

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY DĚLENÍ MATERIÁLU

UNCONVENTIONAL METHODS OF MATERIAL CUTTING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

RADEK RUSZ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁRSKÉ PRÁCE**

student(ka): Radek Rusz

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

### **Nekonvenční způsoby dělení materiálu**

v anglickém jazyce:

### **Unconventional methods of material cutting**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie možných nekonvenčních metod dělení materiálu se zaměřením na jejich vhodnost pro velko- či malosériovou výrobu. Rešerše bude obsahovat základní rozdělení a principy.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na nekonvenční metody dělení materiálu se zhodnocením jejich vhodnosti či nevhodnosti a s ukázkami použití.

Seznam odborné literatury:

1. ZATLOUKAL, Petr. Laserové dělení materiálu [online]. 2007 , 10. 5. 2007 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>>.
2. ŽÁK, Jan, SAMEK, Radko, BUMBÁLEK, Bohumil. Speciální letecké technologie I. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. ISBN 80-214-0128-1. s. 220.
3. PETRUŽELKA, Jiří. Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření. 1. vyd. Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2000. 156 s. ISBN 80-7078-635-3.
4. BOUDA, Luděk . Řezání vodním paprskem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, roč. 2008, č. 7 [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/článek/řezání-vodním-paprskem>>. ISSN 1212-2572.
5. ŘASA, Jaroslav, KEREKANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění-8. díl:Obrábění paprskem iontu - plazmatem. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, roč. 2008, č. 10 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/článek/nekonenční-metody-obráběni-8-díl>>. ISSN 1212-2572.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 16.11.2009

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

RUSZ Radek: Nekonvenční metody dělení materiálu.

---

Bakalářský projekt obsahuje literární studii o nekonvenčních způsobech dělení materiálu. Práce je zaměřena na technologie dělení materiálu vodním paprskem, plazmou, laserem, ultrazvukem a svazkem elektronů. Metody jsou zpracované z hlediska fyzikálního principu a použití v průmyslu. Jsou zde uvedena technologická zařízení pro jednotlivé metody, včetně zhodnocení jejich parametrů.

V práci je vypracováno srovnání všech metod z hlediska produktivity a kvality zpracování materiálu, posouzení jejich výhod, nevýhod a vhodnosti pro malo- nebo velkosériovou výrobu.

Klíčová slova: laser, plazma, vodní paprsek, paprsek elektronů, ultrazvuk, dělení materiálů, nekonvenční technologie, řezání

## ABSTRACT

RUSZ Radek: Unconventional methods of material cutting.

---

The bachelor thesis contents literary study of a unconventional methods of material cutting. Work is focused on cutting technology of a water jet, plasma, laser, ultrasound and electron beam. Each method is explained in terms of physical principle and application in industry. Also, there is the technological equipment for the various methods, including evaluation of their parameters.

The work is also a comparison of all methods in terms of productivity and material processing quality, assessment their advantages and disadvantages, and suitability for small- or large volume production.

Keywords: laser, plasma, water jet, electron beam, ultrasound, materials cutting, unconventional technologies, cutting



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RUSZ, R. *Nekonvenční způsoby dělení materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.





## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V ..... dne 28.5.2010

.....  
Podpis



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za cenné připomínky a rady, týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat všem mým rodinným příslušníkům a přátelům, kteří mě podporovali při psaní této práce.



# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1 ÚVOD.....	9
2 TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU .....	10
2.1 Technologická zařízení pro řezání vodním paprskem.....	11
3 TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ PLASMOU .....	13
3.1 Stabilizace oblouku .....	14
3.2 Technologická zařízení pro řezání plasmou.....	15
4 TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ LASEREM.....	17
4.1 Pevnolátkové lasery .....	17
4.2 Plynové lasery.....	18
4.3 Kapalinové, polovodičové lasery .....	19
4.4 Metody řezání laserem.....	19
4.5 Technologická zařízení pro řezání laserem .....	20
5 ŘEZÁNÍ ULTRAZVUKEM .....	22
5.1 Technologická zařízení .....	22
6 ŘEZÁNÍ PAPRSKEM ELEKTRONŮ .....	23
7 SROVNÁNÍ PARAMETRŮ PROCESŮ .....	24
7.1 Rychlost řezání .....	24
7.2 Kvalita řezu .....	25
7.3 Vodní paprsek.....	27
7.4 Plasma .....	27
7.5 Laser .....	28
7.6 Ultrazvuk .....	28
7.7 Paprsek elektronů .....	28
8 ZÁVĚR.....	29

Seznam použitých zdrojů

Seznam příloh

# 1 ÚVOD

Pojem nekonvenční technologie lze vysvětlit jako technologicky pokročilé systémy a metody průmyslového zpracování materiálu, které jsou založeny na principu využití fyzikálního nebo chemického mechanismu úběru materiálu. Charakteristické pro všechny nekonvenční technologie je absence klasické třísky, která vzniká při konvenčním obrábění a dělení materiálu. Konvenční dělení materiálu představuje např. autogenní řezání, nůžkové stříhání, řezání na pilách a další. Nekonvenční technologie se dělí do několika skupin, z hlediska principu dělení materiálu se rozlišují metody dělení:

- elektrickým výbojem - dělení elektroerozivní, elektrickou jiskrou a elektrickým obloukem
- chemické - elektrochemické a chemické
- paprskem koncentrované energie - laserem, plazmou, elektronovým a iontovým paprskem
- mechanickými procesy - ultrazvukem, kapalinovým paprskem a proudem brusiva

Tato práce je zaměřena na nejznámější a nejpoužívanější z těchto metod. Do tohoto výběru byly zahrnuty technologie řezání vodním paprskem, plazmou, laserem, ultrazvukem a paprskem elektronů.

Zavádění nekonvenčních technologií do průmyslové sféry probíhalo v druhé polovině 20. století. Důvodem zavedení těchto technologií do výrobních procesů byly stále větší požadavky na efektivní dělení těžko obrobitelných materiálů. V současné době jsou některá průmyslová odvětví jako např. letectví a kosmonautika na těchto technologiích přímo závislá. Nekonvenční metody díky automatizaci zvyšují hospodárnost a efektivitu výrobních procesů, minimalizují možnost chyby zapříčiněnou lidským faktorem, zvyšují bezpečnost práce, zvyšují dosažitelnou přesnost hotových dílců a poskytují mnoho dalších výhod.

Snad jedinou vážnější nevýhodou zůstávají vysoké investiční náklady.



Obr. 1.1 Řezání laserem [31]



Obr. 1.2 Konvenční řezání na pile [32]

## 2 DĚLENÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPSKEM [1][2][3]

Technologie funguje na principu řezání materiálu proudem vody, který je vysokotlakým čerpadlem vháněn do řezné hlavy, ze které vychází tryskou jako řezný vodní paprsek. Historie této metody má kořeny v 50. letech 20. století, kdy lesní inženýr Dr. Norman Franz experimentoval s nápadem řezání dřeva na plátky pomocí proudu vody. I když technologie nikdy nebyla použita v průmyslové výrobě, jeho výzkum posloužil jako základní kámen k tzv. abrazivnímu vodnímu paprsku, který byl vyvinut Dr. Mohamedem Hashishem. U této metody se do proudu vody přidává abrazivní částice, které pak přispívají k efektivnějšímu procesu řezání.

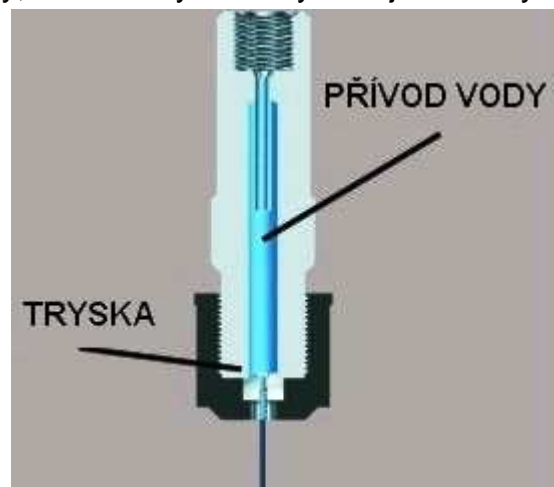
V roce 1983 americká společnost Flow International Corporation představila první komerční hydroabrazivní systém pro řezání autoskel. V 80. a 90. letech se technologie začala postupně uplatňovat ve výrobním sektoru, hlavně pro letecký a kosmický průmysl. V dnešní době lze technologii řezání vodním paprskem najít prakticky ve všech oblastech průmyslu.

Voda je v zařízení stlačena na tlak 50-415 MPa. Toto umožňují vysokotlaká čerpadla disponující příkonem 11-150 kW, ve kterých se průtok vody pohybuje mezi 1,2 a 5,2 l.min<sup>-1</sup>. Pro měkké materiály jako např. guma, dřevo, plasty, pěnové materiály atd. se používá zařízení, emitující čistý vodní paprsek (obr. 2.1).

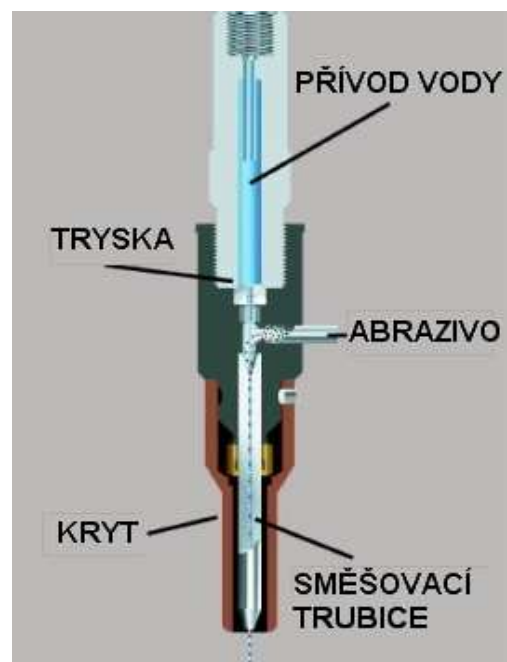
Toto zařízení však není vhodné pro tvrdší materiály, a proto se u materiálů jako jsou různé oceli, kovové slitiny, keramika, beton atd. používá zařízení emitující abrazivní paprsek. Jeho princip spočívá v přidávání tvrdých mechanických částic do proudu vody (Obr. 2.2). Abrazivo se volí podle tvrdosti materiálu, často se používá přírodní olivín nebo granát. Technologie vodního paprsku má standardní přesnost řezu  $\pm 0,1 \text{ mm.m}^{-1}$ . Obrovský význam této metody spočívá v tom, že řezané součásti nejsou tepelně ani mechanicky namáhány.

### 2.1 Technologická zařízení pro řezání vodním paprskem [28][29]

V současnosti existuje mnoho firem zabývajících se výrobou zařízení pro obrábění vodním paprskem. Pro přehlednost jsou zde uvedeny pouze špičkové firmy působící na českém trhu.



Obr. 2.1 Schéma zařízení emitujícího čistý vodní paprsek [3]



Obr. 2.2 Schéma zařízení emitujícího abrazivní vodní paprsek [3]

Na těchto zařízeních je prováděn samotný řezný proces. V dnešní době jsou řezací stroje řízeny číslicovou technikou, což zaručuje dostatečnou rychlost a přesnost řezu. Lze je vybavit širokou řadou doplňků od speciálních řezných hlav až po různé senzorické a upínací systémy. Samozřejmostí je podpora mnoha CAD formátů.

a) **Flow Corp International** – tato společnost je předním světovým výrobcem a prodejcem strojů, čerpadel a příslušenství pro technologii řezání vodním paprskem. Je také lídrem v oblasti výzkumu a vývoje hydroabrazivní technologie. Její sídlo je v americkém Kentu ve státě Washington, ale díky svým pobočkám je její působnost na celém světě včetně české centrály v Brně.

- **Mach 3** – je série produktů, která je díky své univerzálnosti a možnostech konfigurace jedním z nejoblíbenějších abrazivních zařízení současnosti. Tato řada má mnoho druhů uspořádání pracovního stolu od nejmenší konfigurace 1,3 x 1,3 m až po největší 7,3 x 2 m. Má mnoho volitelných doplňků, např. odkalovací systémy abraziva, upínací doplňky, nebo laserový zaměřovač polohy.



Obr. 2.3 Hydroabrazivní zařízení řady Mach 3 [27]

- **Mach 4** – je nejprogresivnější série řezacích strojů Flowcorp, která umožňuje kromě klasického 2D řezání také řezání trojrozměrných dílů. 3D řezání umožňuje technologie Dynamic Waterjet XD, díky které lze řezací hlavu natočit až o 60°. Naopak technologie HyperPressure dovoluje díky velmi vysokému výstupnímu tlaku řezat až o 50 % rychleji, s poloviční spotřebou abraziva a až o 30 % menšími náklady na obrábění.



Obr. 2.4 Hydroabrazivní zařízení řady Mach 4 [27]



b) **PTV spol. s r.o.** - Firma po založení v 80. letech 20. století fungovala pouze jako poradenská a servisní firma v tomto oboru, ale po vnitřní restrukturalizaci se zaměřila na vlastní vývoj a výrobu zařízení pro obrábění vodním paprskem. V roce 2000 byl zkonstruován první CNC stůl, a dnes již firma působí téměř ve všech zemích východní i západní Evropy. Její sídlo je v Hostivicích u Prahy.

- **Modelová řada New Line** – je robustní řada nejvýkonnějších strojů firmy PTV, umožňující použití až dvou suportů najednou a maximální plochou pracovního stolu až 6 x 9m. Řada umožňuje zakomponovat mnoho doplňků jako podtlakový systém přísávání abraziva, vzduchovou vrtačku a další, ale především systém ProgressJet. Tento doplněk představuje speciální řezná hlava, která eliminuje úkos řezné spáry vzniklý energetickým úbytkem paprsku, zvyšuje přesnost řezu a především umožňuje naklání řezného paprsku až o 10°, čímž lze řezat úkosy a 3D modely.



Obr. 2.5 Hydroabrazivní zařízení řady New Line [28]

Tab 3.1 Parametry řezných strojů

Model	Přesnost (+/-) [mm/m]	Přesnost opakovaného najetí [mm]	Rychloposuv [m/min]	Max. řezná rychlost [m/min]
Mach 2031b	0,1	0,08		
Mach 3 3020b	0,06	0,05	12,7	7,6
Mach 4 4020c	0,02	0,025	35	25
WJ3015-12-SMART JET	0,08	0,05	20	10
WJ2010-1Z-PJ-5AX-NEW LINE	0,05	0,05	30	20

Z tabulky 3.1 je patrné, že v současnosti nejvýkonnějším strojem na českém trhu je model Mach 4. Přesnost i rychlosti řezání a posuvů jsou v porovnání s dalšími stroji bezkonkurenční. Tyto pozitiva jsou ovšem vyváženy vysokou cenou stroje. Proto je tento stroj vhodný pro dělení a obrábění velkých produkčních sérií. Model New Line je díky své vysoké rychlosti posuvů také určen pro velké série, ovšem přesnost řezu je srovnatelná s modely nižší řady, jeho využití spočívá tedy v řezání polotovarů, nevyžadujících vysokou tvarovou přesnost. Zbylé tři modely jsou ekonomickým řešením pro malé a střední podniky, kde nižší pořizovací cena je zaplácena, vyššími výrobními náklady oproti modelům vyšší řady.

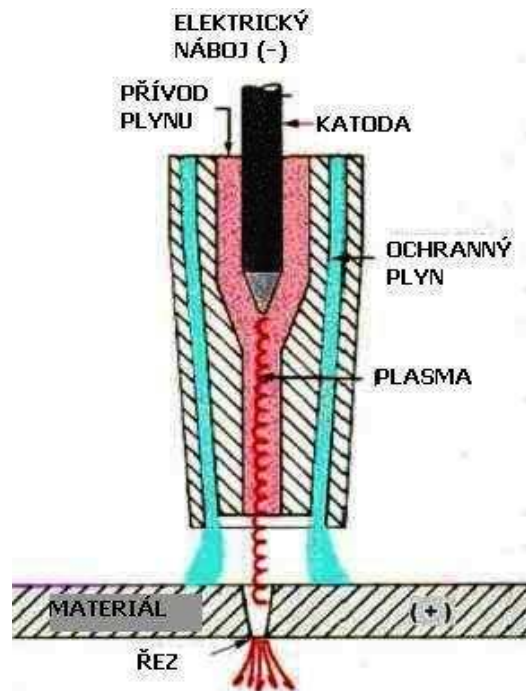
Čerpadla jsou srdcem hydroabrazivní technologie. Čerpadlo stlačí vodu na určitý tlak (nejsilnější čerpadla dokážou stlačit vodu až na tlak 650 MPa) a následně ji dodávají do řezné hlavy, kde proudí ven z trysky nadzvukovou rychlostí. Vybraná čerpadla tuzemských společností, včetně jejich popisu a srovnání jsou umístěná v příloze 2.

### 3 ŘEZÁNÍ PLAZMOU [4][5][6]

Princip této metody spočívá ve vysokorychlostním a vysokoteplotním proudění inertního plynu (Ar, H, He) kolem netavící se wolframové elektrody (katoda), která s anodou vytváří elektrický oblouk. Oblouk ionizuje inertní plyn, který se tímto zahřívá a přechází do skupenství známého jako plazma.

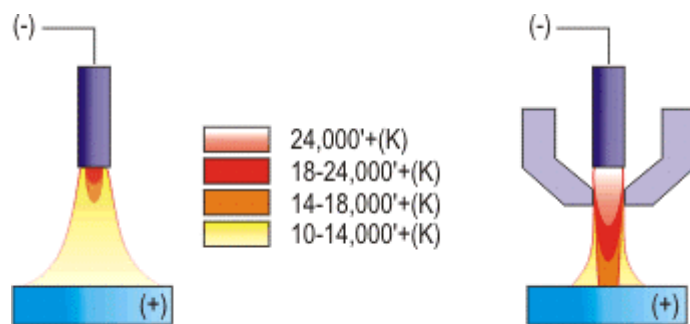
Plazma je charakterizována jako tepelný, vysoce žhavý, elektricky vodivý plyn složený z kationů, anionů, elektronů ale také vybuzených a neutrálních atomů a molekul daného plynu. Zkoncentrováním proudu plazmatu se dosahuje vysoké hustoty výkonu a následně vysokých teplot (16-20 tis. K). Hustota výkonu je pojem, který vyjadřuje míru dosaženého výkonu na jednotce plochy kolmé ke směru proudění laserového paprsku [ $W/m^2$ ].

Proud plazmatu se může koncentrovat na stěně trysky hořáku, ochranným (fokusačním) plynem (obr. 3.1), nebo vodním vírem. Řezný proces je postaven na kinetické a tepelné energii plynu, neboť řezaný materiál je nejprve taven a následně vyfukován z řezné spáry.



Obr. 3.1 Schéma plazmového řezáku chlazeného ochranným plynem [7]

Technologie řezání plazmou má počátky v 50. letech 20. století. V roce 1941 americký obranný průmysl představil novou metodu spojování lehkých kovových materiálů pro letecký průmysl na principu svařování v ochranné atmosféře inertního plynu, tzv. "TIG" (Tungsten Inert Gas). Tato metoda dosáhla komerčního úspěchu, a díky dalšímu vývoji američtí vědci zjistili, že zúžením výtokové trysky inertního plynu dosáhnou vysokých teplot oblouku a velkých rychlostí proudění plynu (Obr 3.2). Díky novým vlastnostem této technologie už nebyl materiál taven, ale řezán.



Obr. 3.2 Teplotní profil metody TIG (vlevo) a metody řezání plazmatem. [4]

U technologie řezání plazmatem jsou v technologickém zařízení pro různé účely použité následující plyny:

- **Plazmové plyny** – plyny, jež jsou přiváděny do elektrického oblouku, kde jsou zionizovány a následně přeskupeny do plazmatického skupenství a použity jako řezný prostředek. Používají se plyny jako argon, vodík, dusík, kyslík a jejich směsi.

- **Fokusační plyny** – jejich funkce spočívá ve zkoncentrování proudu plazmy vystupující z hořáku. Používá se argon, helium dusík a vodík, případně jejich směsi.
- **Asistentní plyny** – mají ochranný charakter, obklopují místo řezu a plazmatický paprsek, čímž zabraňují nežádoucím chemickým reakcím s atmosférou. Jako asistenční plyny se používají argon a dusík.

Volba plazmového a asistenčního plynu závisí na tloušťce a druhu materiálu:

- ✓ konstrukční ocel: O<sub>2</sub>, vzduch
- ✓ vysoce legovaná ocel: Ar/H<sub>2</sub>, Ar/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Ar/N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, vzduch
- ✓ neželezné kovy: Ar/H<sub>2</sub>, vzduch

### 3.1 Stabilizace oblouku [6][17]

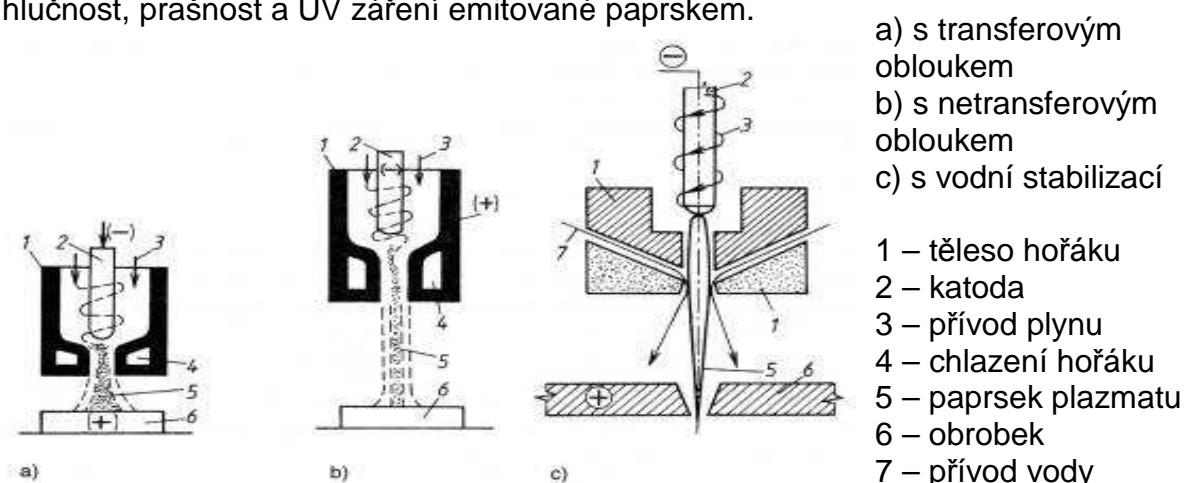
U plazmového řezání je plazmový plyn ionizován elektrickým obloukem, který je nutno stabilizovat. Stabilizace může probíhat pomocí fokusačního plynu, nebo pomocí proudu vody. Podle druhu použitého stabilizačního média se plazmové hořáky dělí na:

#### Plazmové hořáky s plynovou stabilizací

- s transferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi katodou (umístěnou v hořáku) a anodou, kterou představuje řezaný materiál musí překonat vzdálenost mezi těmito tělesy, proto jej nazýváme transferový. Jeho použití je v řezání elektricky vodivých materiálů, např. ocelí a neželezných kovů.
- s netransferovým obloukem – elektrický oblouk hoří mezi katodou v hořáku a anodou tvořenou kladně nabitou výstupní tryskou. Používá se tam, kde katoda nemůže vytvořit elektrický oblouk s řezaným nevodivým materiálem např. keramikou.

#### Plazmové hořáky s vodní stabilizací

Stabilizace elektrického oblouku je způsobena vodou, která je přiváděna přídatnými kanálky. Tyto hořáky se používají pro řezání ocelí a neželezných kovů a k nanášení povlaků. Hlavní předností těchto hořáků je možnost řezat pod vodou, čímž se zlepšují pracovní podmínky pro obsluhu řezacích zařízení a to především hlučnost, prašnost a UV záření emitované paprskem.



Obr. 3.3 Plazmové hořáky s plynovou stabilizací [17]

### 3.2 Technologická zařízení pro řezání plasmou [29][30]

Podobně jako při dělení materiálu vodním paprskem je současný světový trh v oblasti pálicích plazmových strojů velmi pestrý. Proto zde opět platí zaměření na domácí trh.

Plazmové pálicí stroje se vyrábějí jak v mobilním provedení určeném, pro časté přenášení, např. na staveništích, ale i v provedení stacionárním, které je zejména vhodné pro výrobní průmyslové pracoviště. Stacionární stroje jsou ovládány číslicovou technikou, zajišťující rozměrovou přesnost, rychlost řezného procesu a jeho kvalitní provedení.

a) **MGM spol. s r.o.** je firma působící nejen na českém trhu, ale i v Evropě. Sídlo firmy, která je výrobcem a dodavatelem zařízení pro termické dělení materiálu je v Táboře. V současné době vyrábí kompletní vybavení pro plazmové řezání, včetně zdrojů a řídicích CNC systémů.

- **Pálicí stroje OMNICUT**

Stroje OMNICUT jsou robustní portálové stroje vyráběné v několika rozměrových variantách. Nástroj je upevněn na mostní konstrukci, po které se pohybuje díky lineárnímu vedení. Podélný pohyb je zajištěn díky servomotorům na obou stranách pojezdů. Stroj je univerzální, co se týče typu dělení, kromě plazmy lze použít také autogenní techniku popř. další technologie.



Obr. 3.4 Pálicí stroj OMNICUT 4000 [29]

- **Pálicí stroje ARROW**

Vyznačují se lehkou konstrukcí, dobrými statickými i dynamickými vlastnostmi. Pohyb řezné hlavy je opět zjištěn lineárním vedením v příčném směru a servomotory v podélném směru. Stroj je také vybaven integrovaným odsávacím stolem, výškovým senzorem fungujícím na principu velikosti napětí v oblouku a dalšími doplňky. U největší verze je pracovní délka stolu až 8m.

b) **HaWe systems, s.r.o.** je dodavatelská společnost, zabývající se prodejem a instalací zařízení pro tvarové zpracování plochých materiálů moderními technologiemi. Firma se sídlem v Olomouci prodává plazmové stroje americké společnosti Multicam.

- **CNC Plazma série 1000** - je ekonomická řada modelů společnosti MultiCam, vybavena duálním pohonem, pracovní jednotkou Hypertherm a ovladačem Multicam. Stroj disponuje integrovanou knihovnou materiálů, díky které stroj automaticky přizpůsobuje rychlost a výšku řezu zadanému materiálu a jeho tloušťce.



Obr. 3.5 Stroj MultiCam 1000 Plasma [30]

- **CNC Plazma série 6000** - je orientován na zákazníky požadující dělení rozměrných hrubých plátů materiálů a zároveň dostatečnou rychlost a přesnost. Pohybový systém je oddělen od samostatného stolu což chrání řezací systém při nakládání materiálu a před vysokou teplotou.

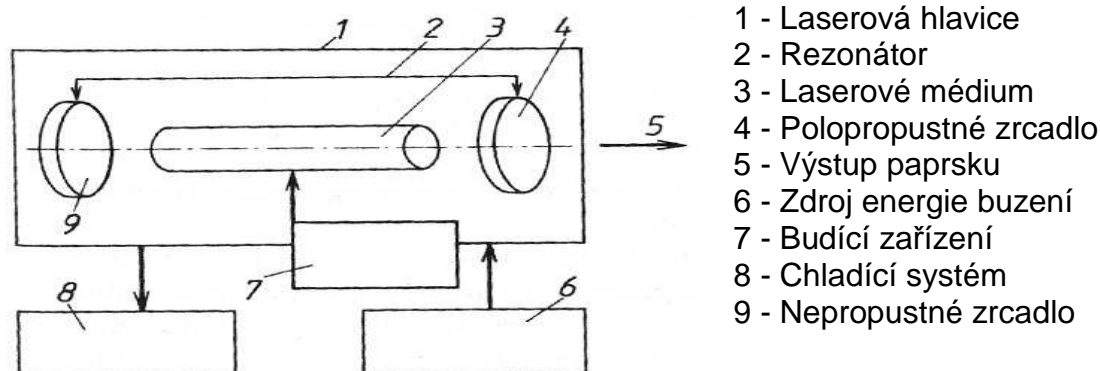


Obr. 3.6 Stroj MultiCam 6000 Plasma [30]

Obě uvedené firmy mají významné postavení na českém trhu. Zatímco MGM spol. s.r.o. své stroje vyrábí včetně všech doplňků, HaWe systéme s.r.o. je firma dodavatelská. Zahraniční zařízení je v současné době pokročilejší, což je dáno kvalitativní rozdílností českého a amerického průmyslu. Pokročilost zahraničních zařízení dokazuje zejména integrovaná knihovna materiálů s automatickou regulací řezných parametrů v závislosti na rozměrech a typu materiálu.

## 4 Řezání laserem [8][9]

Řezání laserem funguje na principu indukované emise, tj. vynuceného záření. K indukované emisi dochází v rezonátoru, který je tvořen soustavou zrcadel. V rezonátoru je aktivní prostředí, tvořené plynem, nebo tuhou látkou, do něhož je dodávána energie.



Obr. 4.1 Schéma zařízení pro řezání laserem [8]

Dodávaná energie vybudí elektrony laserového plynu ze základní energetické hladiny do hladiny vyšší. Při dalším příjmu energie se síly v atomu vyrovnají a elektron se vrátí do své původní energetické hladiny. Při návratu na původní energetickou hladinu dojde k vyzáření kvanta energie ve formě fotonů. Díky zrcadlům dochází k odrazu paprsku fotonů a opětovnému průchodu prostředím, což podporuje další emisi fotonů, a celkový tok energie se exponenciálně zvyšuje. Po určitém čase se světelné záření zkoncentruje do paprsku vycházejícím z rezonátoru přes polopropustné zrcadlo. Vzniklé záření má jednu přesně danou vlnovou délku, tzn., že je monochromatické a pohyb fotonů je uspořádaný do jednoho směru tzv. koherentní. Zkoncentrovaný paprsek je zaostřen čočkou na povrch materiálu, který je nataven a následně odfukován asistenčním plynem, nebo se přímo vypařuje.

Slovo Laser pochází z anglického **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, tj. zesilování světla stimulovanou emisí záření, a jeho počátky sahají do 60.let minulého století. Předchůdcem Laseru byl tzv. maser, zařízení fungující na stejném principu, ovšem emitující mikrovlnou energii. První funkční laser sestavil Theodore H.Maiman v roce 1960, použitím krystalu rubínu jako aktivního prostředí. Technologii zdokonalili sovětsí fyzici Nikolaj Basov a Aleksandr Prochodov v 70. letech 20. století.

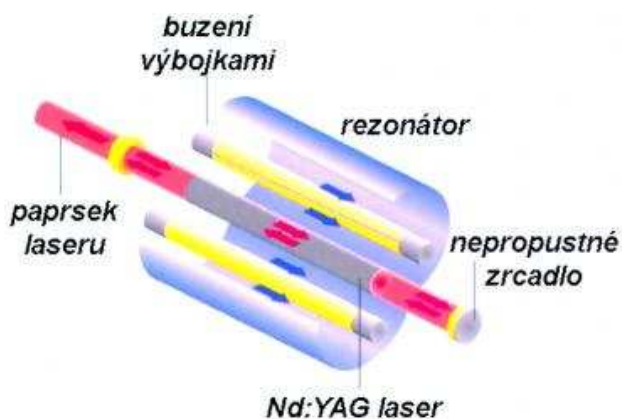
### 4.1 Pevnolátkové lasery [8][9][18]

Jak už název napovídá, aktivní prostředí je tvořeno pevnolátkovým dielektrikem, které musí být opticky propustné a homogenní v celém objemu. Představa konstrukce laseru je nejvíce spojena s aktivním prostředím tvořeným krystaly drahých kamenů, např. rubínu nebo safíru. Tyto lasery se používají, ale dnes už v omezené míře, jelikož jejich vlastnosti dovolují velké výkony pouze v krátkých pulzech, protože spojitě záření by znamenalo zničení krystalu. Tento problém řeší lasery s aktivním prostředím tvořeným sklem s přísadkou vzácných prvků, jako např. Nd: YAG. Tyto lasery jsou v současnosti nejpoužívanější.



Buzení elektronů aktivního prostředí a následný proces indukované emise se nazývá čerpání energie z krystalu laseru. Čerpání laserů probíhá výbojkami umístěnými v tělese laseru. V posledních letech se ovšem rozšířilo a osvědčilo čerpání laseru diodami kvůli jejich nesporným výhodám v podobě vyšší účinnosti, menší spotřeby energie a delší trvanlivosti.

V praxi se nejvíce používá Nd:YAG laser (obr. 4.2) – Zkratka pro laser vznikla z počátečních písmen prvků tvořící tento materiál: izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) je dopován ionty neodymu ( $Nd^{3+}$ ). Vlnová délka laserového paprsku je 1064,1nm a jeho výkon se pohybuje v rozmezí od 100 do 4000 W. Kromě použití v průmyslu při řezání, vrtání a svařování je používán také v medicíně (chirurgie).



Obr. 4.2 Konstrukce Nd:YAG laseru [4]

## 4.2 Plynové lasery [8][9][18]

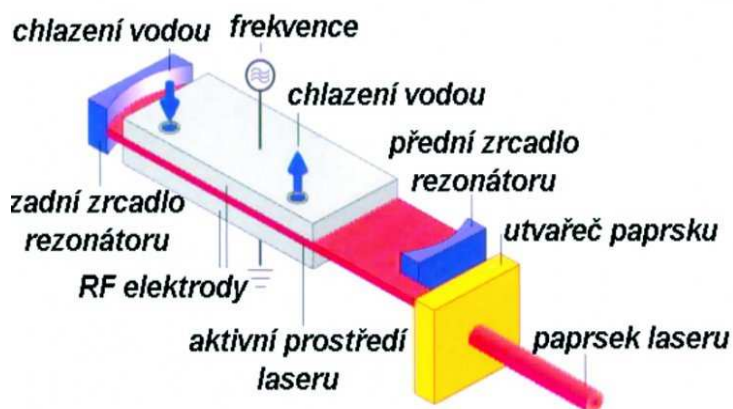
Aktivní prostředí tvoří plynná fáze různých prvků. Pracují většinou v kontinuálním režimu avšak existují i typy laserů z velmi vysokým výkonem pracující v pulzním režimu. Buzení plynových laserů zpravidla obstarává vysokonapěťový elektrický výboj, ale používají se samozřejmě i jiné metody, např. chemickou reakcí, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky.

Existuje obrovské množství plynových laserů - Argonový (modrý, zelený), Dusíkový (UV), laser s párami Mědi (zelený), Jódový (viditelné, IR) a mnoho dalších. Plynové lasery lze rozdělit na fotodisociační, atomové, iontové, molekulární. Podrobnější přehled je uveden v příloze 1 v tabulce 1.1.

Velkou popularitou se těší kontinuální  $CO_2$  lasery (obr 4.3), které mají uplatnění při řezání, značení, vrtání atd. Plynové aktivní prostředí zde tvoří směs  $CO_2$ , He a N v různých poměrech ležících v rozmezí 60-85% helia, 13-55% dusíku a 1-9% oxidu uhličitého.

Rezonátor je nutno chladit, jelikož plynné médium se snadno zahřívá. U nižších výkonů (do 100 W) postačí chlazení vedením, kdy je plášť rezonátoru ochlazován chladicí kapalinou (voda, olej).

Při vyšších výkonech, pohybujících se v řádech až tisíc wattů je chlazení provedeno prouděním laserového plynu přes tepelný výměník. V impulsním režimu lze dosáhnout výkonů i několik desítek TW (teraWattů). Tento laser svítí infračerveným světlem o vlnové délce 10,6  $\mu m$ , ale používají se i lasery na jiných vlnových délkách, například 9,4  $\mu m$ .



Obr. 4.3 Konstrukce plynového  $CO_2$  laseru [4]

### 4.3 Kapalinové, polovodičové lasery [8][9][18]

#### ▪ **Kapalinové lasery:**

Aktivní prostředí tvoří roztok rozpouštědla (líh, destilovaná voda) a barviva např. Rhodamin, Fluorescein. Jejich významnou výhodou je, že lze pomocí hranolu umístěného v rezonátoru měnit jejich vlnovou délku a proto jejich využití je především ve spektrometrii. Používané jsou také v medicíně, ale v průmyslovém prostředí zřídka z důvodu jejich krátké životnosti. Jejich vlnové délky lze vytvořit v rozmezí od 300 do 1500 nm.

#### ▪ **Polovodičové lasery:**

Jejich aktivní prostředí tvoří polovodičové materiály, kde se vyskytují nerovnovážné elektrony a díry, které lze injektovat a plní zde funkci volných nosičů náboje. Z vlastností polovodičových laserů vyniká především jejich kompaktnost, vysoká účinnost, dosahující až 50%, možnost změny jejich vlnové délky ( $\lambda = 0,3$  do 30  $\mu\text{m}$ ), a spektrálního pásma, ovšem také nežádoucí rozbíhavost vytvářeného záření.

Polovodičových laserů je mnoho, za zmínku stojí:

- ✓ **laser buzený svazkem elektronů** - nazývaný diodový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno blokem polovodičů. Svazek elektronů prochází blokem polovodiče a vyvolává přechody elektronů mezi energetickými vrstvami, při vzniku laserového záření. Nejpoužívanější je galiumarsenidový (GaAs) polovodičový laser. Generují záření o vlnové délce v rozsahu 808 až 940 nm a výkonu 30 W až 8 kW.
- ✓ **Injekční polovodičový laser**, kde aktivním prostředím je polovodič P a N. Záření vzniká v P-N přechodu, kde rekombinují díry a volné elektrony vybuzené přiloženým elektrickým polem. Nejnámější je GaAs polovodičový laser.

### 4.4 Metody řezání laserem

#### • **Tavné řezání laserem**

U tohoto typu řezání je materiál lokálně nataven laserovým paprskem a následně vyfukován z místa řezu asistenčním plynem. Ve srovnání s ostatními metodami řezání laserem lze u tohoto způsobu docílit jen nižší řezné rychlosti. S výkonem laseru roste maximální řezná rychlost přímo lineárně, a s tloušťkou řezaného materiálu a s jeho teplotou přibližně lineárně klesá. Kvůli kvalitnímu povrchu řezu je tento způsob vhodný především k dosažení řezů bez oxidace povrchu kovových materiálů, jako např. nerezových ocelí, hliníku, mosazi, mědi atd. Použitím vysoce čistého dusíku jako asistenčního plynu s vysokým tlakem 1-2 MPa na trysce, dosáhneme kovově lesklé řezné plochy, která nevyžaduje žádné finální úpravy. Vysoké požadavky na čistotu dusíku zaručují absenci oxidace materiálu a koroze v místě řezu.

Tato metoda je vhodná pro vysokolegované a korozivzdorné oceli. Některé ušlechtilé materiály jako titan nebo zirkon můžou být řezány jedině za pomoci absolutně nereaktivního plynu, a pro tyto účely se používá argon.



- **Oxidační řezání laserem**

Oxidační řezání laserem je v principu stejné jako tavné, rozdíl tvoří použití kyslíku jako asistenčního plynu. V důsledku použití kyslíku vzniká v místě řezu exotermická reakce, která dále ohřívá materiál a tímto usnadňuje tavení a odfukování nataveného materiálu. Díky tomuto jevu je oxidační řezání rychlejší než tavné, ale za cenu horší kvality povrchu, širšího tepelně ovlivněného pásma a širší řezné spáry. Tato metoda není vhodná pro přesné výpalky a ostré geometrické tvary. Oxidačním řezáním se dělí především nízkolegované a nelegované oceli, které nejsou tak náchylné na oxidaci jako vysokolegované oceli. U vysokolegovaných ocelí je nutno snížit rychlost a teplotu řezu, nebo přejít na pulzní režim laseru, který tyto parametry eliminuje.

- **Sublimační řezání**

Dnes již málo používaný způsob řezání, při kterém se materiál odpařuje přímo v místě řezu bez nutnosti použití asistenčního plynu. Z důvodu minimalizace tavné zóny je nutno přivádět laserový paprsek z vysokou hustotou energie. Zároveň tloušťka řezaného materiálu, musí být menší, než průměr paprsku, jinak by páry materiálu znovu zkondenzovaly a svařily řez. Tyto omezení ovšem neplatí pro materiály s absencí tekuté fáze jako dřevo nebo keramika. Maximální řezná rychlost je nepřímo úměrná odpařovacímu teplu materiálu a přímo úměrná rychlosti proudění řezného plynu.

#### 4.5 Technologická zařízení pro řezání laserem [20]

V současné době neexistuje žádný ryze český výrobce laserových řezných strojů. Na tuzemském trhu má silné postavení firma TRUMPF Praha, spol. s r.o. , která je ovšem pouze součástí německého koncernu TRUMPF Gruppe. Vybrané stroje pocházejí právě z produkce této firmy.

První kategorií řezných strojů jsou 2D stroje, které jsou schopné obrábět pouze rovinné dílce, a jsou tedy určeny pro řezání plechů různých tloušťek a formátů.

- **TruLaser 5030 / 5040 / 5060** – řada výkonných laserových strojů, které pracují na principu “létající optiky”, což znamená, že obrobek je statický, a řezná hlava se pohybuje po stole. Aktivní prostředí v rezonátoru laseru tvoří CO<sub>2</sub>. Označení stroje vyjadřuje výkon stroje (první dvojčíslí) a pracovní délku stolu (poslední dvojčíslí).



Obr. 4.4 TruLaser 5030 [20]

- **TruLaser 7025/7040** – nejproduktivnější řada 2D řezacích strojů společnosti TRUMPF. Své produktivnosti dosahuje především díky použití 2 řezných hlav, ale také díky lineárním pohonům zaručujícím přesné a rychlé polohování.

Na rozdíl od 2D strojů jsou 3D stroje schopné opracovávat prostorové modely, což umožňuje robotické rameno, které se natáčí ve 3 osách a na kterém je upevněná řezná hlava. Kromě prostorového zpracování je samozřejmostí řezání plošných dílců.

- **TRUMPF LASERCELL 6005** - je špičkovým laserovým řezným strojem osazený CO<sub>2</sub>TruFlow laserem. Díky svým rozměrům je schopný na jedno upnutí opracovávat díly velikostí celé karosérie, což významně přispívá k produktivitě výroby.
- **TRUMPF TLC CUT 5** - špičkový 3D řezný stroj, poskytující vysokou kvalitu řezu v jakékoliv pozici řezné hlavy. Kvalitu zaručuje regulační mechanismus AutoLas Plus, který udržuje stejnou polohu ohniska v celém pracovním rozsahu stroje a také mechanismus přizpůsobující laserový paprsek druhu a tloušťce materiálu.

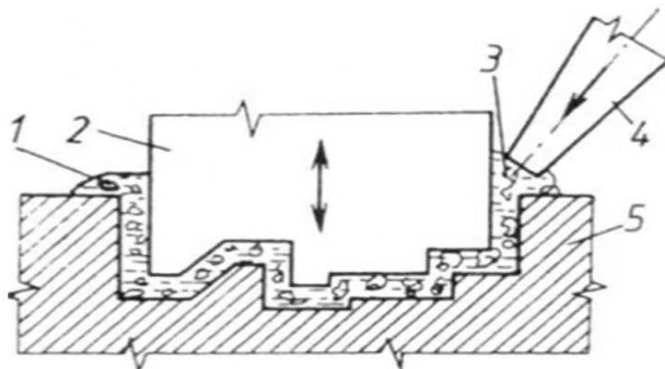


Obr. 4.5 TRUMPF TLC CUT 5 [20]

Firma TRUMPF má výsostní postavení na českém trhu, což dokazuje většinové zastoupení jejích strojů v tuzemských výrobních podnicích. Konkurencí této firmy jsou především modely švýcarské společnosti Bystronic a také slovenského Microstepu. Pro vyřezávání plochých profilů je nejvýkonnější variantou stroj TruLaser 7040, který je řešením pro podniky s vysokým objemem výroby. Maximální rychlost řezu 304m/min a výkon laseru až 6000W je drtivým argumentem produktivity stroje. Ve 3D prostoru zase kraluje TRUMPF TLCCUT 5 díky přesnosti řezu až 0,1mm a progresivním metodám zajišťujícím kvalitu řezu.

## 5 Řezání ultrazvukem [11][12][13]

Ultrazvuk je akustické vlnění, jehož frekvence se pohybuje kolem 20 kHz, tedy nad hranicí frekvence zvukových vln. Pro lidské ucho je toto vlnění neslyšitelné.



Použití ultrazvuku pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů je známo od 50. tých let.

- 1 – kapalina
- 2 – nástroj
- 3 – brousící zrna
- 4 – přívod brousících zrn a kapaliny
- 5 – obrobek

Obrázek 5.1 Princip metody pro obrábění ultrazvukem [11]

Technologie spočívá v interakci směsi abrazivního materiálu a kapaliny s povrchem řezaného materiálu. V praxi se uplatňují 2 metody:

- **Ultrazvukové nárazové broušení** - směs abraziva a kapaliny získává velkou kinetickou energii od nástroje, kmitajícího s frekvencí 18-25 kHz. Mezi nástrojem a obrobkem se udržuje vrstva abrazivní směsi přibližně stejné tloušťky, která je řízenou silou přitlačována na obrobek, kde dochází k úběru materiálu. Přitom tvar nástroje je kopírován od obrobku, a lze tak obrábět i poměrně složité tvary jedním nástrojem viz obr. 5.1. Kapalné prostředí umožňuje lepší pronikání ultrazvukové energie do místa obrábění, dobrou výměnu opotřebovaných zrn za nové zaručují kavitační vlastnosti kapaliny. Jako kapalina je nejčastěji používána voda, benzín, nebo petrolej, brusivo představuje např. karbid bóru. Dobrou vlastností ultrazvukové metody je nízká teplota nástroje a malé tlaky nástroje (do 2 MPa).
- **Rotační obrábění ultrazvukem** – u této metody je úběr materiálu realizován samotným nástrojem, nikoliv abrazivem. Při této operaci je diamantový vrták rozkmitán ultrazvukovými vibracemi, což pozitivně přispívá k vlastnostem vrtání. Podélným kmitáním špičky vrtáku se snižuje tření mezi nástrojem a materiálem, řezná kapalina snáze cirkuluje a zvyšuje se rychlost řezání. Amplituda vibrací se pohybuje mezi 0,025 a 0,05 mm při frekvenci 20 kHz.

### 5.1 Technologická zařízení

Stroje pro ultrazvukové obrábění mění elektrickou energii střídavého proudu na mechanickou energii kmitání nástroje. Obecně tato zařízení tvoří:

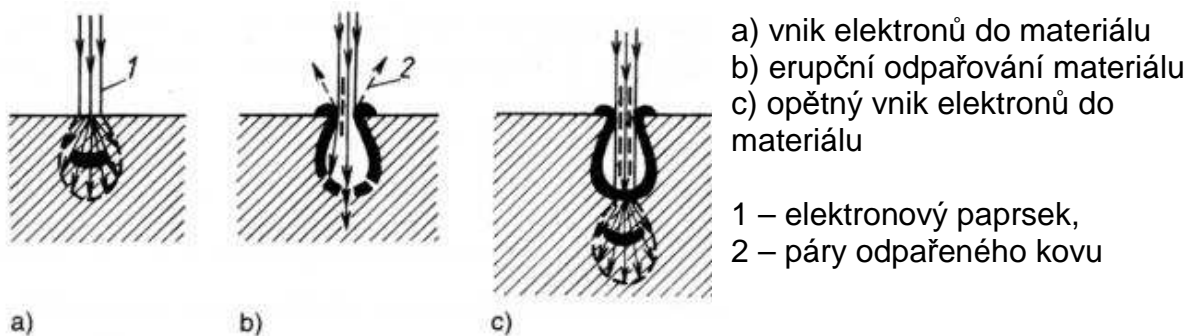
- **generátor ultrazvukových kmitů** – zde se mění frekvence elektrického proudu ze vstupní hodnoty 50Hz na výstupní hodnotu 18-25 kHz
- **systém pro vytvoření mechanických kmitů** – využívající vlastnost magnetostrikce, což je změna rozměrů feromagnetických prvků v magnetickém poli.
- **systém pro přívod brousících zrn**



Obrázek 5.2 Ultrazvukový řezný stroj [11]

## 6 Řezání paprskem elektronů [12] [14] [15]

Technologie řezání paprskem elektronů spočívá ve využití kinetické a tepelné energie proudu elektronů. Elektronový paprsek je generován elektronovým dělem, a pomocí elektromagnetického zaostřovacího systému je soustředěn na velmi malou plochu. Díky zaostření na plochu 10 – 100  $\mu\text{m}$  má paprsek vysokou plošnou hustotu energie. Jako pracovní prostředí je ideální vakuum, v jiném případě můžou elektrony reagovat s molekulami vzduchu, čímž by došlo ke ztrátě kinetické energie a řezných schopností elektronů. Při dopadu elektronů na materiál je jejich kinetická energie konvertována na tepelnou a dochází k tavení materiálu. Paprsek elektronů se zastaví v určité hloubce materiálu, kde vysoká tepelná energie způsobuje erupční odpařování.



Obrázek 6.1 Princip metody obrábění elektronovým paprskem [14]

Páry roztaveného materiálu se díky vysokému tlaku pohybují vysokou rychlostí z otvoru ven, kde jsou zionizovány a opětovně zaostřují paprsek do místa řezu. Díky opakování tohoto procesu dochází k úběru materiálu.

U obrábění paprskem elektronů jsou 2 pracovní režimy:

- **pulzní pracovní režim** probíhá v podobě postupných erupcí. Používá se pro vrtání a malé tloušťky materiálu, doba pulsu se pohybuje od 2  $\mu\text{s}$  do 0,01 s a frekvence mezi 500 a 10 000 Hz.
- **plynulý pracovní režim** pro velké tloušťky materiálu.

## 7 POROVNÁNÍ PROCESŮ [21] [22] [24]

Každá dělicí metoda má svoje charakteristiky a parametry, které určují její použitelnost a vhodnost pro dělení daného materiálu, ať už se jedná o rychlost řezu, šířka řezné spáry, geometrická přesnost řezu, či další parametry.

### 7.1 Rychlost řezání

Rychlost řezání je velmi důležitý parametr pro produktivitu výrobního procesu. Čím vyšší rychlost řezu je stroj schopný vyvinout, tím vyšší objemy výroby je možno zpracovávat a tím větší je produktivita stroje. Rychlost řezání je vždy závislá na druhu materiálu, jeho tloušťce, požadované kvalitě řezu a taky na samotném zařízení.

- **Vodní paprsek** – obecně se rychlost pohybuje od mm až po metry za sekundu. V tabulce 7.1 jsou uvedeny orientační hodnoty rychlostí dělicího řezu při podmínkách: tlak 410 MPa, průtok 3,8 l/min vody a 580 g/min abraziva (FLOW PASER plus).

Tabulka 7.1 Příklady rychlosti řezání vodním paprskem [21]

Tloušťka materiálu [mm]	5	10	15	20	25	30	50	100
Materiál	Řezná rychlost [mm/min]							
Ušlechtilá ocel	678	370	236	169	128	102	48	18
Hliník	2250	1226	782	561	427	339	162	59
Sklo	4315	2352	1502	1075	820	650	310	113
Grafit	8087	4409	2815	2015	1538	1219	581	213

- **Plasma** – technologie plasmového řezání je charakteristická velmi vysokými rychlostmi řezu (v porovnání s konvenčním autogenem je rychlost řezu až 10x vyšší). Rychlost závisí na tloušťce materiálu, výkonu proudového zdroje, konstrukci hořáku a samozřejmě na použitém plasmovém plynu. V tabulce 7.2 jsou uvedeny orientační řezné rychlosti plasmového řezného stroje při vstupním napětí 280V, výstupním proudu zdroje 120A a kapalinou chlazeným hořákem.

Tabulka 7.2 Rychlosti řezání plasmou [22]

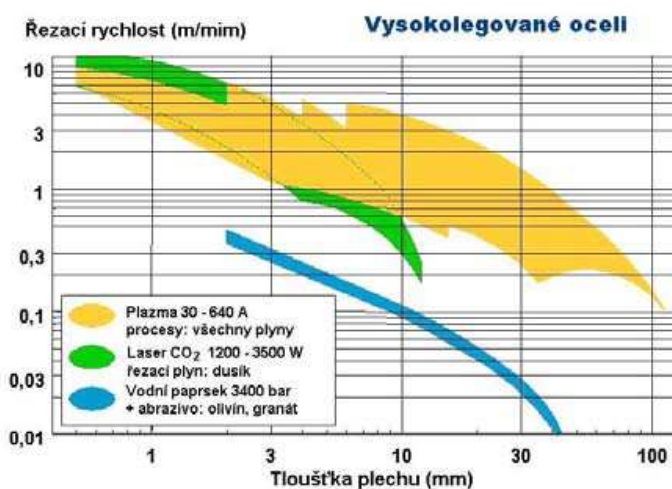
Tloušťka [mm]			3,2	4,7	6,4	9,6	12,7	16	19,3
Materiál	Plazmový plyn	Asistenční plyn	Řezná rychlost [mm/min]						
Nelegovaná ocel	O <sub>2</sub>	vzduch	-	-	4318	3556	2540	2032	1524
Nerez ocel	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +LPG(H <sub>2</sub> )	2540	2032	1778	1143	1016	1016	762
Hliník	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> +LPG(H <sub>2</sub> )	3810	3048	2540	1524	1270	1016	762

- **Laser** – rychlost řezného procesu je závislá na výkonu laseru, tloušťce materiálu, typu procesu (tavné, oxidační, sublimační) a také vlastnostech materiálu. Běžné průmyslové lasery o výkonu 1000W a více, dělí plechy různých materiálu v rozmezí tloušťky materiálu 0,51 až 12,7 mm. V tabulce 7.3 jsou uvedeny řezné rychlosti průmyslového CO<sub>2</sub> laseru o výkonu 1000 W.

Tab. 7.3 Rychlosti řezání laserem [23]

Tloušťka materiálu [mm]	0,51	1,02	2,03
Materiál	Řezná rychlost [mm/min]		
Nerezová ocel	19050	13970	8255
Hliník	20320	8890	3810

Díky porovnáním jednotlivých rychlostí a parametrů procesů je zřetelné, že každá technologie má jedinečné vlastnosti a oblast použití. Vodní paprsek, díky absenci tepelně ovlivněné oblasti, může být koncentrován v místě řezu delší dobu oproti zbylým nekonvenčním technologiím. Tento podstatný fakt umožňuje dělit materiály do tloušťky až 200 mm, naopak použití pro tenké plechy (do tloušťky 2 až 3 mm) které snesou i tepelné dělení se jeví jako neproduktivní. Plasmové řezání je velmi produktivní u všech kovových materiálů díky své enormní dosahované teplotě a kinetickým vlastnostem. Naopak omezení stanoví tloušťka materiálu (do 100 mm) z důvodu značného poklesu tlaku se vzrůstající hloubkou řezu. Laser dosahuje nejvyšších řezných rychlostí, ale je omezen tloušťkou řezaného materiálu (do 20 mm). Pracovní oblasti jednotlivých technologií pro dělení vysokolegované oceli jsou zobrazeny v grafu 7.1.

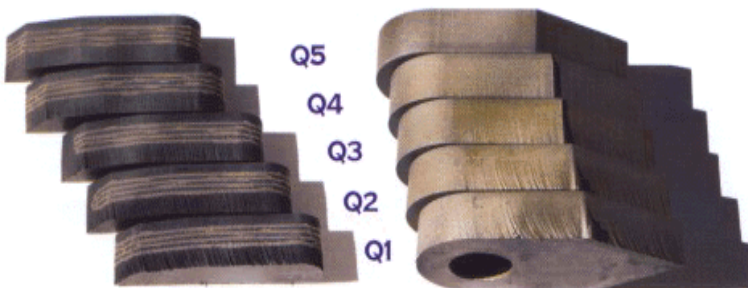


Graf 7.1 Pracovní oblasti nekonvenčních technologií [24]

## 7.2 Kvalita řezu

Kvalita řezu je dalším důležitým aspektem pro výběr správné technologie. Kritériem pro kvalitu řezaného materiálu je jakost obrobené plochy, tvarová přesnost a velikost tepelně ovlivněné oblasti. Výsledná jakost řezu je ovlivněná především rychlosti řezání, proto se vysoké rychlosti vyznačují hrubým a nekvalitním povrchem, a označujeme je jako dělicí řez. Tato varianta je nejlevnější a časově nejméně náročná. Naopak pro vysokou přesnost řezu je nutno počítat s delší dobou zpracování.

- **Vodní paprsek** – výsledkem působení abrazivního procesu na povrch materiálu lze dosáhnout nejlepší drsnosti povrchu Ra 3,2  $\mu\text{m}$ . Jakost povrchu se liší v horní části řezu a spodní části, kde paprsek ztrácí svou kinetickou energii a proto se v této části tvoří



Obr. 7.1 Stupně kvality řezu [24]



méně kvalitní povrch. Maximální dosažitelná rozměrová přesnost je  $\pm 0,1$  mm. Na obrázku 7.1 jsou znázorněny kvalitativní stupně řezu, přičemž Q5 znamená nejlepší řez s drsností povrchu  $Ra 3,2 \mu\text{m}$  a tvarovou přesností  $\pm 0,1$  mm v horní i dolní části řezu a Q1 představuje dělicí řez s velmi hrubou přesností až  $Ra 40 \mu\text{m}$  a velmi nepřesnou geometrií ve spodní části řezu.

- **Plasma** – u tohoto způsobu kvalita povrchu závisí především na charakteristice plazmy. Faktory udávající kvalitu řezu jsou:
  - průměr plazmy ve svazku v závislosti na výkonu a jeho symetrie – nesymetrie svazku způsobuje zhoršenou kvalitu řezu
  - druh plazmového plynu – špatná volba plazmového plynu může způsobit nežádanou chemickou reakci, což se projeví ve zhoršené kvalitě řezu
  - mechanické chvění hořáku – řezný svazek, velmi citlivě kopíruje polohu hořáku, proto se záchvěvy negativně projeví na kvalitě povrchuSoučasné přesné plazmové automaty jsou schopny dosáhnout geometrické přesnosti  $\pm 0,1$  mm.

- **Laser** – laserové řezání je charakteristické nemožností nastavení různých stupňů kvality řezu. Řez je vždy nastaven pro optimální kvalitu, která je závislá na tloušťce řezu. Nejlepší, hladký řez je realizovatelný do tloušťky  $\pm 8$  mm. Se vzrůstající tloušťkou se zhoršuje kvalita, vznikají různé okraje, návarky a drážkování. Laserové stroje jsou schopné dosáhnout přesnosti  $\pm 0,1$  mm. Struktura povrchu obroběných ploch se pohybuje od  $Ra 3,6 \mu\text{m}$  do  $Ra 12 \mu\text{m}$ . Příklady řezu pro různé tloušťky materiálů jsou na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Příklady materiálu řezaných laserem o různých tloušťkách [24]

Všechny metody mají srovnatelnou kvalitu řezu, liší se ovšem vhodností použití. Laser je vhodný pro menší tloušťky, kde dosahuje nejlepších výsledků drsnosti povrchu. Plazma a vodní paprsek zvládnou i větší tloušťky materiálu. Obecně platí, že pro větší tloušťky je složitější dosáhnout požadované kvality řezu, je-li to u dané metody vůbec možné.

Vlastnosti výše uvedených dělicích metod rozhodují o použitelnosti v průmyslové sféře, ať už se jedná o jejich výhody či nevýhody. Každý materiál, který má být dělen má svoje specifika a charakteristiky a tudíž i požadavky na dělicí proces. Volba vhodné dělicí technologie s uvažováním jejich kladů a záporů je klíčová pro hospodárnost výroby.

### 7.3 Vodní paprsek [24][19]

#### Výhody:

- Řez není tepelně ovlivněn (max. teplota 50°C, takže materiál nevykazuje fyzikální, chemické ani mechanické změny. U materiálu se nevyskytuje žádná deformace způsobená tepelným působením.
- Lze řezat dílce umístěné těsně vedle sebe, díky absenci tepelně ovlivněné oblasti
- Univerzální metoda z hlediska kvality řezu, drsnost lze volit od nejlepší (Ra 3,2 μm) až po dělicí řez.
- Možnost řezání velice detailních kontur, omezení klade pouze kruhovitý průřez paprsku
- Paprsek nenarušuje předchozí povrchovou úpravu materiálu (broušení)
- Při procesu nevznikají žádné ekologicky závadné zplodiny ani se netvoří nebezpečný odpad
- Velmi úzká řezná spára (od 0,3 mm průměru paprsku), malé ztráty materiálu
- Možnost řezání jakýchkoliv materiálů včetně vysokolegovaných kovů a slitin, a hlavně těžko obrobitelných materiálů jako sklolaminát, pryže, gumotextil atd.

#### Nevýhody:

- Kontakt s vodou může způsobit povrchovou korozi materiálu, u nasákavých materiálu nutnost vysoušet dělený materiál
- Při horších kvalitativních stupních řezu (dělicí řez) se ve spodní části řezu vyskytuje deformace kontury
- U tvrdších materiálu relativně menší řezná rychlost
- Vyšší počáteční investice oproti konvenčním technologiím (autogen)

### 7.4 Plasma [17] [19]

#### Výhody:

- Možnost použití jednoho nebo dvou hořáků pro jeden kus polotovaru
- Velmi vhodná metoda pro dělení malých a středních tloušťek materiálu
- Vysoká řezná rychlost (až 10x vyšší než u řezání plamenem)
- Možnost řezání pod vodu pro snížení hluku na pracovišti a pro snížení tepelně ovlivněné oblasti
- Široké spektrum materiálu, které lze touto metodou řezat a především schopnost řezat elektricky vodivé materiály pomocí transferového oblouku

#### Nevýhody:

- Omezení tloušťky materiálu (do 180 mm u suchého řezu a do 120 mm u řezání pod vodou)
- Poněkud širší řezná spára

### 7.5 Laser [19]

#### Výhody:

- Vysoká řezná rychlost a velmi dobrá přesnost řezu u malých a středních tloušťek materiálů (do 25 mm)
- Velmi úzká šířka řezné spáry (0,2 - 0,4mm), což umožňuje řezání velmi detailních kontur
- Pravoúhlá řezná hrana umožňující přesné řezání úhlů
- Velmi malé přivedené teplo, minimální tepelné deformace materiálu
- Vysoká hospodárnost i při malých sériích



**Nevýhody:**

- Vyšší počáteční investice oproti konvenčním technologiím (autogen)
- Omezení tloušťky materiálu (do 25 mm)
- Snížení stability paprsku u lesklých materiálů a povrchů
- Menší účinnost (CO<sub>2</sub>-laser max. 10%)

**7.6 Ultrazvuk [24][19]****Výhody:**

- Možnost řezání velmi tvrdých a křehkých materiálu, které jsou ostatními metodami jen velmi těžko obrobitelné jako např. rubín, křemen, keramika atd.
- Dělení probíhá za nízkých tlaků nástroje na materiál
- Při dělení materiálu je vlivem abrazivního účinku zrn řezná plocha vybroušena
- Možnost dělení elektricky vodivých i nevodivých materiálů a absence mechanických, fyzických i chemických změn

**Nevýhody:**

- Nemožnost dělení plastických a měkkých materiálů, abrazivní zrna jsou v tomto případě obalena materiálem a dochází k potlačení řezných účinků
- Nutnost povrchového ošetření po řezném procesu z důvodu nástupu povrchové koroze (u nasákavých materiálů delší vysoušení)
- Nástroj musí být s korozivzdorného materiálu

**7.7 Paprsek elektronů [24][19]****Výhody:**

- Velmi dobrá použitelnost především pro těžkoobrobitelné kovy (žáropevných ocelí, austenitických ocelí pro jaderné reaktory, křemíku, wolframu, speciálních slitin používaných v letectví a kosmonautice atd.)
- Velmi rychlá a přesná metoda
- Univerzálnost zařízení – možnost použití jednoho stroje pro další operace jako svařování, nebo vrtání

**Nevýhody:**

- Použití vakuové komory jako pracovního prostředí značně omezuje rozměrové možnosti děleného materiálu
- Malá hospodárnost oproti laserovému řezání, které je stejně účinné a mnohem hospodárnější, drahé dělicí zařízení
- Horší zpracování měkkých kovů a slitin (mosaz, zinek, bronz, slinované kovy)
- Pro zpracování velkých sérií a horší kvality řezu téměř nepoužitelné

## 8 Závěr

Cílem této práce bylo vypracovat aktuální literární studii možných nekonvenčních metod dělení materiálu, se zhodnocením jejich vhodnosti pro velko- či malosériovou výrobu.

Z porovnání vybraných nekonvenčních metod je patrné, že všechny nekonvenční metody jsou spíše nevhodné pro velkosériovou výrobu. Oproti konvenčním metodám jako např. vystřihování, nejsou schopny zpracovat stejný objem výroby za daný časový interval. Poskytují ovšem jiné výhody.

Laser vyniká především rychlostí řezání plechů a kovových fólií. Zařízení, na kterých je uskutečňován řezný proces, jsou technologicky velmi pokročilá a díky tomu i drahá. Výrobci dělicích zařízení však nabízejí širokou škálu svých produktů, včetně méně výkonných, ekonomicky výhodných strojů, díky kterým je možno zmíněné technologie aplikovat i do menších podniků. Laser je vhodné použít pro všechny druhy ocelí s omezením tloušťky, to samé platí u neželezných slitin. Takto lze dělit i plasty a další měkké materiály.

Plazma dosahuje velmi vysokých řezných rychlostí, oproti laseru je však schopná dělit tělesa o větší tloušťce. Je vhodná především pro řezání tvrdých materiálu, díky vysoké teplotě řezání snadno dělí všechny druhy ocelí, ale i neželezné slitiny. Pro elektricky nevodivé materiály je nutno použít zařízení s netransferovým obloukem.

Technologie vodního paprsku není tak výkonná jako laserová nebo plazmová, ale je schopná dělit materiály do tloušťky až 200 mm, což představuje nejlepší výsledek mezi zmíněnými technologiemi. Je založena na principu mechanického úběru materiálu, nedochází zde k chemickému ovlivnění materiálu, proto je vodní paprsek často nejvhodnější volbou pro materiály s požadavkem na nízkou teplotu, nebo chemickou čistotu řezu. Technologie je vhodná pro dělení různých druhů ocelí, slitin mědi, hliníku i titanu. Pro tepelné a elektrické izolanty, nebo keramiku představuje nejvýhodnější dělicí variantu. Pro měkké materiály jako např. plasty nebo guma je absence tepelného působení dobrým důvodem k použití této metody.

Díky principu ultrazvukového dělení materiálu, je tato technologie využitelná spíše pro tvarové dělení, kde nástroj kopíruje svůj tvar do materiálu. Nevýhodou ultrazvuku a vodního paprsku je fakt, že nevyhnutelně dochází ke styku s vodou, nebo jinou tekutinou, která přivádí abrazivní částice do místa řezu, proto je třeba dělený materiál chránit proti korozi, případně vysoušet. Metoda je vhodná pro těžko dělitelné materiály jako křemen nebo rubín, nevhodný je pro měkké materiály.

Dělení paprskem elektronů nachází uplatnění hlavně tvrdých a odolných materiálů. Díky vysoké investiční nákladnosti na zařízení i provoz je tato technologie nahrazována laserem. Paprskem elektronů je vhodné dělit především žáropevné a vysoko-pevnostní oceli, pro měkké materiály je tato metoda nevhodná.

Zmíněné technologie nacházejí použití i v jiných procesech, než je pouze dělení. Všechny tepelné metody lze stejně dobře využít v procesu svařování, a vrtání. Laser a plazma se používá také např. k nanášení povlaků, či jako podpora pro konvenční obrábění. Vodní paprsek se používá pro tryskání, povrchové značení a díky studenému řezu k bezpečnému řezání munice. Ultrazvukem se kromě dělení obrábí dutiny různých tvarů, lze takto řezat např. závity, ale také brousit povrchy, nebo svařovat plasty.

Nekonvenční technologie představují pokročilé metody dělení materiálu, které jsou v době stále se zvyšujících požadavků na kvalitu, hospodárnost i zpracování stále pevnějších materiálu nepostradatelné. Jsou také klíčovým aspektem technologického pokroku a jejich uplatnění přejde do dalších odvětví a moderních aplikací.

## Seznam použitých zdrojů:

- 1 *Company | Flow International Corporation* [online]. © 2006-2010 [cit. 2010-05-14]. Company. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.com/about-flow.cfm>>
- 2 BOUDA, Luděk. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 9. července 2008 [cit. 2010-05-14]. Řezání vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem>>
- 3 *Waterjets.org : the most complete waterjet resource on the web* [online]. © 2010 [cit. 2010-05-14]. About waterjets. Dostupné z WWW: <[http://waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53](http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53)>
- 4 *AZoM™ : The A to Z of Materials and AZojomo* [online]. Version 2.0. Copyright © 2000-2010 [cit. 2010-05-14]. Plasma Cutting – The History of Plasma Cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.azom.com/details.asp?articleid=1061>>
- 5 ROUBÍČEK, Martin KRITÉRIA VOLBY METODY A TRENDY TEPELNÉHO DĚLENÍ MATERIÁLŮ, © Copyright AIR LIQUIDE 2007 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/roubicek49122.pdf>>
- 6 *Řezání plazmou* [online]. © 2008 [cit. 2010-05-14]. CO JE ŘEZÁNÍ PLAZMOU?. Dostupné z WWW: <<http://www.plazmacz.cz/index.html>>
- 7 *Torchmate CNC plasma cutters, CNC cutting systems, CNC plasma tables for small shop owners and large industrial manufacturers* [online]. Copyright 2010 Torchmate [cit. 2010-05-14]. How a plasma cutter works. Dostupné z WWW: <<http://www.plasma-cutter.com/technical.htm>>.
- 8 ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19. března 2008, 3, strana 80, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>>.
- 9 *Linde Gas a.s. : specialista na technické plyny* [online]. Copyright © 2008 Linde Gas a.s [cit. 2010-05-14]. Laserové technologie. Dostupné z WWW: <[http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/nav\\_ind\\_las](http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/nav_ind_las)>.
- 10 *Wikipedie, otevřená encyklopedie* [online]. 11. 5. 2010 [cit. 2010-05-14]. Laser. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.
- 11 ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 3. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18. prosince 2007, 12, strana 80, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil>>.
- 12 KOČMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. druhé vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- 13 BERTOLINI, A. *5-axis CNC ultrasonic cutting machine: design and preliminary test* [online]. [s.l.], 2002. 11 s. Semestrální práce. Dipartimento di Fisica, Università di Pisa. Dostupné z WWW: <<http://www.ligo.caltech.edu/docs/T/T020198-00/T020198-00.pdf>>.

- 14 ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 11. června 2008, 6, strana 58, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenncni-metody-obrabeni-2>>.
- 15 Non conventional Machining. In IIT Kharagpur. *Module 9*, 2006 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-40.pdf>>.
- 16 HÁJEK, Jaroslav. Přehled technologií svařování v ochranných plynech. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 3. března 2010, 3, strana 32, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/prehled-technologiei-svarovani-v-ochrannych-plynech>>.
- 17 ŘASA, Jaroslav; KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 8. října 2008, 10, strana 32, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvenncni-metody-obrabeni-8-dil>>.
- 18 *Leonardo technology s.r.o. : Úmění průmyslového značení* [online]. © 2005 - 2010 [cit. 2010-05-14]. I-Learning LASERY a jejich princip . Dostupné z WWW: <[http://www.lt.cz/index.php?option=com\\_content&task=view&id=161&Itemid=164&limit=1&limitstart=5](http://www.lt.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=161&Itemid=164&limit=1&limitstart=5)>.
- 19 *Řezání plazmou* [online]. © 2008 [cit. 2010-05-14]. Přednosti a nevýhody. Dostupné z WWW: <<http://www.plazmacz.cz/prednosti.htm>>.
- 20 *TRUMPF CZ, Praha* [online]. 08.03.2010 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.cz.trumpf.com/>>.
- 21 Inovativní řešení vodním paprskem. In Flow Europe GmbH. *Aplikace a výroby*. 2009 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <[http://www.floweurope.com/pdf/prospekt\\_ap/Prospekt\\_A&P\\_CZ.pdf](http://www.floweurope.com/pdf/prospekt_ap/Prospekt_A&P_CZ.pdf)>.
- 22 Cutting Technologies Division Komatsu America Industries LLC 120 Amp Cut Speeds. In *Fine Plasma Cutting Technology*, 2006 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <[http://fineplasma.com/kai/ctd/en/rasor/pdf/g9120\\_g940\\_fineplasma.pdf](http://fineplasma.com/kai/ctd/en/rasor/pdf/g9120_g940_fineplasma.pdf)>.
- 23 TODD, Robert H.; ALLEN, Dell K.; ALTING, Leo. *Manufacturing Processes Reference Guide* [online]. First Edition. New York: Industrial Press Inc., 1994 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <[http://books.google.cz/books?id=6x1smAf\\_PAcC&printsec=frontcover&dq=Manufacturing+processes+reference+guide&cd=1#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=6x1smAf_PAcC&printsec=frontcover&dq=Manufacturing+processes+reference+guide&cd=1#v=onepage&q&f=false)>. ISBN 0-8311-3049-0.
- 24 *CHPS s.r.o.: řezání vodním paprskem, řezání laserem, zpracování kovů* [online]. 2008 [cit. 2010-05-14]. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/>>.
- 25 Tvarové dělení kovů plazmou. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 7. října 2002, 10, strana 23, [cit. 2010-05-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvarove-deleni-kovu-plazmou>>.
- 26 KULENDA, M. *Nekonvenční způsoby dělení materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- 27 *Jednička v oboru řezání vodním paprskem | Flow* [online]. © 2006-2009 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/>>.

- 28 *PTV - vodní paprsek, řezání vodním paprskem* [online]. © 2006 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz>>.
- 29 *MGM Tábor* [online]. 2005 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.mgm-tabor.eu/>>.
- 30 *HaWe systems Olomouc* [online]. © 2007 [cit. 2010-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.hawe.cz>>.
- 31 *A1 Designs* [online]. 2008 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <[http://www.a1designs.co.uk/images/laser\\_cutting.jpg](http://www.a1designs.co.uk/images/laser_cutting.jpg)>.
- 32 Pila. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 15. 5. 2010 [cit. 2010-05-23]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pila>>.

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Typy laserů

Příloha 2: Technologická zařízení pracující s technologií vodního paprsku

## Příloha 1: Typy laserů

Tabulka 1.1: Typy průmyslových laserů

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
<b>Pevnolátkové</b>				
Rubínový laser	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho:YAG laser	Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový laser	titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový laser	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR	žihání, řezání
<b>Barvivové</b>				
Rhodamin 6G laser	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30 laser	Kumarin C30	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie
<b>Plynové–Atomární</b>				
He-Ne laser	hélium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
Xenonový laser	xenon, neon, hélium	140 vlnových délek	viditelné, IR	
<b>Plynové–Iontové</b>				
Argonový laser	argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium-kadmiový laser	hélium, kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá	

Plynové– Molekulární				
Vodíkový laser	vodík	100 - 120nm, 140 - 165nm	UV	sváření, řezání, stomatologie, gravírování
CO <sub>2</sub> laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR	
CO laser	Oxid uhelnatý	5 - 6,5μm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie
Dusíkový laser	dusík	337 nm	UV	
Polovodičové				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	Laserová ukazovátka
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, CD přehrávače, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

Poznámka: UV ~ ultraviolet (ultrafialová), IR ~ infrared (infračervená)



## Příloha 2: Technologická zařízení pracující s technologií vodního paprsku

Zde jsou umístěna technologická zařízení používaná u technologie řezání vodním paprskem, která nebyla uvedena v hlavní části práce. Kromě řezných strojů je zde uveden také přehled vysokotlakých čerpadel.

### Řezné stroje:

- **Mach 2** - Série Mach 2 je ekonomická řada modelů společnosti FlowCorp, která je ovšem dostatečně přesná a výkonná pro řezání klasických materiálů jako sklo, keramika, plasty nebo ocel.



Obrázek 2.3 Hydroabrazivní zařízení řady Mach 2

- **Modelová řada Smart Jet** – tento model byl vyvinut za cílem snížení výrobních nákladů a použití v nových odvětvích. Přístroj je standardně vybaven proporčním dávkovačem abraziva a diamantovou řeznou hlavou, díky čemuž je možné plošně řezat množství materiálů čistým vodním nebo abrazivním paprskem



Obrázek 2.6 Hydroabrazivní zařízení řady Smart Jet [28]

## Čerpadla:

Flow Corp International – viz 2.1/ a)

Řada 25X – jedná se o velmi výkonnou řadu čerpadel, která je konstruována s cílem zajistit vysoký průtok, schopný napájet několik řezacích hlav. Čerpadlo je poháněno vysoce výkonnými elektromotory, díky čemu dosahuje právě takto vysokých průtokových charakteristik. Nejvýkonnější typ 25XQ – 60 je vybaven čtyřmi intenzifikátory .



### Specifikace 25XQ – 60:

- **Tlak:** 4150 Bar
- **Příkon:** 148kW
- **Průtok:** 13,7l/min
- **Napájení:** 380V
- **Max. průměr dýzy:** 0,6096 mm

Řada Hyplex30/50 HP – je ekonomická řada spolehlivých a bezpečných čerpadel vhodných pro stroje s jednou řezací hlavou. Využívají elektromotorů s nízkým výkonem (do 37kW) díky čemu jsou velmi úsporná a jejich účinnost šplhá až na 90%, a tak jsou až o 30% účinnější než čerpadla s intenzifikátorem.

### Specifikace Hyplex 50 HP:

- **Tlak:** 3 800 Bar
- **Příkon:** 37 kW
- **Průtok:** 4,7 l/min
- **Napájení:** 380V



Řada 100 iD – je nejvýkonnější řada čerpadel na trhu, pracuje s dvěma intenzifikátory a jedním atenuátorem pro snížení tlakového rázu a pro hladší řez vodního paprsku. Intenzifikátory mohou být zapínány, nebo vypínány podle aktuální potřeby.

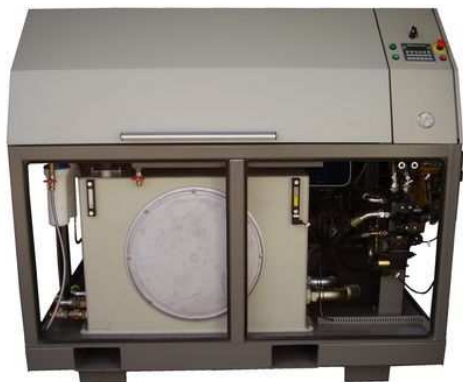
### Specifikace Hyper Jet 100iD:

- **Tlak:** 6 458 Bar
- **Příkon:** 74 kW
- **Průtok:** 5,3 l/min
- **Napájení:** 380V



PTV spol. s r.o – viz 2.1/b)

PTV JETS - 7.5/60c – Výkonný model firmy PTV s elektromotorem firmy Siemens o výkonu 75kW, který je schopný vytvořit dostatečný průtok pro řezání více tryskami. Tento stroj také nabízí bezpečnostní funkci Bleed Down, která automaticky snižuje tlak v čerpadlu při nečinnosti, možnost nastavení 10 úrovní tlaku a další.



#### **Specifikace PTV JETS - 7.5/60c:**

- **Tlak:** 4150 Bar
- **Příkon:** 75 kW
- **Průtok:** 7,5 l/min
- **Napájení:** 380V

KMT PRO 60/125 – Nejvýkonnější zařízení, které firma PTV nabízí (je ovšem vyráběno americkou firmou KMT), schopné vytvořit v kapalině tlak až 6200 bar. Vhodné pro řezání tvrdých materiálu o velkých tloušťkách .

#### **Specifikace KMT PRO 125:**

- **Tlak:** 6200 Bar
- **Příkon:** 93kW
- **Průtok:** 5,5 l/min
- **Napájení:** 380V



Tabulka 2.1: Parametry čerpadel

Model	Tlak[bar]	Příkon[kW]	Průtok[l/min]
25XQ – 60	4 150	148	13,7
Hyplex 50 HP	3 800	37	4,7
Hyper Jet 100iD	6 458	74	5,3
PTV JETS - 7.5/60c	4150	75	7,5
KMT PRO 125	6200	93	5,5

Srovnáním vybraných čerpadel vyšlo najevo, že nejlepší parametry co se týče průtoku a tlaku nabízí opět firma Flow International Corporation. Kromě toho, že nabízí

extrémně výkonná čerpadla, nabízí také širokou škálu čerpadel, pro různé využití, od ekonomických čerpadel nižší třídy, až po vysokotlaké stroje (UHP-Ultra Hydro Pressure), využitelné v dělení odolných materiálů. Firma PTV spol s.r.o. nabízí kvalitní zařízení, ovšem srovnatelné s konkurencí jako například firma AWAC dodávající čerpadla z produkce firmy Accustream.