

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie  
obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Akademický rok 2011/2012

Bc. Luboš RAUCH

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Nekonvenční řezání plechů plasmou a kyslíkem

Autor: **Bc. Luboš RAUCH**

Vedoucí práce: **Ing. Jan ŘEHOŘ, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš RAUCH, DiS.**  
Osobní číslo: **S09N0059K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Název tématu: **Nekonvenční řezání plechů plasmou a kyslíkem**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod do problematiky a cíle řešení
2. Moderní způsoby řezání plechů
3. Charakteristika současného stavu řezání plechů ve firmě EGE a hodnocení stavu
4. Realizace vybraného experimentálního měření
5. Porovnání výsledků se současným stavem
6. Technicko-ekonomické vyhodnocení
7. Závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

**MÁDL, J.: Teorie obrábění. Praha, ČVUT 1990**

**MÁDL, J.: Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění. Praha, ČVUT 1990**

**MORÁVEK, R. : Nekonenční metody obrábění /2. vyd. Plzeň : 1999. ISBN 80-7082-518-9.**

**CIRP ANNALS - Manufacturing Technology: (<http://www.cirp.net/>)**

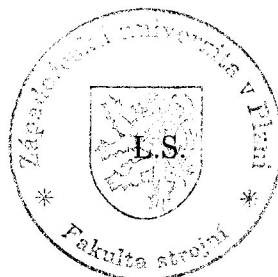
**MM Průmyslové spektrum Obráběcí stroje a technologie:**


**(<http://www.mmspektrum.com/clanky-nomenklatura/obrabeci-stroje-a-technologie>)**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2011**  
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Rauch	Jméno Luboš
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie – technologie obrábění	
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Řehoř, Ph.D.	Jméno Jan
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Nekonvenční řezání plechů plasmou a kyslíkem	

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	69	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	69	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	-
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Diplomová práce se v první části zabývá teorií nekonvenčního způsobu obrábění. Zabývá se moderními současně používanými metodami řezání plechů. Druhá část diplomové práce je experimentální. Experiment porovnává řezání plechů plasmou a kyslíkem ve výrobním podniku ve vztahu k nové technické normě pro provádění ocelových konstrukcí.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	řezání plechů, plasmové řezání, řezání kyslíkem, řezání laserem, řezání vodním paprskem, geometrické tolerance, úhlová odchylka, tvrdost, drsnost

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Rauch	Name Luboš
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Řehoř, Ph.D.	Name Jan
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KTO	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	unconventional methods of cutting plates by plasma and oxygen	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Department of Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2012
----------------	---------------------------	-------------------	---	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	69	<b>TEXT PART</b>	69	<b>GRAPHICAL PART</b>	-
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>The first part of thesis is engaged in theory of unconventional machining methods and progressive present methods of cutting metal plates. The second part of thesis is description and evaluation of practical experiment.</p> <p>In experiment I compared methods of cutting plates by plasma and oxygen in production factory in relation to new standard for execution of steel structures.</p>
<b>KEY WORDS</b>	cutting metal plate, plasma cutting, oxygen cutting, laser cutting, water set cutting, geometric tolerance, angular displace, hardness, roughness

## Obsah:

1. Úvod .....	- 9 -
2. Způsoby nekonvenčního obrábění .....	- 10 -
2.1 Elektroerozivní obrábění .....	- 10 -
2.2 Obrábění paprskem laseru .....	- 11 -
2.3 Obrábění elektronovým paprskem .....	- 11 -
2.4 Obrábění iontovým paprskem .....	- 11 -
2.5 Obrábění paprskem plazmy .....	- 12 -
2.6 Elektrochemické obrábění .....	- 12 -
2.7 Chemické obrábění .....	- 12 -
2.8 Obrábění ultrazvukem .....	- 13 -
2.9 Obrábění vodním paprskem .....	- 13 -
2.10 Obrábění proudem brusiva .....	- 13 -
3. Moderní způsoby řezání plechů .....	- 14 -
3.1 Řezání vodním paprskem .....	- 14 -
3.2 Řezání kyslíkem .....	- 16 -
3.2.1 Princip řezání kyslíkem .....	- 16 -
3.2.2 Kyslík .....	- 18 -
3.2.3 Hořlavé plyny .....	- 19 -
3.2.4 Rozdělení zařízení .....	- 19 -
3.3 Řezání laserovým paprskem .....	- 20 -
3.3.1 Historie laseru .....	- 20 -
3.3.2 Dělení laserů .....	- 21 -
3.3.3 Metody řezání laserem .....	- 22 -
3.3.3.1 Tavné řezání laserem .....	- 22 -
3.3.3.2 Oxidační řezání laserem .....	- 22 -
3.3.3.3 Sublimační řezání .....	- 22 -
3.3.4 Řezný proces .....	- 23 -
3.3.5 Parametry laserového záření použitého pro řezání .....	- 23 -
3.3.6 Tepelně-fyzikální vlastnosti řezaného materiálu .....	- 23 -
3.3.7 Parametry řezného plynu .....	- 24 -
3.3.8 Výhody a nevýhody laserového řezání .....	- 24 -
3.4 Řezání plazmou .....	- 25 -
3.4.1 Historie a fyzikální podstata plazmy .....	- 25 -
3.4.2 Zapálení paprsku plazmy .....	- 26 -
3.4.3 Používané plazmové plyny .....	- 28 -
3.4.4 Typy plazmových zařízení .....	- 28 -
3.4.5 Typy plazmových hořáků a plazmového řezání .....	- 29 -
3.4.5.1 Vzduchové plazmové řezání .....	- 29 -
3.4.5.2 Řezání hořáky s plynovou stabilizací .....	- 29 -
3.4.5.3 Dělení s vodní clonou .....	- 30 -
3.4.5.4 Řezání hořáky se vstřikováním vody .....	- 30 -
3.4.5.5 Řezání pod vodou .....	- 31 -
3.4.5.6 Řezání plazmou s vysokou koncentrací paprsku .....	- 31 -
3.4.6 Chlazení plazmových hořáků .....	- 31 -
3.4.7 Shrnutí plazmového řezání .....	- 31 -



4. Charakteristika současného stavu řezání plechů ve firmě EGE spol. s r.o. a hodnocení stavu .....	- 33 -
4.1 Strojní vybavení .....	- 33 -
4.1.1 Kyslíkové řezání .....	- 33 -
4.1.2 Plazmové řezání .....	- 33 -
4.1.3 Další používané stroje .....	- 35 -
4.2 Vyhodnocování pálených dílců .....	- 35 -
4.2.1 Současný stav vyhodnocování pálených dílců .....	- 35 -
4.2.2 Změny ve vyhodnocování pálených dílců .....	- 35 -
5. Experimentální měření .....	- 37 -
5.1 Standardní výroba .....	- 37 -
5.2 Stanovení parametrů pro vyhodnocení experimentu .....	- 40 -
5.2.1 Jakost řezaných povrchů .....	- 40 -
5.2.2 Tvrdost povrchů volných hran .....	- 40 -
5.2.3 Ostatní sledované parametry .....	- 40 -
5.3 Stanovení tvaru vzorku .....	- 41 -
5.3.1 Tvar vzorku .....	- 41 -
5.3.2 Materiál vzorku .....	- 42 -
5.3.3 Zkušební místa a metody .....	- 42 -
5.4 Provedení experimentu .....	- 43 -
5.4.1 Stanovení vzorků a parametrů řezání .....	- 43 -
5.4.2 Vizuelní hodnocení a vady .....	- 53 -
5.4.3 Geometrické tolerance .....	- 55 -
5.4.4 Úchylka kolmosti .....	- 56 -
5.4.5 Vyhodnocení tvrdosti řezu .....	- 58 -
5.4.6 Vyhodnocení drsnosti povrchu .....	- 60 -
6. Porovnání výsledků se současným stavem – shrnutí .....	- 63 -
7. Technicko-ekonomické vyhodnocení .....	- 65 -
7.1 Technické porovnání .....	- 65 -
7.2 Ekonomické vyhodnocení .....	- 65 -
7.2.1 Výpočet ceny výrobku .....	- 66 -
7.3 Diskuse .....	- 67 -
8. Závěr .....	- 69 -

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK:

CAD/CAM	computer-aided design/computer-aided manufacturing
EIM	electro discharge machining, elektroerozivní obrábění
LBM	Laser beam machining, obrábění paprskem laseru
EBM	Elektron beam machining, obrábění elektronovým paprskem
IBM	Ion beam machining, obrábění iontovým paprskem
PBM	Plasma beam machining, obrábění paprskem plasmu
ECM	Electro-chemical machining, elektrochemické obrábění
CHM	Chemical machining, chemické obrábění
USM	Ultrasonic machining, obrábění ultrazvukem
WSM	Water jet machining, obrábění vodním paprskem
AJM	Abrasive jet machining, obrábění proudem brusiva
YAG	Yttrium Aluminium Granát
TPV	technická příprava výroby

## SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH JEDNOTEK:

<i>kp</i>	kilopond	jednotka síly ( $1kp \cong 9,807N$ )
<i>mm</i>	milimetr	jednotka délky
$\mu m$	mikrometr	jednotka délky
<i>A</i>	ampér	jednotka elektrického proudu
<i>V</i>	volt	jednotka elektrického napětí
<i>kV</i>	kilovolt	jednotka elektrického napětí
<i>kW</i>	kilowatt	jednotka výkonu
$^{\circ}C$	stupeň Celsia	jednotka teploty
<i>MPa</i>	megapascal	jednotka napětí
<i>J</i>	joule	jednotka práce
<i>bar</i>	bar	jednotka tlaku
<i>s</i>	sekunda	jednotka času

## 1. Úvod

Diplomová práce se zabývá technologií obrábění plechů řezáním plazmovým a kyslíkovým plamenem. Řezání materiálu kyslíkem patří do metod tepelného dělení materiálu. Metoda řezání plazmovým paprskem patří do tzv. nekonvenčních metod obrábění. Význam slova nekonvenční není v dnešní době zcela přesný, neboť plazmové či laserové řezání patří do průmyslově využitelných metod obrábění. Dnes již pro většinu průmyslových podniků není problém tyto technologie pořídit.

Nekonvenční technologie obrábění znamenají oproti konvenčním technologiím rozdíl ve způsobu obrábění. Zatímco klasické třískové technologie používají pro oddělení části materiálu mechanický úběr třísek, u nekonvenčního obrábění se úbytku materiálu dosahuje využitím tepelných, elektrických, chemických, abrazivních a jiných fyzikálních jevů. Obrobitelnost materiálu je vázána na fyzikální vlastnosti materiálu (tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost a další). Tyto progresivní metody obrábění se používají hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžko obrobitelné jako např. monolitické a kompozitní keramické materiály, kompozitní materiály s kovovou maticí, některé polymery apod. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich žárupevnosti, vysoké tvrdosti, křehkosti, nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem a podobně.

Diplomová práce má za cíl porovnat postupy řezání kyslíkem a plazmou a vyhodnotit je z hlediska nově nastupující normy ČSN EN 1090. Toto porovnání se uvažuje hlavně z hlediska ověření výrobního postupu a tím splnění požadavků daných normou. Také se provede technickoekonomické vyhodnocení. Provede se řezání na shodných vzorcích na obou typech strojů a vyhodnotí se na základě dále určených parametrů.

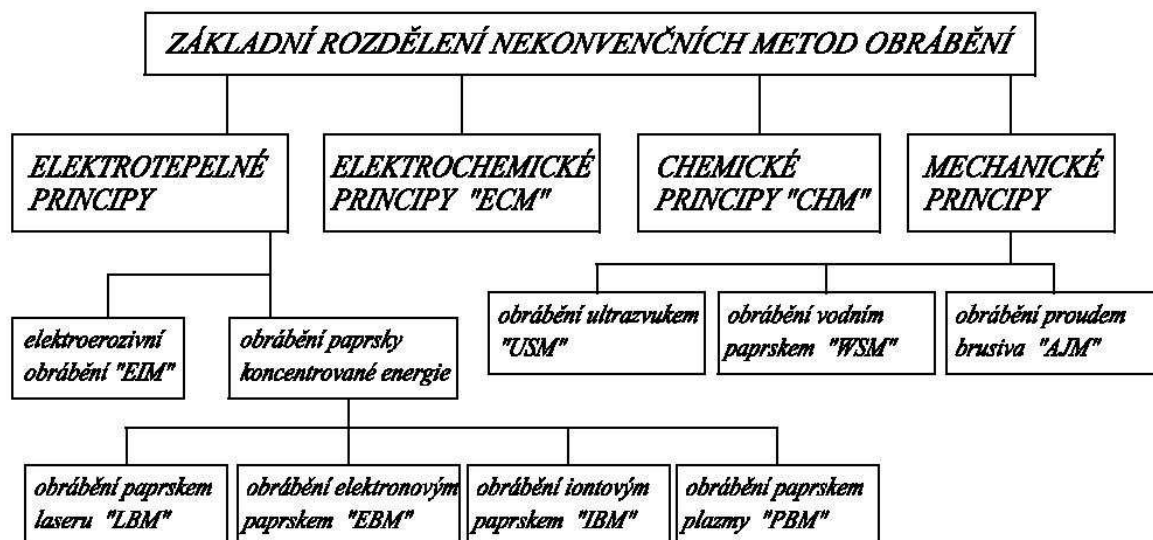
Řezání bylo provedeno ve firmě EGE spol. s r.o., která se zabývá mimo jiné výrobou ocelových konstrukcí. Jsou to konstrukce zaměřené převážně na energetický průmysl, stožáry elektrického vedení a různé podpůrné konstrukce do elektráren. Z charakteru výroby se nejedná o přesnou strojařskou činnost, výrobky jsou spíše stavební konstrukce.

## 2. Způsoby nekonvenčního obrábění

Obrábění kovů se dá rozdělit na dva druhy obrábění. Klasické silové třískové a nekonvenční metody obrábění. Význam nekonvenčních metod obrábění roste především z důvodů:

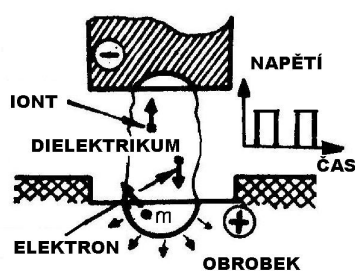
- neustálého vývoje nových metod a zařízení
- zvyšujících se nároků na produktivitu práce a zlevňování výroby
- zvyšování podílu těžkoobrobitelných materiálů při nových konstrukčních řešeních
- integrovatelnost těchto výrobních způsobů se systémy CAD/CAM a CNC řízením
- bezproblémové zavádění do výrobní linky
- bezsilové obrábění, mající předpoklady vzniku povrchu bez mechanického zpevnění
- minimální tepelné zatížení obráběné součásti, zasahuje do mikroobjemu materiálu

Následující obrázek č. 1 uvádí základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění dle fyzikálního principu.



Obr. 1 Nekonvenční metody obrábění [1]

### 2.1 Elektroerozivní obrábění

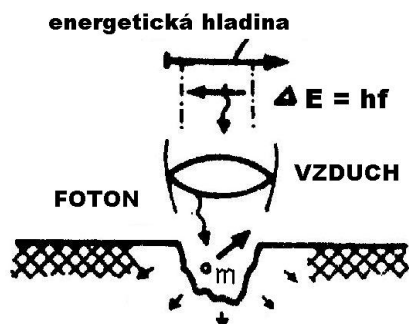


Obrábění probíhá na dvou elektrodách oddělených jiskrovou mezerou 0,01 až 0,5 mm a ponořených v dielektrické kapalině. Ke vzniku výboje dochází v místě nejsilnějšího napětového pole. Tím se vytvoří vodivý (ionizovaný) kanál a mezi elektrodami začíná protékat elektrický proud. Vzniklý výboj vyvolá srážky částic, plazmové pásmo a tím dojde k odtavení materiálu obrobku i nástrojové elektrody. Přerušením výboje dojde k deionizaci a odplavení částic.

Nevýhodou tohoto způsobu obrábění je velký úbytek nástrojové elektrody, který lze

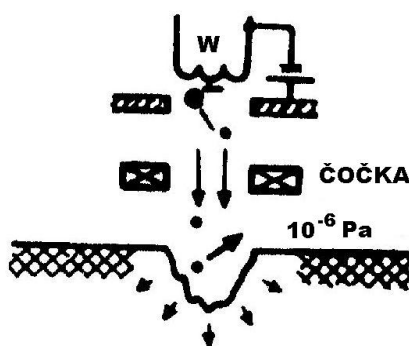
minimalizovat podmínkami obrábění a vhodnou volbou nástrojové elektrody. Použití je vhodné pro řezání tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, vyřezávání profilů.

## 2.2 Obrábění paprskem laseru



Při laserovém obrábění dochází k odebírání materiálu účinkem úzkého paprsku silného monochromatického světla soustředěného na velmi malou plošku. V místě dopadu se energie světelného záření mění na energii tepelnou a tím dojde k odtavení případně odpaření materiálu obrobku.

## 2.3 Obrábění elektronovým paprskem



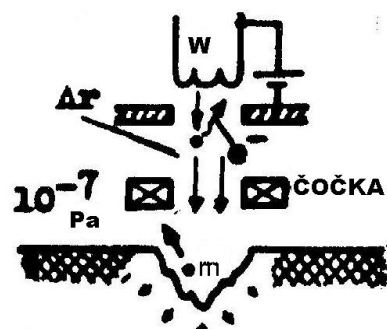
Obrábění paprskem elektronů využívá soustředěný svazek elektronů o vysoké rychlosti, který dopadá na obráběný materiál. Materiál se v místě dopadu odpařuje. Při pulzním režimu, který je nejčastější aplikací elektronového paprsku pro vrtání, neprobíhá odpařování kontinuálně, ale v podobě postupných erupcí.

Nejčastěji se tato metoda používá pro obrábění děr malých rozměrů v rozmezí 0,1 až 1 mm. Obrobitelnost materiálu je dána pouze jeho tepelně fyzikálními vlastnostmi a nezávisí na mechanických vlastnostech. Proto se elektronový

paprsek používá pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů.

Elektronovému i laserovému paprsku je společná vysoká koncentrace výkonu. Předností elektronového paprsku je jeho vysoká účinnost (>95%), nižší náklady na provoz stroje a jednodušší uspořádání. Značnou nevýhodou je nutnost obrábět ve vakuu.

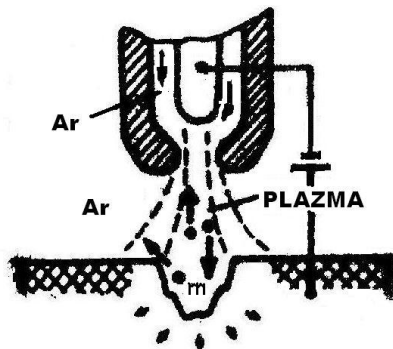
## 2.4 Obrábění iontovým paprskem



Iontová zařízení jsou založena na působení iontů ve vakuu na obráběný materiál. Intenzita úběru je závislá na hustotě proudu iontů.

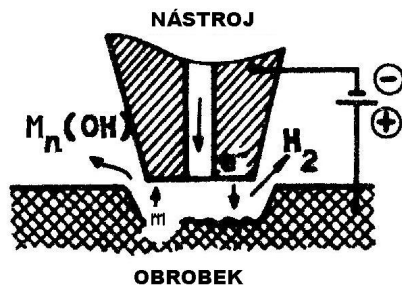
Výhodou je možnost obrábění téměř všech materiálů, vyšší hodnoty úběrů, plně kontrolovatelné obrábění s přesností 100 nm a vysoká kvalita obrobeného povrchu.

## 2.5 Obrábění paprskem plazmy



Princip řezání plazmou spočívá v tavení materiálu extrémně vysokou teplotou,  $>10\,000^{\circ}\text{C}$ . Vysokou teplotou se materiál taví a kinetickou energií proudu vytlačuje roztavený materiál z místa řezu. Podrobněji o řezání plazmou je uvedeno dále.

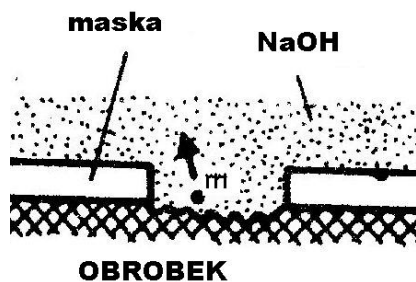
## 2.6 Elektrochemické obrábění



Elektrochemické obrábění je metoda beztliskového obrábění elektricky vodivých materiálů. K úběru materiálu dochází v důsledku řízené elektrolýzy. Elektrolyt prochází mezerou mezi obrobkem a nástrojem, kdy stejnosměrný proud o nízkém napětí rozpouští materiál na obrobku. Anoda, kladná elektroda – tedy obráběná plocha se rozpouští v elektrolytu podle tvaru katody – nástroje, záporné elektrody. Katoda tvoří zrcadlový obraz obrobené plochy.

Výhodou této metody je možnost obrábění tvrdých materiálů jako kalená ocel, žárovevné slitiny, nebo provádění tvarovaných ploch či hlubokých děr.

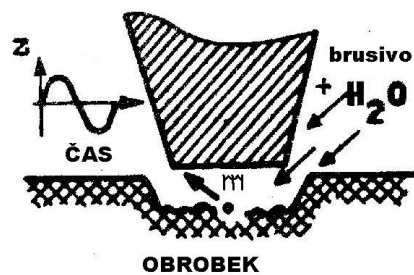
## 2.7 Chemické obrábění



Chemické obrábění je prováděno řízeným odleptáváním tenkých vrstev materiálu v tloušťkách od několika setin milimetru do několika milimetrů. Metoda je založena na chemické reakci mezi obrobkem a pracovním prostředím, nejčastěji kyselinou nebo hydroxidem.

Ekonomicky výhodná metoda u plošných obrobků s potřebou malého úbytku tloušťky.

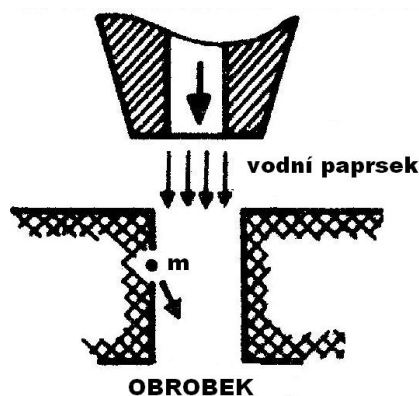
## 2.8 Obrábění ultrazvukem



Podstatou této abrazivní metody je řízené rozrušování obráběného materiálu účinkem úderů abrazivních zrn nacházejících se mezi obráběným povrchem a nástrojem, které jsou v podélném směru rozkmitávány na ultrazvukovou frekvenci. Počet kmitů je cca 18-25 tisíc za sekundu. Zrna rozrušují povrch obrobku a po přitlačení nástroje k obrobku dochází k překopírování tvaru nástroje na obrobek. Touto metodou se dají obrábět tvrdé a křehké

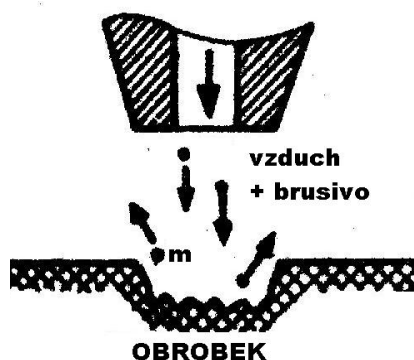
materiály, např. sklo, křemík, keramika.

## 2.9 Obrábění vodním paprskem



Tato metoda využívá abrazivního účinku vysokotlakého vodního paprsku pro odstraňování materiálů.

## 2.10 Obrábění proudem brusiva



K odstraňování materiálu se využívá účinku brusiva unášeného vzdušným proudem o vysoké rychlosti. Optimální hodnota pracovního tlaku se udává 5,0 MPa, brusivem je tavený oxid hliníku nebo karbid křemíku.

### 3. Moderní způsoby řezání plechů

V současné době jsou pro většinu průmyslových podniků nekonvenční, progresivní metody již běžně dostupné. Výrobci neustále vyvíjejí či zdokonalují technologie výroby obráběcích strojů. Díky těmto úpravám a také konkurenčnímu prostředí dochází ke zlevňování a tím k většímu rozšiřování těchto technologií do výrobních podniků.

Používané technologie pro řezání plechů ve výrobních podnicích lze dělit na:

- řezání vodním paprskem,
- řezání kyslíkem
- řezání laserovým paprskem,
- řezání paprskem plazmy

#### 3.1 Řezání vodním paprskem

Obrábění vodním paprskem se někdy označuje jako hydrodynamické obrábění. Využívá se především pro řezání různých materiálů, kdy řezným nástrojem je paprsek vody o vysokém tlaku a rychlosti. Nejčastěji se v praxi využívá řezání čistým vodním paprskem a řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí.

Zařízení pro řezání čistým vodním paprskem se používá zejména pro řezání nekovových materiálů, jako jsou lamináty, grafitové kompozity, sklotextil, gumotextil. Rychlost řezání je 5 až 400 m.min<sup>-1</sup>. Zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí lze použít pro řezání tvrdých a velmi tvrdých materiálů rychlostmi od 10 m.min<sup>-1</sup> (titan, kobalt, SK) až do 2500 m.min<sup>-1</sup> (sklo, hliník, kompozity). [5]

Vysokotlaká čerpadla s různým příkonem a průtokem vody dosáhnou pracovního tlaku cca 500 až 4000 barů. Vhodným abrazivem je přírodní granát či olivín.

Výhody řezání vodním paprskem:

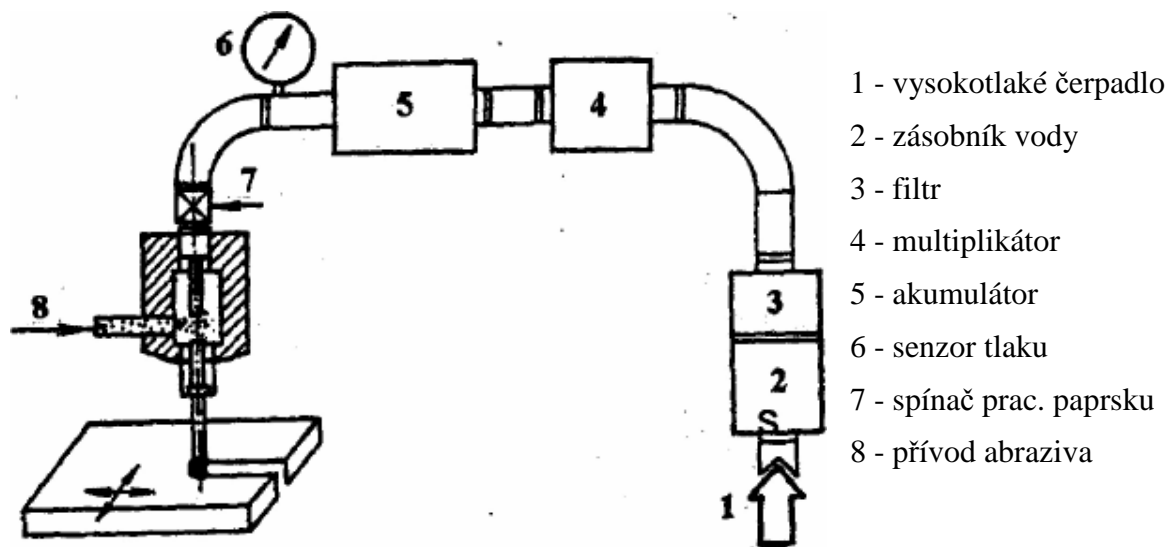
- řezání vodním paprskem probíhá bez dotyku nástroje a materiálu,
- nedochází k tepelnému namáhání materiálu a ke vzniku vnitřního pnutí,
- řezy lze provádět v těsné blízkosti hrany materiálu a minimalizovat tak odpad,
- nedochází ke vzniku mikrotrhlin v okolí řezu,
- řezání vodním paprskem nezpůsobuje vznik polétavého prachu z děleného materiálu,
- vodním paprskem lze řezat i materiály měkké a lepkavé nebo droplivé a křehké,
- lze provádět kvalitní řezy vrstvených materiálů o různých fyzikálně-chemických vlastnostech,
- nedochází k chemickému ovlivnění řezaného materiálu,
- nevznikají žádné škodlivé plyny nebo páry,
- výsledkem je kvalitní řez bez otřepů,
- řezná hrana obvykle již nevyžaduje další opracování,
- je dosahována vysoká přesnost řezu,



- úspora materiálu při použití materiálu větší tloušťky,
- neporušení povrchové úpravy materiálu (leštění, broušení...),
- příznivá cena.

Nevýhody řezání vodním paprskem:

- nevyhnutelný kontakt s vodou,
- kovové materiály nutno vhodně ošetřit,
- delší vysoušení u nasákavých materiálů,
- možnost změny barvy či znečištění některých materiálů,



Obr. 2. Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí [5]

Na následujících dvou obrázcích [6] jsou uvedeny příklady řezu vodním paprskem



Obr. 3. Tvarový řez



Obr. 4. Řez durallem tl. 160 mm

## 3.2 Řezání kyslíkem

Řezání kyslíkem se řadí mezi tři nejpoužívanější metody tepelného dělení materiálů (spolu a plazmovým a laserovým řezáním). Ze všech těchto tří metod má řezání kyslíkem nejdelší s nejbohatší historií a z toho plyne také nejvíce praktických aplikací. V téměř každé strojírenské výrobě se lze potkat s některou z variant řezání kyslíkem – ruční nebo strojní.

Zatímco ale plazmové a laserové technologie dnes nalézají stále nová uplatnění a vývoj v těchto oborech postupuje rychle kupředu, v oblasti řezání kyslíkem je pro inovace zásadního charakteru stále méně prostoru, stále obtížněji se zde hledají témata doposud nevyzkoušená. Vývoj postupuje zejména v oblasti řezacích trysek, kde díky dokonalejším systémům vedení hořáku se stále více uplatňují trysky rychlořezné a vysokovýkonné dosahující nejvyšších řezných rychlostí při vynikající kvalitě řezu.

Řezání kyslíkem je relativně jednoduchá metoda, jejíž podstatou je spalování řezaného materiálu (předehřátého nahřívacím plamenem na zápalnou teplotu) v proudu kyslíku. Produkty spalování – oxidy ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) jsou pak vyfukovány kyslíkem z místa řezu ve formě strusky.

Kyslíkem lze efektivně řezat nelegované a v závislosti na chemickém složení také nízkolegované oceli. Výhodou je teoreticky neomezená tloušťka řezaného materiálu, i když většina běžně používaných zařízení je konstruovaná pro vysoce kvalitní řezy do tloušťky 300 mm. V oblastech menších tloušťek nepatří tato metoda k nejrychlejším, nicméně vysoká kvalita řezu a jedinečnost při řezání velkých tloušťek ji zajišťuje stabilní místo ve strojírenství. [4,7]

### 3.2.1 Princip řezání kyslíkem

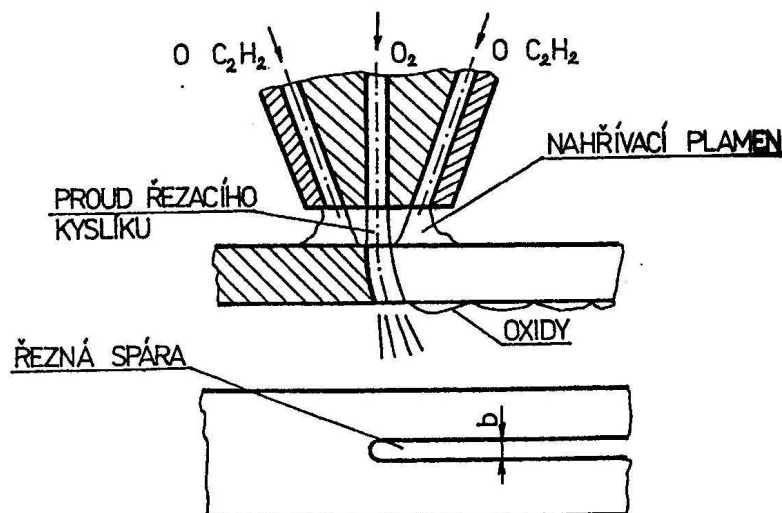
Zdrojem energie pro proces řezání je jednak nahřívací plamen tvořený spalováním hořlavého plynu v kyslíku a jednak exotermická reakce mezi prvky obsaženými v oceli a kyslíkem. Teplota z nahřívacího plamene totiž nestačí energeticky pokrýt celý průřez řezu, vlivem odvodu tepla do obrobku. U větších tloušťek (cca nad 30 mm) tak narůstá význam tepla vznikajícího z probíhající reakce mezi kyslíkem a materiálem. Existence exotermické oxidické reakce je tedy jednou s nutných podmínek, které musí být splněny, aby materiál byl kyslíkem řezatelný. Množství tepla, které tato reakce vyvine, musí stačit na ohřev okolního materiálu na zápalnou teplotu. Zápalná teplota materiálu pak musí být nižší než jeho teplota tavení (u nelegované oceli: zápalná teplota cca  $1300^\circ\text{C}$ , teplota tavení cca  $1500^\circ\text{C}$ ). Aby vznikající oxidy nebyly bariérou při dalším šíření reakce, musí být jejich teplota tavení nižší než teplota tavení řezaného materiálu. Za splnění těchto podmínek lze materiál kyslíkem řezat.

Proces je zahájen nahříváním materiálu na zápalnou teplotu nahřívacím plamenem. Po dosažení zápalné teploty a přidání řezacího kyslíku je materiál spalován a vznikající oxidy jsou vyfukovány z řezné spáry řezacím kyslíkem ven. Rychlost nárůstu na zápalnou teplotu je daná chemickým složením hořlavého plynu, jeho množstvím, množstvím přidávaného nahřívacího kyslíku a způsobem odvodu tepla (tloušťka materiálu a rozměry plechu). 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. Podstatnou roli zaujímá také kvalita řezaného plechu a stav jeho povrchu. Za předpokladu kvalitního stroje a jeho zkušené obsluhy je význam soustředěn do kombinace tryska – kyslík – hořlavý plyn. Na trhu je dnes řada kvalitních řezacích trysek, které při dodržení nastavení optimálních parametrů umožňují bezvadné řezy vysokými řezacími rychlostmi. Nejvyšších řezacích rychlostí lze dosáhnout pomocí tzv. vysokovýkon-

ných trysek, které jsou ale zároveň nejnáročnější na přesnost stroje, úroveň pracovníků a nastavení parametrů.

Řezatelnost materiálu je podmíněna těmito základními podmínkami:

- zápalná teplota řezaného kovu v proudu kyslíku musí být nižší než teplota tavení. Není-li tato podmínka splněna, nedochází k intenzivnímu hoření kovu a tím vytváření řezné mezery s hladkým povrchem, ale pouze k tavení materiálu a řez je tak velmi nekvalitní. Toto není splněno např. u šedé litiny.
- reakce při hoření kovu musí být exotermická, aby byly pokryty ztráty vzniklé odvodem tepla a reakce mohla kontinuálně pokračovat.
- ohřev materiálu musí být plynulý v celém průřezu a to nejméně na zápalnou teplotu kovu.
- teplota tavení vzniklých oxidů musí být nižší než teplota tavení řezaného kovu a struska musí mít dostatečnou tekutost, aby byla snadno odstranitelná z řezné mezery proudem řezacího kyslíku. Tuto podmínku nesplňují např. vysokolegované oceli, kde vznikající oxid chromu má velkou viskozitu a proto nejde odstranit z řezné spáry. Proto tyto materiály nelze řezat kyslíkem a je třeba použít jiné metody jako např. dělení plazmou, laserem apod.

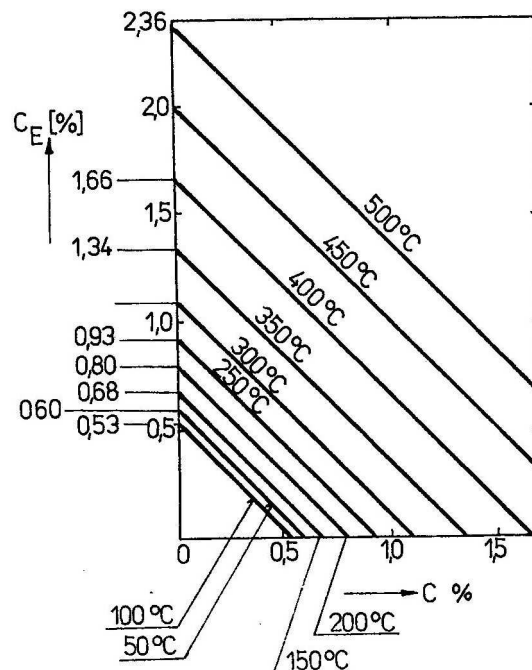


Obr. 5. Schematický řez řezacím hořákem [7]

Při řezání materiálu kyslíkem dochází podobně jako při svařování k jeho tenzotermickému ovlivnění, které se může projevit např. u legovaných ocelí místním zakalením, zvýšením tvrdosti v okolí řezné spáry, případně tvorbou povrchových trhlin. V závislosti na průběhu teplot a rychlosti ochlazování můžeme v tepelně ovlivněné oblasti nalézt podobně jako při svařování tyto oblasti:

- částečného natavení
- zhrubnutí zrna
- normalizace
- částečné překrytalizace

Šířka těchto oblastí se úměrně zvětšuje s tloušťkou řezaného materiálu, obsahem legujících prvků a zvětšující se intenzitou nahřívacího plamene. U legovaných materiálů s možností vzniku zákalných struktur a následných trhlin je nutné snížit tepelný gradient předehřevem. Výšku předehřevu je možno řešit podle diagramu, který je uveden na obr. 6. [4,7]



Obr. 6. Diagram určování výšky předehřevu [7]

Proces řezání kyslíkem v největší míře ovlivňuje několik základních faktorů:

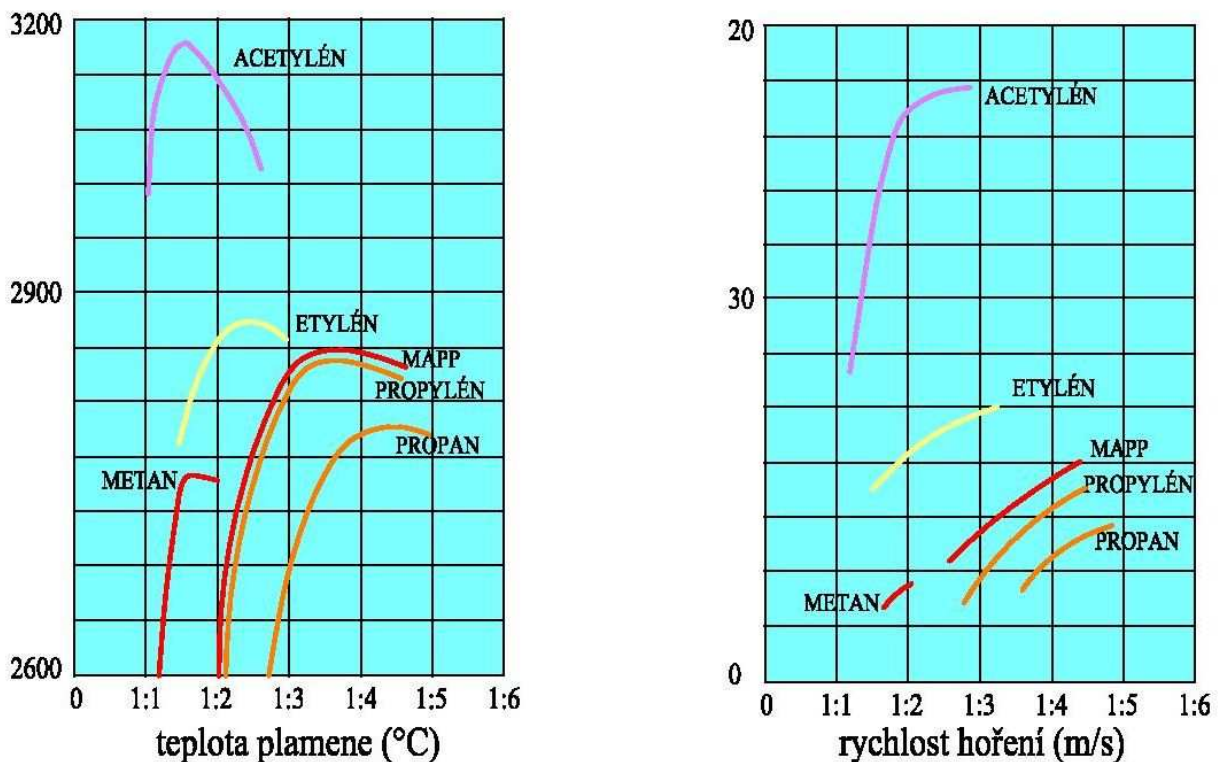
- řezaný materiál (typ, kvalita, stav povrchu),
- řezací zařízení (tryska, hořák, vedení hořáku),
- kyslík (tlak, průtok, čistota),
- hořlavý plyn (typ, tlak, průtok). [4]

### 3.2.2 Kyslík

Jak již bylo uvedeno, podstatou technologie je spalování řezaného materiálu kyslíkem. Vlastnosti dodávaného kyslíku jsou tedy pro optimální výsledek rozhodující. Minimální potřebná čistota řezacího kyslíku je 2,5 (99,5 %). Významný vliv má čistota kyslíku na výstupu z tlakové lahve, svazku tlakových lahví či kryogenního zásobníku, mnohem důležitější však je zajistit zachování čistoty až do řezací trysky (čistota nesmí být snížena v průběhu transportu potrubním a hadicovým systémem k trysce). Často bývá podceňována rovněž skutečnost, že úroveň tlaku řezacího kyslíku (hodnoty – dle doporučení výrobce řezací trysky) musí být ne na výstupu ze zdroje média, ale přímo na řezací trysce. Již zmiňované vysokovýkonné trysky vyžadují při řezání některých tlouštěk tlaku více než 10 bar, čemuž musí odpovídat celý systém zásobování. Optimálních hodnot čistoty, tlaku a průtoku kyslíku lze dosáhnout pouze pomocí dobře dimenzovaného zdroje kyslíku (láhev, svazek, zásobník) a transportního systému (potrubí, hadice, redukční a uzavírací ventily). [4]

### 3.2.3 Hořlavé plyny

Hořlavý plyn je při technologii řezání kyslíkem nutný pro zahřátí materiálu na zápalnou teplotu. Volba typu hořlavého plynu je závislá převážně na požadavcích provozovatele technologie. Je možné sledovat několik kritérií: maximální výkon řezání (rychlost náhřevu na zápalnou teplotu, řezná rychlost, schopnost propálení, ...), kvalitu řezné plochy pro všechny běžně řezané tloušťky materiálů. Ve většině případů je optimálním výsledkem vysoká kvalita řezu při dosažení co největší rychlosti řezání, v případě kratších řezů a častých propalů pak také vysoká rychlost zahřátí materiálu na zápalnou teplotu a možnost propálení co největší tloušťky materiálu bez nutnosti předvrtání. Nejpoužívanějším a z uvedených hledisek nejvýhodnějším hořlavým plynem je acetylén. Oprávněnost jeho použití dokazují následující grafy, které zobrazují porovnání nejvýznamnějších výkonových charakteristik různých hořlavých plynů.



Obr. 7 Porovnání charakteristik hořlavých plynů [4]

Jako zdroj acetylénu připadají v úvahu pouze jednotlivé tlakové lahve nebo svazky tlakových lahví. Velikost zdroje je potřeba dimenzovat vzhledem k maximálně možné okamžité spotřebě. Pro jednotlivé tlakové lahve o vnitřním objemu 40 l nebo 50 l a při teplotě v lahvi 15°C platí, že krátkodobě (max. 10 min.) lze odebírat množství o průtoku 1 m<sup>3</sup>/hod, střednědobě (cca. 1 směna) 0,5 m<sup>3</sup>/hod. a trvale pouze 0,35 m<sup>3</sup>/hod. [4]

### 3.2.4 Rozdělení zařízení

Z hlediska strojního vybavení lze řezání kyslíkem prakticky provádět dvěma základními způsoby:

- ruční – provádí se ručními řezacími hořáky, kvalita řezu záleží především na paliči a je poměrně nízká. Použití je určeno pro méně kvalitní řezy např. v montážních podmínkách, na šrotištích apod. Jeho výhodou je však značná operativnost.
- strojní:

toto řezání lze rozdělit do dvou skupin:

1) mobilní řezací strojky - pojíždí po předem připravené kolejničce nebo vodicím pravítku, jsou určeny zejména pro dlouhé rovné řezy a můžeme s nimi pálit i úkopy pro svarové plochy. Kvalita řezu je podstatně vyšší než u řezání ručního.

2) stabilní řezací stroje - jsou dnes převážně portálové konstrukce a je jimi možno řezat přímé, kruhové i tvarové řezy při vysoké přesnosti řezu a kvalitě řezných ploch. Tyto stroje jsou většinou řízeny fotoelektricky nebo numericky podle předem zpracovaného programu. Přesnost tohoto řezání zvláště ve spojení s plazmovými a laserovými hořáky je velmi vysoká a zároveň dosahujeme velké produktivity výroby. [7]

### 3.3 Řezání laserovým paprskem

K nejnovějším metodám patří laserové dělení, při kterém zfokusovaný laserový paprsek s mimořádně vysokou koncentrací výkonu umožňuje dělit materiály a slitiny prakticky nezávisle na jejich tepelně-fyzikálních vlastnostech. Dosahuje se přitom velmi malá šířka řezu s minimálním tepelně ovlivněným pásmem. Při laserovém dělení nedochází k mechanickému působení na zpracovávaný materiál a vznikají jen minimální deformace. Proto je možné dělit materiály s vysokou přesností, a to i materiály velmi lehce deformovatelné nebo křehké.

Velká koncentrace výkonu v laserovém paprsku zabezpečuje vysokou produktivitu práce a vynikající kvalitu řezu. Snadné ovládání laserového paprsku průmyslovým robotem nebo manipulátorem umožňuje dělit materiály i složitými křivkovými řezy na ploše i v prostoru. Z cenového hlediska je dnes produkce z technologických pracovišť pro dělení materiálů laserem konkurence schopná ve srovnání s ostatními technologiemi dělení.

Jedinou, ale nepochybně závažnou nevýhodou zůstává vysoká cena zařízení. [8]

#### 3.3.1 Historie laseru

Existenci stimulované emise záření předpověděl již Albert Einstein v roce 1917. Jeho teorie zněla následovně: „Určité atomy a molekuly, které jsou schopné kmitání, mohou podněceny přílivem energie, dosáhnout stavu vyšší energetické hodnoty. Přitom přijímají energii převážně ve formě fotonů, tedy světla (světelného kvanta). Jsou-li tyto atomy tak řečeno elektricky přebité, upadají do původního stavu nižší energie, přičemž přebytečnou energii vyzařují v formě fotonů, tedy světla. Tyto světelné vlny budou jednobarevné (září v jedné určité vlnové délce) a budou kmitat ve stejném taktu“.

Vlastní počátek historie laseru spadá do let 1953 – 54, kdy nezávisle na sobě američtí a sovětské vědci rozpracovali počáteční teorie stimulované emise záření. Výsledky těchto prací umožnily postavení prvního zesilovače pracujícího v oboru mikrovln, který byl nazván maserem. V průběhu 60. let byla tato zařízení zdokonalena a označena názvem laser podle zkratky z prvních písmen názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu značí zesílení světla s využitím stimulované emise. [1]

### 3.3.2 Dělení laserů

#### Podle aktivního prostředí

- Plynové lasery: nejdůležitějšími jsou CO<sub>2</sub> laser a excimerový laser.
- Kapalinové lasery: laserovým médiem je roztok barviva, díky němuž může být barva laserového světla měněna v širokém rozmezí.
- Pevnolátkové lasery: nejvýznamnější je neodymový YAG laser.
- Polovodičové lasery: nejmladší typy laserů.

#### Podle vlnové délky záření

- infračervené lasery,
- lasery viditelného pásma,
- ultrafialové lasery,
- rentgenové lasery.

#### Podle délky generovaného impulsu

- kontinuální lasery,
- pulzní ns,
- pulzní ps/fs.

#### Podle typu kvantových přechodů

- molekulární lasery,
- elektronové lasery,
- jaderné lasery.

#### Podle typu čerpání

Podle typu buzení rozlišujeme lasery buzené:

- opticky (světlem) - Nd:YAG, vláknové lasery,
- elektrickým výbojem - CO<sub>2</sub>, He-Ne, excimerové lasery,
- injekcí nosičů náboje (elektrickým proudem) - laserové diody,
- chemicky - chemické lasery používané v armádě,
- elektronovým svazkem,
- tepelnými změnami,
- rekombinací. [9]

### 3.3.3 Metody řezání laserem

- tavné
- oxidační
- sublimační

#### 3.3.3.1 Tavné řezání laserem

U tavného řezání laserem se dělený materiál lokálně nataví a vzniklá tavenina se od základního materiálu odděluje proudem vysoce čistého inertního plynu, který se do místa řezu přivádí, ale na vlastním procesu řezání se nepodílí. Ve srovnání s ostatními metodami řezání laserem lze u tohoto způsobu docílit jen nižší řezné rychlosti. Maximální řezná rychlost stoupá lineárně s výkonem laseru a snižuje se přibližně lineárně s tloušťkou řezaného materiálu a s jeho teplotou. Laserový paprsek je jen velmi málo absorbován. Tento způsob je vhodný především k vytváření neoxidovaných řezů kovových materiálů, jako např. nerezových ocelí, hliníku, mosazi, mědi a pozinkovaného plechu. Použijeme-li jako inertní plyn dusík s vysokou čistotou a vysokým tlakem 1-2 MPa na trysce, jsou výsledkem řezání kovové lesklé řezné plochy, které nevyžadují žádné finální úpravy. V závislosti na kvalitě řezaného materiálu se mohou na spodní hraně řezu objevit otřepy, které je nutno odjehlít. [8]

#### 3.3.3.2 Oxidační řezání laserem

Oxidační řezání laserem se od tavného řezání liší pouze použitím kyslíku jako řezného plynu. Vzájemným účinkem kyslíku s roztaveným povrchem kovu vzniká exotermní reakce, která má za následek další ohřívání materiálu. V důsledku tohoto efektu lze dosáhnout u konstrukčních ocelí vysokých rychlostí řezu, řez je však širší a horší kvality, s vyšší drsností a s větším tepelně ovlivněným pásmem. Tento způsob není proto vhodný pro zhotovování ostrých geometrických tvarů, malých otvorů, apod. Určitým východiskem je přechod na pulzní provoz laseru, kdy se řezaný materiál v mezeře mezi jednotlivými pulzy ochladí a nenastává exotermní reakce. Další vylepšení kvality řezu je možné dosáhnout regulací výkonu laseru, který musí být optimalizován dle tloušťky materiálu. Řezná rychlost je pak omezena sníženým výkonem laseru. [8]

#### 3.3.3.3 Sublimační řezání

Sublimační způsob řezání, při kterém se materiál v místě řezu odpařuje, se v dnešní době velmi málo používá. Pro minimalizaci tavné zóny, která vzniká na hraně řezu, je nutná vysoká hustota energie laserového paprsku. Zároveň se musí kontrolovat tloušťka řezaného materiálu, která nesmí překročit průměr paprsku, aby páry materiálu znovu nezkondenzovaly a nesvařily řez. Tato omezení platí u materiálů, u nichž vzniká tekutá fáze. U materiálů, které se netaví, např. dřevo, keramika apod., omezovací faktor tloušťky neplatí. Sublimační řezání vyžaduje pečlivé nastavení optiky v závislosti na tloušťce materiálu. Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu. [8]



### 3.3.4 Řezný proces

Řezný proces probíhá na základě vzájemného působení laserového paprsku, řezného plynu a řezaného materiálu. Oblast, ve které k těmto účinkům dochází, je ohraničena řeznou spárou ve směru řezu a nazývá se čelem řezu. Paprsek, který na toto čelo působí, musí natavit materiál na teplotu, která vede ke změně pevné fáze materiálu na kapalnou a plynnou.

Pásma, které absorbovaný laserový paprsek ohřívá až na teplotu tání, se v důsledku exotermické reakce s proudícím kyslíkem ještě dále otepluje až k teplotě vznícení. Následuje silné odpařování materiálu, které vede k jeho odvodu. Současné mechanické působení proudu řezného plynu unáší částice tekutého materiálu mimo prostor řezu. Roztavené pásmo se pohybuje ve směru řezu a proces natavování se neustále opakuje. Laserový paprsek v případě kontinuálního řezání tedy stabilně postupuje a představuje vlastní "řezný" nástroj.

Analýzou popsaného procesu lze teoreticky vypočítat řeznou rychlost, šířku řezu, tepelné ovlivnění okraje řezaného materiálu a vznik charakteristických rýh, které způsobují vlastní drsnost řezné plochy. [8]

### 3.3.5 Parametry laserového záření použitého pro řezání

Laserový paprsek je definován svojí vlnovou délkou, výkonem, rozdělením hustoty energie v příčném průřezu (módem), polarizací, divergencí a průměrem. Pro dosažení potřebné hustoty energie pro řezání je laserový paprsek fokusován optikou (takřka výhradně čočkovou), která je definována ohniskovou vzdáleností, transparentí, absorpcí a reflexivitou, fokusační kausťickou plochou a hloubkou ostroty. Řezný proces dále ovlivňuje poloha ohniska fokusační optiky ve vztahu k povrchové ploše materiálu.

Protože celá řada parametrů je definována principiálně a nelze je u daného laseru měnit, pro vlastní technologický proces jsou důležité pouze tyto parametry:

- výkon laserového paprsku,
- transparentce fokusační optiky (především její snižování se stárnutím optiky),
- ohnisková vzdálenost optiky,
- poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku. [8]

### 3.3.6 Tepelně-fyzikální vlastnosti řezaného materiálu

Pro technologický proces řezání jsou rozhodující tyto tepelně-fyzikální vlastnosti materiálu:

- reflexivita řezaného materiálu rozhodující pro vlnovou délku laserového paprsku,
- hustota materiálu,
- tepelná kapacita,
- skupenské teplo tání,
- skupenské teplo výparné,
- tepelná vodivost,
- teplota tání,
- teplota vypařování,

- chemická energie vzniklá při reakci řezaného materiálu s kyslíkem,
- elektrický odpor materiálu. [8]

### 3.3.7 Parametry řezného plynu

Pro proces řezání jsou důležité tyto parametry řezného plynu:

- druh plynu,
- pracovní tlak,
- průměr trysky, kterou proudí řezný plyn,
- geometrie tvaru trysky.

Tlak plynu a geometrie tvaru trysky ovlivňují kvalitu řezu, drsnost povrchu řezné plochy a tvorbu otřepů. Tlak plynu se pohybuje při řezání nízkotlakém do 100 kPa, při řezání středotlakém do 500 kPa a při řezání vysokotlakém do 2 MPa. Konvenční trysky mají kruhový, kuželovitě se rozšiřující otvor. Odstup trysky od materiálu musí být co možno nejmenší, aby plyn optimálně působil v řezné drážce. Obvykle se pohybuje mezi 0,5-2,5 mm. Na odstranění taveniny z drážky se podílí pouze ta část plynu, která do ní vstupuje. Proto se jeví výhodný průměr trysky přibližně rovný šířce řezné drážky řezu. Takto malý průměr se však brzy znečistí a znemožňuje další řezání. Proto v praxi leží průměr trysek mezi 1-2,5 mm. Spotřeba řezného plynu je závislá na průměru trysky a tlaku plynu. [8]

### 3.3.8 Výhody a nevýhody laserového řezání

Výhody:

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálů,
- velmi malá šířka řezné spáry – 0,2÷0,4 mm,
- velmi malé přivedené teplo, žádné deformace obráběného předmětu,
- vysoká řezná rychlost.

Nevýhody:

- vysoké investiční a provozní náklady,
- omezení tloušťky materiálu, konstrukční ocel 25 mm, legovaná 15 mm,
- snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů

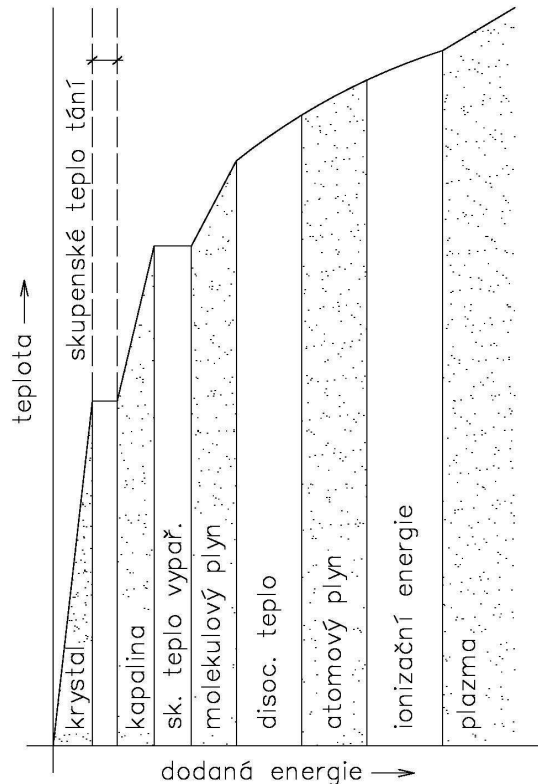
### 3.4 Řezání plazmou

Princip řezání plazmou spočívá v tavení děleného materiálu extrémně vysokou teplotou, která se tvoří vznikem plazmatu hořícím mezi netavící se elektrodou a řezaným materiálem. Netavící se elektroda je zapojena jako katoda (-) a řezaný materiál je zapojen jako kladná elektroda – anoda. Takto vytvořený paprsek plazmatu má vysokou teplotu a velkou kinetickou energii. Roztaví a částečně odpaří dělený materiál a vyfoukne jej z řezné spáry.

#### 3.4.1 Historie a fyzikální podstata plazmy

Z hlediska historického popisu a vývoje plazmy je možné vyjít od Crookse, který si poprvé v roce 1879 uvědomil existenci plazmy jako zvláštního skupenství ve výboji. Oscilaci plazmy ve výboji studoval poprvé Langmuir a definoval plazmu jako část elektrického výboje, ve kterém je stejný počet elektronů a kladných iontů.

Nejběžnějšími stavy hmoty jsou pevné látky, kapaliny a plyny. Tyto vlastnosti byly také nejdříve prozkoumány. Kromě těchto tří skupenství existuje ještě čtvrté skupenství – plazma, která se na Zemi vyskytuje výjimečně. Oproti tomu ve Vesmíru v naší sluneční soustavě je jedna tisícina látky v kapalném, plynném či pevném skupenství, zatímco 999 tisícín je plazma. K vytvoření a udržení plazmy na povrchu Země je nutné buď látku zahřát na vysokou teplotu nebo v ní vytvořit elektrický výboj. Pro získání plazmy je potřeba dodat látce takovou energii, aby se porušily vazby vnějšího elektronu a atom se ionizoval na kladný ion a elektron. Látka, která se skládá z elektronů a kladných iontů se podstatně liší od plynu a nazývá se plazma. Na obrázku 1 je zjednodušený diagram závislosti teploty skupenství chemicky čisté látky na dodané tepelné energii.



Obr. 8. Závislost teploty skupenství chemicky čisté látky na dodané tepelné energii [3]

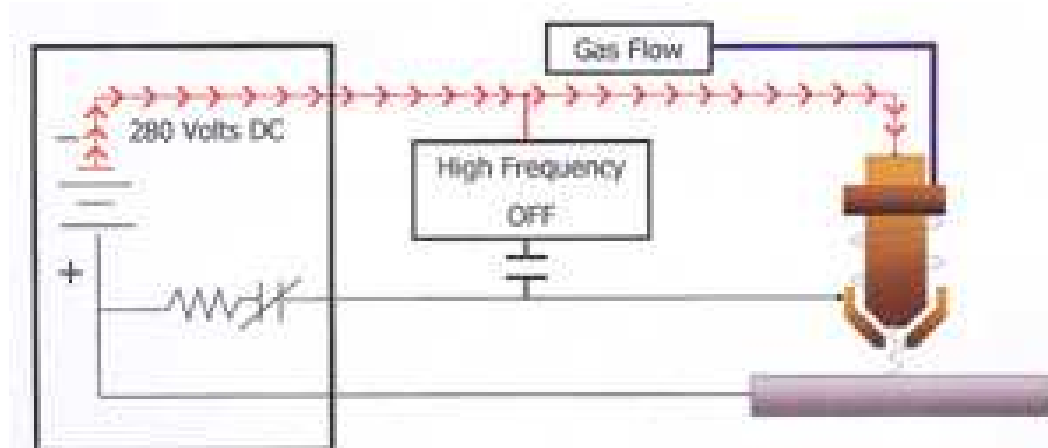
Z obrázku je vidět, že přechod od plynu k plazmě je pozvolný, na rozdíl od předcházejících změn skupenství. Je to způsobeno tím, že molekulový plyn přechází disociací v atomový plyn a teprve při dalším dodávání energie se atom ionizuje [3].

### 3.4.2 Zapálení paprsku plazmy

Zapálení elektrického oblouku se provádí pomocí vysokofrekvenčního jiskrového výboje nebo mechanicky pomocí zapalovací jehly. Následující schémata ukazují ve čtyřech bodech zapálení elektrického oblouku pomocí vysokofrekvenčního výboje [10].

- 1. krok

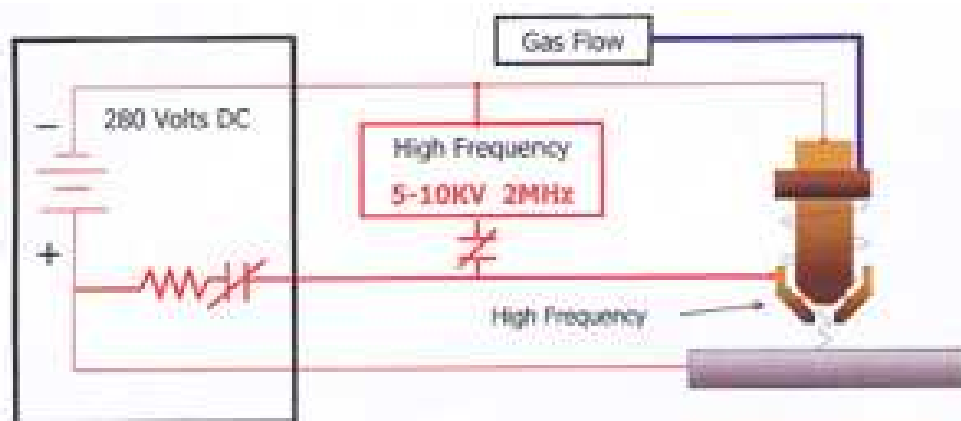
V prvním kroku je poslán startovní signál do zdroje napájení. Tento signál otevře svorkové napětí a zároveň začne protékat plazmový plyn tryskou ven. Tryska je připojena ke kladnému pólu zdroje přes relé a odpor a řezaný materiál je připojen ke kladnému pólu na přímo. Mezi tryskou a materiálem se zatím netvoří žádný elektrický oblouk.



Obr. 9 První krok zapálení oblouku [10]

- 2. krok

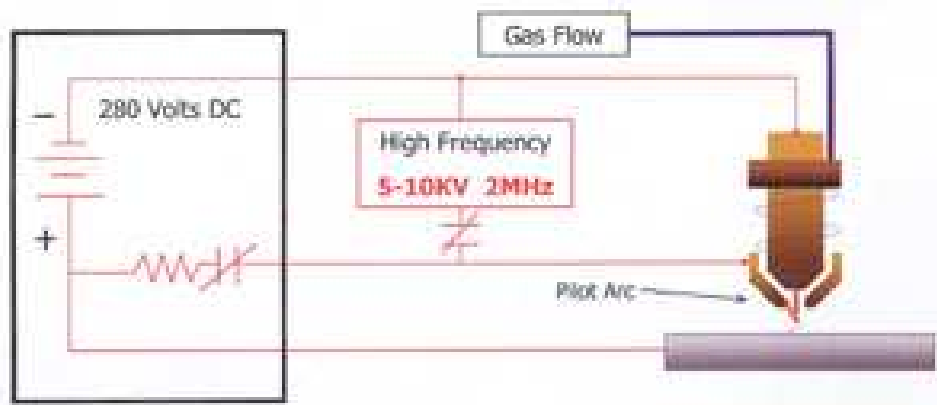
Jakmile je průtok plazmového plynu stabilizovaný, spustí se vysokofrekvenční obvod. Energie z vysokofrekvenčního zdroje způsobuje ionizaci plazmového plynu a tím se plyn stává elektricky vodivý. Tento již elektricky vodivý plyn začne přenášet elektrický oblouk mezi elektrodou a hořákem. Tok plynu vytékající tryskou vytváří pilotní oblouk vně hořáku.



Obr. 10 Druhý krok zapálení oblouku [10]

- 3. krok

Vytvořený pilotní oblouk je ve třetím kroku potřeba přenést na oblouk mezi elektrodou a řezaným materiálem. Po přiblížení hořáku začne procházet proud mezi obrobkem a elektrodou. Elektronika zaznamená tok proudu v obrobku a automaticky vypne generování vysokofrekvenčního zdroje. Ionizace plazmového plynu je nyní udržována mezi elektrodou a obrobkem.

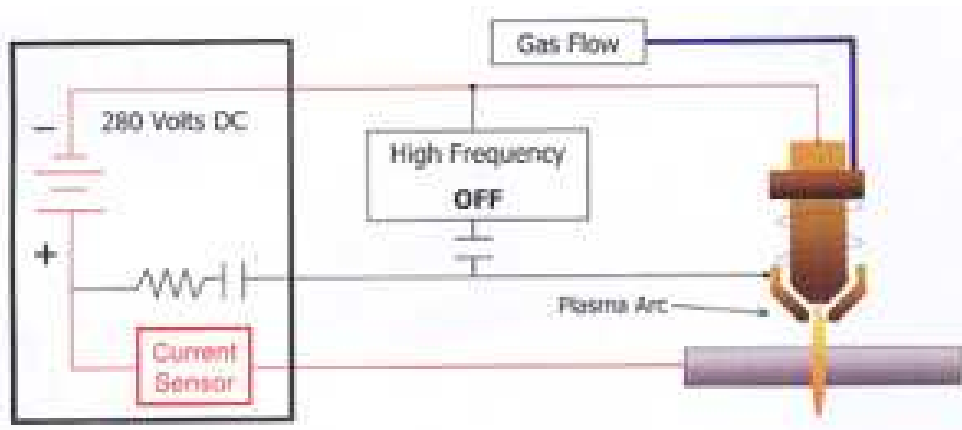


Obr. 11 Třetí krok zapálení oblouku [10]

- 4. krok

Ve čtvrtém kroku je již plazmový paprsek zapálen, vzniká vysoká teplota tavení materiálu obrobku a kinetická energie vyfukujícího plynu odstraňuje roztavený materiál z řezné spáry.

Výstupní rychlost plazmy dosahuje rychlosti 1500 až 2300  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Teplota plazmového oblouku může dosahovat až 30000°C v závislosti na použitém plynu nebo kombinaci plazmových plynů.



Obr. 12 Čtvrtý krok zapálení oblouku [10]

### 3.4.3 Používané plazmové plyny

Pro přesné usměrnění plazmového paprsku je rozhodujícím faktorem druh použitého plynu. Z tohoto hlediska dělíme na:

- Plazmové plyny – plyny, které jsou přiváděny rovnou do elektrického oblouku a ionizovány, např. Ar, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, vzduch a kombinace Ar/ H<sub>2</sub>.
- Fokusační plyny – zužují paprsek plazmatu po opuštění trysky hořáku, např. Ar, N<sub>2</sub>, Ar/ H<sub>2</sub>
- Ochranné plyny – obklopují paprsek plazmy a tavnou lázeň a chrání před účinkem atmosféry, např. Ar, N<sub>2</sub>. [1]

Fokusační plyny se používají ke stabilizaci paprsku plazmy. Tato stabilizace má za následek lepší přenos tepelné energie od hořáku k obrobku a zúžení paprsku plazmy. Zúžením paprsku se dosáhne menší plocha, na kterou paprsek dopadá a tím i menší řezná spára. Ke stabilizaci se dají použít plyny, nebo také vodní clona.

Volba plazmového plynu se odvíjí od druhu řezaného materiálu a je doporučována výrobcem zařízení. . Například pro konstrukční ocel se volí – kyslík, vzduch; pro vysoce legovanou ocel – směs argonu a vodíku, směs argonu a dusíku.

Na kvalitu řezu a opotřebení spotřebních dílů plazmového hořáku má výrazný vliv čistota plazmového plynu.

### 3.4.4 Typy plazmových zařízení

Plazmové řezací zařízení lze rozdělit na ruční a strojní.

Ruční řezací zařízení se skládá z dvou hlavních částí, a to zdroje energie a plazmového hořáku. Ruční řezání se používá zpravidla pro řezání menších tloušťek materiálu.



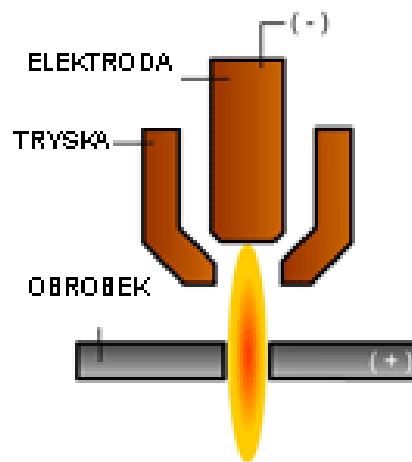
Obr. 13 Ruční řezací zařízení Powermax45 a ruční hořák [11]

Strojní řezání využívá podobných komponentů, ale celé zařízení je doplněno stolem s pohyblivým suportem a CNC řízením. Stůl bývá zpravidla univerzální, takže je možné na něj instalovat i další typy řezacích technologií.

### 3.4.5 Typy plazmových hořáků a plazmového řezání

#### 3.4.5.1 Vzduchové plazmové řezání

Pro vzduchové plazmové řezání bez stabilizace se používá jednotný plazmový plyn, obvykle vzduch nebo dusík, k tvorbě plazmy a chlazení. Tento způsob řezání nemá stabilizaci paprsku plazmy a je používán obvykle pro ruční řezání. Tloušťka materiálu nepřesahuje 16mm. Vzduchové řezání bez stabilizace je nejméně výkonné.



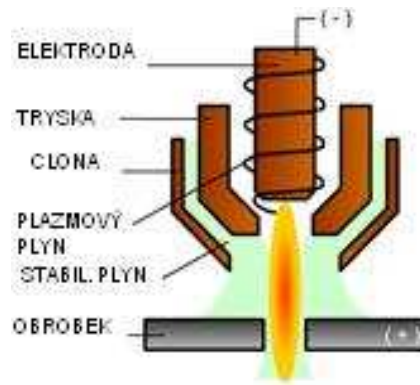
Obr. 14 Vzduchové řezání plazmou [10]

Vzduchové plazmy se stabilizací se používají pro řezání uhlíkových ocelí do tloušťky 40mm. Jako stabilizace se používá opět stlačený vzduch o velkém průtoku, až  $130 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . V těchto plazmách se nepoužívá wolframová elektroda, ale zirkonová nebo hafniová. [10,12]

#### 3.4.5.2 Řezání hořáky s plynovou stabilizací

Pro řezání materiálu se využívají dva plyny. První je pro vytvoření plazmy, druhý má funkci stabilizace plazmového paprsku a ochranu materiálu před atmosférou. Při konvenčním řezání plazmou bez sekundárního plynu se paprsek setkává bezprostředně po průchodu tryskou s opracovávaným materiálem. Odstrikávacím materiálem vznikají zdvojené oblouky, které poškozují trysku a tím se zhoršuje kvalita řezu. Použití sekundárního plynu se tato nevýhoda odstraňuje.

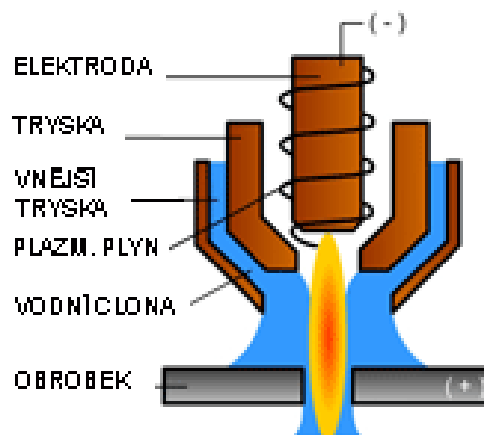
Tento způsob řezání je nejrozšířenější, protože umožňuje kvalitnější řez materiálu a zároveň je rychlejší oproti konvenčnímu způsobu řezání. Při tomto způsobu řezání se dají využívat kombinace plazmových plynů.



Obr. 15 Hořák s plynovou stabilizací [10]

### 3.4.5.3 Dělení s vodní clonou

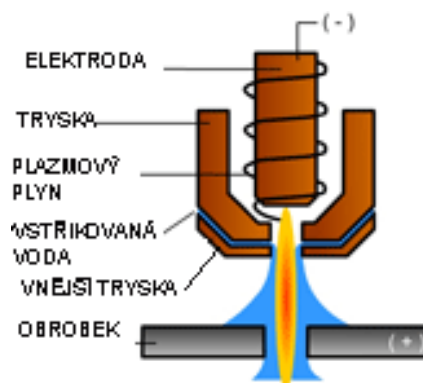
Ochranný, fokusační, plyn je v tomto případě nahrazen vodou. Proces se využívá pouze pro mechanizované dělení.



Obr. 16 Dělení s vodní clonou [10]

### 3.4.5.4 Řezání hořáky se vstřikováním vody

Řezná tryska má přídavné kanálky, kterými se vstřikuje voda do plazmového paprsku. Vstříknutím vody do paprsku dojde k zúžení paprsku a tím ke zvýšení teploty plazmy. Zároveň voda chrání a prodlužuje trvanlivost trysky.



Obr. 17 Hořák se vstřikováním vody [10]

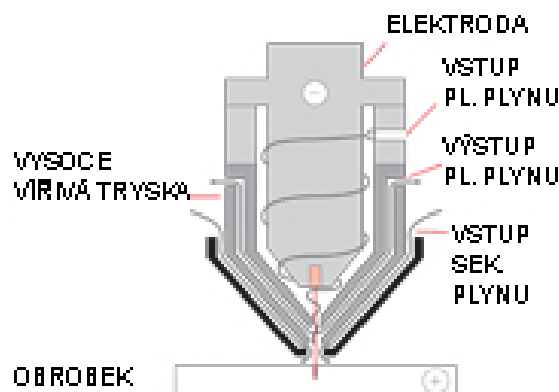


### 3.4.5.5 Řezání pod vodou

Při tomto způsobu řezání se používá pouze plazmový plyn. Řezáním pod vodou se sníží hluk, prašnost a vliv záření.

### 3.4.5.6 Řezání plazmou s vysokou koncentrací paprsku

Tyto technologie s obchodními názvy HyDefinition nebo Fine Focus jsou nejnovějšími úpravami plazmových hořáků. Výrazně redukuje pro předchozí metody typické zkosení řezné plochy u menších tloušťek plechů. Úpravami hořáku se dosáhne ještě větší koncentrace plazmového paprsku, zvýšení hustoty paprsku a zúžení řezné spáry. Tím se zajistí vyšší řezná rychlost, pro tloušťky od 10mm téměř kolmé a hladké řezy.



Obr. 18 Hořák s vysokou koncentrací paprsku [10]

### 3.4.6 Chlazení plazmových hořáků

Při řezání vzniká velmi vysoká teplota, přibližně 10 000 až 30 000°C. Teplotou je pak velmi namáhán hořák, který je potřeba chladit. Hořák se ochlazuje buď plynem, nebo chladicí kapalinou proudící v hořáku. Tato kapalina je dodávána výrobcí plazmového zařízení a zároveň obsahuje přísady s protikorozními účinky.

### 3.4.7 Shrnutí plazmového řezání

Plazmové řezání se dá použít pro elektricky vodivé i nevodivé materiály. Pro elektricky vodivé materiály se používá řezání s **transferovaným** (přeneseným) obloukem, kdy řezaný materiál tvoří kladnou elektrodu a oblouk se vytváří mezi řezaným materiálem a netavící se elektrodou. Pro elektricky nevodivé materiály se používá řezání s **netransferovaným** (nepřeneseným) obloukem. Elektrický oblouk zde vzniká mezi netavící se elektrodou a hořákem. Tato metoda se používá pro řezání například keramiky a k nanášení povlaků. Oblouk používaný mezi elektrodou a hořákem má za následek vyšší opotřebení hořáků.

Nejrozšířenější plazmy jsou bezesporu vzduchové plazmy. Pro řezání nízkolegovaných ocelí je však z hlediska produktivity výhodnější použití kyslíkové plazmy. Tato využívá vedle kinetické energie plazmy také spalné teplo reakce materiálu s kyslíkem, podobně jako řezání kyslíkem.

Ke stabilizaci plazmového paprsku se používají tzv. fokusační plyny nebo se stabilizace provede vodní clonou. To celé za účelem zmenšení řezné spáry a koncentrace energie v úzkém

paprsku plazmy. Speciálním způsobem je řezání pod vodou, které zároveň odstraňuje negativa v podobě hluku, dýmů a záření. V neposlední řadě voda také ochlazuje roztavený materiál a dochází k menšímu tepelnému namáhání součástí stroje.

Odstíněním paprsku plazmy fokusačním plynem nebo vodou dochází také ke zvýšení trvanlivosti trysky.

Materiál netavící se elektrody je wolfram, zirkon, nebo hafnium.

## **4. Charakteristika současného stavu řezání plechů ve firmě EGE spol. s r.o. a hodnocení stavu**

Firma EGE spol. s r.o. se zabývá výrobou a dodávkou konstrukcí zpravidla pro energetický průmysl. Dělí se na více sekcí, které se dále zabývají výrobou ve svém oboru. Mezi hlavní sekce patří sekce pro výrobu zapouzdřených vodičů, sekce pro elektrotechniku a samozřejmě sekce pro výrobu ocelových konstrukcí.

Sekce ocelových konstrukcí se zabývá hlavně výrobou stožárových konstrukcí pro vysoké napětí a podpěrných konstrukcí zapouzdřených vodičů. Tyto konstrukce jsou opatřeny povrchovou protikorozní ochranou buď nátěrem, nebo žárovým zinkováním. Další se vztahuje právě k sekci ocelové konstrukce.

### **4.1 Strojní vybavení**

Pro výrobu těchto konstrukcí jsou nejdůležitějšími stroji děrovací a vrtací linky ke zhotovení děr do válcovaných úhelníků a nosníků. Tyto stroje zároveň dělí tyčový materiál na požadované délky. Dělení plechů se provádí na dvou pálicích strojích a na mechanických nůžkách. Pálicí stroje jsou zařízení pro strojní pálení, se stolem a pohyblivým portálem s řezací tryskou. Používané technologie pálení jsou řezání kyslíkem a řezání plazmou. Pro zhotovení děr u plechu vypáleného kyslíkem či plechu odstřiženého nůžkami je nutné provést další výrobní operace – děrování nebo vrtání. U plazmového řezání není nutný převoz na další pracoviště, tím odpadá další operace a manipulace s obrobky. Portál s řezací tryskou obsahuje zároveň rychlořezné vrtací vřetenem a děrovací zařízení pro zhotovení děr do plechů.

#### **4.1.1 Kyslíkové řezání**

Stroj pro kyslíkové řezání dodala firma MGM Tábor. Stroj se skládá z pracovního stolu a pohyblivého portálu s jednou řezací tryskou. Je možné řezat plechy do velikosti 2x6m. Používaný typ řezací trysky je VADURA 1215-A. Používaný topný plyn je acetylen.

Pro nastavení řezacích parametrů je k používaným tryskám dodána tabulka. Tabulka obsahuje řezací údaje pro tloušťku materiálu, tlak nahřívacího a řezacího kyslíku, tlak acetyleny, odstup trysky od materiálu, šířka řezné spáry atd.. Hodnoty v tabulce platí pro nelegovanou ocel do obsahu uhlíku 0,3 %. Z tabulky vyplývá možnost řezání materiálu v tloušťce od 3 mm do 300 mm. Pro jednotlivé tloušťky tabulka obsahuje nastavení průměru řezací trysky, tlaku plynů, řezné rychlosti a spotřeby plynů.

Řezná rychlost se v závislosti na tloušťce materiálu pohybuje od 110 mm.min<sup>-1</sup> do 850 mm.min<sup>-1</sup>. Rychlost je pouze teoretická a platí v případě dlouhého rovného řezu. Při řezání krátkých plechů pohony stroje nestačí teoretických rychlostí dosáhnout.

#### **4.1.2 Plazmové řezání**

Plazmový stroj dodala firma Vernet Behringer, která svůj pracovní stůl doplnila plazmou od firmy Kjellberg Finsterwalde. Mimo plazmové řezání je možné plechy značit, děrovat a vrtat. Portál obsahuje jedno vřetenem na vrtání a hlavu pro umístění razicích kamenů. Dále obsahuje také zařízení pro provádění děr děrováním. Na pracovním stole se dají zpracovat tabule plechů do velikosti 2x6m a tloušťky 60 mm.

Řezací stroj je vybaven plazmou s technologií HiFocus<sup>plus</sup>, která je určena pro řezání konstrukčních ocelí. Tato technologie využívá principu jemného plazmového paprsku s extrémním zúžením oblouku, čímž byla dosažena mimořádná hustota energie a docílena řada technologických předností:

- kvalita řezání podobná laseru od 0,5 do 60 mm
- v závislosti na materiálu bezotřepové řezání do 40 mm
- nízký přenos tepla a malá tepelná deformace
- zpravidla není nutné další opracování řezu.

Konkrétní obchodní značka plazmového zdroje používaná ve firmě EGE je HiFocus 280i, kde:

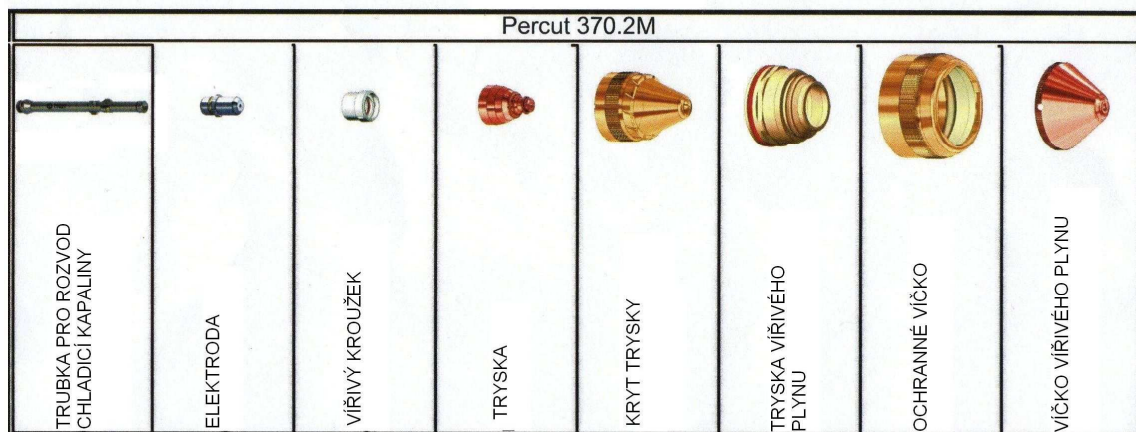
- řezací proud je od 10 A do 280 A,
- řezací napětí je 200 V,
- řezací výkon 56 kW.

Zapálení pilotního oblouku je s pomocí vysokonapěťového zapalovače a chlazení hořáku je oběhové chladicí směsí Kjellfrost s integrovanou protikorozi ochranou.

Pro nastavení plazmových plynů je použita jednotka PGE 3-360. Připojit k jednotce je možné plazmový plyn vzduch (bez nečistot, oleje a vody) nebo kyslík (čistota 99,5%, suchý). Jako vířivý plyn je možné připojit vzduch, kyslík nebo dusík (čistota minimálně 99,9%). V EGE se používají tyto plyny:

- startovací plazmový plyn pro zapálení pilotního oblouku PG1 – vzduch,
- řezací plazmový plyn PG2 – kyslík O<sub>2</sub>,
- ochranný, vířivý plyn WG1 – dusík

Strojní plazmový hořák je typu PerCut 370.2, který umožňuje řezání do tl. 80 mm, max. řezací proud je 360 A, zapalování vysokonapěťové (max. 10 kV). Schéma jednotlivých částí hořáku uvádí následující obrázek 19.



Obr. 19 Schéma hořáku PerCut 370.2 [14]

### 4.1.3 Další používané stroje

Mimo pálicích strojů se používají při výrobě následující stroje:

- děrovací stroj plechů,
- stojanová vrtačka,
- hydraulické nůžky plechů,
- hydraulický lis,
- děrovací stroje pro válcované úhelníky,
- vrtací centrum pro válcované profily (tvaru L, U, H, I).

## 4.2 Vyhodnocování pálených dílců

V následujícím textu diplomové práce bude použito označení norem ČSN. Protože zpravidla všechny evropské normy obsahují za označením normy poměrně dlouhý text názvu a ten by zbytečně prodlužoval práci, jsou v textu použity pouze čísla označující normu. Celý název platných norem je pak uveden v přehledu literatury.

### 4.2.1 Současný stav vyhodnocování pálených dílců

Do nedávné doby byla firma certifikovaná pro výrobu ocelových konstrukcí podle ČSN 73 2601 – výroba ocelových konstrukcí. Pro posuzování stavu obrobků dělených tepelným dělením sloužila část interní návodky. Tento odstavec z návodky určoval pro všechny výrobní skupiny (A,B,C) kvalitu řezu B podle ČSN 05 3401. To znamená ošekat opaly a obrousit hrany. V současné době je ale norma ČSN 05 3401, stejně tak norma ČSN 73 2601 již neplatná.

Vyhodnocení řezaných ploch plechů probíhá pouze na základě vizuálního pohledu na obrobek. Záleží na obsluze, zda daný plech vyhodnotí jako zmetek, či nikoliv. Může se stát, že se plech vyhodnotí jako správný kus, a přesto nesplňuje parametry návodky. Jedná se především o sražení hran. Sražení se neprovádí z toho důvodu, aby jednotlivé plechy byly co nejdříve vyrobeny. Tím se zároveň urychlí výroba celé zakázky, jejíž termín ukončení je nezřídka velmi krátký. Sražení hran broušením se navíc provádí ručně, takže zaměstnanci jsou vystaveni rizikovým faktorům – vibracím. Vzhledem k charakteru výroby se však neprovedení sražení hran neprojeví jako reklamace od zákazníka.

### 4.2.2 Změny ve vyhodnocování pálených dílců

Následná norma pro provádění ocelových konstrukcí je norma ČSN EN 1090, řady 1,2,3. Norma ČSN EN 1090-1 určuje požadavky na posouzení shody konstrukčních dílců. Tato shoda představuje shodu výrobku od samotného určení vlastností, přes návrh a posouzení dle evropských návrhových norem až po výrobu ocelové konstrukce. Vztahuje se ke konstrukcím definovaným dle nařízení vlády č. 190/2002 Sb. jako konstrukcím stavebním. Naprostá většina ve firmě vyráběných konstrukcí jsou stavební konstrukce.

Díl ČSN EN 1090-3 se zabývá požadavky na výrobu konstrukcí z hliníku.

Pro výrobu ocelových konstrukcí slouží norma ČSN EN 1090-2. Tato norma předepisuje požadavky, podle kterých se má ocelová konstrukce vyrábět. Tyto požadavky jsou určené zatří-

děním konstrukce. Norma EN 1090-2 rozděluje konstrukce do čtyř skupin s označením EXC1 až EXC4 se vzrůstající přísností.

Požadavky normy EN 1090 se týkají různých oblastí. Předepisují například provádění otvorů pro šrouby, kde pro EXC2 je možné děrovat, pro EXC3 a EXC4 od tloušťky materiálu 3mm nelze. Dále předepisuje rozsah nedestruktivních zkoušek svařovaných konstrukcí apod. Pokud norma neobsahuje sama dané požadavky, odkáže se na normy, které danou problematiku řeší.

Nejběžněji používané zařazení konstrukcí ve výrobě je EXC2, ale firma je schopna vyrábět i podle požadavků konstrukcí zařazených v kategorii EXC3 a samozřejmě i EXC1. Vyhodnocení experimentu se bude zabývat požadavky na splnění konstrukcí zařazených do EXC2 i EXC3.

Z hlediska tepelného dělení plechů norma EN1090-2 předepisuje následující požadavky:

- na jakost řezaných povrchů, podle EN ISO 9013,
- na tvrdost povrchů volných hran.

Z hlediska povrchové ochrany plechů předpisuje norma EN1090-2 následující požadavky (jedná se o soubor různých požadavků z dalších norem, EN ISO 1461, EN ISO 14713-1,2, EN ISO 12944, ze kterých bylo vybráno podstatné):

- pro nátěry musí být příprava povrchu provedena dle normy EN ISO 8501-3
- pro žárově zinkované povrchy musí být hrany sražené.

Z hlediska protikorozní povrchové ochrany jsou normou předepsány požadavky dle dalších souvisejících norem (viz. výše). V nich jsou předepsány různé požadavky, např. na vady povrchů a svarů, ale z hlediska tepelného (i netepelného) dělení je důležitý požadavek na zaoblení, resp. sražení volných hran, které jsou předepsány pro konstrukci ve třídě provedení EXC2÷EXC4.

## 5. Experimentální měření

V následujících kapitolách je popsáno provedení experimentu. Jsou stanoveny parametry pro vyhodnocení experimentu, zvolen vhodný tvar a materiál vzorků a zkušební místa na vzorcích. V souladu s kapitolou 4.2 je zde uveden cíl experimentu. Experiment bude proveden na vzorcích z plechu provedených tepelným dělením plazmou a kyslíkem a jejich vyhodnocením.

Pro výrobu ocelových konstrukcí jsou ve firmě využívány pouze dva druhy konstrukčních ocelí, a to S235JR a S355J2.

Jak již bylo zmíněno, firma EGE spol. s r.o. se zabývá výrobou ocelových konstrukcí. Konstrukce mají spíše stavební charakter, nejedná se o přesnou strojírenskou výrobu.

Mezi standardně vyráběné konstrukce patří stožárové konstrukce elektrického vedení 22 kV, 110 kV, 400 kV a jejich variace. Tyto jsou z za tepla válcovaných úhelníků a plechů. Spoje mezi jednotlivými díly stožáru jsou šroubované, spoje výpletů stožáru jsou podle druhu stožáru šroubované nebo svařované. Dalšími důležitými konstrukcemi jsou podpěrné konstrukce zapouzdřených vodičů, které jsou tvořeny spíše válcovanými nosníky tvaru I, H. Všechny tyto konstrukce jsou doplněny plechy používanými jako stykové, výplňové nebo plechy tvořícími žebra v nosnících.

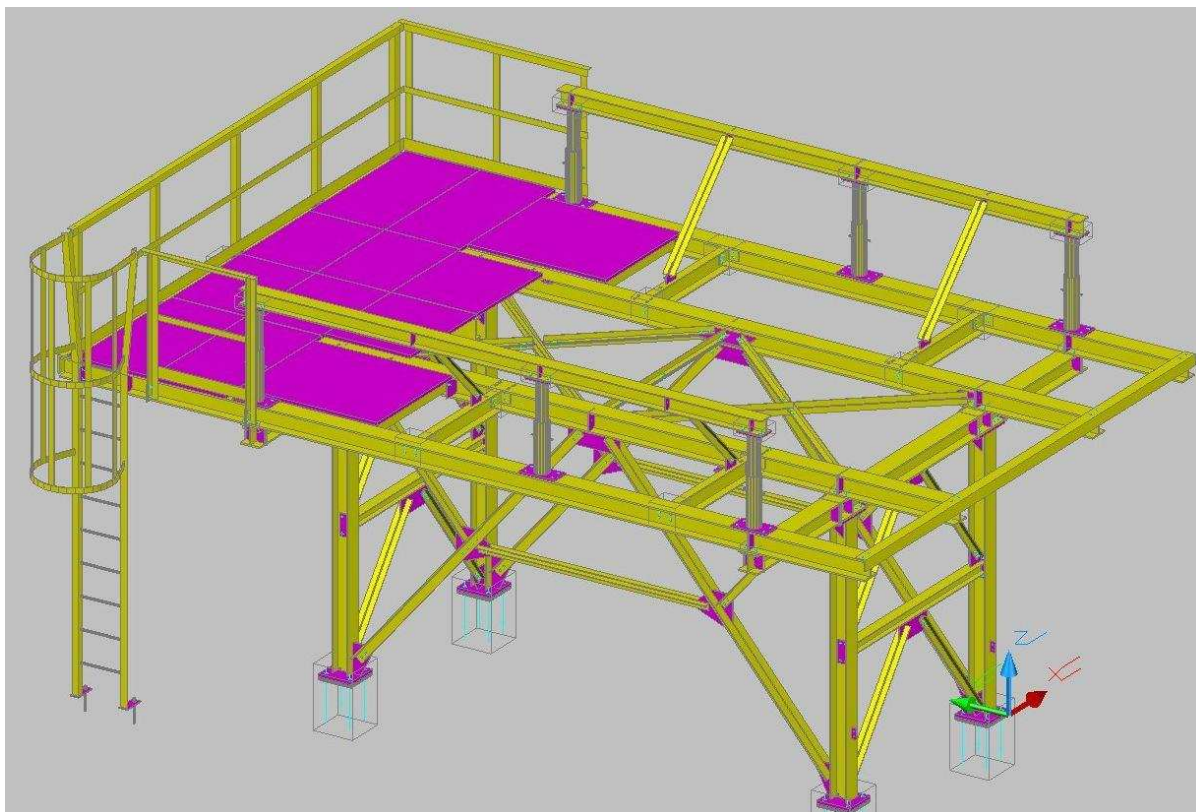
Výroba tvaru plechů se provádí buď pálením nebo stříháním. Po stříhání na nůžkách nebo pálením kyslíkem je nutné provést díry do plechu na dalším stroji. Při pálení plazmou jsou díry provedeny před vypálením, takže po pálení je plech již hotov.

Standardně se provádí tepelné dělení u plechů:

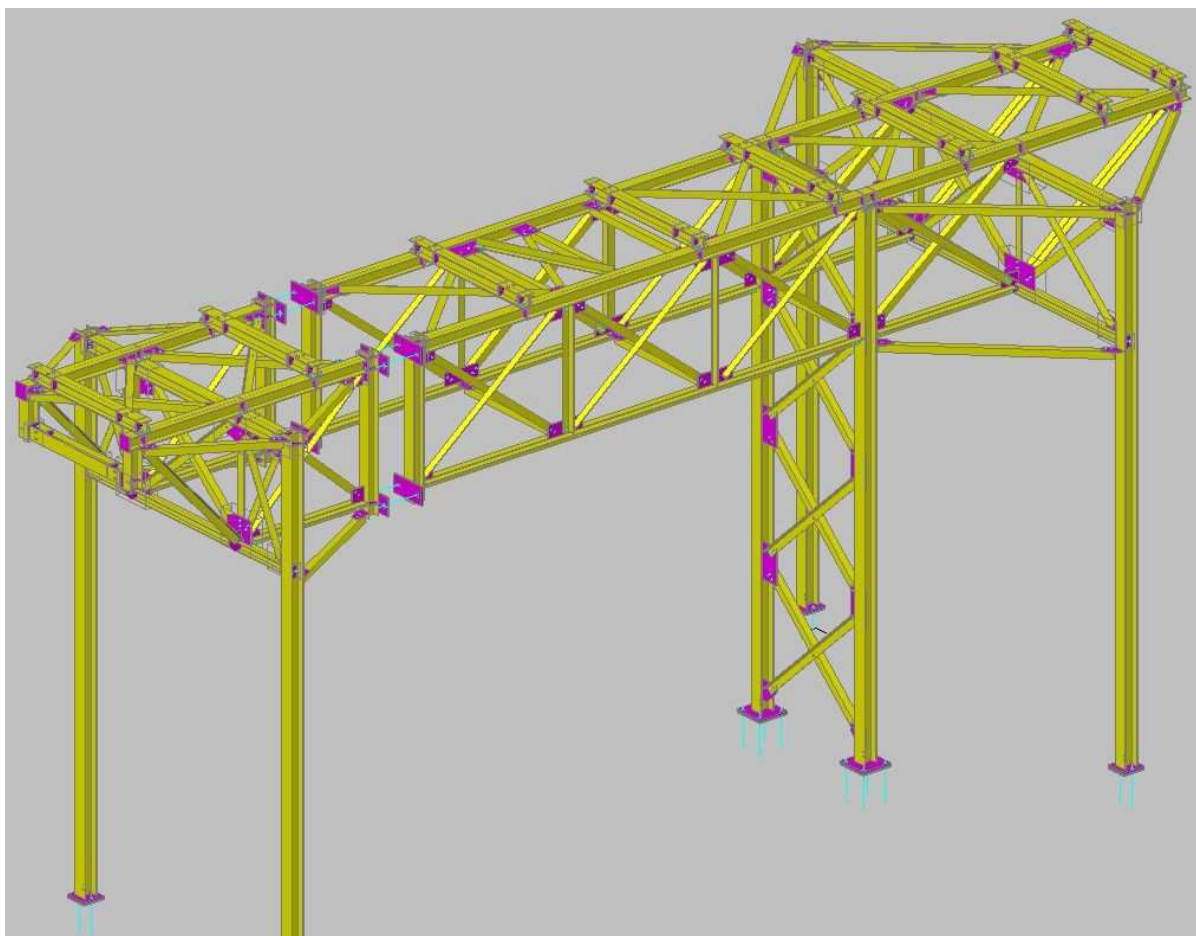
- s vnitřními kouty,
- tloušťky větší než 12 mm,
- u nesymetrických, nerovnoběžných tvarů.

### 5.1 Standardní výroba

Pro představu konstrukcí vyráběných ve firmě jsou uvedeny následující obrázky 20÷23.

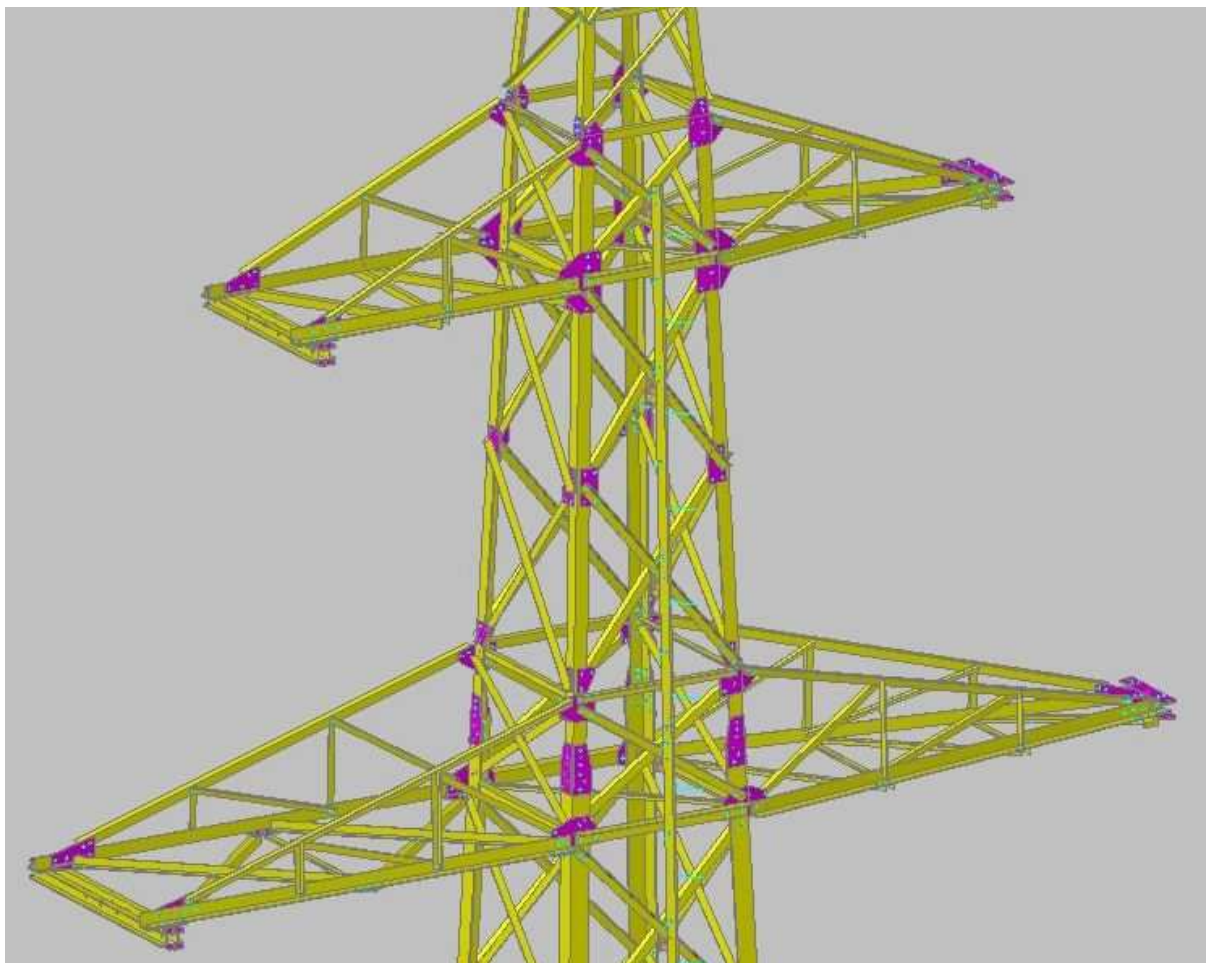


Obr. 20 Příklad vyráběné konstrukce

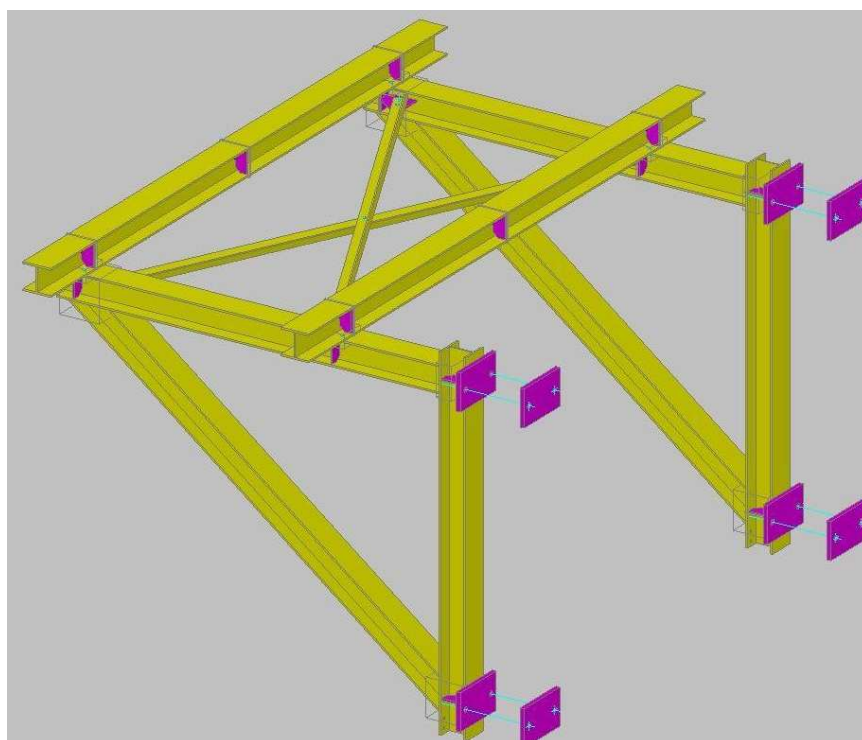


Obr. 21 Příklad vyráběné konstrukce





Obr. 22 Příklad vyráběné konstrukce



Obr. 23 Příklad vyráběné konstrukce

## 5.2 Stanovení parametrů pro vyhodnocení experimentu

Parametry, podle kterých jsou vzorky vyhodnoceny, jsou následující. Další upřesňující informace jsou pak uvedeny v příslušných kapitolách vyhodnocení vzorků.

### 5.2.1 Jakost řezaných povrchů

Jakost řezaných povrchů je v normě EN1090-2 definována odkazem na EN ISO 9013, a to následovně:

- pro třídu konstrukce EXC1 platí, že hrany jsou přijatelné za předpokladu, že jsou odstraněny všechny okraje, pro kolmost a úhlovou tolerance lze použít toleranční pole 5,
- pro ostatní třídy provedení je jakost povrchů dle tabulky 1:

	Úchylka kolmosti a úchylka úhlu $u$	Střední výška profilu, $Rz$ 5
EXC2	toleranční pole 4	toleranční pole 4
EXC3	toleranční pole 4	toleranční pole 4
EXC4	toleranční pole 3	toleranční pole 3

Tab. 1 Jakost povrchů

### 5.2.2 Tvrdost povrchů volných hran

Tepelné dělení, stříhání a děrování vedou ke změně místní tvrdosti. Dovolená tvrdost dělených povrchů je určena v normě EN1090-2 tabulkou. Pro konstrukční oceli tvářené za tepla nebo za studena platí pro pevnostní třídu S235 až S460 maximální hodnota tvrdosti HV10 – 380.

Tvrdost je určena Vickersovou zkouškou, HV10 znamená zkušební zatížení vzorku silou 10 kp.

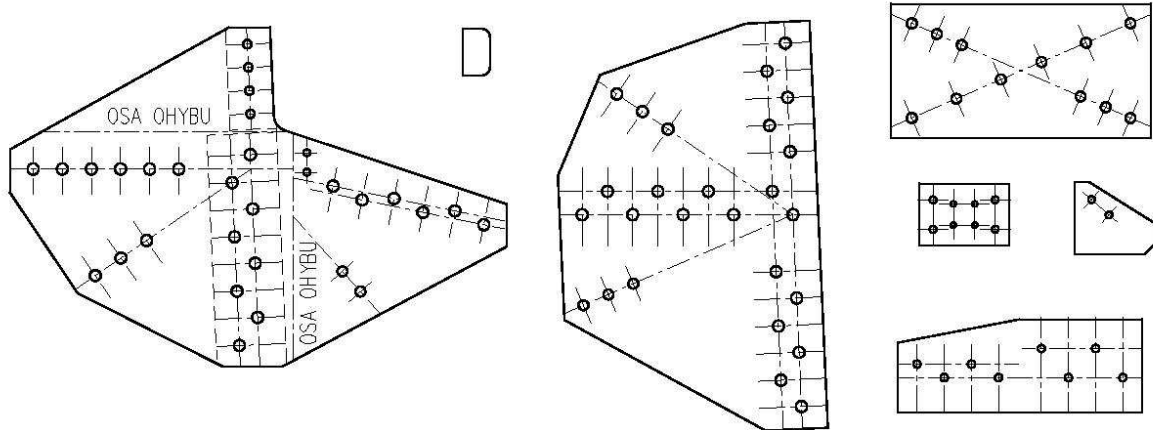
### 5.2.3 Ostatní sledované parametry

Ostatní sledované parametry experimentu, pro které není nutný komentář, jsou:

- hodnocení stavu povrchu po řezání
- geometrické tolerance

### 5.3 Stanovení tvaru vzorku

Na následujícím obrázku jsou uvedeny nejběžnější tvary používaných plechů. Tvary jsou samozřejmě odpovídající charakteru konstrukce. Velikostně plechy mnohdy překračují délku 1200 mm a šířku 500 mm, ale průměrné velikosti polotovaru plechů se pohybují kolem 400x250 mm. Tloušťka plechů se běžně pohybuje od 6 do 15 mm, pro větší zatížení se používají plechy o tloušťce nad 30 mm.



Obr. 24 Příklady tvarů plechů

Z uvedeného je zřejmá různorodost tvarů pro každý případ výrobních zakázek.

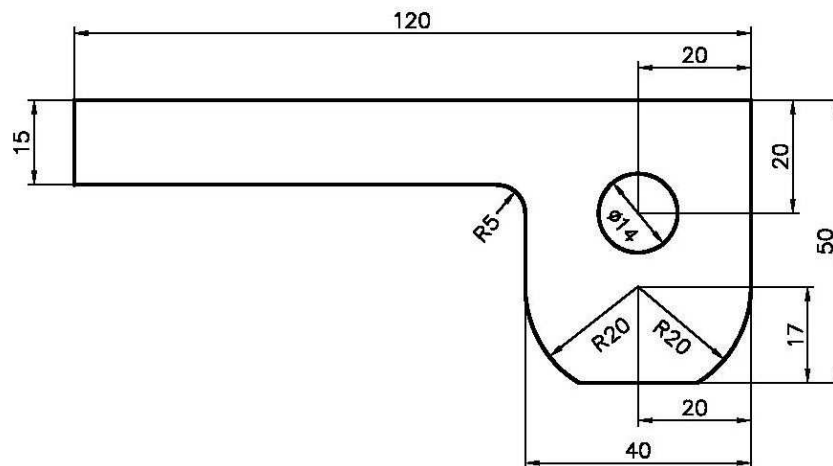
#### 5.3.1 Tvar vzorku

Vzhledem k předem projednaným požadavkům na tvar zkušební vzorku bude nutné vypálit pouze elementární tvary a tím zmenšit rozměr plechu. Plech skutečného tvaru by se nevešel do měřicího přístroje. Tvar plechu je tedy navržen pouze ke změření parametrů.

Pro měření tvrdosti bude nutné mít vzorky s malou výškou. To znamená, že základnu vzorku bude tvořit tloušťka plechu a řez bude vysoký cca 10 – 15 mm. Délka vzorku není důležitá.

Pro měření drsnosti je potřeba pouze rovná plocha, jejíž délka není příliš dlouhá.

Na obrázku č. 25 je uveden tvar zkušební vzorku.



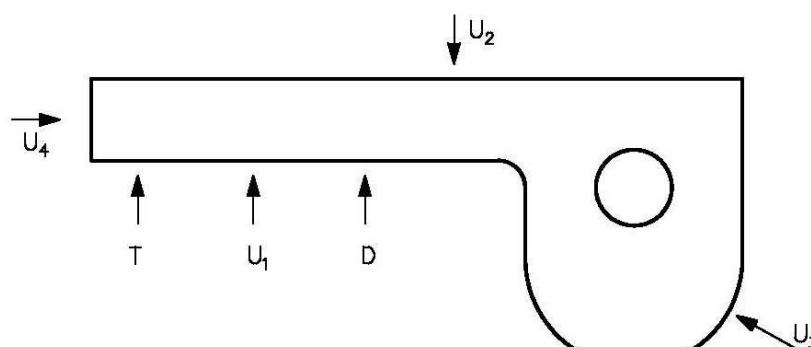
Obr. 25 Tvar zkušební vzorku

### 5.3.2 Materiál vzorku

Materiál pro zkušební vzorky je ze dvou materiálů. První materiál zkušebních vzorků je z konstrukční oceli S355J2, výrobní normy EN10025-2, tloušťky 15 mm. Minimální mez kluzu materiálu je  $R_{emin}=355$  MPa. Hodnota nárazové práce  $KV=27J$  je zaručena pro teploty  $-20^{\circ}C$ . Druhý materiál vzorků je z konstrukční oceli S235JR, výrobní normy EN10025-2, tloušťky 15 mm. Minimální mez kluzu materiálu je  $R_{emin}=235$  MPa. Hodnota nárazové práce  $KV=27J$  je zaručena pro teploty  $+20^{\circ}C$ .

### 5.3.3 Zkušební místa a metody

Celkově byl na vzorcích posouzen vzhled a povrchové vady po vypálení z hlediska otřepů apod. Z hlediska EN 1090-2 budou posouzeny geometrické tolerance, tvrdost, úchylka kolmosti a drsnost profilu Rz. Na obrázku 26 jsou zakresleny schematicky zkušební místa.



- D – MĚŘÍCÍ MÍSTO DRSNOSTI Rz
- T – MĚŘÍCÍ MÍSTO TVRDOSTI HV
- U – MĚŘÍCÍ MÍSTO ÚCHYLKY KOLMOSTI u

Obr. 26 Místa měření

## 5.4 Provedení experimentu

Provedením experimentu a následného měření na daných vzorcích se dosáhne ověření správného postupu výroby tepelného dělení plechů ve firmě. Vyhodnocení jednotlivých měření se provede podle normy EN ISO 9013 a EN1090-2.

Tvar zkušební vzorku je zkonstruován ve známém kreslicím 2D programu. Před samotným pálením bylo nutné naprogramovat tvar plechů do programu pro každý pálicí stroj. Programy jsou ke strojům kopírovány pomocí síťového připojení. Program byl vytvořen v technologii TPV a ze serveru byl nakopírován do paměti pálicího stroje. Po ustavení polotovaru ve strojích byl spuštěn program zadanými parametry – tabulkovými či upravenými, a vypáleny vzorky. Po vizuální kontrole byly výpalky očištěny od ořepů a následovalo provedení měření.

### 5.4.1 Stanovení vzorků a parametrů řezání

Pro experiment je použito celkem devět zkušebních vzorků. Tvar je stále stejný, měnit se bude materiál vzorku a parametry řezání. Otvor průměru 14 mm byl proveden pouze ve vzorcích, které byly páleny plazmou. Při pálení vzorků kyslíkem bylo obsluhou doporučeno tyto díry nepálit. Otvory byly páleny pouze pro vizuální zhodnocení.

Experiment byl proveden na vzorcích pálením nejprve tabulkovými hodnotami předepsanými pro danou tloušťku materiálu. Poté byl upraven jeden parametr, a to řezná rychlost. Tlaky plynů zůstaly stejné. V níže uvedených tabulkách jsou zobrazeny souhrnné informace o parametrech řezání a fotografie jednotlivých vzorků.

#### Řezání plazmou:

Tabulkové hodnoty pro řezání plazmou pro tloušťku 15 mm se pohybují od  $2800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  pro kvalitní řez do  $3900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  pro maximální možnou řezací rychlost. V experimentu byla použita nejprve rychlost  $2800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (vzorek č. 3). Pro tuto rychlost byl ovšem řezaný povrch vizuálně hrubý, velká hloubka drážky, zřejmě také kvůli velikosti vzorku. Větší řezané plechy vypadají lépe. Přistoupilo se tedy ke snížení rychlosti na  $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  u vzorku č. 5. Řezaná plocha vypadala lépe. V dalším kroku následovalo snížení rychlosti na  $1500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  u vzorku č. 6. Řezaná plocha měla vizuálně nejmenší hloubku drážky a vypadala nejlépe. Na druhou stranu tato nízká rychlost nebyla vhodná pro řezací stroj, hluk při řezání byl hlubší, hučivý, než by měl být. Vzorky č. 3,5,6 byly z materiálu S235JR. Materiál S355J2 na plazmě vykazoval podobné výsledky (vzorky č. 4,7). U tohoto materiálu byl řez proveden nejprve rychlostí  $2800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  pro porovnání, a poté rovnou rychlostí  $1500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

Plazmou byly řezány vzorky č. 3÷7, parametry viz následující souhrnné tabulky.

#### Řezání kyslíkem:

Tabulkové hodnoty pro řezání kyslíkem jsou pro tloušťku 15 mm předepsány na  $600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Pro netabulkové hodnoty byla řezná rychlost zvýšena na  $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ .

V souhrnných tabulkách ke vzorkům není oproti řezání plazmou uveden počet zápalů, neboť plamen se zapaluje ručně a hoří až do mechanického zhasnutí. Čas pálení je spočítán z celkové délky řezání a rychlosti pálení. Pálicí kyslíkový stroj tyto hodnoty oproti plazmovému řezacímu stroji neuvádí.

Kyslíkem byly řezány vzorky č. 1,2,8 a 9, parametry viz následující souhrnné tabulky.

Vzorek č. 1 (kyslíkové řezání)	
Materiál	<b>S235JR</b>
parametry řezání	tabulkové
řezací tryska	10/25
tlak acetylenu [bar]	5
tlak nahřívacího kyslíku [bar]	2,5
tlak řezacího kyslíku [bar]	6,5
řezná rychlost [mm.min-1]	600
odstup trysky [mm]	5-7
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	325
čas dělení [s]	32,5



Obr. 27 Zkušební vzorek č. 1

Vzorek č. 2 (kyslíkové řezání)	
Materiál	<b>S355J2</b>
parametry řezání	tabulkové
řezací tryska	10/25
tlak acetylenu [bar]	5
tlak nahřívacího kyslíku [bar]	2,5
tlak řezacího kyslíku [bar]	6,5
řezná rychlost [mm.min-1]	600
odstup trysky [mm]	5-7
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	325
čas dělení [s]	32,5



Obr. 28 Zkušební vzorek č. 2

Vzorek č. 3	
Materiál	<b>S235JR</b>
parametry řezání	tabulkové
plazmový plyn pro zapálení PG1	vzduch
plazmový plyn pro řezání PG2	kyslík O <sub>2</sub>
stabilizační (vířivý) plyn WG	dusík N <sub>2</sub>
řezací tryska	Percut 370.2M
řezací proud [A]	280
řezací napětí [V]	128
tlak PG1 [bar]	8,5
tlak PG2 [bar]	7
tlak WG [bar]	6
výška hořáku nad materiálem [mm]	4
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	<b>2800</b>
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	369
počet zápalů	2
čas dělení [s]	8,33
celkový čas dělení [s]	36



Obr. 29 Zkušební vzorek č. 3



Vzorek č. 4	
Materiál	<b>S355J2</b>
parametry řezání	tabulkové
plazmový plyn pro zapálení PG1	vzduch
plazmový plyn pro řezání PG2	kyslík O <sub>2</sub>
stabilizační (vířivý) plyn WG	dusík N <sub>2</sub>
řezací tryska	Percut 370.2M
řezací proud [A]	280
řezací napětí [V]	128
tlak PG1 [bar]	8,5
tlak PG2 [bar]	7
tlak WG [bar]	6
výška hořáku nad materiálem [mm]	4
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	<b>2800</b>
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	369
počet zápalů	2
čas dělení [s]	8,33
celkový čas dělení [s]	36



Obr. 30 Zkušební vzorek č. 4

Vzorek č. 5	
Materiál	<b>S235JR</b>
parametry řezání	upravené
plazmový plyn pro zapálení PG1	vzduch
plazmový plyn pro řezání PG2	kyslík O <sub>2</sub>
stabilizační (vířivý) plyn WG	dusík N <sub>2</sub>
řezací tryska	Percut 370.2M
řezací proud [A]	280
řezací napětí [V]	128
tlak PG1 [bar]	8,5
tlak PG2 [bar]	7
tlak WG [bar]	6
výška hořáku nad materiálem [mm]	4
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	<b>2000</b>
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	369
počet zápalů	2
čas dělení [s]	11,66
celkový čas dělení [s]	38



Obr. 31 Zkušební vzorek č. 5

Vzorek č. 6	
Materiál	<b>S235JR</b>
parametry řezání	upravené
plazmový plyn pro zapálení PG1	vzduch
plazmový plyn pro řezání PG2	kyslík O <sub>2</sub>
stabilizační (vířivý) plyn WG	dusík N <sub>2</sub>
řezací tryska	Percut 370.2M
řezací proud [A]	280
řezací napětí [V]	128
tlak PG1 [bar]	8,5
tlak PG2 [bar]	7
tlak WG [bar]	6
výška hořáku nad materiálem [mm]	4
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	<b>1500</b>
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	369
počet zápalů	2
čas dělení [s]	15,3
celkový čas dělení [s]	42



Obr. 32 Zkušební vzorek č. 6

Vzorek č. 7	
Materiál	<b>S355J2</b>
parametry řezání	upravené
plazmový plyn pro zapálení PG1	vzduch
plazmový plyn pro řezání PG2	kyslík O <sub>2</sub>
stabilizační (vířivý) plyn WG	dusík N <sub>2</sub>
řezací tryska	Percut 370.2M
řezací proud [A]	280
řezací napětí [V]	128
tlak PG1 [bar]	8,5
tlak PG2 [bar]	7
tlak WG [bar]	6
výška hořáku nad materiálem [mm]	4
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	<b>1500</b>
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	369
počet zápalů	2
čas dělení [s]	15,3
celkový čas dělení [s]	42



Obr. 33 Zkušební vzorek č. 7

Vzorek č. 8 (kyslíkové řezání)	
Materiál	<b>S235JR</b>
parametry řezání	upravené
řezací tryska	10/25
tlak acetylenu [bar]	5
tlak nahřívacího kyslíku [bar]	2,5
tlak řezacího kyslíku [bar]	6,5
řezná rychlost [mm.min-1]	700
odstup trysky [mm]	5-7
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	325
čas dělení [s]	27,9



Obr. 34 Zkušební vzorek č. 8

Vzorek č. 9 (kyslíkové řezání)	
Materiál	<b>S355J2</b>
parametry řezání	upravené
řezací tryska	10/25
tlak acetylenu [bar]	5
tlak nahřívacího kyslíku [bar]	2,5
tlak řezacího kyslíku [bar]	6,5
řezná rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	700
odstup trysky [mm]	5-7
parametry při dělení	
délka pálení hořáku [mm]	325
čas dělení [s]	27,9




Obr. 35 Zkušební vzorek č. 9

### 5.4.2 Vizuální hodnocení a vady

Vizuální hodnocení bylo provedeno pouze na vnějších obrysech výpalku. Hodnocení děr provedeno nebylo, díry nejsou standardně páleny plazmou.

Řezání kyslíkem přineslo na první pohled jiné výsledky proti plazmovému. Při řezání kyslíkem bylo vneseno do výpalků výrazně více tepla než při řezání plazmou. Toto hodnocení je subjektivní, neboť nebylo ověřeno měřením teploty vzorků, ale během pokusu byla tato skutečnost evidentní. Povrch řezu byl hrubší s většími souvislejšími otřepy a více nepravidelný.


HODNOCENÍ VAD				
	Hodnocení otřepů			Jiné vady po dělení
Vzorek č.1	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	vizuálně výrazně horší řez než z plazmy, méně kovový vzhled po řezu. Žádné deformované hrany.
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	souvislé ze 100%	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.2	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	vizuálně výrazně horší řez než z plazmy, méně kovový vzhled po řezu. Žádné deformované hrany.
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	souvislé ze 100%	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.3	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ano	větší hloubka drážky, 1x deformovaná hrana, v rozích prohlubně od zpomalení řezu
		Druh	odstřík po najetí k dřevu	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	kapky	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.4	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	střední hloubka drážky, 4x deformovaná hrana
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	minimálně	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	

 pálení kyslíkem

Tab. 2 Hodnocení vad

pokračování

HODNOCENÍ VAD				
	Hodnocení otřepů			Jiné vady po dělení
Vzorek č.5	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	střední hloubka drážky, 1x deformovaná hrana, 1x půdorysně vytažená hrana
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	kolem díry souvisle, jinak kapky minimálně	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.6	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ano	malá hloubka drážky, 1x deformovaná hrana
		Druh	odstřík kolem díry	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	souvisle z 50%	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.7	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	malá hloubka drážky, 2x deformovaná hrana
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	minimálně	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.8	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	vizuálně výrazně horší řez než z plazmy, méně kovový vzhled po řezu. Žádné deformované hrany. Na horní hraně vytvořené vroubkování, odstraněno pilníkem
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	souvislé ze 100%, větší vrstva	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	
Vzorek č.9	Horní hrana	Otřepy ano-ne	ne	vizuálně výrazně horší řez než z plazmy, méně kovový vzhled po řezu. 1x deformovaná hrana, Na horní hraně 40% vytvořené vroubkování, odstraněno pilníkem
		Druh	-	
		Odstranitelnost	-	
	Dolní hrana	Otřepy ano-ne	ano	
		Druh	souvislé ze 100%	
		Odstranitelnost	snadná, sekáč	

 pálení kyslíkem

Tab. 2 Hodnocení vad

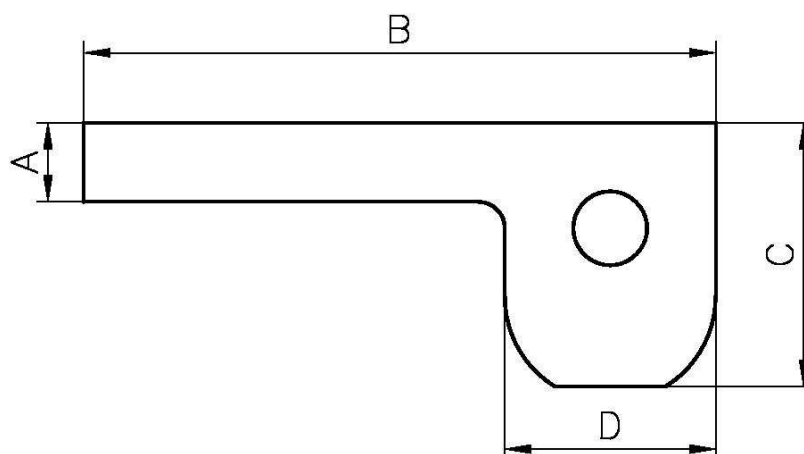


### 5.4.3 Geometrické tolerance

Měření geometrických rozměrů a úchyly kolmosti bylo provedeno za pomoci zapůjčených firemních měřících pomůcek. K měření geometrických tolerancí bylo použito digitální posuvné měřítko délky 150 mm. Výrobce měřítka More & Wright, dělení stupnice 0,01 mm, chyba měřítka je 0,03 mm.

Pro vyhodnocení naměřených hodnot byla použita norma EN ISO 9013 a mezní úchyly v tolerančním poli 2. Tyto úchyly představují pro tloušťku plechu 15 mm a jmenovité rozměry od 10÷125 mm hodnotu  $\pm 1,8$  mm.

Na vzorcích jsou změřeny hlavní rozměry dle obrázku 36. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 3. Rozměry byly měřeny přibližně v jedné třetině od horní hrany.




Obr. 36 Geometrické tolerance

Geometrické tolerance podle ISO 9013, toleranční třída 2 [mm]					
vzorek č.	označení rozměru	jmenovitý rozměr	naměřený rozměr	úchylnka	mezní úchylnka
1	A	15	15,6	0,6	$\pm 1,8$
	B	120	119,4	-0,6	$\pm 1,8$
	C	50	50,7	0,7	$\pm 1,8$
	D	40	39,1	-0,9	$\pm 1,8$
2	A	15	15,1	0,1	$\pm 1,8$
	B	120	119,5	-0,5	$\pm 1,8$
	C	50	50	0	$\pm 1,8$
	D	40	40,1	0,1	$\pm 1,8$
3	A	15	15,4	0,4	$\pm 1,8$
	B	120	120,5	0,5	$\pm 1,8$
	C	50	49,7	-0,3	$\pm 1,8$
	D	40	40,5	0,5	$\pm 1,8$

Tab. 3 Geometrické tolerance

pokračování

Geometrické tolerance podle ISO 9013, toleranční třída 2 [mm]					
vzorek č.	označení rozměru	jmenovitý rozměr	naměřený rozměr	úchylka	mezní úchylka
4	A	15	15,4	0,4	±1,8
	B	120	120,2	0,2	±1,8
	C	50	50	0	±1,8
	D	40	40	0	±1,8
5	A	15	15,9	0,9	±1,8
	B	120	120,1	0,1	±1,8
	C	50	49,1	-0,9	±1,8
	D	40	40,2	0,2	±1,8
6	A	15	15,2	0,2	±1,8
	B	120	119	-1	±1,8
	C	50	49,8	-0,2	±1,8
	D	40	39	-1	±1,8
7	A	15	15	0	±1,8
	B	120	119,5	-0,5	±1,8
	C	50	49,8	-0,2	±1,8
	D	40	39,7	-0,3	±1,8
8	A	15	15,3	0,3	±1,8
	B	120	119,6	-0,4	±1,8
	C	50	50	0	±1,8
	D	40	40,2	0,2	±1,8
9	A	15	16	1	±1,8
	B	120	118,8	-1,2	±1,8
	C	50	49,7	-0,3	±1,8
	D	40	39,4	-0,6	±1,8

 pálení kyslíkem

Tab. 3 Geometrické tolerance

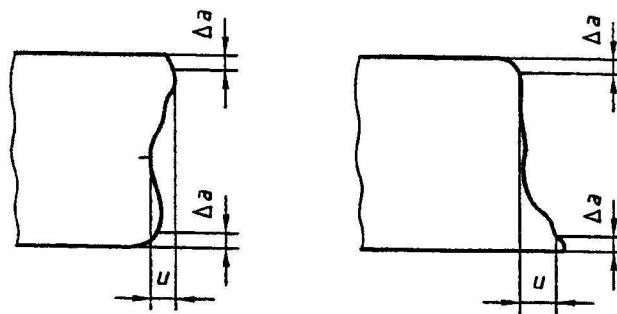
Z tabulky je patrné, že tolerance nepřesahují toleranční třídu 2, která je méně přísná než toleranční třída 1. Toleranční třída 1 má v daném rozmezí jmenovitých hodnot úchylku  $\pm 0,7$  mm, kterou naměřené hodnoty v téměř všech případech splňují také.

#### 5.4.4 Úchylka kolmosti

Úchylka kolmosti byla vyhodnocena podle příslušné části normy EN ISO 9013.

Představuje vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, mezi kterými je vepsán povrch řezu. Hodnota úchylky kolmosti se určuje pouze v omezené oblasti povrchu řezu. Oblast se

musí zmenšit o vzdálenost  $\Delta a$  od horní a dolní hrany řezu dle tabulky 3 [16]. Důvodem je dovolené natavení horní hrany řezu. Pro tento experiment ( $t=15$  mm) je  $\Delta a$  rovno 1mm.



Obr. 37 Úchylka kolmosti  $u$


K měření úchylky kolmosti byl použit dílenský úhelník a lístkové spárové měřky. Podle normy ČSN EN ISO 9013 patří tyto měřidla do kategorie měřidel pro hrubé měření, které je pro dané měření dostačující.

Toleranční pole pro úchylku kolmosti je uvedeno v tabulce 4 v [16], a zde v tabulce 4.

Toleranční pole	Úchylka kolmosti v mm obecně	Úchylka kolmosti pro tloušťku plechu 15mm v mm
1	$0,05 + 0,003t$	0,095
2	$0,15 + 0,007t$	0,255
3	$0,4 + 0,01t$	0,550
4	$0,8 + 0,02t$	1,100
5	$1,2 + 0,035t$	1,725

Tab. 4 Tolerance úchylky kolmosti

Měření úchytky kolmosti u [mm]							
Vzorek č.	u <sub>1</sub>	u <sub>2</sub>	u <sub>3</sub>	u <sub>4</sub>	u <sub>max</sub>	u	toleranční pole
1	0,15	0,04	0,08	0,1	<b>0,15</b>	0,255	<b>2</b>
2	0,31	0,06	0,22	0,04	<b>0,31</b>	0,55	<b>3</b>
3	0,06	0,55	0,27	0,05	<b>0,55</b>	0,55	<b>3</b>
4	0,36	0,15	0,78	0,1	<b>0,78</b>	1,1	<b>4</b>
5	0,38	0,51	0,1	0,33	<b>0,51</b>	0,55	<b>3</b>
6	0,1	0,25	0,4	-	<b>0,4</b>	0,55	<b>3</b>
7	0,06	0,15	0,31	-	<b>0,31</b>	0,55	<b>3</b>
8	0,27	0,3	0,38	0,25	<b>0,38</b>	0,55	<b>3</b>
9	0,25	0,31	0,32	-	<b>0,32</b>	0,55	<b>3</b>

 pálení kyslíkem

Tab. 5 Úchytky kolmosti

Místa měření byla již uvedena, viz obr. 26. Výstup z měření úhlových odchylek je uveden v tabulce 5.

Z naměřených hodnot úchytek kolmosti vyplývá shoda s tabulkou 1, která předepisuje pro třídu konstrukce EXC2 a EXC3 toleranční třídu 4. Všechny vzorky kromě vzorku č. 4 by vyhověli danému tolerančnímu poli i pro nejvyšší třídu konstrukce EXC4.

#### 5.4.5 Vyhodnocení tvrdosti řezu

Stanovení tvrdosti proběhlo ve školních laboratořích katedry materiálu a strojírenské metalurgie.

Norma EN 1090-2 uvádí požadavek na tvrdost dělených ploch stanovenou podle Vickerse takto: HV10 < 380.

Přítláčná síla je stanovena na 10 kp, což odpovídá přibližně 10 kg. Toto zatížení je poměrně malé a vnikací tělíčko nezatlačí příliš hluboko do materiálu. Z charakteru zkoušky tedy vyplývá, že se jedná o tvrdost v povrchové vrstvě. Zkouška probíhá ustavením vzorku do stroje, pozvolným vtláčováním pravidelného čtyřbokého diamantového jehlanu se čtvercovou základnou do plochy řezu a výdrží po stanovenou dobu. Poté se pomocí lupy odečte délka úhlopříček a zprůměrovaná se dosadí do vztahu pro výpočet tvrdosti:


$$HV = \frac{2F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2}, \text{ kde } F \text{ je přítláčná síla [kp] a } d \text{ je délka úhlopříčky [mm]}$$

Vypočítané hodnoty jsou dosazeny do tabulky 6.

Pro stanovení délky úhlopříčky musí být vtisk viditelný, nejlépe na hladké světlé ploše. Na neočištěném povrchu není vtisk patrný mezi ostatními nečistotami. Stejně tak ani na ploše, která není rovná, resp. má velkou hloubku drážky, by vtisk nebyl patrný. Vzorky, tak jak byly

ořezány, nebyly ve vhodném stavu pro měření tvrdosti. Vzorky 5,6,7 měly nejrovnější plochu a stačilo u nich pouze jemným smirkovým papírem odstranit vrstvu okují. Vtisk byl poté čitelný. U ostatních vzorků byla hloubka drážky poměrně velká, takže nešlo měření provést. Musela se zvolit opatření, aby měření provést šlo. Jedná se o zkoušku tvrdosti povrchové vrstvy, takže použití větší zatěžovací síly by zkrátilo výsledky. Zvolilo se lehké zbroušení drážek pilníkem. Tím se odstranila překážka pro provedení měření, ale zároveň se odstranila i část povrchové vrstvy. Předpokládá se, že zbroušení nebylo tak velké, aby byly výsledky významněji ovlivněny.

Vzorek č.	i	Ø délka úhlopříčky vtisku $u_i$ [mm]	Tvrdot HV10	Ø tvrdost HV10	Vyhovuje EN1090-2
1 S235JR	1	0,3145	187	<b>188</b>	ano
	2	0,3085	195		
	3	0,3185	183		
2 S3552	1	0,2535	289	<b>273</b>	ano
	2	0,2685	257		
	3	0,261	272		
3 S235JR	1	0,256	282	<b>276</b>	ano
	2	0,265	264		
	3	0,2565	281		
4 S355J2	1	0,209	424	<b>399</b>	ne
	2	0,217	394		
	3	0,2215	378		
5 S235JR	1	0,2415	318	<b>320</b>	ano
	2	0,2425	315		
	3	0,238	327		
6 S235JR	1	0,233	341	<b>366</b>	ano
	2	0,2205	381		
	3	0,222	376		
7 S355J2	1	0,222	376	<b>392</b>	ne
	2	0,216	397		
	3	0,2145	403		
8 S235JR	1	0,311	192	<b>186</b>	ano
	2	0,3275	173		
	3	0,31	193		

 pálení kyslíkem

Tab. 6 Tvrdot řezaných ploch

Z tabulky vyplývá, že tvrdost povrchů je u materiálu S235JR nižší než u S355J2. Při pálení kyslíkem je tvrdost v porovnání s plazmovým řezáním také výrazně nižší. To je způsobeno tím, že plazmový paprsek má vysokou teplotu, velkou rychlost a je úzký. Materiál je zahřátý

v úzké oblasti a zbylé teplo je rychle odvedeno do základního materiálu. Tím se povrch žezu rychle ochladí, zakalí a ztvrdne. Naproti tomu kyslíkové řezání je pomalejší, paprsek má nižší teplotu (kolem 3000 °C) a je výrazně širší. Paprsek více ohřívá materiál a ten chladne pomaleji.

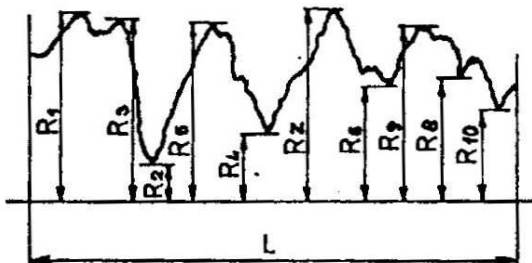
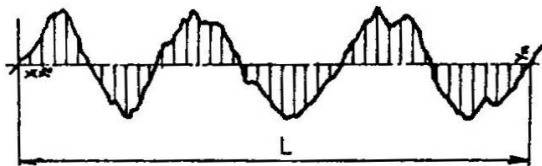
U plazmového řezání materiálu S355J2 výrazněji nepomůže ke snížení tvrdosti zpomalení rychlosti řezání. Rozdíl v tvrdosti je mezi rychlostmi pálení vzorků č. 4 a 7 minimální. Snižování rychlosti řezání plazmou u materiálu S235JR vedlo k tomu, že tvrdost rostla. To je zřejmě způsobeno vnesením většího množství tepla a rychlým odvodem tepla do obrobku.

Tvrdost u vzorku č. 9 nebyla zkoušena, povrch byl velmi hrubý, pro zbroušení plošky ke stanovení tvrdosti by bylo nutné odbrousit silnou vrstvu.

### 5.4.6 Vyhodnocení drsnosti povrchu

Drsnost povrchu jsou stopy zanechané nástrojem po obrábění, v tomto případě po tepelném dělení. Velikost drsnosti je určena ve směru, ve kterém se pohybuje řezací plamen, tzn. ve směru hlavního pohybu.

Drsnost povrchu se dá hodnotit:



- střední aritmetickou úchylkou  $R_a$

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y dx = \frac{\sum_{i=1}^n y}{n}, \quad \text{kde } y_{1:n} \text{ jsou}$$

vzdálenosti od střední čáry profilu,

- výškou nerovností  $R_z$ , což je střední hodnota vzdálenosti pěti nejvyšších a pěti nejnižších výstupků na měřené délce, od čáry rovnoběžné se střední čarou profilu,

- maximální výškou nerovnosti  $R_{max}$ , což je vzdálenost mezi čarami rovnoběžnými se střední čarou profilu, označující nejvyšší a nejnižší bod profilu na měřené délce. Hodnota  $R_{max}$  se uvažuje jako doplňková.

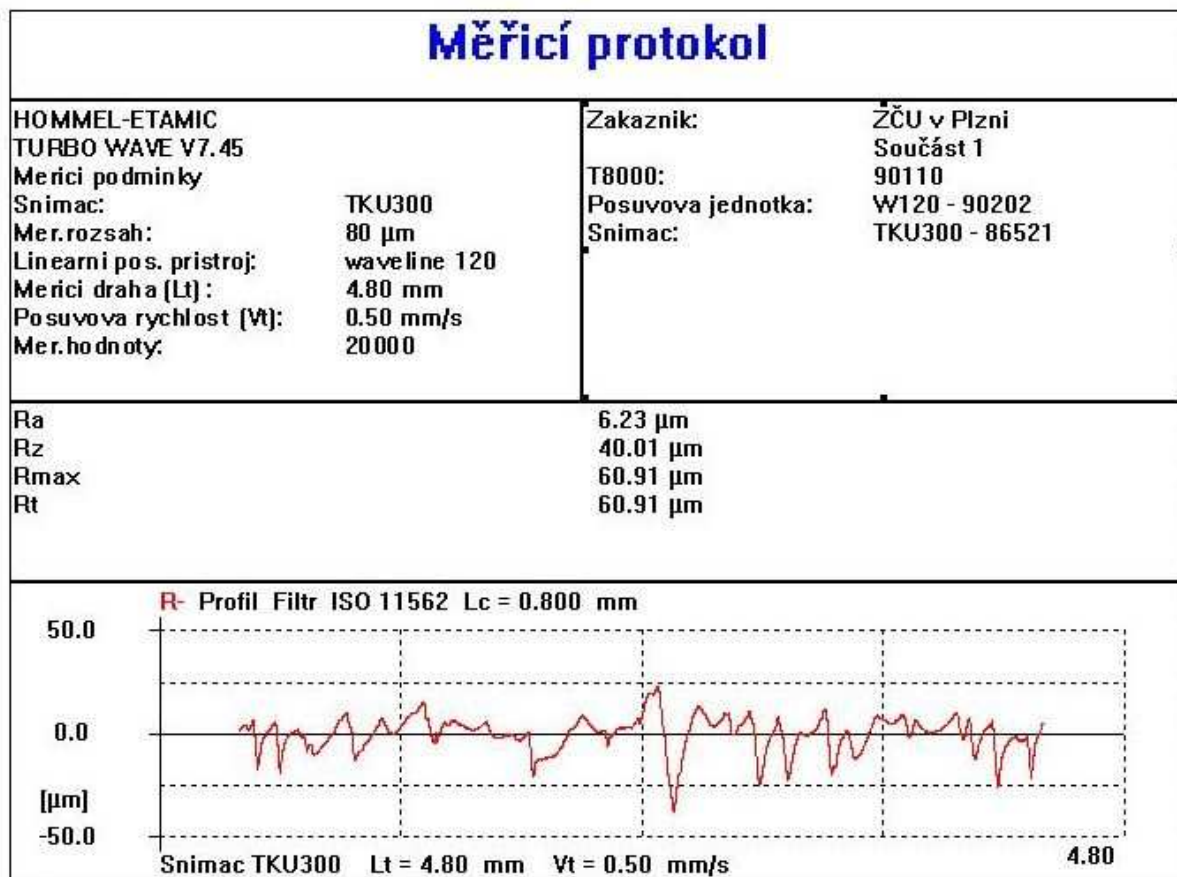
Měření drsnosti povrchu bylo provedeno v laboratořích katedry obrábění na dotykovém profilometru HOMMEL ETAMIC T8000 RC. Schematické zakreslení místa měření je uvedeno výše, v obr. 26. Pro vyhodnocení stavu povrchu se podle normy ČSN EN ISO 9013 uvažuje s hodnotou drsnosti  $R_z5$ , kde index 5 značí aritmetický průměr z jednotlivých výšek profilu pěti za sebou následujících základních délek. V případě tohoto experimentu postačí měření pouze jedné základní délky.

V tabulce 7 jsou uvedeny normové hodnoty pro jednotlivé toleranční pole drsností a hodnota pro tloušťku plechu 15 mm.

Toleranční pole	Průměrná výška profilu Rz [μm]	Průměrná výška profilu Rz pro tloušťku plechu 15 mm [μm]
1	10 + (0,6a mm)	19
2	40 + (0,8a mm)	52
3	70 + (1,2a mm)	92,5
4	110 + (1,8a mm)	137


Tab. 7 Tolerance drsnosti

Výstup z měření drsnosti jednotlivých vzorků plechů byl generován v podobě obrázku ve formátu .jpg. Protože každý výstup je přibližně na formát A4, bylo by vkládání devíti protokolů objemné. Do textu diplomové práce je vložen pro představu výstup z prvního měřeného vzorku na obr. 38 a zbylé výstupy jsou uvedeny v tabulce 8.



Obr. 38 Výstup z protokolu měření drsnosti

Stanovení drsnosti řezané plochy [ $\mu\text{m}$ ]					
Vzorek č.	Ra	Rz	Rmax	Rz <sub>max</sub>	toleranční pole
1	6,23	<b>40,01</b>	60,91	52	<b>2</b>
2	13,15	<b>72,29</b>	87,08	92,5	<b>3</b>
3	1,86	<b>8,43</b>	10,95	19	<b>1</b>
4	0,61	<b>3,54</b>	4,07	19	<b>1</b>
5	2,88	<b>14,17</b>	20,78	19	<b>1</b>
6	1,39	<b>7,11</b>	11,30	19	<b>1</b>
7	1,07	<b>7,27</b>	11,84	19	<b>1</b>
8	3,48	<b>23,13</b>	50,05	52	<b>2</b>
9	6,49	<b>46,58</b>	71,03	52	<b>2</b>

 pálení kyslíkem

Tab. 8 Stanovení drsnosti

Z výsledků vyplývá, že všechny drsnosti vyhovují tabulce 1, která pro zařídění výrobku EXC2 a EXC3 udává toleranční pole 4. I pro nejvyšší zařídění EXC 4 tyto řezy vyhovují.

Dále je patrný rozdíl drsností povrchů řezaných plazmou a kyslíkem. U plazmového řezání jsou hodnoty poměrně vyrovnané a nízké. U kyslíkového řezání jsou hodnoty proti plazmovému řezání vysoké a zároveň převažuje vyšší drsnost u plechů jakosti S355J2. Je pravděpodobné, že se na velikosti drsnosti řezané plochy projevuje vliv stáří pálícího stroje a způsob ovládání. Během řezání dochází k poruchám sondy sledující vzdálenost hořáku od základního materiálu. Sonda signalizovala poruchu a hořák se musel ručně (tlačítkem) nastavovat zpět. Tím dochází k nepřesnostem při řezání.



## 6. Porovnání výsledků se současným stavem – shrnutí

V předcházející kapitole byl popsán experiment tepelného dělení plechů. Experiment měl přinést přehled v podobě reálných výsledků, jakých je výroba ve firmě schopna dosáhnout při tepelném dělení za současného stavu. Bylo provedeno dělení devíti vzorků z konstrukčních ocelí S235JR a S355J2. Řezání se provedlo na plazmovém řezacím stroji a řezáním kyslíkem. Tyto stroje jsou běžně ve výrobě používány. Řezání bylo provedeno na reprezentativním vzorku plechu o tloušťce 15 mm. K řezání byly použity tabulkové hodnoty tlaků plynů a řezných rychlostí, a také upravené hodnoty řezných rychlostí.

Dosažené výsledky se měly porovnat s požadavky, které jsou nyní kladeny na výrobu ocelových konstrukcí z hlediska prováděcí normy, na kterou je firma EGE spol. s r.o. certifikována. Jedná se o normu ČSN EN 1090-2 Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce. Ta stanoví požadavky na ocelové konstrukce z hlediska přesnosti výroby, kvalifikace pracovníků, ověření výrobních postupů a dalších požadavků.

Z hlediska této normy se experiment zaměřil na stav vzorků po tepelném dělení plechů. Jedná se o požadavky na konstrukce zařazené do skupiny EXC2 a EXC3. Požadavky pro obě tyto skupiny jsou shodné z hlediska úchytky kolmosti a drsnosti povrchu. Geometrické tolerance a tvrdost povrchu nezávisí na zatřídění konstrukce.

Na základě zjištěných výsledků se provedlo vyhodnocení a návrh opatření:

- a) Stav povrchu po tepelném dělení – ve stávajících výrobních podmínkách je nutné pouze odstranit ořepy po řezání, případně zabrousit vzniklou nepravidelnost.
- b) Geometrické tolerance – ve stávajících výrobních podmínkách geometrické úchytky plechů po tepelném dělení vyhovují výrobní normě a žádné úpravy nejsou potřeba.
- c) Úchytky kolmosti – ve stávajících výrobních podmínkách plechy vyhovují požadavkům úchytky kolmosti, nejsou potřeba žádné dodatečné úpravy.
- d) Drsnost povrchu – vyhodnocení výšky nerovností  $R_z$  ve stávajících výrobních podmínkách vyhovuje a nejsou potřeba dodatečné úpravy
- e) Tvrdost povrchu – při současném stavu vyhovují z hlediska tvrdosti pálených hran pouze plechy pálené kyslíkem. Tyto mají nízkou hodnotu tvrdosti danou pomalým ochlazováním řezaného plechu. Dále vyhovují plechy pálené plazmou jen z materiálu S235JR.
- f) Sražení hran po řezání – nesouvisí přímo s provedením experimentu, ale požadavky na povrchovou ochranu se vztahují i na hrany plechů po tepelném (i netepelném) dělení. Dosud se provádělo jen na zvláštní požadavek.

Dosud nebylo ve firmě provedeno žádné měření parametrů ani vyhodnocení vypálených plechů. Dosud ani nebyl předpis nebo požadavek zákazníka, podle kterého by se toto vyhodnocení provedlo. Až se zavedením nové prováděcí normy EN 1090-2 se požadavky na stav plechů po tepelném dělení konkretizovaly.

Na základě výsledků této diplomové práce se provedou opatření, která budou tyto požadavky respektovat. Diplomová práce tedy slouží jako podklad pro stanovení dalších opatření, kterým

bude potřeba se pozorněji věnovat. O opatřeních se bude ještě jednat, ale dále jsou uvedeny dané možnosti. Tyto možnosti budou prezentovány odpovědným osobám ve firmě, ale konečné rozhodnutí zůstane na těchto osobách.

Z hlediska geometrických tolerancí, úchytky kolmosti a drsnosti povrchu jsou požadavky splněny. Je možné počítat s kladným výsledkem případného proměření těchto parametrů koncovým zákazníkem, pokud by o toto proměření požádal. Bude se uvažovat, že výroba je schopna dodržet požadavky normy.

Pro zajištění požadované tvrdosti řezaných hran plechů z materiálu S355J2 pálených na plazmě by byl vhodný předehřev. Protože hodnoty překračují požadovanou tvrdost jen o 5%, je na dalším zvážení, zda by investice na zřízení předehřevu plechů byla adekvátní a technicky vůbec možná. Při takto malých hodnotách překročení tvrdosti je možné vzít v úvahu i ponechání stávajícího stavu bez dalších úprav. Předehřev by se mohl realizovat sadou nahřívacích hořáků, dodatečně namontovaných.

Samozřejmě nelze vyloučit ani chybu provedenou při experimentu a při měření. Bylo by každopádně vhodné provést kontrolní opakování zkoušky a provést zkoušku také na jiných tloušťkách plechů.

Dalším způsobem snížení povrchové tvrdosti by bylo odbroušení povrchové vrstvy. To by znamenalo pálit plechy s určitým přídavkem na opracování a následné broušení. Tento způsob ale prodražuje výrobu. Při broušení jsou navíc zaměstnanci vystaveni rizikovým faktorům pracovních podmínek - vibracím přenášených na ruce, fyzické zátěži (lokální svalové zátěži) a hluku. Tím může dojít a také v praxi dochází ke vzniku chorob z povolání.

Nejjednodušším, ale ne nejlevnějším řešením v současných podmínkách by bylo pálit plechy z materiálu S355J2 jen kyslíkovým pálením. Tím by bylo dosaženo požadované tvrdosti volných hran, ale zároveň by bylo nutné plechy převážet na další pracoviště k dalším výrobním operacím.

Z hlediska nových požadavků na výrobu ocelových konstrukcí včetně požadavků na povrchovou ochranu je nutné všechny hrany po tepelném (i netepelném) dělení opatřit sražením hran. Výroba se musí přizpůsobit danému požadavku. Sražení hran se nyní provádí ručním broušením a i nadále tomu tak bude. Touto změnou se musí zároveň upravit normy času a postupy. Technologie předepíše do výrobních postupů další výrobní operaci – broušení a přizpůsobí se normy času. Bohužel ruční broušení s sebou přináší riziko vzniku choroby z povolání.

## 7. Technicko-ekonomické vyhodnocení

### 7.1 Technické porovnání

V následující tabulce 9 jsou uvedeny technické parametry obou strojů pro tepelné dělení plechů. Uvedené parametry zohledňují možnost porovnání mezi stroji. Parametry, které nejdou porovnat, v tabulce nejsou zobrazeny (např. používané plyny).

Technické porovnání		
Parametr	Stroj	
	Kyslíkové řezání	Plazmové řezání
Materiál k řezání	S235JR + S355J2	S235JR + S355J2
Tloušťka materiálu	3 ÷ 300 mm	0,5 ÷ 60 mm
Rychlost řezání	110 ÷ 850 mm.min <sup>-1</sup>	200 ÷ 8000 mm.min <sup>-1</sup>
Počet hořáků	1	1
Možnost děrování	ne	ano
Možnost vrtání děr	ne	ano
Možnost značení	ne	ano

Tab. 9 Porovnání technických údajů

### 7.2 Ekonomické vyhodnocení

V ekonomickém vyhodnocení se sleduje porovnání ceny jednoho druhu výrobku mezi dvěma technologiemi výroby. Tento výrobek je plech tl. 15 mm, z materiálu S355J2, rozměru 200×300 mm a obsahuje šest děr Ø21,5 mm. Na každém plechu bude vyraženo značení. Rozmístění děr ani půdorysný tvar plechu není pro toto porovnání podstatné, proto zde není uveden náčrt plechu. Pro výraznější rozdíly se uvažuje s dávkou 30 ks výrobku. Každý plech váží 7,07 kg, celková váha dávky je 212 kg.

Uvažuje se s výrobou plechu na plazmovém řezacím stroji a stroji s kyslíkovým řezáním.

Plazmový stroj umožňuje mimo samotné pálení také děrování, vrtání a ražení značek. Před pálením se do tabule plechu nejprve vyvrtají díry a provede značení.

Při použití kyslíkového řezání je potřeba pro provedení děr převézt vypálené plechy na vrtací stroj PG83, který umožňuje vrtání a značení. To s sebou přináší prodloužení doby výroby a zvýšené náklady na manipulaci.

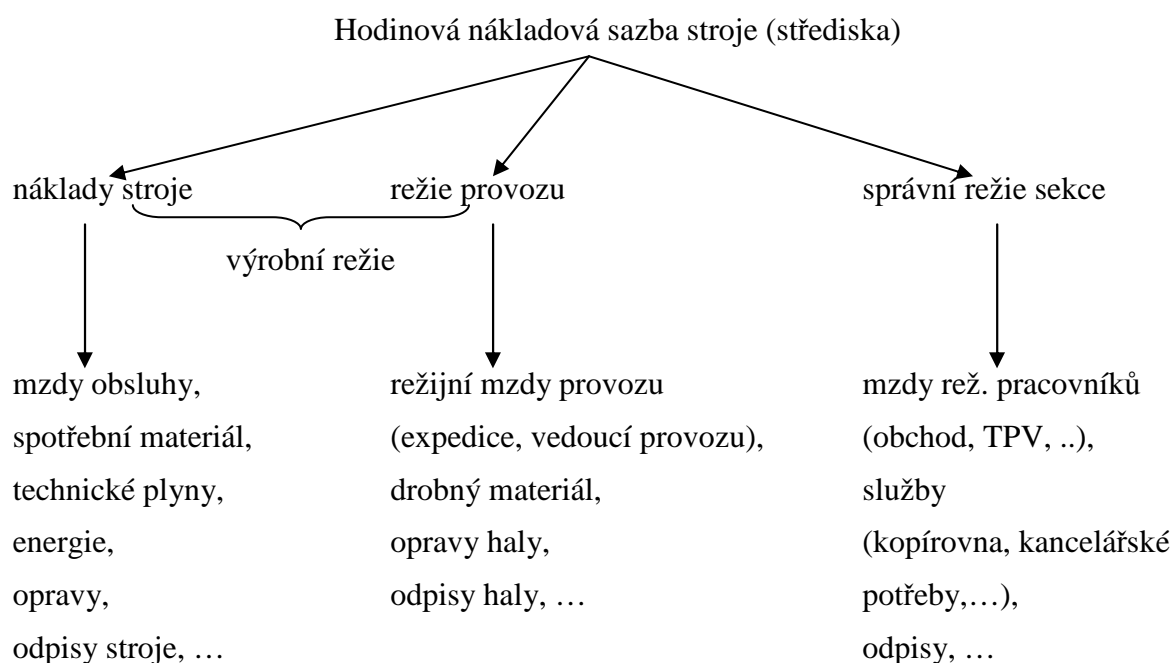
Plazmový stroj má pracovní označení MAG, kyslíkový pálicí stroj má pracoviště s označením TM515, vrtací stroj má označení TM508. Toto označení bude uváděno dále.

Cílem porovnání je zjistit, která z technologií vychází levněji pro daný výrobek, a jaká úspora nákladů vychází při použití plazmového stroje, u kterého se předpokládá levnější výroba.

### 7.2.1 Výpočet ceny výrobku

Finanční oddělení firmy každý rok aktualizuje údaje nákladů jednotlivých strojů a pracovišť a vydává přehled nákladových hodinových sazeb pro jednotlivé stroje a pracoviště na další rok. Ceny jsou vedeny jako plánované sazby, vycházející z údajů za rok zpětně. Pálicí a vrtací stroje jsou vedeny jako samostatná nákladová střediska, takže kromě vlastních nákladů na provoz je do hodinových sazeb zahrnuta část režijních nákladů celé firmy poměrově rozpočítaná (např. odpisy budov). Nákladů, které se zahrnují do výpočtu sazeb je mnoho a není nutno je zde vyjmenovávat všechny. Pro případnou cenovou nabídku zákazníkům je nutné připočítat zisk, náklady na povrchovou ochranu, na dopravu a další případné náklady. Tyto přírážky jsou ale shodné pro celou zakázku, takže v ekonomickém porovnání se bude vycházet pouze z nákladových hodinových sazeb strojů.

Stručný přehled rozpadu nákladů je uveden níže:



V porovnání nákladů na výrobek se vychází z cen, předaných finančním oddělením firmy.

Pro výpočet nákladů se uvažuje s těmito technologiemi výroby:

- Technologie 1:
  - Pálení plechů kyslíkem na pracovišti TM515,
  - Převoz na paletě k pracovišti TM508 – vrtání a značení,
  - Vrtání děr a značení plechů na vrtačce, pracoviště TM508
- Technologie 2:
  - Vrtání děr, značení a poté pálení plechů plazmou na pracovišti MAG

Pro získání ceny výrobku technologií 2 na pracovišti MAG stačí určit dobu práce stroje a tuto dobu vynásobit s nákladovou cenou. Pro získání ceny výrobku technologií 1 pálením kyslíkem na pracovišti TM515 je nutné sečíst náklady na pálení plechů, na převoz výpalků k pracovišti TM508 a na vrtání a značení na pracovišti TM508. Cena za převoz je určena hodinovou sazbou manipulanta. Cena na pracovištích TM508 a TM515 se stanoví vynásobením nákladové sazby a času práce stroje.

Doba samotné práce na jednotlivých strojích byla vypočtena dle norem času. Tyto normy jsou řešeny v technologii podle tloušťky plechu, rychlosti pálení, rychlosti vrtání a značení. Jsou určeny na základě letitých zkušeností normovače a samozřejmě přizpůsobovány během modernizace strojového vybavení. Do doby převozu mezi pracovišti TM515 a TM508 se neuvažuje s prostoji, uvažuje se, že pracovník na vrtačce začne pracovat ihned po dovezení palety s výpalky manipulantom. Ve výrobních časech jsou zahrnuty i časy na sražení hran plechů a samozřejmě čas na manipulaci u stroje.

Do výpočtu nejsou zahrnuté náklady, které jsou společné pro obě technologie a tudíž by zvýšily cenu o stejnou část. Jedná se o cenu za materiál, dopravení tabule plechů ke strojům a odvezení hotových výrobků do expedice.

Pol.	Výrobní operace	Výroba technologií 1	Výroba technologií 2
1	Čas pálení kyslíkem, pracoviště TM515 [min]	130	
2	Náklady na pracoviště TM515 [Kč/Nh]	880	
3	Cena dávky za pálení TM515 [Kč]	1907	
4	Převoz na pracoviště TM508 [min]	6	
5	Náklady na manipulaci [Kč/Nh]	150	
6	Cena dávky za manipulaci [Kč]	15	
7	Čas vrtání a značení, pracoviště TM508 [min]	195	
8	Náklady na pracoviště TM508 [Kč/Nh]	815	
9	Cena dávky za vrtání a značení TM508 [Kč]	2649	
10	Čas vrtání, značení a pálení plazmou, pracoviště MAG [min]		105
11	Náklady na pracoviště MAG [Kč/Nh]		1100
12	Cena dávky za pálení MAG [Kč]		1925
	Celková cena výroby 30ks [Kč]	<b>4571</b>	<b>1925</b>
	Celkový čas výroby 30ks [min]	<b>331</b>	<b>105</b>
	Průměrná cena 1ks [Kč]	<b>152,4</b>	<b>64,2</b>
	Průměrný čas výroby 1ks [min]	<b>11,0</b>	<b>3,5</b>

Tab. 10 Výpočet ceny výrobku

### 7.3 Diskuse

Kyslíkový pálící stroj má proti plazmovému nižší výrobní náklady, ale zároveň také výrazně nižší rychlosti pálení. Stroje jsou schopny pálit stejnou jakost materiálu, u kyslíkového řezání je možnost pálit větší tloušťky plechu. Velkou nevýhodou u kyslíkového stroje je skutečnost, že nemůže vrtat či děrovat a značit, což je pro současný výrobní sortiment zásadní.

Z tabulky 10 jednoznačně vyplývá, že součást vyrobená na plazmovém stroji je výrazně levnější než výroba druhou variantou. Výroba plechu kyslíkovým pálením s následným převozem k dalšímu pracovišti vychází 2,4× draž, než výroba na plazmovém stroji. Také čas výroby je přibližně 3× rychlejší na plazmovém stroji.

Vzhledem k výrazně vyšší výrobní ceně výrobku vyrobeného na kyslíkovém stroji se nabízí otázka, zda nevyměnit starší kyslíkový stroj za nový plazmový. Provede-li se jednoduchá diskuse výroby stejného výrobku na plazmě a kyslíku bez uvažování stavebních úprav, rozdílných tloušťek plechů, atd., pak by mohl být výsledek následující.

Předpokládá se, že daný výrobek bude s pomocí kyslíkového stroje a následného vrtání vyroben za přibližně 3× delší čas a nákladová cena vrtacího a pálicího stroje je shodná.

- denní provoz plazmy: 7 hodin
- roční fond plazmy (21 dní v měsíci): 1764 hodin provozu
- roční fond kyslíkového stroje (včetně následného vrtání):  $3 \times 1764 = 5292$  hodin
- náklady na plazmu za rok:  $1764 \times 1100 = 1\,940\,400$  Kč
- náklady na kyslíkový stroj za rok:  $5292 \times 880 = 4\,656\,960$  Kč

Rozdíl v nákladech představuje 2 716 560 Kč ročně. Při ceně nového plazmového stroje 13 000 000,- je návratnost nákladů přibližně 4,8 roku. Tento výpočet není zcela přesný, neboť nejsou započítány stavební úpravy, které při nedostatku místa pro umístění stroje mohou znamenat vysoké náklady. V tuto chvíli také není známa procentuelní využitelnost obou pálicích strojů, která by měla vliv na rozhodnutí o výměně kyslíkového stroje.

Při situaci, kdy díry není nutno vrtat, ale je možné díry děrovat, by návratnost nákladů byla přibližně 6,2 let (2,6× rychlejší výroba děrováním na plazmě).

## 8. Závěr

Diplomová práce se zabývala porovnáním dvou technologií tepelného dělení plechů. V první části se práce zabývala teorií nekonvenčního způsobu obrábění plechů, jakož i současným moderním způsobům dělení plechů. Mezi tyto běžně využívané metody dělení plechů patří dělení vodním paprskem, laserem, plazmou a kyslíkovým řezáním. Poslední dvě jmenované metody byly popisovány podrobněji, neboť tyto technologie jsou využívány ve firmě, kde byl proveden experiment.

Provedení experimentu směřovalo k získání údajů parametrů po tepelném dělení plechů. Tyto údaje byly využity k vyhodnocení stavu a posouzení, zda současný způsob výroby vyhovuje nové evropské prováděcí normě EN 1090-2. Norma předepisuje požadavky na výrobu ocelových konstrukcí. Z hlediska tepelného dělení se zaměřuje na jakost povrchů volných stěn a jejich tvrdost po tepelném dělení. Tyto požadavky jsou předpokladem pro určitý výrobní standard a pro vhodnost povrchů po tepelném dělení k povrchové ochraně. Experiment byl proveden na vzorcích z plechu tloušťky 15 mm, oceli jakosti S235JR a S355J2 při řezání plazmou a kyslíkem.

Výsledek experimentu prokázal vhodnost výroby pro všechny parametry vyjma požadavků na tvrdost. Nevyhověly k materiálu S355J2 při řezání plazmou. Tvrdost byla překročena pouze minimálně, o cca 5%. Navrhovaná řešení jsou předehřev plechů, odbroušení povrchové vrstvy a pálení plechů z materiálu S355J2 pouze na kyslíkovém stroji. Všechny tyto varianty ale zvyšují náklady na výrobek a je na odpovědných osobách ve firmě, která varianta bude zvolena.

Z výsledků ekonomického porovnání vyplývá výrazně levnější výroba daného výrobku při použití plazmového pálicího stroje, který umožňuje navíc vrtat, děrovat a značit. Po vyřešení problému s tvrdostí hran po pálení by bylo jistě vhodné nahradit stávající kyslíkový pálicí stroj novým plazmovým.

## Použitá literatura:

- [1] Barcal, J., *Nekonvenční metody obrábění*. Praha:ČVUT, 1989. 17-51
- [2] Morávek, R., *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň:ZČU, 1999. ISBN 80-7082-518-9
- [3] David, P., Stach, V., *Plazma, fyzikální jevy a technické aplikací*. Č. Budějovice: Sborník Pedagogické fakulty, 1977. 14-272-78
- [4] Airliquide [online]  
<http://www.airliquide.cz/cs/tisko/odborne-publikace/lanky.html>
- [5] Kocman, K., Prokop, J., *Technologie obrábění*. Brno:CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2
- [6] AWAC [online]  
<http://www.awac.cz>
- [7] Kovařík, R., Černý, F., *Technologie svařování*. Plzeň:ZČU, 2000. ISBN 80-7082-697-5
- [8] <http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>
- [9] <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
- [10] Hypertherm [online]  
[http://www.hypertherm.com/en/Training\\_and\\_Education/What\\_is\\_Plasma/index.jsp](http://www.hypertherm.com/en/Training_and_Education/What_is_Plasma/index.jsp)
- [11] Hypertherm [online]  
<http://www.hypertherm.com>
- [12] <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/index.htm>
- [13] Hypertherm POWERMAX45 řezné systémy s plazmovým obloukem Pracovní manuál  
<https://www.hypertherm.com/Xnet/library/library.jsp?locale=en>
- [14] Návod k obsluze HiFocus 280i + PGE 3-360 Pracovní manuál pro obsluhu stroje
- [15] Výpočet tvrdosti podle Vickerse  
<http://gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm>
- [16] ČSN EN ISO 9013 Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu
- [17] ČSN EN 1090-2 Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce
- [18] Šova, F., *Technologie obrábění a montáže*. Plzeň:ZČU, 2001. ISBN 80-7082-823-4
- [19] ČSN EN 1090-1 Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 1: Požadavky na posouzení shody konstrukčních dílců
- [20] ČSN EN 1090-3 Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí - Část 3: Technické požadavky na hliníkové konstrukce
- [21] ČSN EN ISO 8501-3 Příprava ocelových povrchů před nanesením nátěrových hmot a obdobných výrobků - Vizuální vyhodnocení čistoty povrchu - Část 3: Stupně přípravy svarů, hran a ostatních ploch s povrchovými vadami
- [22] ČSN EN ISO 1461 Žárové povlaky zinku nanášené ponorem na železných a ocelových výrobcích - Specifikace a zkušební metody
- [23] ČSN EN ISO 14713 (soubor) Zinkové povlaky - Směrnice a doporučení pro ochranu ocelových a litinových konstrukcí proti korozi
- [24] ČSN EN ISO 12944-1 (soubor) Nátěrové hmoty - Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy
- [25] ČSN EN 10025-2 Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli



