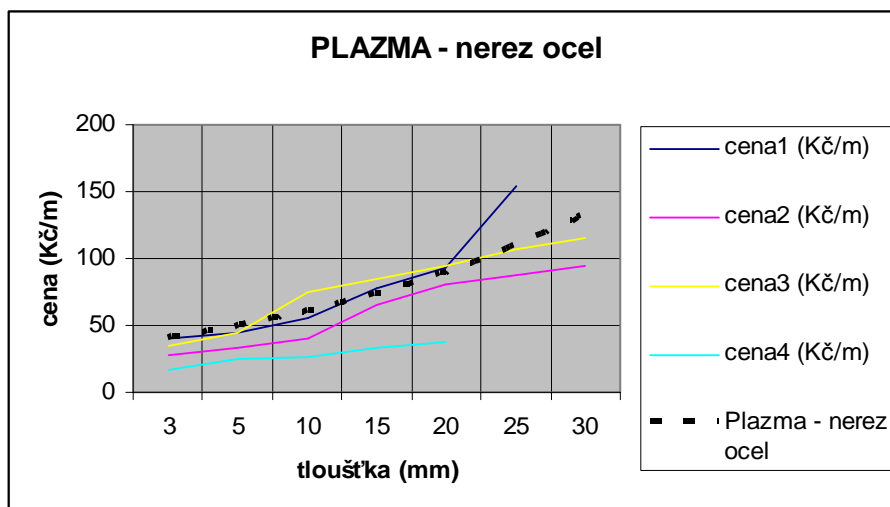
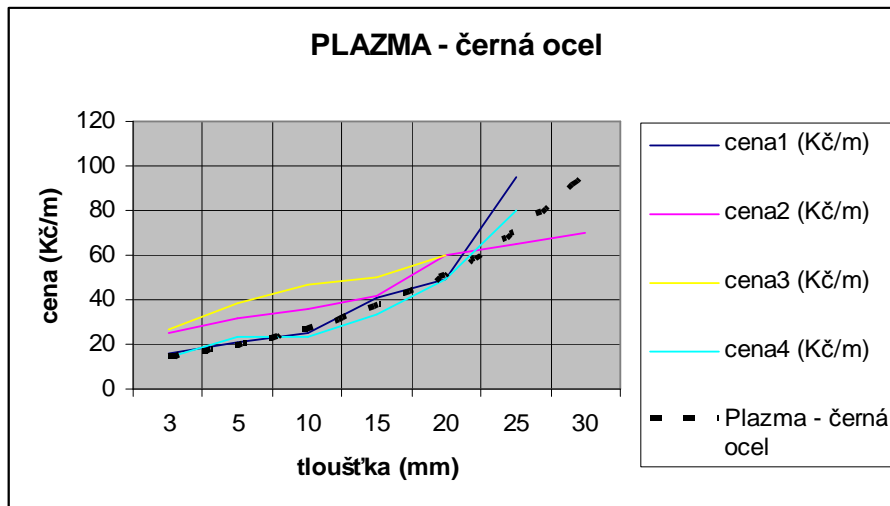
Výsledek experimentu:

Porovnání se týká pouze ekonomického hlediska, nikoliv kvality řezu.

Co se týká černé, konstrukční oceli, literatura (např. obr. 5.5 [4]) udává nižší náklady na řezání pro plazmu (v závislosti na druhu plazmy) asi do tloušťky 20 až 30 mm. Nad touto hodnotou je ekonomičtější kyslíkové řezání.

V mém experimentu je výsledek následující. Do tloušťky 20 mm hovoří mírně ve prospěch plazmy, od této tloušťky je ekonomičtější řezání kyslíkem. V tomto ohledu současná situace v ČR víceméně odpovídá údajům ve starší literatuře.

Co se týká řezání korozivzdorné oceli plazmou, je trend stejný jako u plazmového řezání černé oceli, ale náklady na 1m řezu jsou zhruba dvojnásobné.



Obr. 5.6 – Grafické zobrazení nákladů na 1m řezu pro řezání kyslíkem a plazmou – situace na současném tuzemském trhu

Zhodnocení:

S postupem doby a se zdokonalováním plazmových řezacích hořáků získává plazma čím dál větší prostor v oblasti tepelného dělení na úkor kyslíkového řezání. Je to zásluhou variability metody a obecně vyšší produktivity plazmového řezání. Investiční náklady jsou u plazmového zařízení o něco málo vyšší, což je kompenzováno úsporou při provozu. Nezastupitelnou pozici má plazma především u tepelného dělení vysokolegované oceli a hliníkových slitin středních a větších tloušťek, kde prakticky nemá alternativu. Dobré uplatnění má také pro řezání konstrukční oceli menších tloušťek (do 30mm) a neželezných kovů. Řezání kyslíkem má své postavení ve výrobě ocelových konstrukcí díky převážné spotřebě nelegovaných konstrukčních ocelí středních a větších tloušťek, kde má stále dominantní postavení. Pokud se řeže uhlíková ocel do tloušťky 25mm, jsou ekonomické přednosti plazmy oproti kyslíkovému pálení jasné v případě, že jde o dlouhé, kontinuální řezy ve větší sérii. V případě řezání tloušťky více než 35mm, lze diskutovat o použití metody v závislosti na ceně zařízení, řezaném materiálu a specifických podmínkách. Běžná je konstrukce řezacích strojů kombinujících obě tyto technologie.

Výhody plazmového řezání:

- vyšší rychlost řezání (až 10x) než u řezání kyslíkem pro tenké a střední tloušťky
- snížení vneseného tepla do materiálu - menší TOO a deformace
- možnost řezání všech kovových materiálů především vysokolegovaných ocelí, hliníku, niklu, mědi, a jejich slitin
- bez alternativy při řezání vysokolegované oceli a hliníkových materiálů ve střední a větší tloušťce
- minimální vliv kvality povrchu řezaných materiálů
- libovolné zpracování kvalitního řezu u středních a silných rozměrů plechů s technologií vířivého plynu ve spojení s technickými plyny
- řezání plazmou pod vodou pro velmi malé tepelné ovlivnění řezaného materiálu a malou hladinu hluku v okolí pracoviště
- řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem
- snadná automatizace a mechanizace

Nevýhody plazmového řezání:

- úhel řezné hrany je větší než u řezání kyslíkem
- horní hrana plechu je oblejší než u kyslíkového řezání
- velký vývin dýmů, par kovů, ozónu a oxidů dusíku a intenzivní UV záření
- vysoká hladina hluku od 80 do 100 dB
- vyšší pořizovací náklady
- obtížní propalování otvorů u tloušťek nad 15 mm.
- omezení použití do 160 mm (180 mm) u suchého řezání a 120 mm u řezání pod vodou

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1. Cíl a program experimentu

Diplomová práce se zabývá vlivem provozních parametrů plazmového řezání na výslednou jakost řezu. Úkolem je určit tyto vlivy technologických parametrů, zejména řezné rychlosti z hlediska vyhodnocené kvality řezných ploch a velikosti tepelně ovlivněné oblasti.

Mezi hlavní technologické parametry plazmového řezání kovů patří rychlost řezání, použitý proud, vzdálenost trysky od materiálu, tlak plynu. Vzdálenost trysky od materiálu se volí podle tloušťky řezaného materiálu. Tlak plynu závisí na řezné rychlosti, velikosti trysky a tloušťce materiálu. Řezná rychlost se volí především v závislosti na tloušťce řezaného materiálu. Právě rychlost řezání je důležitý faktor pro určování hospodárnosti metody a pro porovnání s dalšími způsoby tepelného dělení materiálu. Můžeme uvažovat rychlost maximální, při které ještě materiál protavíme v celé tloušťce bez ohledu na kvalitu řezu. Nebo rychlost optimální, která nám zaručí nejvyšší jakost řezných hran a největší kolmost ploch.

Cílem je právě určení optimálních hodnot těchto parametrů.

Program experimentu:

1. Provedení řezů na plazmovém řezacím stroji Fine Focus 800 Kjellberg
2. Vyhodnocení jakosti řezné plochy podle normy ČSN EN ISO 9013
3. Separování vzorků pro metalografické zkoušky z předem určených míst na odřezku
4. Příprava vzorků: preparace, broušení, leštění
5. Pozorování a měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti
6. Měření tvrdosti
7. Pozorování mikrostruktury po naleptání

Práce vznikla ve spolupráci s firmou RW Ferra, na jejichž zařízení byly provedeny plazmové řezy, použité k experimentu.

Společnost RW Ferra s.r.o. vznikla v roce 2007 jako společný projekt firem Wirpo s.r.o. a Rapid trade s.r.o. Tato nová společnost sídlí v prostorách firmy Rapid trade s.r.o., kde vyrábí tvarové výpalky a výpalky s úkoly z vlastního, nebo dodaného materiálu v jakostech konstrukční, vysokopevnostní a nerezové oceli na plazmovém stroji od firmy MICROSTEP s plazmovými zdroji od firmy KJELLBERG.

6.2 Popis experimentálního zařízení [16] [17]

Vzorky použité v experimentu byly nařezány na plazmovém CNC centru MicroStep MG s plazmovým řezacím systémem **Fine Focus 1600** od firmy Kjellberg. Jedná se o jedno z nejvýkonnějších plazmových zařízení v ČR. K plazmovému zdroji Kjellberg Fine Focus 1600, skládajícího se ze dvou paralelně zapojených zdrojů Fine Focus 800, jsou připojeny 2 plazmové hořáky. Systém se vyznačuje vysokou kvalitou řezu a dlouhou životností spotřebních dílů díky technologii ochranných vířivých plynů – „swirl gas“.

Při zapojení do konfigurace Fine Focus 800 je používán strojní hořák PB-S77 W s technologií „swirl gas“ a výkonem 300A. Jako plazmové plyny se používají vzduch, O₂, Ar/H₂, Ar/H₂/N₂. Vhodné pro řezání černé oceli, korozivzdorné oceli menších tloušťek a neželezných kovů. Řezat se dají kvalitní tvarové řezy do tloušťky 50mm, maximálně do 80mm. Tento hořák je připojen na 3D rotátor pro úhlové řezání a úkosy.

Při zapojení obou zdrojů dostaneme konfiguraci Fine Focus 1600, pro kterou je používám 600 ampérový strojní hořák PB-S150 W. Jako plazmového plynu se používá kombinace argon/vodík. Vhodné pro řezání korozivzdorné oceli, hliníkových slitin a černé oceli velkých tloušťek. Kvalitní tvarové řezy lze řezat do tloušťky 120mm, maximálně do 160mm.



Obr. 6.1 – Plazmový zdroj Fine Focus 800 od firmy Kjellberg [16]

Tab. 6.1 – Technické parametry zdroje

TYP	<i>Fine Focus 800</i>	<i>Fine Focus 1600</i>
Hlavní přívod	3x400 V, 50Hz	3x400 V, 50Hz
Příkon max.	83 kVA	170 kVA
Napětí naprázdno	400 V	400 V
Rozsah řezacího proudu	80 – 300 A	160 – 600 A
Pojistka, pomalá	125 A	2 x 125 A
Ochranná třída	IP 22	IP 22
Izolační třída	F	F
Plazmové plyny	Vzduch, O ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	Ar/H ₂
Řezaná tloušťka, kvalitní řez / max. tl.	60 mm / 80 mm	120 mm / 160 mm
Hmotnost	566 kg	2x 566 kg
Rozměry	1320 x 844 x 1470 mm	2x(1320 x 844 x 1470) mm

Plazmový hořák PB-S77 W

Tab. 6.2 – Technické parametry hořáků

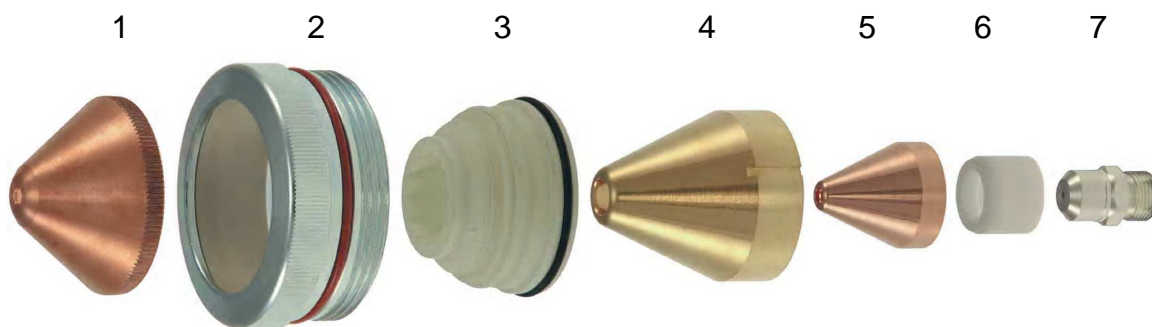
Typ hořáku	<i>PB-S77 W</i>	<i>PB-S150 W</i>
řezací proud	Max. 300 A	Max. 600 A
Průměr hořáku	58 mm	58 mm
Proud pilotního oblouku	22 A	24 A
Tlak plazmového plynu	0,6 až 0,8 MPa	0,7 až 0,8 MPa
Plazmové plyny	Vzduch, H ₂ , O ₂ , N ₂ , Ar	Ar/H ₂
Rozsah řezané tloušťky	3 až 80 mm	3 až 160 mm
Ochranný vířivý plyn	Vzduch, N ₂	-
Průměr trysky	2,7 mm	4 mm

Tryska:

Hořák je osazen trysku L4-XL 300A od firmy KJELLBERG s technologií „CoolFlow“ pro maximální životnost, použití pro O₂ / vzduch. Průměr trysky je 2,7mm.

Elektroda:

V hořáku je použita elektroda K3-XL od firmy KJELLBERG. Použití pro O₂ / vzduch. Elektroda je ze stříbra s hafniovou emisivní vložkou. Díky tomu, že stříbro je lepší elektrický i tepelný vodič, než běžná měď, je životnost elektrody prodloužena a řezná rychlost se zvyšuje až o 40%.



Obr. 6.2 – Jednotlivé části hořáku PB-S77 W

1 – hlavice ochranného plynu, 2 – izolační ochranná hlavice, 3 – tryska ochranného plynu, 4 – hlavice trysky, 5 – tryska, 6 – kroužek vedení plynu, 7 - elektroda

CNC plazmové centrum MicroStep MG

MG splňuje nejvyšší požadavky na komplexnost, automatizaci, produktivitu a spolehlivost ve vrcholné třídě CNC řezacích center. Umožňuje kombinaci plazmového či autogenního řezání pod úhlem, vrtání až do průměrů děr 30 mm s automatickým výměníkem vrtáků pod portálem či na konci stolu, konfiguraci s více portály, precizní polohování plechů pomocí senzorů či CCD kamery, popisování tryskovým atramentovým popisovačem, řezání trubek a profilů aj.

Tab. 6.3 – Technické parametry CNC zařízení MicroStep MG

Rozměry pracovního stolu	2500 x 12000 mm
Max. tloušťka materiálu	250 mm
Max. počet vozíků s hořáky	6
Rychlost polohování	do 30 m/min
Typ vedení v ose x	lineární
Typ vedení v ose y	lineární
Nastavení přesnosti polohování	podle DIN 28206
Rotátor / 3D řezání	ano



Obr. 6.3 – Plazmové řezací zařízení Fine Focus 1600 od firmy Kjellberg na CNC plazmovém zařízení Microstep MG



Obr. 6.4 – Ukázka řezné plochy: řez plazmovým zařízením Fine Focus 800, plazmový plyn O_2 , proud 300A, materiál WELDOX 700E tloušťky 50mm.

6.3 Řezaný, experimentální materiál [15]

Experimentálním materiálem byla pro své rozsáhlé použití v praxi zvolena konstrukční vysokopevná ocel **S 690 QL**, v označení firmy SSAB Oxelösund jde o **WELDOX 700E**.

WELDOX jsou konstrukční vysokopevné ocelové plechy s mezemi kluzu od 420 do 1111 MPa. Jedná se o ocelové plechy s nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků tak, aby při vysokých hodnotách pevnosti (respektive tvrdosti) byla zajištěna jejich technologičnost, zejména svažitelnost.

Plechý WELDOX jsou kaleny a popouštěny. Je snaha, nahradit část legujících prvků, potřebných k dosažení daného pevnostního stupně intenzitou kalícího procesu, tzv. „legování vodou“. Takto dostáváme nízké hodnoty uhlíkového ekvivalentu Ce, což má příznivý vliv na svažitelnost. Plechy se kalí zahřáním na teplotu 900°C a ochlazením proudem vody. Po následném popouštění na vysoké teploty 580 až 650°C mají plechy vysokou pevnost, jednotnou ve všech místech, při současně dobré houževnatosti a výbornou opracovatelnost a svažitelnost. U ocelových plechů WELDOX jsou zaručovány a hutním atestem doloženy hodnoty Rp0,2, Rm, A5, KV a chemické složení. Vyrábějí se s označením D, E, F (např. WELDOX 700D, podle EN 10137 je to S 690 Q), kde označení D znamená zaručovanou hodnotu vrubové houževnatosti KV při -20°C, označení E (QL) pak při -40°C a F (QL1) při -60°C.

Výsledkem je např. ocel WELDOX 700, s mezí kluzu 700 MPa, která je dobře tvařitelná za studena a v tloušťce do 20 mm má stejnou svažitelnost jako ocel 11523.

Tab. 6.4 – Chemické složení materiálu WELDOX 700

C max [%]	Si max [%]	Mn max [%]	P max [%]	S max [%]	B max [%]	Nb max [%]	Cr max [%]	V max [%]	Cu max [%]	Ti max [%]	Al min. [%]	Mo max [%]	Ni max [%]	N max [%]
0,2	0,6	1,6	0,02	0,01	0,005	0,04	0,7	0,09	0,3	0,04	0,01	0,7	2,0	0,01

Tab. 6.5 – Zaručená vrubová houževnatost materiálu WELDOX 700

Teplota	0°C	-20°C	-40°C	-60°C
WELDOX 700D	30	27	-	-
WELDOX 700E	35	30	27	-
WELDOX 700F	40	35	30	27

Tab. 6.6 – Mechanické vlastnosti oceli WELDOX 700

Tloušťka plechu	4 – 50 mm	50 – 100 mm	100 – 150 mm
Mez kluzu [R _{p0,2}] min.	700 MPa	650 MPa	630 MPa
Mez pevnosti [R _m]	780-930 MPa	780-930 MPa	710-900 MPa
Tažnost [A ₅] min.	14%	14%	14%

Tab. 6.7 – Hodnoty uhlíkového ekvivalentu Ce pro ocel WELDOX 700E

Tloušťka plechu	do 7 mm	7-20 mm	20-45mm	45-102mm	102-130mm
Ce	0,56	0,41	0,46	0,56	0,64

$$\text{Uhlíkový ekvivalent} \dots Ce = \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Aplikace materiálu WELDOX:

Plech WELDOX 700 má dvojnásobnou hodnotu meze kluzu, oproti běžné konstrukční oceli S 355. Je ale taky 2 až 3 krát dražší, takže úspora nákladů na materiál není tedy apriori důvodem k aplikaci vysokopevné oceli. V současné době je převládajícím důvodem aplikace vysokopevných ocelí potřeba snížit hmotnost konstrukcí z hlediska manipulace, dopravy a legislativních předpisů, nebo zvýšení kapacity (nosnosti) zařízení. Nejčastější použití je pro jeřáby, nákladní automobily, přívěsy, bagry, nakladače, žel. vagony, mosty, ocel. stavby...

6.4 Průběh experimentu a parametry řezání

Experimentální část byla prováděna v prostorách firmy RW Ferra a prostorách Ústavu strojírenské technologie FSI VUT.

Konkrétní průběh experimentu:

1. Provedení řezů na plazmovém řezacím stroji Fine Focus 800 Kjellberg.
2. Vyhodnocení řezné plochy podle normy ČSN EN ISO 9013
Podle normy ČSN EN ISO 9013 je hodnocena jakost vytvořeného plazmového řezu a případné vady.

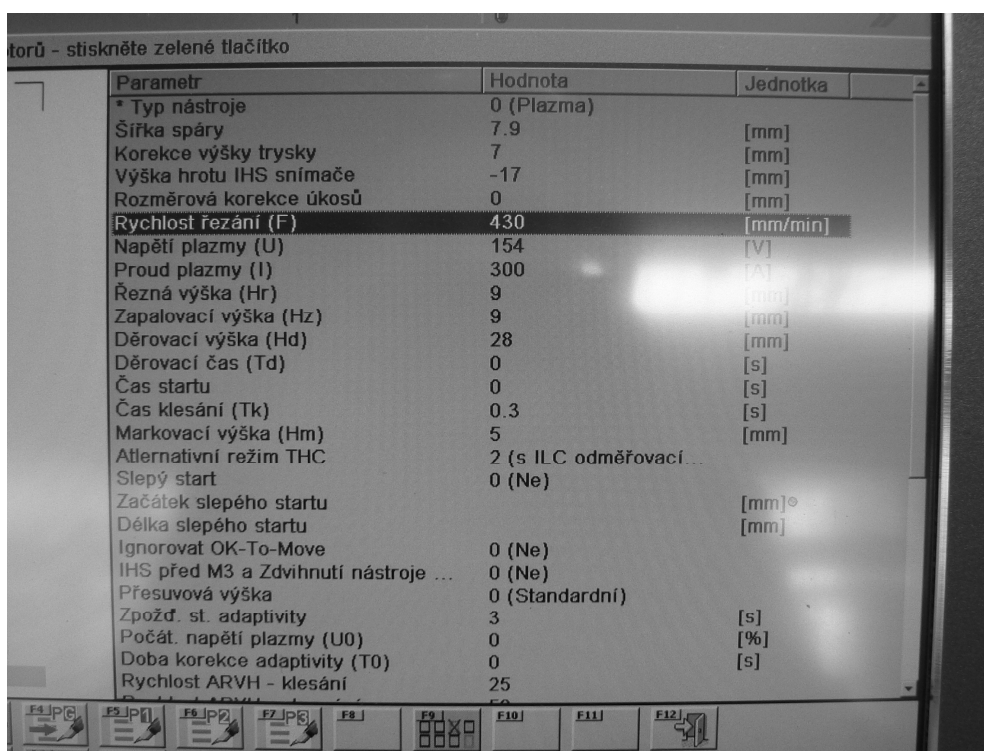
3. Separování vzorků pro experimentální zkoušky z předem určených míst na odřezku:
Z každého plazmového řezu byly vyříznuty 2 vzorky o rozměrech asi 8x8x23 mm. Jeden z horní a druhý z dolní části plazmového řezu. K dělení byla použita rozbrušovací pila s chlazením, aby se předešlo možnosti dalšího nežádoucího tepelného ovlivnění vzorku teplem vznikajícím při řezání.
4. Příprava vzorků: preparace, broušení, leštění:
Další práce se vzorky proběhla v laboratoři mikrostruktur a obrazové analýzy na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně. Pro další manipulaci se vzorky, musí být tyto preparovány. Kvůli možnosti tepelného ovlivnění byl vzorek preparován za studena, zalitím do dentakrylu. Po ztvrdnutí je vzorek broušen na univerzálním brousícím stroji s finální zrnitostí 600. Poté je vzorek ještě vyleštěn.
5. Pozorování a měření velikosti tepelně ovlivněné oblasti:
Na vyleštěných vzorcích lze pozorovat hloubku tepelně ovlivněné oblasti. Tyto oblasti byly vyfotografovány s měřítkem, kvantitativně popsány a porovnávány.
6. Měření tvrdosti:
Pro zjištění případných změn vlastností řezaného materiálu v ovlivněné oblasti řezu byla naměřena tvrdost dle Vickerse. Měření proběhlo v laboratoři měření tvrdostí na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně na tvrdoměru ZWICK 3212 s CCD kamerou. Měřilo se na třech místech. V tepelně ovlivněné oblasti, v základním materiálu a v přechodové oblasti.
7. Pozorování mikrostruktury po naleptání.
Na optickém mikroskopu NEOPHOT 32 v laboratoři mikrostruktur a obrazové analýzy na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně byla pozorována mikrostruktura vzorku a její případné změny v oblasti plazmového řezu. Před pozorováním bylo vzorek naleptán 2% Nitalém (2% roztok HNO₃ v etanolu).

ad. 1. Provedení řezů

Na plazmovém řezacím stroji Fine Focus 800 Kjellberg byly provedeny 300 ampérovým plazmovým hořákem PB-S77 W tři řezy na materiálu WELDOX 700 tloušťky 50mm třemi různými rychlostmi. Ke sledování různých velikostí tepelně ovlivněného pásma byly vybrány řezné rychlosti 200, 400 a 600 mm/min. Podle materiálů firmy Kjellberg je doporučená rychlost řezání pro tento typ materiálu a tuto tloušťku okolo 300 až 400 mm/min, proto jsme volili experimentální rychlosti kolem těchto hodnot. Jako plazmového plynu bylo pro řezání použito kyslíku, s ochranným plynem vzduchem a startovacím plynem dusíkem. Startovacího plynu (N₂) je použito za účelem šetření hafniové elektrody před oxidačními účinky kyslíku při startování oblouku. Před vlastním řezáním nebyl plech žádným způsobem upravován, pouze byl volně položen na pracovním stole. Dodaný materiál byl ve formě pásu o rozměrech 400 x 150 mm. Vzhledem k předpokládané malé šířce tepelně ovlivněné oblasti (obvykle do 4mm) byla vzdálenost dvou sousedních řezů asi 30 mm. Jednotlivé řezy zůstávali nedořezány a byla u nich pomocí posuvného měřidla změřena šířka řezné spáry. Teprve po získání této hodnoty byly vzorky mechanicky dolomeny a použity k dalšímu hodnocení kvality řezných ploch a hran. Vzdálenost trysky hořáku od materiálu byla nastavena u všech řezů konstantně na 7mm. Vzorky byly ochlazovány volně na vzduchu.

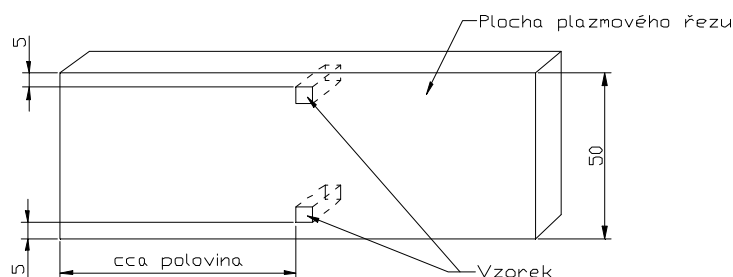
Tab. 6.8 – Parametry experimentálního řezání

Plazmový plyn / tlak	O ₂ / 0,57 MPa
Ochranný plyn / tlak	vzduch / 0,22 MPa
Startovací plyn	N ₂
Napětí plazmy	154 V
Proud plazmy	300 A
Řezná výška	7 mm
Průměr trysky	2,7 mm
Řezací rychlost	200 / 400 / 600 mm/min



Obr. 6.5 – Ovládací panel Fine Focus 800 – provozní podmínky pro řezání tloušťky 50mm

Ze tří získaných plazmových odřezků tvaru kvádru bylo potřeba oddělit vzorky pro metalografické zkoušky. Z každého odřezku byly vyříznut vzorek z horní a dolní části řezu podle obrázku 6.5 o rozměrech přibližně 8x8x23mm.



Obr. 6.6 – Poloha odebraných vzorků

7. VYHODNOCENÍ KVALITY ŘEZŮ [11]

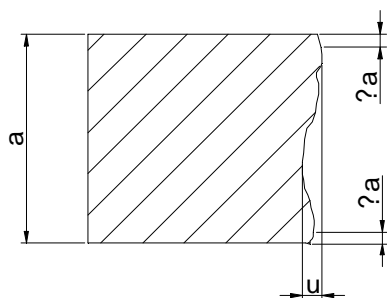
V této kapitole se zabýváme hodnocením kvality řezů provedených při experimentu. Kvalita řezů se posuzuje z několika hledisek. Hlavní kritéria jsou geometrický tvar řezné spáry, hladkost povrchu řezných ploch, čistota řezných hran, tvorba pevně lpící strusky na spodní hraně řezu a výskyt trhlin na řezných plochách.

K hodnocení jakosti řezů slouží norma **ČSN EN ISO 9013**, převzatá z mezinárodní normy EN ISO 9013:2002. Tato norma se používá pro materiály vhodné pro řezání kyslíkovým plamenem, plazmové řezání a řezání laserem. Platí pro řezy plamenem od 3 mm do 300 mm, řezy plazmou od 1 mm do 150 mm a řezy laserem od 0,5 mm do 40 mm. Tato mezinárodní norma zahrnuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezu. V normě jsou uvedeny požadavky pro stanovení postupů měření a měřidel, jejichž pomocí je možné určit a zhodnotit charakteristické veličiny povrchu řezu.

Po vyhodnocení a změření řezné spáry byla hodnocena jedna plocha řezu. Protože se od sebe plochy nelišily, nebylo potřeba řešit obě.

Veličiny a definice určující určující jakost řezné plochy dle ČSN EN ISO 9013 jsou následující:

- Úchylka kolmosti (u kolmého řezu), nebo úhlová úchylka (u šikmého) – „**u**“
Je to vzdálenost dvou rovnoběžných přímek, mezi nimiž musí ležet profil řezné plochy. Tyto přímky svírají s povrchem řezného materiálu teoreticky správný úhel (tzn. u kolmých řezů 90°). Pro posouzení úchylky kolmosti je rozhodující její nejvyšší naměřená hodnota. Oblast se musí zmenšit o vzdálenost Δa od horní a dolní hrany podle obr. 7.1. Hodnoty Δa uvádí tabulkově norma v závislosti na tloušťce materiálu „**a**“. Místní chyby, jako začátek nebo konec řezu se u plazmových řezů při posuzování jakosti řezné plochy nezohledňují.
- Skluz – „**n**“
Je to největší vzdálenost dvou bodů jedné nerovnosti ve směru řezání.
- Průměrná výška prvků profilu – „**Rz5**“
Průměrná hodnota úchylek prvku profilu v rozsahu základní délky. Vyjadřuje drsnost povrchu. Charakteristická hodnota průměrné výšky prvků profilu bude stanovena pouze v omezené oblasti povrchu řezu. Měření musí být provedeno v místě maximální drsnosti povrchu řezné tloušťky. Pro plazmové řezání se měření obvykle provádí ve vzdálenosti 2/3 tloušťky řezu od horní hrany. Rz5 musí být měřena na úseku 15mm délky řezu ve směru posuvu hořáku.



Obr. 7.1 – Definice oblasti měření úchylky kolmosti

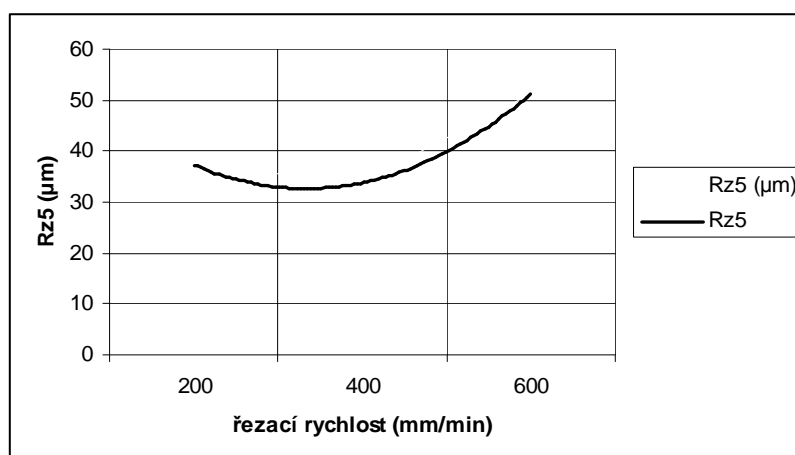
Označení vzorků (řezů): A – řezací rychlost 200 mm/min
 B – řezací rychlost 400 mm/min
 C – řezací rychlost 600 mm/min

Tab. 7.1 – Hodnoty průměrné výšky prvků profilu Rz5

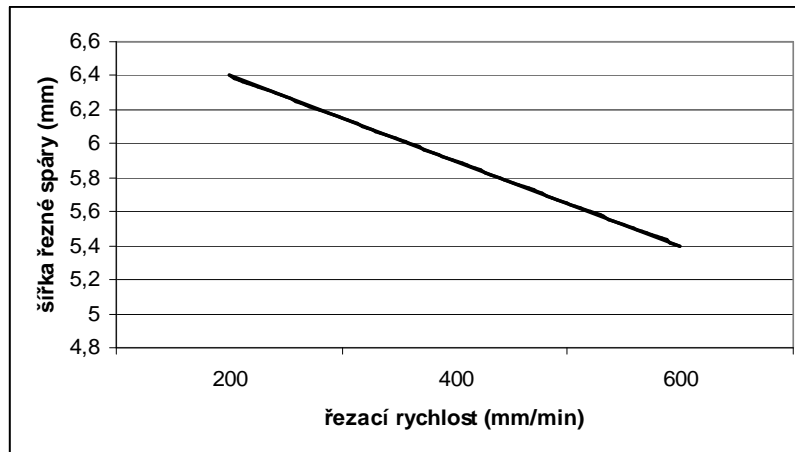
řez	Rz5 [μm]					Rz5 [μm] průměr
A	46,6	35,5	40,2	31,1	32,9	37,3
B	30,7	27,4	33,1	41,8	35,9	33,8
C	39,3	45,1	59,7	66,4	45,5	51,2

Tab. 7.2 – Hodnocení kvality řezů

vzorek	A	B	C
šířka řezné spáry – horní hrana	7,0 mm	6,0 mm	5,4 mm
šířka řezné spáry – spodní hrana	5,8 mm	5,8 mm	5,4 mm
šířka řezné spáry – průměr	6,4 mm	5,9 mm	5,4 mm
úchylka kolmosti „u“	2,0 mm	1,5 mm	2,0 mm
skluz „n“	9 mm	8 mm	12 mm
prům. výška prvků profilu „Rz5“	33,82 μm	37,31 μm	51,22 μm



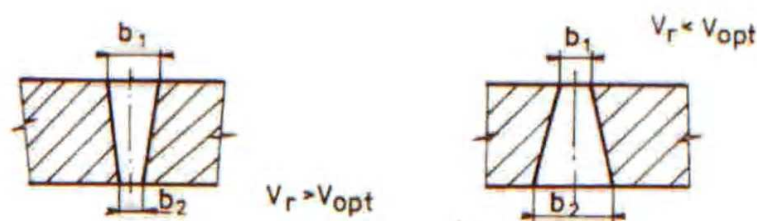
Obr. 7.2 – Závislost Rz5 na řezací rychlosti



Obr. 7.3 – Závislost šířky řezné spáry na řezací rychlosti

Vyhodnocení

Při sledování **šířky řezné spáry** se hodnoty pohybovaly od 5,4 do 7 mm. Byla prokázána určitá závislost šířky spáry na řezné rychlosti. Podle teoretického předpokladu bylo se zvyšující se rychlostí řezání dosahováno užší spáry. Zdůvodnit se to dá větším množstvím vneseného tepla do jednotky materiálu a delším časem odtavování materiálu po délce řezu při nižší rychlosti řezání. Podle jiné studie byla zjištěna ještě navíc přímá závislost šířky řezné spáry na řezacím proudu a taky na průměru trysky. [5] Šířka řezné spáry je tedy závislá na řezací rychlosti, průměru trysky, vzdálenosti trysky od materiálu a řezacím proudu. V optimálním seřízení je šířka řezné spáry 1,5 až dvojnásobek průměru trysky. [1] V tomto experimentu se do tohoto rozmezí vejde pouze spára při nejvyšší rychlosti řezání 600 mm/min. Ostatní spáry byly o něco málo větší. Další zjištění jsme získali měřením šířky spáry na horním a spodním okraji řezu. Při dvou nižších rychlostech (200 a 400mm/min) byla spára o něco málo širší na horním okraji. To taktéž odpovídá teoretickému předpokladu. Při nadměrné řezné rychlosti vznikají řezné hrany s úkosem do tvaru V, protože se oblouk nemůže natáhnout až ke spodní hraně řezu a . To stejné platí, i pokud nemá zdroj dostatečné napětí k prodloužení oblouku až ke spodní hraně. Při příliš malé řezné rychlosti je řezná spára nadměru široká a navíc se směrem ke spodní hraně následkem přebytku energie ještě rozšiřuje. [1] (obr. 7.2) Optimální řezná rychlost je rychlost posuvu hlavice, při které je rozložení tepelného toku z plazmatu do materiálu rovnoměrné po celé tloušťce materiálu. To zajišťuje dosažení téměř kolmých řezných hran a přibližně stejné šířky řezné spáry nahoře i dole. Při tomto experimentu se jako nejvhodnější jeví nejvyšší rychlost řezání 600 mm/min, při které bylo dosaženo nejužší řezné spáry a nulového rozdílu mezi šířkou v horní a dolní části.



Obr. 7.2 – Tvar řezné spáry: b – šířka spáry, v_r – řezná rychlost [3]

Na řezných plochách bylo možno vysledovat určitého **zpoždění řezu „n“**. Nepatrně větší hodnota byla zaznamenána při vyšších rychlostech. Na jakost řezu to ale nemá zásadní vliv.

Podle normy ČSN EN ISO 9013 jsou hodnoty **úchylek kolmosti „n“** rozděleny do pěti a hodnoty průměrných výšek prvků profilu „Rz5“ do čtyř tolerančních polí. Pro běžné plazmové řezání se hodnoty úchylek kolmosti pohybují obvykle v 5. tolerančním poli. Naměřené hodnoty úchylek kolmosti se pohybovali od 1,5 do 2 mm, což odpovídá 4. až 5. tolerančnímu poli.

Zajímavých výsledků bylo dosaženo při měření **Rz5**. Jde o průměrnou výšku prvků profilu a podle normy jsou její hodnoty při tepelném dělení materiálů rozděleny do 4 tolerančních tříd. Norma uvádí, že pro plazmové řezání je běžně dosahovaná hodnota této veličiny na hranici 3. a 4. toleranční třídy. To odpovídá při tloušťce 50 mm hodnotám kolem 110 až 140 μm . V tomto experimentu ovšem byly hodnoty Rz5 naměřeny podstatně nižší. Už pouhým okem je pozorovatelná velmi nízká drsnost řezné plochy. Optickým bezdotykovým přístrojem MicroProf FRT byly v laboratoři na řezech naměřeny hodnoty Rz5 od 33,8 po 51,2. To podle normy odpovídá prvnímu, nejpresnějšímu tolerančnímu poli. Ukazuje to na špičkovou úroveň moderního plazmového řezacího zařízení s vysokým stupněm fokusace, na kterém byl experiment prováděn. Dosahovaná drsnost řezné plochy u těchto řezů je minimálně na úrovni řezání laserem. Dokonce bych ji hodnotil jako lepší. V tomto experimentu byla řezána tloušťka 50mm, která je laserem neřezatelná. U plazmového řezu menší tloušťky by byl předpoklad ještě lepší dosažené drsnosti povrchu.

Dalším faktorem určujícím jakost řezu je struska ulpívající na řezných plochách. Na všech řezech byla zjištěna místa ve střední a spodní části plochy velmi tenká vrstva oxidů, která je dobře mechanicky odstranitelná.

Norma taky popisuje 5 skupin případných vad. A to vady na hranách řezů, vady na plochách řezů, strusky, trhliny a jiné vady. Každý plazmový řez vykazuje přinejmenším náznaky některých z těchto vad. U experimentálních řezů to byly například nepatrné náznaky některých plošných vad jako úhlová odchylka řezu, vydutá plocha řezu, zvlněný profil plochy řezu nebo předbíhání řezné stopy. Žádný náznak ale nebyl natolik výrazný, aby se dal považovat za vadu řezu. Dá se tedy konstatovat, že řезы byly bez vad.

Požadavky, kladené na vzhled a jakost řezných ploch se můžou lišit podle účelu použití. Řезы, dosažené plazmovým řezáním zejména na nejmodernějších strojích s vysokým stupněm fokusace paprsku, vykazují relativně dobrou kvalitu a výpalky lze běžně použít bez dalších úprav, například pro svařování. Díky tomu není nutno počítat s přídatky na další mechanické opracování, čímž vznikají nemalé úspory nejen materiálu, ale taky prací s případnou další úpravou.

8. METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ VZORKŮ

8.1 Makroskopické hodnocení vzorků - tepelně ovlivněná oblast

Obsahem této kapitoly je zjištění rozsahu možného tepelného ovlivnění materiálu v oblasti plazmového řezu. Rozsahy šířky tepelně ovlivněné oblasti (dále jen TOO) byly sledovány na metalografických výbrusech makroskopicky. Podle teorie je toto tepelné ovlivnění závislé kromě jiných parametrů především na řezné rychlosti, a proto byla zkoumána závislost právě na této veličině.

Na výbrusu vzorku bylo provedeno makroskopické změření hloubky TOO. Sledování probíhalo na plochách kolmých rovině řezu. Vzorky byly odebrány z jednotlivých řezů podle obr. 6.6 a připraveny podle popisu v kapitole 6.4. Přehled jednotlivých vzorků je v tabulce 8.1. Snímky makroskopického výbrusu byly pořízeny se zvětšením s použitím milimetrového papíru jako měřítka.

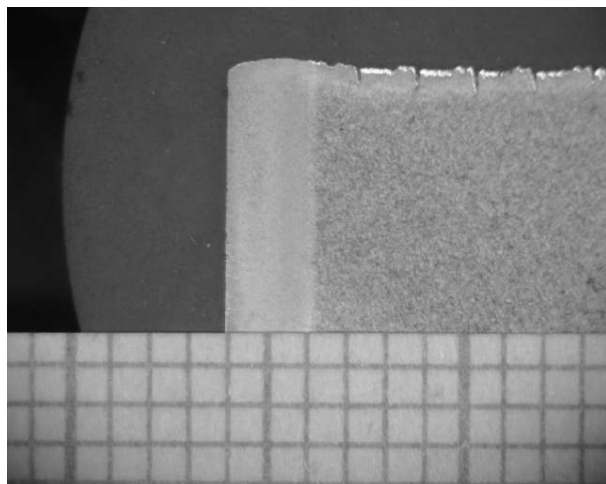


Obr. 8.1 – Ukázka metalografického vzorku

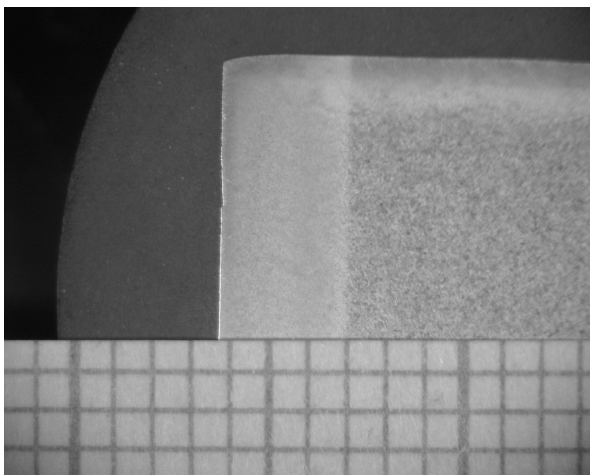
Tab. 8.1 – Označení jednotlivých vzorků, poloha vzorků podle obr. 6.6

vzorek	řezná rychlost [mm/min]	poloha vzorku
1	200	spodní
2	200	horní
3	400	spodní
4	400	horní
5	600	spodní
6	600	horní

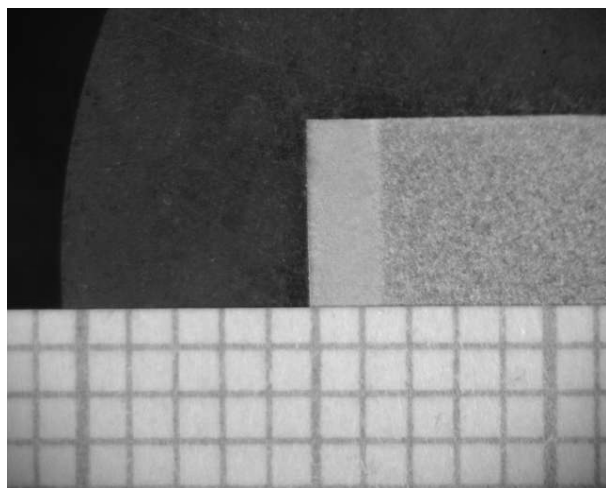
Tepelně ovlivněná oblast



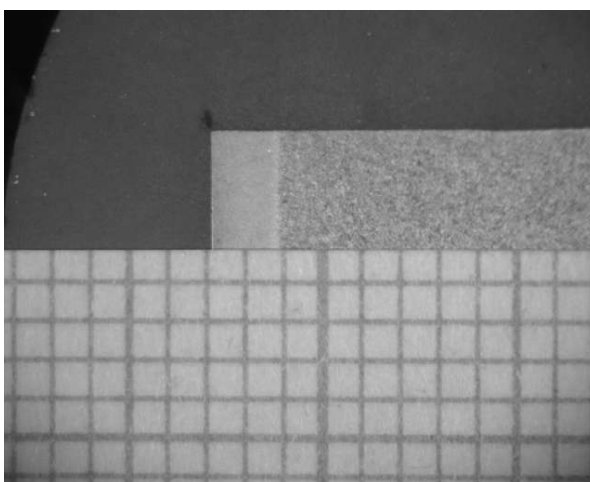
vzorek 1



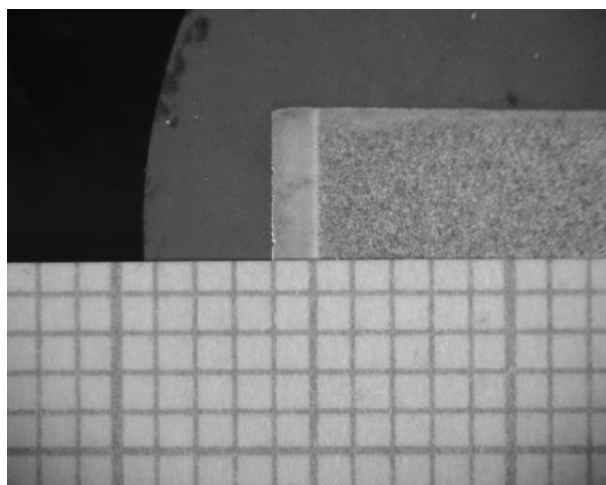
vzorek 2



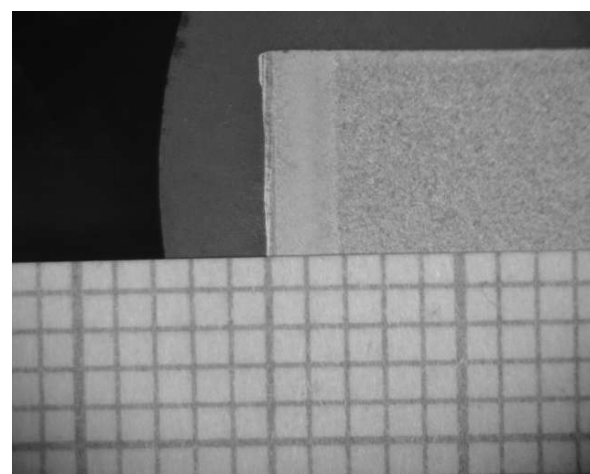
vzorek 3



vzorek 4



vzorek 5

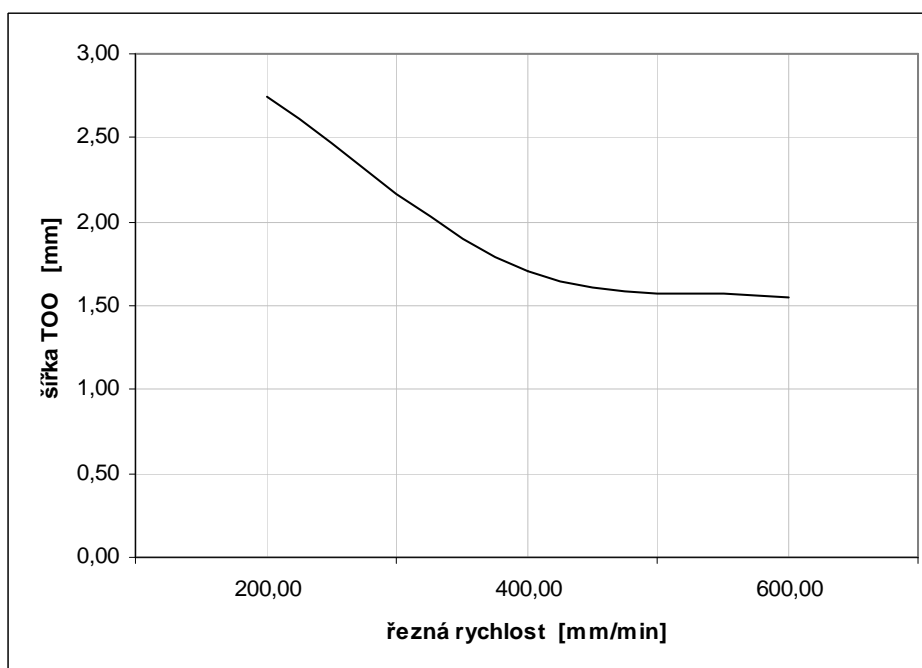


vzorek 6

Obr. 8.2 – Šířka tepelně ovlivněné oblasti u jednotlivých vzorků (zvětšení)

Tab. 8.2 – Vyhodnocení velikosti tepelně ovlivněné oblasti

Řezná rychlost	č. vzorku / poloha	Velikost tepelně ovlivněné oblasti	
		hodnota	průměr
200 mm/min	1 / spodní	2,2 mm	2,75 mm
	2 / horní	3,3 mm	
400 mm/min	3 / spodní	1,6 mm	1,7 mm
	4 / horní	1,8 mm	
600 mm/min	5 / spodní	1,2 mm	1,55 mm
	6 / horní	1,9 mm	



Obr. 8.3 - Graf závislosti šířky TOO na řezné rychlosti

Vyhodnocení:

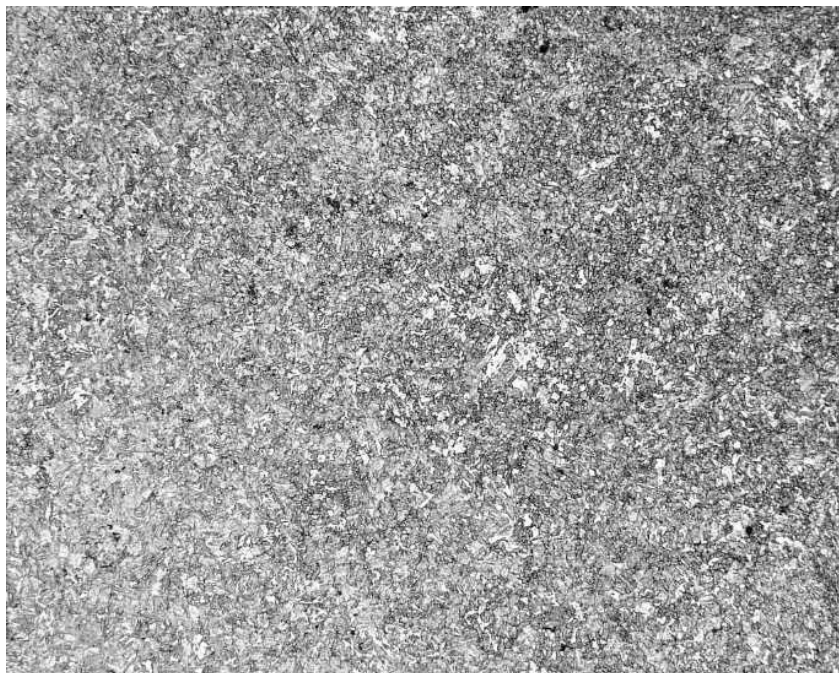
Sledování probíhalo v rovině kolmé k ploše řezu. Nejbližší k řezné hraně se vyskytuje natavená oblast, jejíž tloušťka se pohybuje od 0,15 do 0,25 mm. Na tuto tenkou oblast navazuje přechodové pásmo částečného natavení, charakterizované větší velikostí zrn, úměrnou snižování teploty směrem do základního materiálu.

Podle předpokladu experiment prokázal nepřímou závislost velikosti TOO na řezné rychlosti. Přestože experiment obsahuje pouze 3 hodnoty řezných rychlostí, závislost je zřejmá z grafu. Tento výsledek je dán větším množstvím vneseného tepla do materiálu při menší rychlosti posuvu hořáku. Požadavek je na co nejnižší hodnotu TOO, což v experimentu zastupuje nejvyšší rychlost 600mm/min, ale při rychlosti

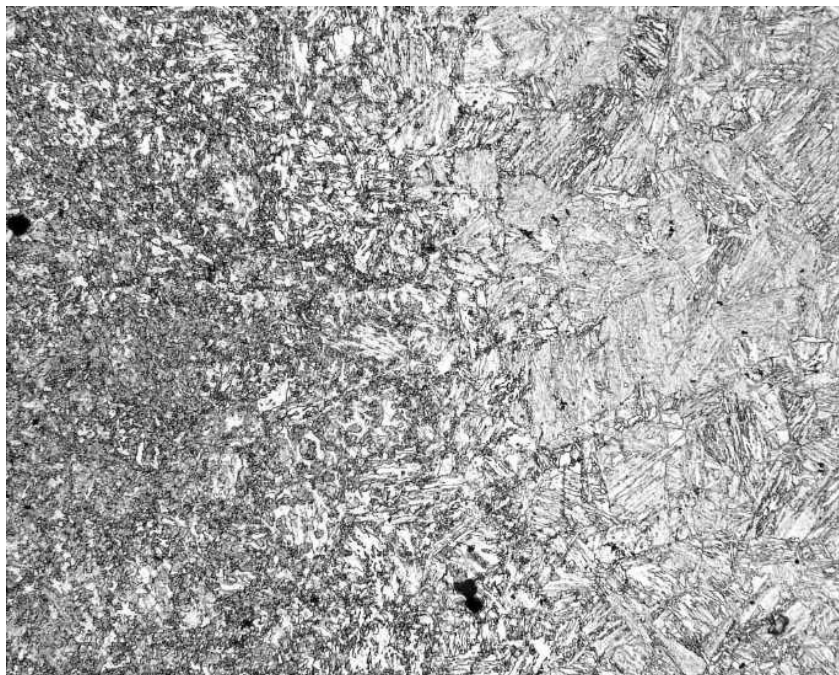
400mm/min je šířka pásma jen nepatrně větší a přináší taky dobrý výsledek. Při rychlosti 200mm/min už je šířka tepelného ovlivnění značně větší, což značí nevhodnost takto nízké rychlosti k řezání této tloušťky. Vysledováno bylo, že šířka TOO sledovaná po průřezu je u všech řezů nepravidelná. Větších hodnot dosahovala vždy v horní části řezu a rozdíl byl dokonce větší, než rozdíl hodnot daný různými rychlostmi řezání. Je to dáno tím, že u větších tloušťek řezaného materiálu plazmový paprsek v průběhu pronikání do materiálu podél tloušťky ztrácí energii a tím pro spodní okraj řezu zůstává energie méně. Přechod z TOO do základní struktury je ostrý.

8.2 Mikrostruktura

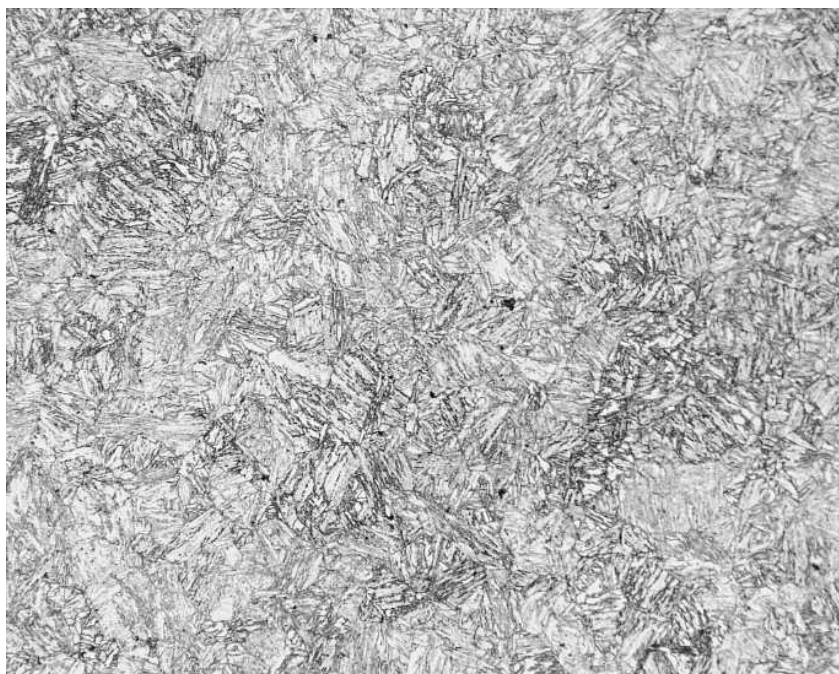
Pro pozorování metalografických změn děleného materiálu byla v oblasti řezů pozorována mikrostruktura. Vzorky byly naleptány dvouprocentním Nitalem (2% roztok HNO_3 v etanolu). Pozorování proběhlo na optickém mikroskopu NEOPHOT 32 při zvětšení 200x. Identický materiál, mechanismus tepelného ovlivnění, rychlost ochlazování i nepříliš velký rozdíl v teplotě ohřevu materiálu je dobrý důvod k předpokladu, že všechny vzorky budou mít stejnou, nebo velmi podobnou mikrostrukturu materiálu jak základního, tak i tepelně ovlivněného. Z toho důvodu proběhlo pozorování mikrostruktury pouze u jednoho vzorku. Fotografie mikrostruktury byly pořízeny ze tří oblastí vzorku, respektive ze tří různých vzdáleností od řezné plochy podle obr. 8.7. Porovnávána byla mikrostruktura v místě tepelně ovlivněného materiálu, v přechodové oblasti a v oblasti neovlivněného základního materiálu.



*Obr. 8.4 – Struktura základního materiálu oceli S 690 QL
leptáno 2% nital, zvětšení 200x*



*Obr. 8.5 – Struktura přechodu základní materiál – tepelně ovlivněná oblast
leptáno 2% nital, zvětšení 200x*



*Obr. 8.6 – Struktura v tepelně ovlivněné oblasti
leptáno 2% nital, zvětšeno 200x*

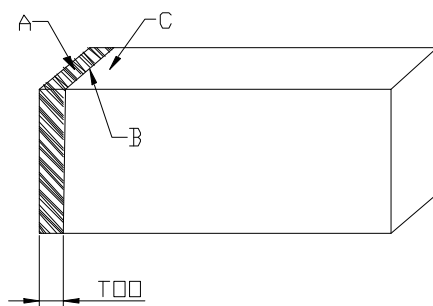
Základní materiál je tvořen strukturou sorbitu (obr. 8.4). Sorbit vznikne tak, že zakalený základní materiál, který je tvořen nízkouhlíkovým martenzitem popouštíme vysokými teplotami. Výsledkem pochodu je jemnozrnná feriticko-cementitická struktura sorbit, která při vysoké hodnotě pevnosti zajišťuje taky dobrou houževnatost.

V tepelně ovlivněné oblasti je pozorována struktura nízkouhlíkového tetragonálního martenzitu se zbytkovým austenitem (obr. 8.6). Při řezání byla TOO zahřátá na teploty nad teplotu A_3 do oblasti austenitu. Poté proběhlo, díky rychlému odvodu tepla materiálem, prudké ochlazení nadkritickou rychlostí. Tím vznikla hrubá struktura tvořená převážně martenzitem, vyznačující se velkou tvrdostí. To potvrdily také zkoušky tvrdosti (viz kapitola 8.3).

Na snímku z přechodové oblasti (obr. 8.5) je dobře vidět rozdíl těchto dvou struktur.

8.3 Měření tvrdosti

Na jednom vzorku (ekvivalentně jako u pozorování mikrostruktury) byla naměřena tvrdost. Měření tvrdosti podle Vickerse proběhlo na přístroji ZWICK 3212 s CCD kamerou. Provedena byla tři měření podle obrázku 8.7. A – v místě tepelného ovlivnění, B – v přechodové oblasti, C – v základním materiálu.



Obr. 8.7 – Místa měření mikrotvrdosti a pozorování mikrostruktury

Tvrdost naměřená v místě „C“ základního materiálu je 258 HV 10, což přibližně odpovídá feriticko-cementitické struktuře sorbitu. V přechodové oblasti „B“ mezi neovlivněným materiálem a TOO tvrdost v důsledku vytváření hrubých martenzitických zrn vzrůstá na 290 HV 10. V tepelně ovlivněné oblasti „A“ byla naměřena poměrně vysoká tvrdost 410 HV 10. Naznačuje to, že materiál tam byl zakalen s vysokou rychlostí ochlazení. V souladu s výsledky mikrostruktury tvrdost odpovídá struktuře s nízkouhlíkovým martenzitem.

8.4 Analýza výsledků

Metalografickým zkoumáním vzorků bylo zjištěno a potvrzeno několik faktů o tepelném ovlivnění a změnách vlastností materiálu. Při tepelném dělení plazmou se musí vždy počítat s určitými více či méně nežádoucími účinky tepla na řezaný materiál. Vždy se vyskytuje tenká oblast částečně nataveného materiálu na kterou navazuje oblast s jistou změnou vlastností. Při středních a větších tloušťkách to bývá nejčastěji zakalení, doprovázené zvýšením tvrdosti a křehkosti a možností případných trhlin. Obecně lze konstatovat, že míra tepelného ovlivnění je závislá na více činitelích, z nichž nejdůležitější jsou kromě neovlivnitelných (např. rychlost ochlazování a obsah legujících prvků), teplota plazmového paprsku a rychlost řezání. Bylo potvrzeno, že při vhodně zvolených technologických parametrech lze při plazmovém řezání dosáhnout velmi dobrých výsledků co se týká kvality řezu a velikosti tepelně ovlivněné oblasti. Při tloušťce materiálu 50 mm byla dosažena šířka TOO okolo 1,5 mm, což je vynikající výsledek nesrovnatelný s řezáním kyslíkem a např. laserem by tato tloušťka nebyla proříznuta vůbec. Záleží na způsobu dalšího použití výpalku, do jaké míry je tepelně ovlivněná zóna problémem. Při případné nutnosti dalšího mechanického opracování povrchu řezu, postačí v tomto případě přídavek na obrobení do 3 mm, což zajistí zcela odstranění tepelně ovlivněného pásma.

9. ZÁVĚR

Práce zahrnuje problematiku tepelného dělení materiálů plazmou. Tato technologie dosahuje dobré výsledky srovnatelné s řezáním laserem i u tvorově komplikovaných výpalků je pro uživatele atraktivní díky důležitým charakteristickým technicko-ekonomickým přednostem. Aby se předešlo problémům které mohou mít vliv na výslednou kvalitu řezů, techniku zařízení nebo celkovou ekonomiku výroby, je potřeba se zabývat výzkumem technologických parametrů, které mají na řezný proces nemalý vliv a kterými lze tento proces ovlivňovat k dosažení optimálních výsledků. Práce se nezabývá pouze známými skutečnostmi, ale snaží se taky v rámci možností stanovit vliv technologických parametrů, zejména řezné rychlosti na kvalitu řezného procesu. Na základě provedených pozorování a měření je tento vztah odvozen. Výsledkem jsou tedy konkrétní hodnoty. Pozornost byla věnována taky metalografickému vyhodnocování jednotlivých vzorků. Sledována byla především šířka tepelného ovlivnění materiálu, kde byla vyzorována zřetelná nepřímá závislost na řezné rychlosti. Z experimentu vyplývá, že optimální řezná rychlost je relativní veličina, závislá na prioritních požadavcích. Je nutno volit kompromis mezi různými požadovanými ideály. To znamená, že například řezná rychlost, při které je dosaženo nejlepší hodnoty šířky tepelného ovlivnění materiálu není optimální z hlediska drsnosti a vzhledu řezné plochy.

Výsledky experimentální činnosti ukazují, že při dodržení optimálních podmínek je tato metoda více než konkurenceschopná a lze jí dosahovat kvality řezu takové úrovně, že v závislosti na dalším použití výpalku není potřeba zařazovat další operaci mechanického opracování řezné plochy. Při srovnání plazmového řezání s metodou řezání kyslíkem, které bylo taky předmětem této práce, můžeme zmínit například naměřenou šířku tepelně ovlivněné oblasti. Při dělení materiálu tloušťky 50 mm byla při optimálních podmínkách zjištěna šířka TOO kolem 1,5 mm. U kyslíkového řezání by tato hodnota byla několikanásobně větší a k tomu ještě můžeme připočítat mnohem větší produktivitu plazmy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Gross B., Gryce B., Miklóssy K.: *Technika plazmatu*, SNTL, Praha, 1967.
- [2] Kuncipál J., Pilous V., Dunovský J.: *Nové technologie ve svařování*, SNTL, Praha, 1984.
- [3] Minařík V.: *Tepelné dělení materiálů*, ČVUT Praha, 1993.
- [4] Novotný J., Dubenský R., Dunovský J.: *Progresivní metody svařování a tepelného dělení materiálu*, SNTL, Praha, 1986.
- [5] Kramářová Ivana: *Tepelné dělení vysokolegované austenitické oceli vzduchovou plazmou*, Disertační práce, 2000.
- [6] Sborník přednášek semináře : *Progresivní metody svařování*, SUB Uherský Brod, 1985.
- [7] Turňa M.: *Speciálně metody zvarania. 1. vyd.*, ALFA, Bratislava, 1989.
- [8] Václavík L.: *Plynové a plazmové řezací stroje Pierce Control Automation, Strojírenská výroba*, č. 7-8, 1996.
- [9] Kolektiv autorů: *Tepelné dělení materiálů*. ČÚV Komitétu pro svařování
- [10] Časopis *MM Průmyslové spektrum*, „Moderní zařízení pro tvarové dělení kovů plazmou“, č. 10/2002.
- [11] ČSN EN ISO 9013
- [12] <http://www.hypertherm.com>
- [13] <http://www.konstrukce.cz>
- [14] <http://www.airliquide.cz>
- [15] <http://www.ssab.com>
- [16] <http://www.kjellberg-plasma.com>
- [17] Leták firmy RW Ferra – „Tvarové výpalky a výpalky s úkosy“

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

OZNAČENÍ	LEGENDA	JEDNOTKA
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
A_5	Tažnost	[%]
$Rz5$	Průměrná výška prvků profilu	[μm]
u	Úchylka kolmosti	[mm]
n	skluz	[mm]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
b	Šířka řezné spáry	[mm]
V_r	Rychlost řezání	[mm/min]
V_{opt}	Optimální rychlost řezání	[mm/min]
Q_m	Hmotnostní průtok	[$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$]
C_p	Měrná tepelná kapacita	[$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$]
d	Průměr trysky	[mm]
α	součinitel sdílení tepla od plazmatu do kanálu trysky	[$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$]
I	El. proud	[A]
U	Napětí	[V]
$T_{stř}$	Střední teplota	[°C]
E	střední gradient poklesu napětí na délce oblouku	[V]
W	Střední výtoková rychlost	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
R	Poloměr výstupního otvoru anody	[mm]
ρ	Průměrná hustota plynu	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]