



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY NEKONVENČNÍHO OBRÁBĚNÍ

UNCONVENTIONAL MACHINING PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jitka EXNEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jitka Exnerová

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:

Metody nekonvenčního obrábění

v anglickém jazyce:

Unconventional machining processes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Vznik a vývoj metod.
2. Celkový přehled současného stavu a porovnání metod.
3. Rozbor technologie vodního paprsku.
4. Ekologická situace, recyklace opotřebovaného materiálu.
5. Představení zahraničních a tuzemských firem.
6. Diskuze, závěr.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše doplněná konkrétními produkty firem z oblasti nekonvenčních procesů. Detailnější rozbor technologie vodního paprsku.

Seznam odborné literatury:

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2005. 272 s. ISBN 80-214-3068-0.
3. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
4. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 1. vyd. Ostrava-Poruba: Jiří Pustina, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
5. Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá metodami nekonvenčního obrábění. V první části je popsána historie metod obrábění, následuje charakteristika jednotlivých metod a jejich porovnání. Druhá část práce se zaměřuje na metodu vodního paprsku, její technologii, bezpečnost použití a její výhody a nevýhody. Následně jsou prezentovány vybrané firmy zabývající se technologií obrábění vodním paprskem. V závěru práce je prezentován vliv obrábění vodním paprskem na životní prostředí.

Klíčová slova

Nekonvenční technologie, chemické obrábění, elektrochemické obrábění, elektroerozivní obrábění, plazma, laser, paprsek elektronů, ultrazvuk, vodní paprsek

ABSTRACT

This thesis deals with the methods of the unconventional machining. The first part outlines the history of the machining methods, their characteristic and use follows. The second part aims at the method of the water jet, its technology, safety use, its advantages and disadvantages. Subsequently the thesis presents selected companies dealing with water jet cutting technology. At the end the thesis presents the environmental impact of the water jet cutting.

Key words

Unconventional technology, chemical machining, electrochemical machining, electro discharge machining, plasma, laser, electron beam, ultrasonic, water jet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

EXNEROVÁ, Jitka. *Metody nekonvenčního obrábění*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Metody nekonvenčního obrábění** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jitka Exnerová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně za cenné připomínky a rady při vypracování.

Dále děkuji vedení firmy Rychlý TOM s.r.o. za umožnění prohlídky firmy.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD	9
1 VZNIK A VÝVOJ METOD.....	10
2 CELKOVÝ PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU A POROVNÁNÍ METOD	12
2.1 Rozdělení	12
2.2 Elektroerozivní obrábění.....	12
2.2.1 Princip metody	12
2.2.2 Dielektrikum	13
2.2.3 Nástrojové elektrody	13
2.3 Obrábění paprskem plazmy	13
2.3.1 Princip metody	13
2.3.2 Zařízení pro obrábění plazmatem	14
2.3.3 Používané plyny.....	15
2.4 Obrábění paprskem laseru	15
2.4.1 Princip metody	15
2.4.2 Zařízení pro obrábění laserem	15
2.5 Obrábění paprskem elektronů.....	16
2.5.1 Princip metody	16
2.5.2 Zařízení pro obrábění paprskem elektronů	17
2.6 Elektrochemické obrábění	18
2.6.1 Princip metody	18
2.6.2 Elektrolyt	18
2.7 Chemické obrábění	19
2.7.1 Princip metody	19
2.7.2 Reaktivní prostředí.....	20
2.8 Obrábění ultrazvukem.....	20
2.8.1 Princip metody	20
2.8.2 Nástroje.....	21
2.8.3 Zařízení pro obrábění ultrazvukem.....	21
2.9 Obrábění vodním paprskem.....	22
2.9.1 Princip metody	22

2.10 Porovnání metod	22
3 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU	24
3.1 Princip metody	24
3.2 Rozdělení	24
3.2.1 Obrábění paprskem čisté vody	24
3.2.2 Obrábění vodním paprskem s abrazivem	24
3.2.2.1 Abraziva	25
3.3 Zařízení pro obrábění vodním paprskem	25
3.4 Obráběné materiály	27
3.4.1 Sklo	27
3.4.2 Obklady, dlažby a kámen	27
3.4.3 Kovy	27
3.5 Využití technologie vodního papsku	27
3.6 Netradiční využití	28
3.7 Bezpečnost při obrábění	28
3.8 Výhody a nevýhody metody	29
4 EKOLOGICKÁ SITUACE, RECYKLACE OPOTŘEBOVANÉHO MATERIÁLU	30
5 PŘEDSTAVENÍ ZAHRANIČNÍCH A TUZEMSKÝCH FIREM	31
5.1 Rychlý TOM s.r.o.	31
5.2 Flow International Corporation	31
5.3 AQUAdem s.r.o.	32
5.4 Gebr. Frindt GmbH	32
6 DISKUZE	33
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	35
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	37
SEZNAM PŘÍLOH	39

ÚVOD

Téma Metody nekonvenčního obrábění jsem si zvolila z důvodu rozšíření znalostí o této technologii. Do této doby jsem se převážně setkávala s konvenčními (klasickými) způsoby obrábění, jako je soustružení, frézování a vrtání. Zajímalo mě, co se přesně děje během těchto nekonvenčních metod v průběhu obráběcího procesu, co je možné a nemožné v této technologii.

Otázka je, co to vlastně jsou nekonvenční metody, také nazývané jako moderní, netradiční nebo speciální. Tyto metody jsou nazývány netradičními, protože k odebrání přebytečného materiálu se nepoužívají klasické řezné nástroje. K obrábění jsou využívány fyzikální a chemické jevy. Nástroje, pokud je daná metoda využívá, silově nepůsobí na obrobek a nevznikají klasické třísky. Z této vlastnosti vyplývá, že obráběný materiál může být tvrdší než materiál nástroje. To je v dnešní době, kdy vznikají i nové a lepší materiály, velká výhoda. Tyto metody mají své uplatnění především tam, kde z technologického nebo ekonomického hlediska nelze použít klasické metody.

Vodu a její sílu znají lidé už od počátku. Když se řekne eroze, snad každý ví, co to znamená a někdy ji v přírodě sám viděl. Na tomto jednoduchém principu je založena technologie vodního paprsku. Lidé se jen naučili usměrňovat proud vody do úzkého paprsku o vysoké rychlosti a tlaku. Při soustředění paprsku na malou plochu probíhá stále stejný jev (eroze), ale mnohem rychleji.



Obr. 1 ukázka vodního paprsku [30]



Obr. 2 Možnosti vodního parsku [2]

1 VZNIK A VÝVOJ METOD

U nekonvenčních metod obrábění, jak už bylo zmíněno, se využívá fyzikálních a chemických jevů k úběru přebytečného materiálu. Největší pokrok v této technologii nastal v druhé polovině 20. století. Příčinou pokroku byl vývoj nových druhů konstrukčních materiálů a výzkum ve speciálních oblastech fyziky, konkrétně pak v kvantové elektronice. Velký pokrok nastal také v řízení procesu a automatizaci. Řízení procesu výroby je nedílnou součástí těchto metod. Dnes už je běžně celý proces výroby řízen počítači.

Nejprve tyto metody byly nazývány jako elektrofyzikální a elektrochemické. Hirsehfeld (1953), Příkryl, Vigner (1984), Buda, Békés (1967) poprvé použili pojmenování nekonvenční jako opak ke konvenčním (klasickým) metodám. Pojmenování netradiční technologie obrábění bylo poprvé použito v anglické odborné literatuře, která byla vydávána pod názvem Handbook of machining (Příručka obrábění). U nás se pojmenování netradiční technologie začalo používat v devadesátých letech 20. století. Jako první roztřídil metody podle mechanismu úběru materiálu Kaczmarek (1976). Toto rozdělení uvedl ve své knize Principles of machining by cutting, abrasion and erosion (Principy obrábění řezáním, abrazivním působením a erozí).

Protože se každá metoda vyvíjela samostatně, následuje tak několik málo informací ke každé metodě. Všechny informace v této kapitole jsou převzaty ze zdroje [14]

Elektroerozivní obrábění

- jev elektroeroze poprvé popsal roku 1768 Sir Joseph Priestley
- teoretický základ elektroerozivního obrábění vypracovali a první patent podali roku 1943 B. R. Lazarenko a N. I. Lazarenková
- od roku 1950 až 1954 se metoda začíná rozšiřovat do průmyslové výroby

Obrábění paprskem plazmy

- roku 1923 I. Langmuir zavedl pojem plazma jako čtvrté skupenství látky
- Gerdien a Lotz roku 1922 vypracovali první teoretickou práci zabývající se plazmovým obloukem stabilizovaným vodou
- okolo roku 1955 se objevilo první zařízení na řezání plazmou

Obrábění paprskem laseru

- první laser byl navržen roku 1958 C. H. Townsem a A. L. Shawlowem
- roku 1960 byl zkonstruován první rubínový laser T. H. Mainem a během několika let byly odzkoušeny i ostatní druhy laserů
- poprvé se laser v průmyslu prakticky využil v roce 1966 při vrtání otvorů do diamantu

Obrábění paprskem elektronů

- popsání fyzikálního základu se připisuje několika fyzikům: William Crookes (1879), Thomson (1897), Pirani (1907)
- Streigerwald roku 1947 zkonstruoval první prototyp zařízení pro obrábění paprskem elektronů

- Stohr roku 1957 použil paprsek elektronů pro svařování

Elektrochemické obrábění

- základem elektrochemického obrábění je elektrolýza, a tu zdůvodnil a popsal roku 1834 Faraday
- roku 1929 Gusjev podal první patent
- okolo roku 1950 se tato metoda rozšiřuje především pro obrábění žáruvzdorných slitin

Chemické obrábění

- v průmyslu se začalo využívat po 2. světové válce v leteckém průmyslu, kde se odleptával přebytečný materiál, a tím se snižovala hmotnost leteckých součástí

Obrábění ultrazvukem

- první článek o použití ultrazvuku pro obrábění sepsali roku 1927 R. W. Wood a A. L. Loomis
- Balamuth roku 1945 podal první patent pro průmyslové využití
- během osmdesátých let začal vzrůstat o tuto technologii zájem

Obrábění vodním paprskem

- vodní paprsek se nejprve (začátkem roku 1970) využíval pro dělení dřeva a plastů
- po přidání abraziva do vodního paprsku roku 1983 se metoda začíná používat pro řezání skla

2 CELKOVÝ PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU A POROVNÁNÍ METOD

2.1 Rozdělení

Nekonvenční metody lze rozdělit do tří základních skupin podle principu úběru materiálu, a to na obrábění materiálu tepelným účinkem, elektrochemickým nebo chemickým účinkem a mechanickým účinkem.

Obrábění materiálu tepelným účinkem se dále rozděluje na:

- elektroerozivní obrábění,
- obrábění paprskem plasmy,
- obrábění paprskem laseru,
- obrábění paprskem elektronů.

Obrábění materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem se dále rozděluje na:

- elektrochemické obrábění,
- chemické obrábění.

Obrábění materiálu mechanickým účinkem se dále rozděluje na:

- obrábění ultrazvukem,
- obrábění vodním paprskem.

Podrobněji tyto metody budou popsány v následujících kapitolách.

2.2 Elektroerozivní obrábění

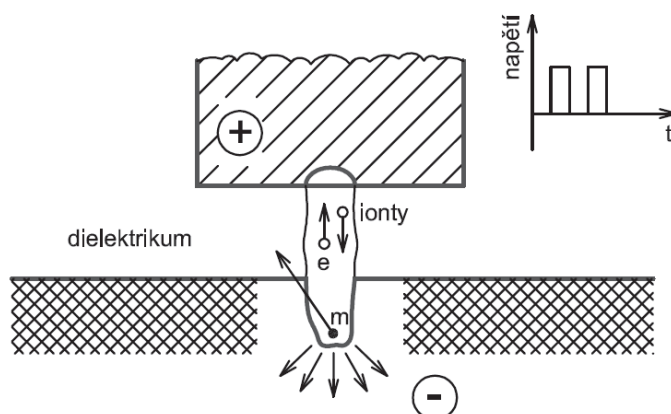
Mezinárodní název: EDM (Electro discharge machining)

Proces elektroerozivního obrábění je v příloze 1.

2.2.1 Princip metody

Základem elektroerozivního obrábění je elektroeroze, která probíhá mezi dvěma elektrodami. Anoda, nejčastěji nástrojová elektroda, a katoda, nejčastěji obrobek, mají mezi sebou jiskrovou mezeru o velikosti 0,01 až 0,5mm. Obě elektrody jsou ponořené v dielektrické kapalině a připojeny ke zdroji elektrické energie. Mezi elektrodami se pohybují ionty, které se pohybují velmi vysokou rychlostí. Díky těmto iontům vznikne vodivý kanál a začne mezi nimi protékat elektrický proud. Na základě tohoto jevu vzniká elektrický výboj ve formě jisker. Při výboji dochází k tavení a odpařování materiálu, na povrchu vzniká kráter. Odebíraný materiál odchází z oblasti obrábění pomocí dielektrické kapaliny ve formě velmi malých částic, které mají tvar dutých kuliček.

Touto metodou lze obrábět jen elektricky vodivé materiály. Přesnost obrábění závisí na bočních mezerách mezi elektrodami. Intenzita výboje určuje znečištění, vodivost dielektrika a vzdálenost mezi elektrodami. [13, 19]



Obr. 3 Schéma elektroerozivního obrábění [14]

2.2.2 Dielektrikum

Dielektrikum je kapalina, která má vysoký elektrický odpor. Nejčastěji se používá petrolej, strojní olej, transformátorový olej, destilovaná voda a další speciální dielektrika. Dielektrikum slouží k odvodu tepla a materiálu z jiskrové mezery, také slouží jako izolátor mezi elektrodami. Na tyto kapaliny se klade celá řada požadavků. Musí mít dostatečně vysokou teplotu hoření. Musí být chemicky neutrální, aby nevznikala koroze a ekologicky a hygienicky nezávadná. Při jejím vypařování nesmí vznikat jedované výpary a nepříjemný zápach. Také nesmí docházet k chemickým změnám, musí být lehce vyrobitelná a levná. [16, 19]

2.2.3 Nástrojové elektrody

Na nástrojových elektrodách závisí přesnost rozměrů a jakost obrobené plochy. Nejčastěji používané materiály jsou měď, grafit, wolfram a jeho slitiny, mosaz a ocel. Materiál elektrod se volí podle materiálu obrobku a použitého stroje. Musí mít vysokou elektrickou vodivost, dostatečnou pevnost a vysoký bod tavení. Vyrábějí se třískovým obráběním, litím, lisováním, práškovou metalurgií a zápustkovým kováním. Pro každou novou geometrii obrobku se musí navrhnout nová nástrojová elektroda. Náklady na její výrobu jsou vysoké, činí až 50% z celkových nákladů. Proto se pečlivě volí materiál, způsob výroby i její geometrie. Při určování rozměrů elektrody se zohledňuje rozměr požadované dutiny, velikost jiskrové mezery a požadované jakosti obrobeného povrchu. [13, 19]

2.3 Obrábění paprskem plazmy

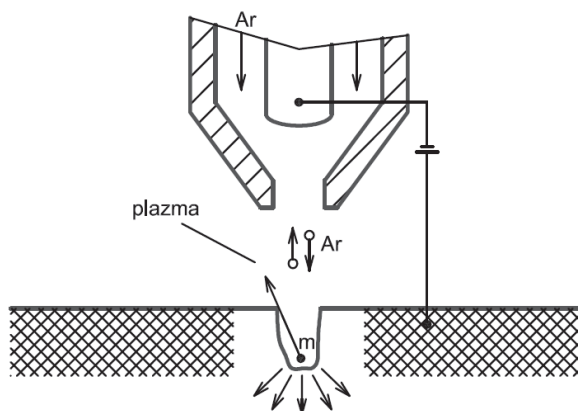
Mezinárodní název: PBM (Plasma beam machining)

Obrábění paprskem plazmy je v příloze 2.

2.3.1 Princip metody

Tato metoda obrábění je založena na tavení a odpařování materiálu obrobku pomocí paprsku plazmy. Plazma je plyn ohřátý na velmi vysokou teplotu, která převyšuje 1000°C. Vzniká při průchodu elektrickým obloukem, kde se plyn rozkládá na molekuly. Elektrický oblouk hoří mezi elektrodou a obráběným materiálem. Elektroda musí být netavící a nejčastějším materiálem je wolfram. Plazma vychází z hořáku vysokou rychlostí jako

úzký paprsek s vysokou kinetickou energií. Díky této kinetické energii je obrobený materiál odváděn z místa řezu. [13, 24]

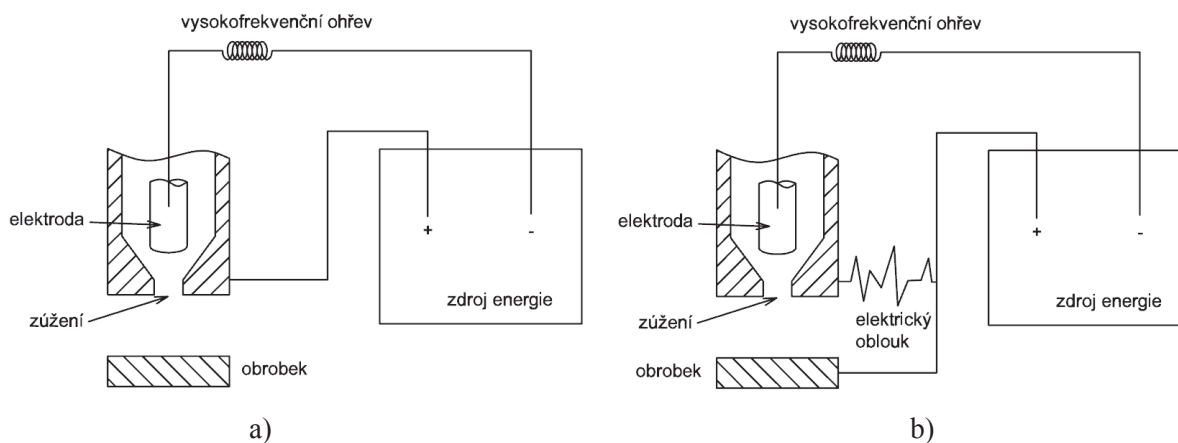


Obr. 4 Schéma obrábění paprskem plazmy [14]

2.3.2 Zařízení pro obrábění plazmatem

Zařízení se skládá z plazmového hořáku, zdroje elektrické energie a u NC a CNC zařízení obsahuje řídicí jednotku. Podle použitého elektrického oblouku se dělí na zařízení s přeneseným a nepřeneseným obloukem. U přeneseného oblouku elektrický oblouk vzniká mezi elektrodou, která je uvnitř hořáku, a obráběným materiálem, na rozdíl od nepřeneseného oblouku, kdy vzniká mezi dvěma elektrodami v hořáku. Zařízením, které používá nepřenesený oblouk, lze obrábět i elektricky nevodivé materiály.

Jednou z nejdůležitějších částí je plazmový hořák, který musí zajišťovat několik funkcí. Musí přivádět elektrický proud na elektrodu. Uvnitř hořáku, kam je přiváděn pracovní plyn, vzniká plazma. Pomocí zúžení hořáku se vytváří paprsek nasměrovaný do místa řezu. Jak už bylo zmíněno, paprsek plazmy má vysokou teplotu. Je tedy velmi důležité hořák chladit. Chlazení se provádí kapalinou nebo plynem. [14, 24]



Obr. 5 Schéma plazmového zařízení [14]

a) s nepřeneseným obloukem

b) s přeneseným obloukem

2.3.3 Používané plyny

Plyny používané v této technologii můžeme rozdělit do několika skupin, a to na plazmové, fokusační a asistentní. Jako plazmový plyn se používá argon, vodík, dusík, kyslík a vzduch. Plazmový plyn je přiváděn do elektrického oblouku a vytváří plazma. Jaký konkrétní plyn se zvolí, závisí na obráběném materiálu a jeho tloušťce. Například pro konstrukční ocel se používá kyslík nebo vzduch. Oproti tomu pro neželezné kovy je vhodná směs argonu s vodíkem nebo vzduch. Fokusační plyny jsou argon, dusík, směs argonu s vodíkem nebo argon s dusíkem. Pomocí fokusačního plynu se vytváří a zužuje paprsek. Poslední v řadě jsou asistentní plyny, které obklopují a chrání paprsek a obráběné místo. Mezi tyto plyny patří argon a dusík. [24]

2.4 Obrábění paprskem laseru

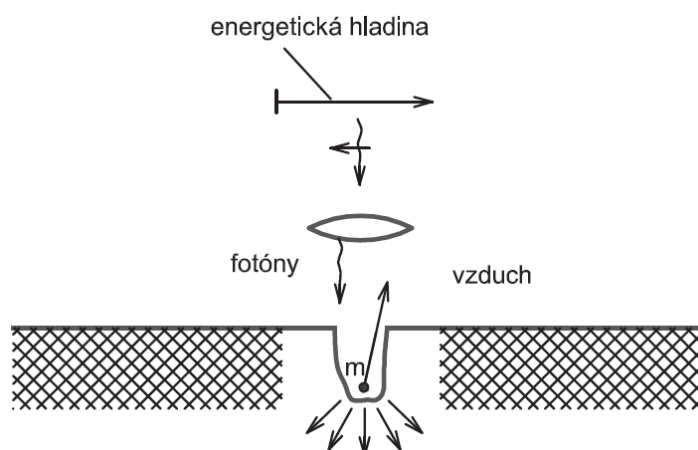
Mezinárodní název: LBM (Laser beam machining)

Obrábění paprskem laseru je v příloze 3.

2.4.1 Princip metody

Termín laser vznikl z počátečních písmen anglického názvu: Light amplification by stimulated emission of radiation. To v překladu znamená: zesílení světla pomocí vynucené emise záření. Laser pracuje na principu vynuceného záření. Vynucené záření je vyvolané nejprve dodáváním energie atomu, při níž elektrony vystupují do vyšších energetických drah. Po dalším přijetí energie a z důvodu rovnováhy sil elektrony sestupují na svoji původní dráhu a při tom vyzáří přijatou energii. Energie se vyzáří ve formě fotonů a je monochromatická (tzn., že má jednu přesně definovanou vlnovou délku) a koherentní (tzn., že částice se ve svazku pohybují jedním směrem).

Obrábění paprskem laseru je založeno na přeměně energie světelné na energii tepelnou. Vlivem tepelné energie se materiál natavuje a následně odpařuje. K natavení dochází jen na malé ploše a do určité hloubky. Až poté, co se materiál odpaří, laser pronikne hlouběji do materiálu. [13, 14, 16, 22]

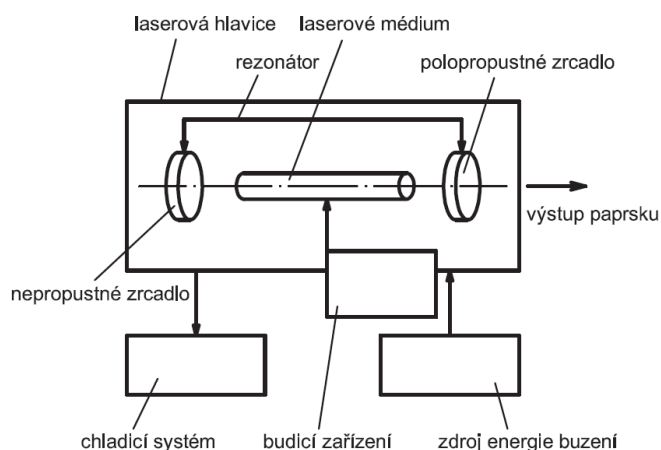


Obr. 6 Schéma obrábění paprskem laseru [14]

2.4.2 Zařízení pro obrábění laserem

Laserové zařízení obsahuje několik základních částí. Laserová hlavička tvoří jakýsi obal pro laserové médium a rezonátor. Laserové médium může být pevného, plynného

i kapalného skupenství. Je to směs několika materiálů určující délku vlny záření v nosném materiálu, který dobře odvádí vzniklé teplo. Rezonátor tvoří nejčastěji dvě sférická zrcadla. Jedno zrcadlo je propustné a druhé nepropustné. Pomocí těchto zrcadel je rezonátor schopen zesílit záření. Vlastnosti paprsku závisí na konstrukčním uspořádání rezonátoru. Celý laser uvádí do chodu budicí zařízení. Laser se uvádí do činnosti přes laserové médium. Způsob buzení závisí na skupenství tohoto laserového média. V případě plynného skupenství je buzeno elektrickým výbojem. Do zařízení musíme také přivádět energii, tu zajišťuje zdroj energie buzení. Během činnosti se všechna energie nepřemění v záření, některá se uvolní ve formě tepla. Proto musíme zajistit chlazení. Nejčastější způsob je chlazení vodou a ve speciálním případě se používá chlazení vzduchem. [14, 22]



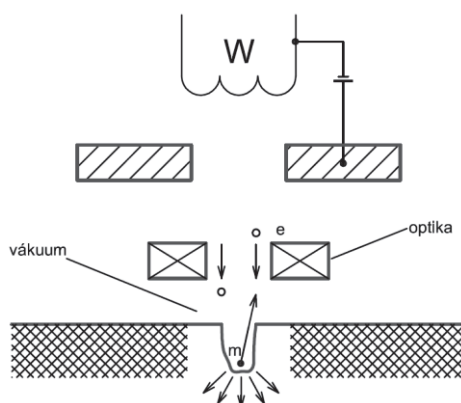
Obr. 7 Schéma zařízení pro obrábění paprskem laseru [22]

2.5 Obrábění paprskem elektronů

Mezinárodní název: EBM (Electron beam machining)

2.5.1 Princip metody

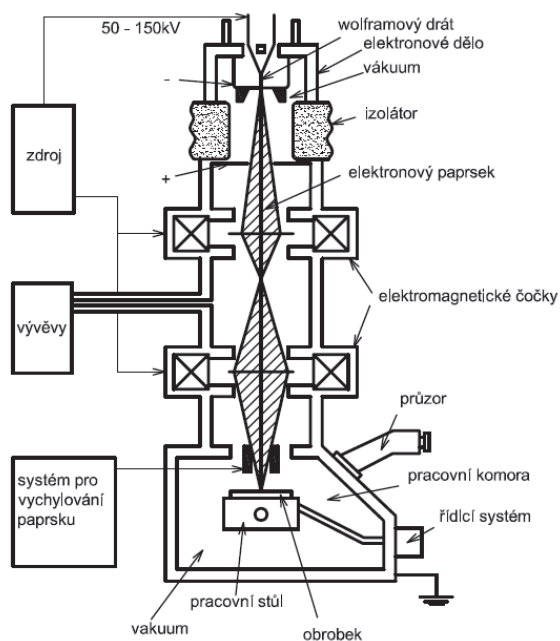
Princip úběru materiálu u této metody je velice podobný obrábění paprskem laseru, jen celý proces probíhá ve vakuu a využívá se urychleného paprsku elektronů, který je soustředěn na velmi malou plochu. Paprsek působí na obráběný materiál termickým nebo netermickým účinkem. V případě netermického účinku se mění chemické a fyzikální vlastnosti materiálu. Při termickém účinku se kinetická energie paprsku po dopadu na plochu obrobku změnila na energii tepelnou. Materiál se do určité hloubky ohřeje, nataví a odpaří. Vzniklé výpary jsou zionizovány a zaostřují paprsek. Při opakování tohoto procesu bude paprsek pronikat do materiálu stále hlouběji. Paprsek může pracovat nepřetržitě, kdy je materiál ubírán plynule, nebo pulzně. Tento pracovní režim se využívá při přesném opracování materiálu. Materiál se odpařuje v podobě postupných erupcí. Doba jednoho pulzu se pohybuje od 2 μ s do 0,01 s, při frekvenci 500 až 10 000 Hz. Velkou výhodou této metody je, že je možné obrábět libovolný materiál bez ohledu na jeho fyzikální nebo mechanické vlastnosti, jako je tvrdost, elektrická vodivost a houževnatost. Další výhodou je minimální tepelně ovlivněná vrstva. [14, 16, 23]



Obr. 8 Schéma obrábění paprskem elektronů [14]

2.5.2 Zařízení pro obrábění paprskem elektronů

Zařízení pro obrábění paprskem elektronů je konstrukčně podobné elektronovému mikroskopu. Asi nejdůležitější částí zařízení je elektronové dělo, které se skládá z wolframové katody a anody. Wolframová katoda při zahřátí na teplotu okolo 2500 – 3000°C uvolňuje elektrony. Ty jsou anodou urychleny na rychlost asi 60% rychlosti světla. Elektronový paprsek je poté zaostřen na malou plochu, čímž se zvětší plošná hustota energie. Zaostření se provádí pomocí elektromagnetického zaostřovacího systému, který tvoří elektromagnetické čočky. Další součástí zařízení je systém pro vychylování paprsku. Systém umožňuje manipulaci s paprskem až do vzdálenosti 4 mm. Obrobek je upevněn na stole, který je připojen na číslíkový řídicí systém. Na řídicím systému lze nastavit nejen pohyb obrobku v osách x a y, ale i výkon elektromagnetického děla, šířku paprsku, zaostření a vychýlení. Aby byla účinnost využití energie co největší, probíhá pracovní proces ve vakuu. V pracovní komoře se vakuum pohybuje okolo 10^{-1} Pa a v prostoru elektronového děla 10^{-2} až 10^{-3} Pa. Součástí zařízení jsou i vakuové pumpy, které umožňují vytvořit potřebné vakuum. [14, 23]



Obr. 9 Schéma zařízení pro obrábění paprskem elektronů [14]

2.6 Elektrochemické obrábění

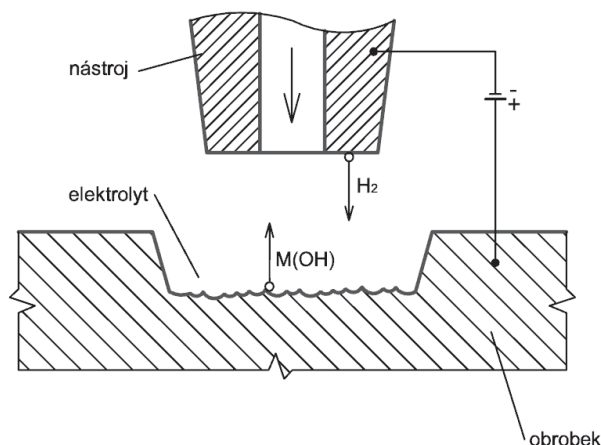
Mezinárodní název: ECM (Electrochemical machining)

2.6.1 Princip metody

Elektrochemické obrábění je řízený místní úběr elektricky vodivého materiálu, který nastává během elektrolýzy. Proces probíhá v elektrolytu prostřednictvím anodického rozpouštění mezi katodou a anodou. Anodu tvoří obrobek a katodu nástroj. Mezi elektrodami je mezera asi 0,05 až 1 mm, kterou proudí elektrolyt. Při zapojení elektrod ke zdroji stejnosměrného proudu se začnou uvolňovat kationty z nástroje. Ty se poté slučují s anionty kovu na anodě. Tím se narušuje povrch obráběného materiálu a anoda kopíruje tvar katody. Katoda má negativní tvar požadované součásti a musí splňovat určité vlastnosti, jako je např. dostatečná pevnost, dobrá tepelná a elektrická vodivost, odolnost proti chemickému působení elektrolytu atd. Nejpoužívanější materiály jsou bronzы a mosazi. [13, 14, 20]

Faktory, které ovlivňují úběr materiálu [14]:

- pracovní napětí,
- mezera mezi nástrojem a obrobkem,
- rychlost posuvu elektrody,
- složení a rychlost proudění elektrolytu,
- materiál obrobku.



Obr. 10 Schéma elektrochemického obrábění [14]

2.6.2 Elektrolyt

Při pracovním procesu elektrolyt plní 3 důležité funkce. Vede elektrický proud, odvádí vzniklé teplo a částčky materiálu z pracovní mezery. Elektrolyt může být kyselina, zásada nebo solný roztok. Jaký elektrolyt je použit, závisí na obráběném materiálu, předepsané kvalitě obrobeného povrchu, ceně elektrolytu a na jeho bezpečnosti při práci. Vlastnosti jednotlivých elektrolytů jsou uvedeny v tab. 1. Během elektrochemického obrábění vzniká v elektrolytu kal z rozpuštěného kovu. Čištění elektrolytu se provádí filtrací, usazováním nebo odstředěním. [14, 20]

Tab. 1 Používané elektrolyty [14]

Druh elektrolytu	Obráběný materiál	Vlastnosti
NaCl	legované a nelegované oceli, slitiny niklu a kobaltu	nejedovatý, laciný, silný korozivní účinek, malý pasivační účinek
NaClO₃	nástrojové oceli	dobrá kvalita povrchu, velké úběry, nebezpečná manipulace sklon ke vznícení
NaNO₂	slitiny mědi	jedovatý, jen pro speciální účely
Na₂SO₄	slitiny mědi	jen pro speciální účely
NaNO₃	legované a nelegované oceli, slitiny niklu, kobaltu, hliníku, mědi a zinku	sklon k pasivaci u ocelí, univerzální použití, nedráždí pokožku, udržuje hodnotu pH
HCl H₂SO₄	slitiny niklu, chromu a kobaltu	velká spotřeba elektrolytu, netvoří nerozpustné hydroxidy, velmi jemné povrchy, náročné na bezpečnou manipulaci, žravina
NaOH	wolfram, molybden	žravina, nepříjemná manipulace

2.7 Chemické obrábění

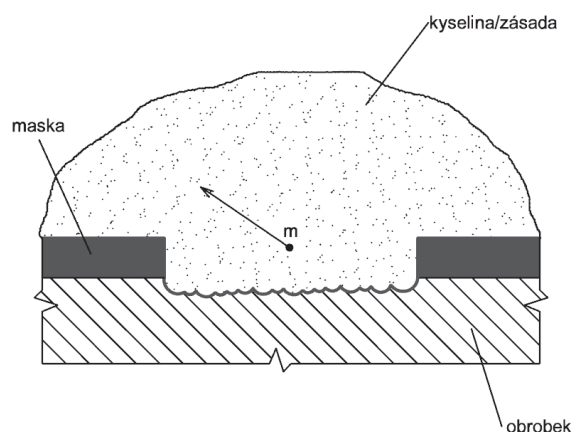
Mezinárodní název: CM (Chemical machining)

2.7.1 Princip metody

Podstata chemického obrábění spočívá v tom, že je řízeně odleptáván materiál z povrchu obrobku o tloušťce několika setin milimetrů až několika milimetrů. Odleptávání probíhá na základě chemické reakce mezi leptadlem a obrobkem. Neobráběná místa jsou potřena speciálním povlakem. Tento povlak se nazývá maska. Maska se nanáší o tloušťce asi 0,2 až 2 mm. Musí být z chemicky odolných materiálů, např. z gumy, plastů nebo pryskyřic. Nejčastěji obráběným materiálem je hliník a jeho slitiny, ale lze obrábět i jiné kovy.

Tuto metodu lze ještě rozdělit na chemické prostřihování a chemické frézování. Postup při chemickém prostřihování je následující: Nejprve se na povrchu polotovaru určí obrys výrobku. Na tento je obrys nanese fotosenzitivní vrstva. Fotosenzitivní vrstva určuje odleptávaná místa a zároveň chrání neobráběnou plochu.

Během chemického frézování je obráběná součást ponořena do leptacího roztoku. Tvar obrobku je nanesen na součást podle šablony a neobráběné plochy jsou zakryty maskou. Před nanesením masky se musí povrch součásti očistit, aby maska dobře přilnula a při samotném obrábění docházelo k rovnoměrnému úběru materiálu. Čištění se skládá ze čtyř po sobě jdoucích operací: odmaštění, moření, opláchnutí ve vodní lázni a sušení. [13, 14, 20]



Obr. 11 Schéma chemického obrábění [14]

2.7.2 Reaktivní prostředí

Reaktivní prostředí, nebo také leptadlo, může být kyselina nebo zásada. Je to chemická sloučenina, která by měla mít dobrou smáčivost, proto se do této sloučeniny přidávají ještě speciální přísady. Pro každý materiál se volí jiné leptadlo. Příklady použitelných leptadel na různé materiály jsou v tab. 2. [14]

Tab. 2. Doporučená leptadla pro vybrané druhy materiálů [14]

Obráběný materiál	Leptadlo	Obráběný materiál	Leptadlo
hliník a jeho slitiny	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	hořčík a jeho slitiny	H_2SO_4
nízkolegované oceli	HNO_3	měď a jeho slitiny	$\text{FeCl}_3, (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$
korozivzdorné oceli	HNO_3	mangan a jeho slitiny	H_2SO_4
titanové slitiny	HF, HNO_3	křemík	$\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}$

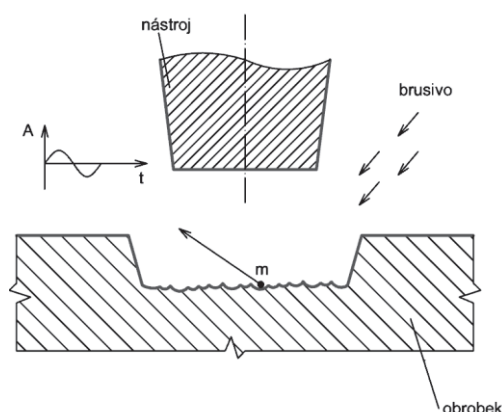
2.8 Obrábění ultrazvukem

Mezinárodní název: USM (Ultrasonic machining)

Obrábění ultrazvukem je příloze 4.

2.8.1 Princip metody

Princip obrábění ultrazvukem je v narušování povrchu obrobku pomocí brusného účinku kapaliny s brusivem a kavitační erozí. Jako kapalina se používá voda, petrolej a líh. Suspenze proudí mezi obrobkem a nástrojem, který kmitá o frekvenci ultrazvukového vlnění (20 až 30 kHz, amplituda 10 až 100 μm). Nástroj přitlačuje zrna brusiva k obrobku a ty obrousí obráběný povrch, který pak kopíruje tvar nástroje. Kapalina přivádí nová zrna brusiva a odvádí ta stará s částicemi odebraného materiálu. Materiál brusiva je nejčastěji B_4C , SiC nebo Al_2O_3 . Čím jsou zrna brusiva větší, tím se zvětšuje úběr materiálu, ale zhoršuje se povrch, klesá přesnost a vzrůstá opotřebení nástroje. Touto metodou se obrábí především tvrdé, křehké a elektricky nevodivé materiály. [13, 14, 21]



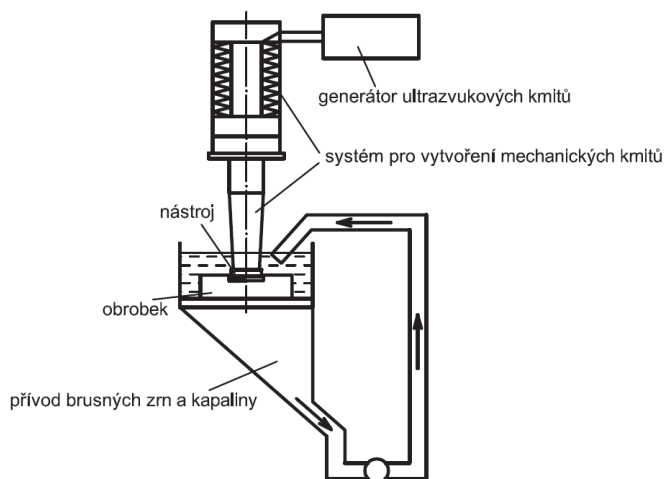
Obr. 12 Schéma obrábění ultrazvukem [14]

2.8.2 Nástroje

Nástroje se vyrábějí z materiálů s dobrou odolností vůči opotřebení a s vysokou únavovou pevností. To jsou např. konstrukční oceli, korozivzdorné oceli, pro kusovou výrobu a tvarově složitější výrobky se používá měď. Měď se používá z důvodu snadného obrábění, ale i pro dobrou odolnost vůči opotřebení. Nástroj má negativní tvar požadované součásti. Protože je při provozu mírně opotřebován, musí se kontrolovat jeho tvar a rozměry. Opotřebení nástroje závisí na pracovních podmínkách, materiálu obrobku a nástroje. [21]

2.8.3 Zařízení pro obrábění ultrazvukem

Zařízení pro ultrazvukové obrábění se skládá z generátoru ultrazvukových kmitů, systému pro vytvoření mechanických kmitů a systému pro přívod brusných zrn. Generátor ultrazvukových kmitů přemění nízkofrekvenční energii (50 Hz) na vysokofrekvenční energii (20 až 30 kHz). Poté systém pro vytvoření mechanických kmitů přemění elektromagnetické kmity na mechanické. Principem přeměny je magnetostrikce. Magnetostrikce je vlastnost, kterou mají feromagnetické materiály. Je to změna rozměrů materiálu při zmagnetizování. Přívod nových a odvod starých brusných zrn zajišťuje systém pro přívod brusných zrn. Koncentrace zrn v kapalině se pohybuje mezi 30% až 40%. [14, 21]



Obr. 13 Schéma zařízení pro obrábění ultrazvukem [21]

2.9 Obrábění vodním paprskem

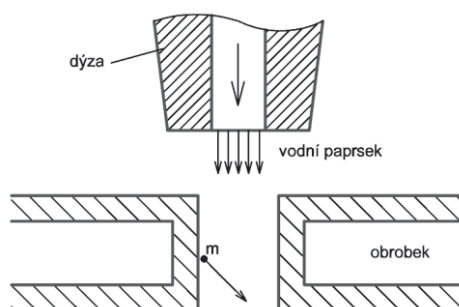
Mezinárodní název: WJM (Water jet machining), AWJM (Abrasive water jet machining)

Obrábění vodním paprskem je v příloze 5.

2.9.1 Princip metody

Podstatou této metody je obrušování materiálu tlakem vodního paprsku. Vodní paprsek o velké rychlosti ($600 - 900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a tlaku (380 nebo 690 MPa) dopadá na malou plochu materiálu obrobku a svou kinetickou energií odlamuje částice materiálu. [6, 25]

V této kapitole je jen stručně popsán princip obrábění vodním paprskem. Podrobněji se touto metodou zabývají následující kapitoly.



Obr. 14 Schéma obrábění vodním paprskem [14]

2.10 Porovnání metod

Každá z výše uvedených metod je založena na jiném principu oddělování materiálu. Také každý obráběný materiál je jiný, má jiné vlastnosti. Při výrobě konkrétních součástí jsou vždy jiné požadavky na jakost povrchu, na ovlivněnou vrstvu atd. Proto se pro konkrétní případ volí vhodná metoda. Přehled jednotlivých metod je v následujících tabulkách.

Tab. 3. Hlavní oblasti využití [14]

Metoda	Využití
EDM	Výroba děr a dutin libovolných tvarů, řezání a vyřezávání libovolných tvarů, děrování, výroba drážek a zápichů, odstraňování ořepů
PBM	Tvarové řezání a vrtání, výroba otvorů a dutin libovolných tvarů
LBM	Tvarové řezání, děrování, výroba drážek, obrábění tvarových ploch, mikroobrábění
EBM	Opracování drobných dílců, vrtání, výroba drážek a zápichů, tvarové řezání
ECM	Výroba dutin libovolných tvarů, opracování mikro dílců, leštění, broušení, odstraňování ořepů
CM	Výroba otvorů a dutin libovolných tvarů, leštění, odstraňování ořepů
USM	Výroba rozměrově malých dílců, otvorů a dutin libovolných tvarů
AWJM	Tvarové řezání, broušení, leštění, výroba drážek a zápichů, vrtání, frézování, soustružení

Tab. 4. Porovnání vhodnosti použití metod pro vybrané materiály [13, 14]

Obráběný materiál	EDM	PBM	LBM	EBM	ECM	CM	USM	AWJM
Slitiny Al	2	1	2	2	2	1	3	3
Vysokolegované oceli	1	1	2	2	1	2	3	1
Žáropevné oceli	1	3	3	1	2	3	1	1
Hořčík	1	1	2	2	1	1	2	2
Titan	1	2	2	2	2	2	2	1
Superslitiny	1	1	2	2	1	2	3	2
Keramika	4	4	1	1	4	3	1	1
Sklo	4	4	2	2	4	2	1	2
Křemík	4	4	2	2	4	2	-	-
Plasty	4	3	2	2	4	3	2	2
Kompozitové materiály	4	4	2	2	4	2	1	1

Hodnocení použití 1 - optimální; 2 - vhodné; 3 - méně vhodné; 4 – nevhodné

Tab. 5. Obecné charakteristiky nekonvenčních metod [14]

Metoda	Požadavky na vlastnosti materiálu	Tloušťka ovlivněné vrstvy	Dosahovaná drsnost povrchu Ra [μm]
EDM	elektricky vodivý	2 ÷ 300 μm	3 ÷ 12
PBM	chemicky aktivní	500 ÷ 800 μm	-
LBM	žádné	100 μm	0,8 ÷ 6,3
EBM	žádné	žádná	0,8 ÷ 6,3
ECM	elektricky vodivý	žádná	0,4 ÷ 6,3
CM	chemicky aktivní	žádná	-
USM	tvrdost nad 35HRC	žádná	0,3 ÷ 0,8
AWJM	žádné	žádná	1 ÷ 10

3 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

3.1 Princip metody

Řezání vodním paprskem je definované jako vysokorychlostní erozivní proces nebo jako řízený proces erozivního opotřebení, kde řezné médium je usměrněné do úzkého paprsku s vysokou řeznou účinností. [14] Po dopadu vodního paprsku na povrch obrobku paprsek proniká materiálem. Během proniknutí celou tloušťkou materiálu se paprsek zpomaluje a vychyluje. Toto vychýlení se popisuje jako důsledek tření mezi povrchem vodního paprsku a povrchem obráběného materiálu.

Pro zvýšení výkonnosti se dnes kromě kontinuálního paprsku, který má stálou hladinu energie používají i jiné typy paprsků, a to pulzující paprsek a kavitační paprsek. Kavitační paprsek je kontinuální s obsahem bublinek. Pracuje na principu lokálního porušení materiálu při zániku kavitačních bublin. Pulzující paprsek využívá opakované a krátkodobé pulzy, které urychlují rozšíření řezné mezery. K vytvoření tohoto paprsku využíváme ultrazvukovou modulaci vodního paprsku. [7, 14]

3.2 Rozdělení

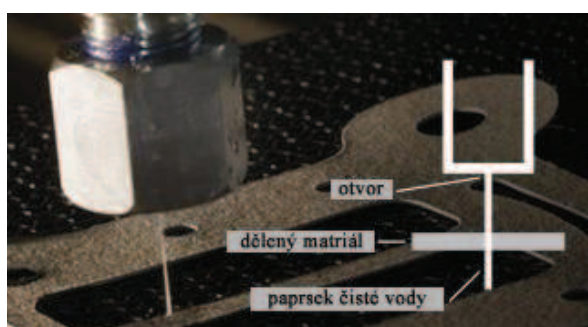
Technologii vodního paprsku lze rozdělit na:

- obrábění paprskem čisté vody,
- obrábění vodním paprskem s abrazivem.

Již z názvu je patrné, jaký je mezi technologiemi rozdíl. U obrábění vodním paprskem s abrazivem je řezným médiem voda s příměsí abraziva.

3.2.1 Obrábění paprskem čisté vody

Obrábění paprskem čisté vody je původní metoda dělení materiálu. Dnes se využívá především pro měkké materiály, jako je hedvábný papír a vybavení interiéru automobilů. Průměr paprsku je 0,1 až 0,24 mm. [8]



Obr. 15 Schéma obrábění čistou vodou [8]

3.2.2 Obrábění vodním paprskem s abrazivem

Obrábění vodním paprskem s abrazivem se liší od předchozí technologie především v řezném médiu. Zatímco u čisté vody narušuje materiál sama voda, v případě abrazivního vodního paprsku voda slouží pouze k urychlení abrazivních částic. Vodní paprsek s abrazivem je stokrát až tisíckrát výkonnější než paprsek čisté vody. Proto se využívá pro tvrdé materiály, jako jsou kovy, kompozity a keramika. Průměr paprsku je 0,3 až 1,35 mm. [8]

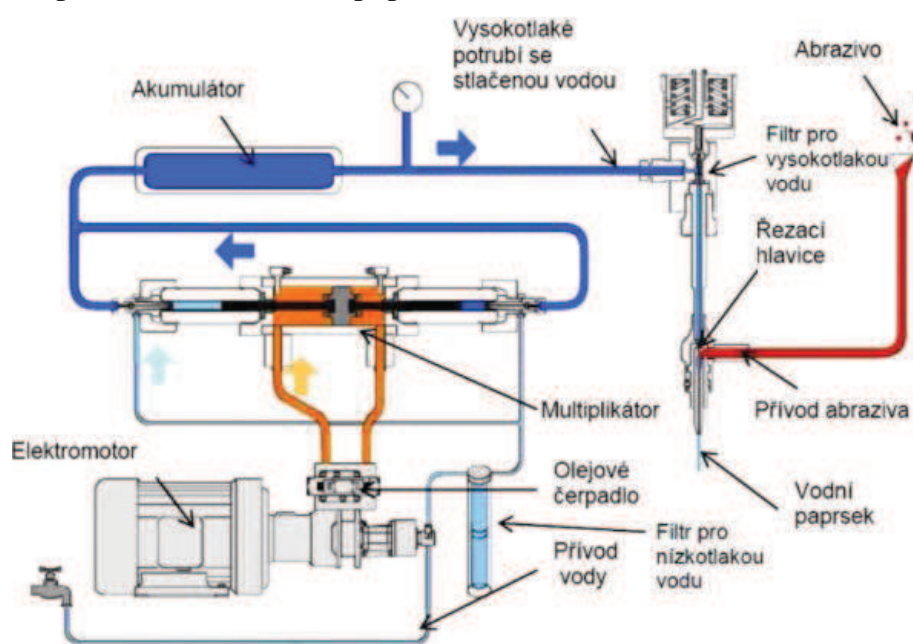


Obr. 16 Schéma obrábění vodním paprskem s abrazivem [8]

3.2.2.1 Abraziva

Abrazivo je směs tvrdých částic materiálu. Z toho nejčastěji používané jsou: křemičitý písek, karbid křemíku, granát a skleněné kuličky. Volba abraziva závisí na obráběném materiálu, parametrech stroje, kvalitě obrobeného povrchu a ceně brusiva. Čím menší je zrna abraziva, tím je hladší výsledný povrch, ale zvyšuje se spotřeba abraziva. Při použití většího množství se zvyšuje rychlost obrábění, ale s tím i cena. S vyšší tvrdostí abraziva také roste opotřebení trysky. Křemičitý písek na rozdíl od granátu rychlost řezu zpomaluje, ale pro některé obráběné materiály je dostačující lacinější křemičitý písek než drahý granát. Proto se musí správně zvolit materiál, velikost i množství brusiva. [6]

3.3 Zařízení pro obrábění vodním paprskem



Obr. 17 Schéma zařízení pro obrábění vodním paprskem [28]

Hlavní části zařízení pro obrábění vodním paprskem jsou [14, 26]:

Hydraulická jednotka:

- skládá se z vysokotlakých čerpadel a multiplikátoru,
- slouží k vytvoření potřebného tlaku vodního paprsku (až 380 MPa).

Akumulátor tlaku:

- vysokotlaká nádoba,
- tlumí rázy v kapalině vzniklé při stlačení vody,
- udržuje konstantní tlak a rychlost vody.

Filtry:

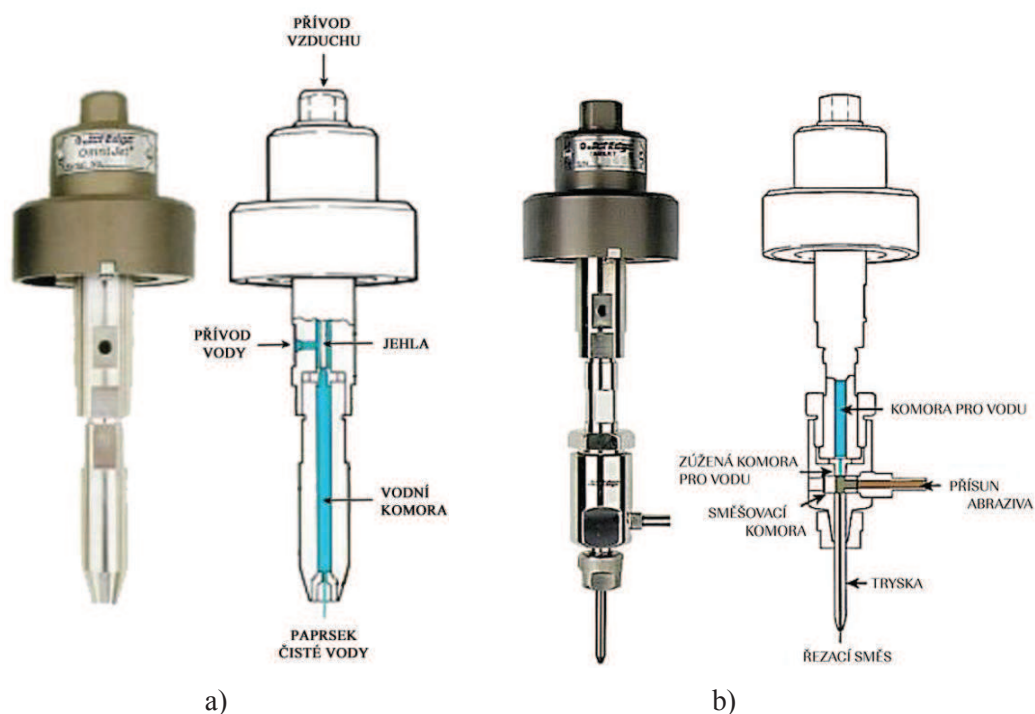
- odstraňují nečistoty z kapaliny.

Potrubí pro rozvod vody:

- různé druhy armatur a spojovacích součástí z korozivzdorné ocele.

Řezací hlava:

- hlavním úkolem je vytvoření vodního paprsku, v případě abrazivního paprsku i přívod a smíchání abraziva s vodou (diamant je dražší, ale má delší životnost, možnost opakovatelného vyčištění od nečistot a usazenin),
- dnes již existují řezací hlavy s vyměnitelnou diamantovou tryskou (po skončení životnosti se nemusí vyměňovat celá řezací hlava, ale pouze tryska).



Obr. 18 Řezací hlava

a) pro paprsek čisté vody [15] b) pro abrazivní vodní paprsek [27]

Lapač vody:

- nádoba, která zachycuje vodní paprsek a třísky materiálu,
- tlumí hluk dosahující až 105 dB,
- hloubka nádoby je 300 až 600 mm, při nedostatku místa se naplňuje kovovými kuličkami.

3.4 Obráběné materiály

V příloze 6 je seznam dělených materiálů ve formě katalogu.

3.4.1 Sklo

Vodní paprsek s abrazivem umožňuje obrábět nejen běžné sklo, ale i barevné, neprůstřelné, lepené, protipožární či vyztužené dráty. Jediné, které nelze obrábět, je tvrzené sklo. Maximální tloušťka skla je 200 mm. Ze skla lze vyřezat větrací otvory, otvory pro panty, segmenty tanečních parketů, různé mozaiky nebo i složitější tvary jakou jsou například nápisy. Při řezání se nepoškozuje povrch ani hrany skla. Ale i u této metody může dojít k prasknutí nebo odštípnutí rohu, avšak riziko je daleko menší než u jiné klasické metody. U zrcadel a lepených skel se během řezání nenaruší povlak nebo lepidlo. [6, 11]

3.4.2 Obklady, dlažby a kámen

Tyto materiály se obrábějí spíše abrazivním vodním paprskem. Lze obrábět keramiku, přírodní nebo umělý kámen, mramor, žulu i atypické moderní materiály, jako je sklokeramika. S přesností 0,2 mm a bez mikropnutí je možné řezat materiály do různých tvarů, ze kterých mohou vzniknout mozaiky vhodné do obytných i komerčních prostorů. [6, 11]

3.4.3 Kovy

Jako u předešlých materiálů se mohou řezat všechny možné tvary a všechny možné kovy od ocelí, barevných kovů přes ušlechtilé slitiny až po litiny. Lze řezat do tloušťky 100 mm i kovy, které jsou povrchově upravené, aniž by se povrch poškodil. Protože je řez studený, kov se při obrábění netaví. Při zvětšující se tloušťce se zhoršuje přesnost i drsnost ve spodní části řezné spáry. U neželezných kovů jsou tyto nepřesnosti jen mírné, na rozdíl od odolnějších materiálů jako je například kalená ocel. [6, 11]

3.5 Využití technologie vodního paprsku

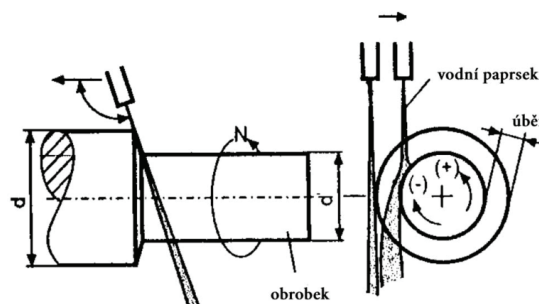
Jak už bylo řečeno, vodním paprskem lze obrábět široké spektrum materiálů od měkkých po velmi tvrdé, a o různých tloušťkách od tenkých fólií po 100 mm, u některých materiálů až po 200 mm. Obráběním vodním paprskem není myšleno pouze řezání, ale i soustružení, frézování, gravírování a vrtání. Je tedy možné říci, že vodní paprsek má široké využití, a proto se používá v mnoha odvětvích průmyslu jako je [14]:

- chemický průmysl – dělení výbušných látek,
- potravinářský průmysl – dělení ovoce a zeleniny v syrovém a zmrzlém stavu,
- elektrotechnický a elektronický průmysl – řezání keramiky, skla, permanentních magnetů, plošných spojů,
- strojírenský průmysl – dělení titanu, wolframu, extrémně tvrdých a těžko obrobitelných materiálů, výroba tvarově složitých součástek,
- stavební průmysl – dělení čedičové vaty, keramiky, dlaždic,
- gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů,
- papírenský průmysl – řezání papírů, fólií,
- obuvnický a galantérský – řezání pravé a umělé kůže,

- sklářský průmysl – řezání skla všech druhů,
- jaderný průmysl – dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev.

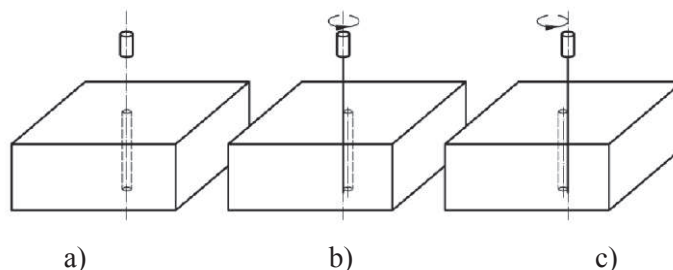
3.6 Netradiční využití

Soustružení vodním paprskem se příliš neliší od běžného soustružení. Zde také obrobek rotuje, ale místo soustružnického nože se ve směru osy obrobku posouvá vodní paprsek. Úběr materiálu je dán posuvem paprsku v radiálním směru. [14]



Obr. 19 Soustružení vodním paprskem [14]

Pro vrtání otvorů touto technologií existuje několik způsobů. Nejčastěji používané jsou: vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím paprskem anebo vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem (vyřezávání). Princip způsobů vrtání a porovnání s frézováním znázorňuje následující obrázek. [14]



Obr. 20 Způsoby vrtání pomocí vodního paprsku [14]

a) vrtání b) vyřezávání c) frézování

Frézování vodním paprskem je v podstatě řezání, ale ne úplné dělení materiálu. Paprsek se opakovaně posouvá po obráběné ploše, dokud nevznikne požadovaný tvar součásti. Velmi podobný princip se využívá při gravírování, kdy nedochází k úplnému prořezání celé tloušťky materiálu, ale jen k odstranění povrchové vrstvy. [14]

3.7 Bezpečnost při obrábění

Z důvodu bezpečnosti obsluhy při práci se zařízením jsou použity různé bezpečnostní prvky. Prvním je zakrytování zařízení, kdy kryt nejen že chrání obsluhu, ale i snižuje hluchnost během provozu. Dalším prvkem je světelná bariéra. Po projití touto bariérou se stroj sám vypne. Jedno z dalších opatření je umístění vysokotlakého čerpadla mimo pracoviště, nejčastěji do oddělené místnosti. Speciální požadavky se kladou i na hadice a přípojky, kdy se musí provádět řada zkoušek na každé části hadicového vedení. Tyto požadavky a zkoušky stanovuje norma ČSN EN 1829-2 Stroje pro zařízení vysokotlakým vodním paprskem – Požadavky na bezpečnost. [4]

3.8 Výhody a nevýhody metody

Výhody [6, 25]:

- vysoká rychlost řezání a energetická účinnost,
- studený řez, nedochází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu a tím ani ke změnám struktury,
- minimální silové působení paprsku na řezaný materiál – nedochází ke vzniku mikrotrhlin,
- přesná geometrie řezaných dílců,
- nedochází k poškození případných povrchových úprav materiálu (materiály mohou být barvené, broušené, leštěné),
- jedním nástrojem je možné změnou tlaku, posuvu a případně dalších parametrů provádět v krátkých časových úsecích několik operací (otryskávat, čistit, řezat, vrtat, frézovat, gravírovat...),
- dělí téměř všechny materiály,
- řez je bez otřepů, většinou odpadá nutnost následného opracování, odjehlování a srážení ostrých hran,
- lze dosahovat vysokého využití polotovaru díky malému průměru paprsku a možnosti naskládání více tvarů na jeden polotovar,
- nevznikají škodlivé emise do ovzduší a nedochází k chemickému působení na řezaný materiál.

Nevýhody [6, 11]:

- nevyhnutelný kontakt s vodou a většinou i s abrazivním materiálem (bez okamžitého vhodného ošetření rychlý nástup povrchové koroze, u nasákavých materiálů delší vysoušení),
- omezená možnost výroby hodně malých dílců (cca pod 3 – 5 cm),
- zaoblené vnitřní rohy podle průměru paprsku.

4 EKOLOGICKÁ SITUACE, RECYKLACE OPOTŘEBOVANÉHO MATERIÁLU

Obrábění vodním paprskem, ať už jde o paprsek čisté vody nebo o abrazivní paprsek, není ekologicky náročné. Do procesu vstupuje pouze elektrická energie, voda a abrazivo. Všechny vstupující složky jsou tedy neškodné pro životní prostředí.

Během obrábění nevznikají jedovaté výpary ani prachové částice, na rozdíl od jiných metod, například u konvenčního obrábění azbestu, kde se uvolňují karcinogenní prašné látky. Tudíž jsou pracovní podmínky pro obsluhu ideální. Jediným negativním faktorem je hluk. Při dostatku místa, kdy je lapač naplněn vodou, není hluk až tak veliký. Ale při naplnění lapače kovovými kuličkami je vzniklý hluk nesrovnatelně větší.

Abrazivo, které vstupuje do výrobního procesu, se zachytí v lapači vody. Toto abrazivo je smícháno s částičky materiálu obrobené součásti. Pomocí kalového čerpadla je obsah lapače přečerpán do odkalovacího systému, kde se voda oddělí od kalu. Znečištěné abrazivo není možné dále použít. Proto bylo vyvinuto zařízení AQUArec PRO. [1] V tomto zařízení je znečištěné abrazivo propláchnuto, pomocí různých sít a filtrů zbaveno nečistot a poškozených zrn. Nakonec recyklace se musí již čisté abrazivo důkladně usušit. Díky tomuto zařízení se zpět do procesu vrátí čistá a nepoškozená zrna. Nevýhodou je, že tato zrna tvoří pouze 20% z použitého abraziva, tedy je stále nutné dokupovat nové abrazivo. Když se k tomu připočte i energie, která byla spotřebovaná při recyklaci, zjistíme, že je tento postup finančně náročný. Pro většinu malých firem se recyklace nevyplatí. Proto se znečištěné abrazivo vyváží. Pro vývoz je nutné získat potvrzení. Lépe tento odvoz mají zorganizovaný v Německu. Tam dodavatel odveze stejné množství již použitého abraziva, jako přivezl nového. Ve firmě tedy odpadají starosti, co s použitým abrazivem, ale také cena nového abraziva je samozřejmě větší.

5 PŘEDSTAVENÍ ZAHRANIČNÍCH A TUZEMSKÝCH FIREM

V této kapitole jsou představeny firmy zabývající se technologií vodního paprsku.

5.1 Rychlý TOM s.r.o.



Obr. 21 Logo Rychlý TOM s.r.o.[18]

Společnost Rychlý TOM s.r.o., kterou jsem sama navštívila, vznikla v roce 2006 za účelem podnikání v oblasti tvarového dělení libovolného materiálu vysokotlakým vodním paprskem. Od začátku se společnost kromě dělení materiálu zabývala i prodejem náhradních dílů, nářadí a přípravků pro technologii řezání vodním paprskem, prodejem abraziva a servisem zařízení na dělení vodním paprskem. Díky úspěšné diskusi s klientem byla na jaře 2007 vyrobena a dodána první CNC technologie na řezání vodním paprskem. Společnost úzce spolupracuje se společností KMT Waterjet Systems Ins., která je světovým výrobcem systémových řešení pro řezání vodním paprskem.

Společnost sídlí v blízkosti Hradce Králové v obci Výrava, kde se nachází pracoviště na poskytování služeb i výroba CNC technologií. Druhá provozovna v Hranicích na Moravě je zaměřena pouze na dělení materiálu vodním paprskem. [18]

Provozovna Hradec Králové [18]:

- pracovní rozměry stolu 4x2,5 m,
- možnost řezání pod úhlem až 45°,
- možnost řezání z materiálů dodaných zákazníkem,
- možnost zhotovení výrobků včetně zajištění materiálu.

Provozovna Hranice na Moravě [18]:

- pracovní rozměry stolu 3x2 m,
- řezání 2D do plochých materiálů.

5.2 Flow International Corporation



Obr. 22 Logo Flow [8]

Společnost Flow International Corporation poskytuje moderní, ekologická řešení pro technologii řezání vodním paprskem, je předním poskytovatelem robotických zařízení. Byla založena v 70. letech 20. století výzkumníkem a vývojovým vědcem od společnosti Boeing. Nejprve se společnost zabývala technologií vodního paprsku jako průmyslový řezný nástroj, později vynalezla, patentovala a zdokonalila první systém řezání abrazivním paprskem na světě, který dokázal řezat tvrdé materiály do tloušťky 300 mm. Příloha 9 obsahuje ukázkou katalogu z této firmy.

Flow International Corporation je dodavatel do různých odvětví průmyslu, jako je: letectví, automobilový průmysl, zpracování papíru, potravin, umělecké a architektonické dílny, průmyslové čištění, příprava povrchu a další speciální aplikace.

Společnost Flow International Corporation má sídlo v Kentu, stát Washington, ale zastoupení má po celém světě. Pro střední a východní Evropu má pobočku v České republice v centru Brna. [8]

5.3 AQUAdem s.r.o.



Obr. 23 Logo AQUAdem s.r.o. [1]

Společnost AQUAdem s.r.o. se kromě dělení materiálu vysokotlakým vodním paprskem také zabývá 3D měřením, dokončovacími operacemi a úpravou povrchu. [1]

Pracoviště je vybaveno nejmodernějšími CNC stroji pro řezání vodním paprskem od firmy Water Jet Sweden [1]:

- NC3000 – efektivní plocha 2000 x 3000 mm, 2 řezací hlavy,
- NC4030T – efektivní plocha 3000 x 4000 mm, 3 řezací hlavy.

Technické možnosti řezání vodním paprskem [1]:

- přesnost tvaru při řezání vodním paprskem - +/- 0,1 mm,
- řízené osy x, y, z – CAD/CAM grafické pracoviště, zpracování dat z výkresu, DXF, DWG,
- polotovary pro řezání 1000 x 2000, 1250 x 2500, 1500 x 3000, 2000 x 3000 a libovolné menší polotovary,
- tloušťka řezaného materiálu od folií až do 150 mm.

5.4 Gebr. Frindt GmbH



Obr. 24 Logo Gebr. Frindt GmbH [10]

Servis společnosti Gebr. Frindt GmbH zahrnuje nejen výrobu součástí zadaných zákazníkem pomocí nejmodernějších zařízení pro obrábění vodním paprskem, ale i intenzivní poradenství při řešení technologických problémů a designu. Kvalita obrábění probíhá v souladu s normou DIN ISO 9001.

Společnost byla založena v roce 1997. Od počátku se zabývá technologií řezání pomocí vodního paprsku. Až na pár výjimek nabízí řezání neomezené škály materiálů.

Společnost Gebr. Frindt GmbH sídlí v Beiersdorfu, nedaleko českých hranic ve spolkové zemi Sasko. [10]

Technické možnosti [10]:

- pracovní plocha 2000 x 3000 mm,
- průměrná přesnost 0,1 mm,
- tloušťka materiálu až 200 mm.

6 DISKUZE

Bakalářská práce se zabývá nekonvenčními metodami obrábění. První kapitola je zaměřena na historii a vývoj metod. Následuje kapitola, která je věnovaná popisu jednotlivých metod a uzavírá ji porovnání. Nelze říct, která z uvedených metod je nejlepší. Každá je určena pro jiný materiál a jiné využití. Například elektroerozivní a elektrochemické obrábění vyžaduje elektricky vodivý materiál, při obrábění paprskem plazmy a chemickém obrábění je nutné, aby byl materiál chemicky aktivní. Obrábění ultrazvukem je určeno pro materiály s tvrdostí nad 35 HRC. Ostatní materiály nemají žádné požadavky na obráběný materiál. Co se týká využití, nejvhodnější metodou pro výrobu velmi malých součástí a malých otvorů je obrábění paprskem laseru a elektrochemické obrábění.

Dále je práce zaměřena na podrobnější popis technologie vodního paprsku, její bezpečnosti a ekologické situace. U metody využívající vodní paprsek není mnoho materiálů, které by nebylo možné obrábět. Jednou z výjimek je tvrzené sklo. Její univerzálnost spočívá v možnosti nastavení více parametrů (tlak paprsku, druh, velikost a množství abraziva) pro jednotlivé materiály.

Při zpracování daného tématu jsem získala mnoho informací, které jsou teoretické i praktické. Nejprínosnější pro mě byla návštěva firmy Rychlý TOM s.r.o., kde jsem si ověřila a rozšířila dosavadní znalosti. V průběhu návštěvy jsem měla možnost sledovat samotný proces výroby a konverzovat se zaměstnanci, kteří mají praktické znalosti o této technologii. Ve firmě jsem také získala kromě informací i vzorky (příloha 7) a katalogy přístrojů a příslušenství (příloha 8). Tyto katalogy prezentují vysokotlaká čerpadla řady KTM a TECHNI, které jsem sledovala při provozu, dále řezací hlavy pro řezání paprskem čisté vody i s příměsí abraziva se systémem 2D i 3D. Nakonec katalogy s tlakovou dopravou abraziva s elektronickým dávkovačem a odkalovací systém. Tyto dva přístroje také firma v provozovně v Hradci Králové sama používá. Vzorky, které jsem získala ve výše jmenované firmě, jsou z nerezové oceli a hliníku. Na vzorcích můžeme vidět průstřel materiálem, který je nutný provést při vyřezávání vnitřních otvorů. Při tomto průstřelu paprsek mírně kmitá, aby se urychlil průchod materiálem. Kdyby se tento průstřel neprováděl, paprsek by se mohl obrážet zpět na řezací hlavu, která by se mohla poškodit. Dále je na vzorcích názorné vychýlení paprsku během řezání, jak se přibývající tloušťkou materiálu vychýlení zvětšuje.

Téma nekonvenční metody obrábění je velice obsáhlé. Z tohoto důvodu jsem nemohla podrobně popsat každou jednotlivou metodu. Nejvíce mě zaujala metoda vodního paprsku, které jsem se věnovala více.

Prostor pro rozšíření práce je v širším popsání jednotlivých metod. Nové přínosné poznatky by mohlo přinést navštívení více firem, ve kterých by proběhl sběr dalších informací. Přínosem v praktické oblasti práce by mohlo být provedení experimentů z firemního nebo laboratorního prostředí.

ZÁVĚR

V této práci jsem systematizovala poznatky z oblasti nekonvenční metody obrábění. Prezentovala jsem jednotlivé metody této technologie, jako jsou elektroerozivní obrábění, obrábění paprskem plazmy, obrábění paprskem laseru, obrábění paprskem elektronů, elektrochemické obrábění, chemické obrábění, obrábění ultrazvukem a hlouběji se zaměřila na obrábění paprskem vody.

U metody vodního paprsku je kromě popisu principu také zahrnuta bezpečnost a ekologická situace. Z hlediska bezpečnosti je možné říct, že je práce s touto technologií zcela bezpečná při dodržování všech zásad a požadavků (například umístění vysokotlakého čerpadla). Také k životnímu prostředí je obrábění vodním paprskem velice šetrné. Během procesu nevznikají žádné prachové částice ani jedovaté výpary a voda, která z procesu odchází, je přefiltrovaná od abraziva a částic z obrobeného materiálu, tedy není nebezpečná pro životní prostředí.

Závěrečná část práce je věnována představení vybraných firem, které se zabývají technologií vodního paprsku. Dvě společnosti jsou z České republiky, a to Rychlý TOM s.r.o. a AQUAdem s.r.o., další dvě společnosti jsou zahraniční. Firma Flow International Corporation pochází ze Spojených států amerických s pobočkami po celém světě. Své zastoupení má i v České republice. Poslední z firem Gebr. Frindt GmbH má své sídlo v Německu.

Nekonvenční metody obrábění se od svého vynalezení stále zdokonalují. V metodě s využitím vodního paprsku se vývoj zaměřuje na pulzující paprsek. Je pouze otázkou času, kdy se tento vývoj zastaví a započne vývoj jiné, nové metody. Pak přivlastek moderní, kterým jsou nazývány tyto nekonvenční metody, převezmou metody nové.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *AQUADEM s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: www.aquadem.cz
2. *CENÍK. VY-TECH steel s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.vytech.cz/clanky/cenik/>
3. CNC Wire Electrical Discharge Machining. *Wire EDM* [online]. 2009 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.wireedm.com/wireedm.htm>
4. ČSN EN 1829-2. *Stroje pro obrábění vysokotlakým vodním paprskem - Požadavky na bezpečnost - Část 2: Hadice, hadicová vedení a přípojky*. Praha: Český normalizační institut, 2008. Dostupné z: <http://csnonline.unmz.cz/>
5. Dělení materiálu. *Workpress Aviation* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.workpressaviation.com/deleni-materialu/>
6. DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. *Glassrevue* [online]. 2007, č. 21 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>
7. DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue* [online]. 2008, č. 15 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
8. *Flow International Corporation* [online]. 2011 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ>
9. Focení pro AK1324 – pálení plazmou a sklady. *David Volný | Fotografie a Webdesign* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.my-pixels.cz/2012/03/26/foceni-pro-ak1324-paleni-plazmou-a-sklady/>
10. *Gebr. Frindt GmbH* [online]. 2006 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: www.frindt-schneidtechnik.de
11. HLAVATÝ, Ivo. *Vodní paprsek*. Ostrava, 2010. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>
12. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Megablog* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
13. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 3. část* [online]. 2005 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
14. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie (Advanced methods of material removal)*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4
15. Omnijet® III Waterjet Cutting Head. *JET EDGE* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_products_detail&product_ID=83
16. *Přehled metod obrábění*. Olomouc, 2011. Dostupné z: http://theses.cz/id/g4ihax/SIKOROV-Pehled_metod.obrbn. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

17. Přesné dělení materiálu vysokotlakým vodním paprskem. *Strojírny Bohdalice, a.s.* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: http://www.strobo.cz/img/down_soubor1097.pdf
18. *Rychlý TOM, s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.rychlytom.cz/>
19. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 7. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni.html>
20. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 10. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2-2.html>
21. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 3. díl. *MM Průmyslové spektrum*. 2007, č. 12. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>
22. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 3. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
23. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 6. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-2.html>
24. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 10. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
25. Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem. *AB JET spol. s r.o.* [online]. 2005 [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.abjet.cz/serv01.htm>
26. Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 7. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
27. Řezání vodním paprskem. *PKIT Praha s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.pkit.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
28. Strojárstvo: Konštrukcia zariadení na obrábanie vysokotlakovým vodným lúčom - WJM. *Industry Central EU* [online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.industry-central.eu/sk/clanky/strojarstvo/105-konstrukcia-zariadeni-na-obrabanie-vysokotlakovym-vodnym-luom-wjm>
29. Ultrasonic impact grinding. *Silfex Incorporated* [online]. 2009 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: http://www.silfex.com/services_2_4.html
30. Water Jet Cutter. *Sugino* [online]. 2009 [cit. 2013-05-08]. Dostupné z: <http://www.sugino.cz/index.php?page=rezani-vodnim-paprskem.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
AWJM	[-]	Abrasive water jet machining – obrábění abrazivním paprskem vody
CAD	[-]	Computer aided design – počítačem podporované navrhování
CAM	[-]	Computer aided manufacturing – počítačem podporovaná výroba
CM	[-]	Chemical machining – chemické obrábění
CNC	[-]	Computer numerical control – řízení obráběcího stroje počítačem
DWG	[-]	Drawing – binární formát souborů výkresů AutoCADu
DXF	[-]	Drawing interchange format – textový formát souboru výkresu AutoCADu
EBM	[-]	Electron beam machining – obrábění paprskem elektronů
ECM	[-]	Electrochemical machining – elektrochemické obrábění
EDM	[-]	Electro discharge machining – elektroerozivní obrábění
LBM	[-]	Laser beam machining – obrábění paprskem laseru
NC	[-]	Numerical control – řízení obráběcího stroje
PBM	[-]	Plasma beam machining – obrábění paprskem plazmy
USM	[-]	Ultrasonic machining – obrábění ultrazvukem
WJM	[-]	Water jet machining – obrábění paprskem vody
Al₂O₃	[-]	Oxid hlinitý
B₄C	[-]	Karbid boru
FeCl₃	[-]	Oxid železitý
HCl	[-]	Chlorovodík
HF	[-]	Fluorovodík

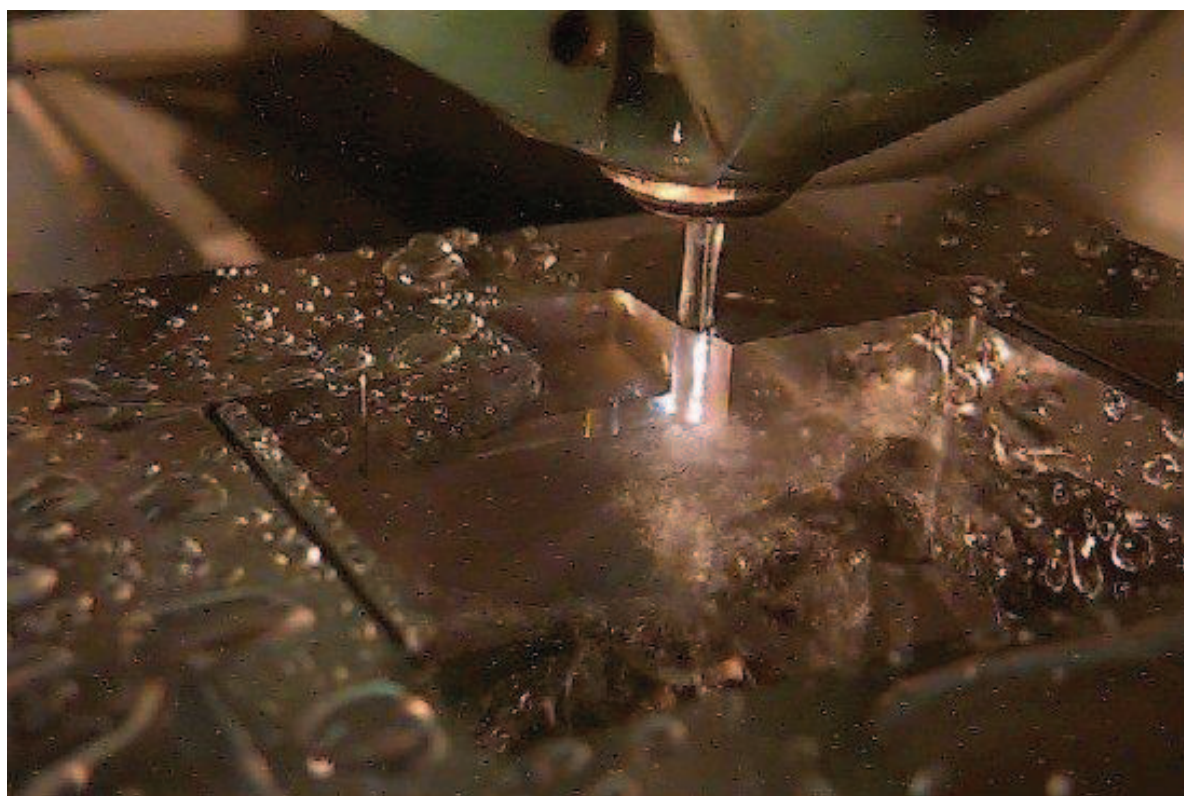
HNO₃	[-]	Kyselina dusičná
H₂O	[-]	Voda
H₂SO₄	[-]	Kyselina sírová
(NH₄)₂S₂O₈	[-]	Peroxidisíran amonný
NaCl	[-]	Chlorid sodný
NaClO₃	[-]	Chlorečnan sodný
NaNO₂	[-]	Dusitan sodný
NaNO₃	[-]	Dusičnan sodný
NaOH	[-]	Hydroxid sodný
Na₂S	[-]	Sulfid sodný
Na₂SO₄	[-]	Síran sodný
SiC	[-]	Karbid křemičitý
Ra	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti povrchu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Elektroerozivní obrábění
Příloha 2	Obrábění paprskem plazmy
Příloha 3	Obrábění paprskem laseru
Příloha 4	Obrábění ultrazvukem
Příloha 5	Obrábění vodním paprskem
Příloha 6	Seznam dělených materiálů
Příloha 7	Vzorky z firmy Rychlý TOM s. r. o.
Příloha 8	Katalog z firmy Rychlý TOM s. r. o.
Příloha 9	Katalog z firmy Flow International Corporation

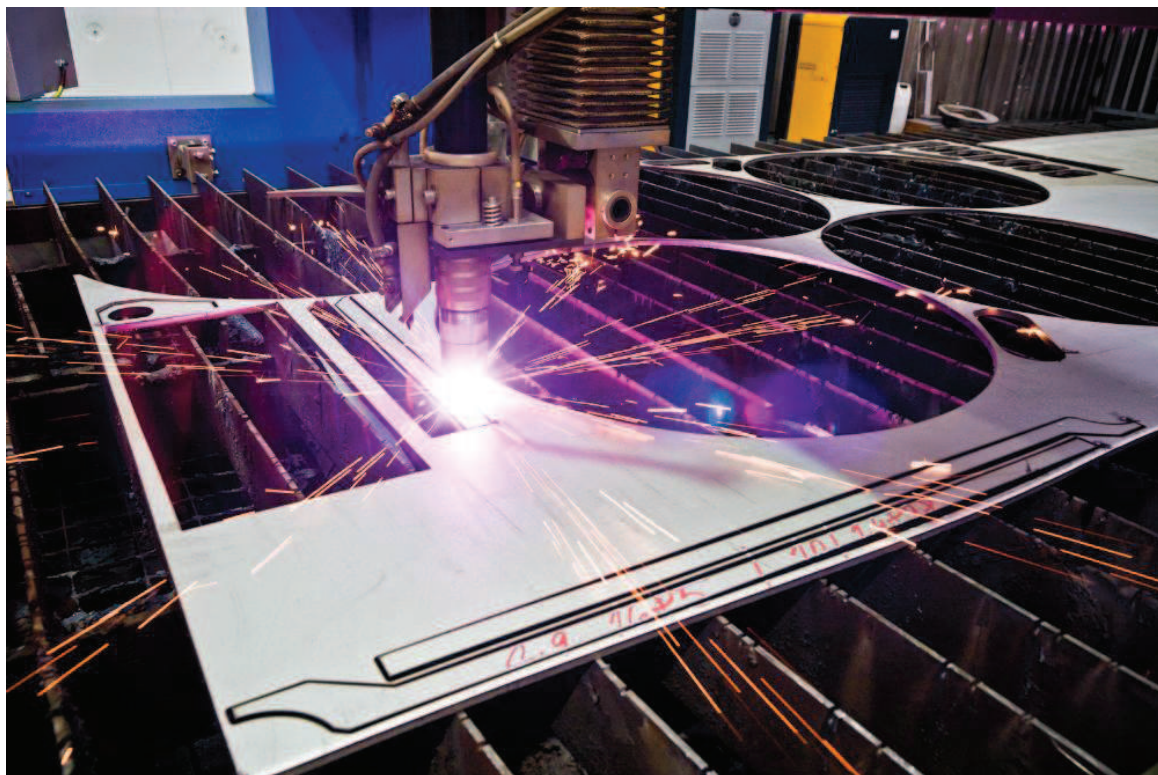
PŘÍLOHA 1

Elektroerozivní obrábění [3]



PŘÍLOHA 2

Obrábění paprskem plazmy [9]



PŘÍLOHA 3

Obrábění paprskem laseru [12]



PŘÍLOHA 4

Obrábění ultrazvukem [29]



PŘÍLOHA 5

Obrábění vodním paprskem [5, 8]



PŘÍLOHA 6

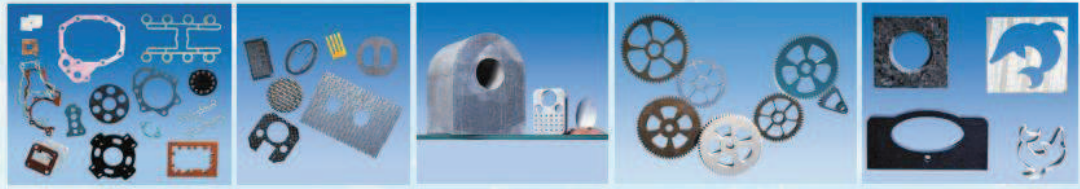
Seznam dělených materiálů [17]

PŘESNÉ DĚLENÍ MATERIÁLU VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPERSEM

INFORMATIVNÍ SEZNAM MATERIÁLŮ K ŘEZÁNÍ VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPERSEM
MAXIMÁLNÍ ROZMĚR 3600 X 2000 MM, TLOUŠŤKA OD 0,1 DO 175MM

- Ušlechtilé i vysocелеgované oceli (kovové materiály)
- Superslitiny titanu, hliníku, niklu, chromu, kobaltu;
(Inconel, Monel, Nimonic, Incoloy, Hastelloy, Duplec, Super duplex, Udimet, Ultimet, Nilo, Brightray, Nicrofer, Avesta, Haynes, Invar, Waspalloy)
- Vícevrstvé a kompozitní materiály, skleněná, uhlíková, aramidová vlákna, kevlar, vyztužené plasty
- Keramické a skleněné materiály, sklolamináty
- Kámen, mramor, žula, pískovec, čedič, apod.
- Plasty, plexisklo, polystyren
- Pryže, silikony, těsnicí a pěnicí hmoty, izolační materiály
- Potraviny, biomateriály
- Exotické materiály (výběrové dřevo, rohovina, slonovina)



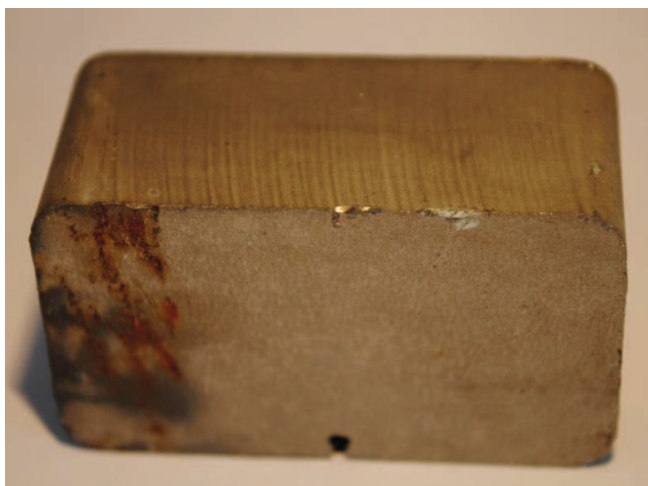


Kontakt:
Strojírny Bohdalice, a.s.
Bohdalice 63
683 41 Bohdalice
Tel.: +420 517 326 645
Fax: +420 517 326 660
E-mail: voda@strobo.cz
www.strobo.cz



PŘÍLOHA 7

Vzorky z firmy Rychlý TOM s.r.o.



PŘÍLOHA 8 - 1/3

Katalog firmy Rychlý TOM s.r.o.

Vysokotlaké čerpadla KTM

STREAMLINE PLUS

Tlak až 4136 bar / 60000 psi vytváří ve všech velikostech čerpadel pouze jeden multiplikátor, přičemž přináší nižší náklady na údržbu a tišší provoz s méně součástmi.



SL-V 30 PLUS

SL-V 50 PLUS

Jmenovitá třída výkonu	22/30 kW/PS	37/50 kW/PS
Max. průtok	2,1 l/min	3,6 l/min
Rozměry	1.7x0.9x1.5 m	1.7x0.9x1.5 m
Hmotnost	963 kg	1353 kg
Hladina hlasitosti	72,5 dBA	72,5 dBA
Jmen. motor. proud při 400V/50Hz	50 A	50 A
Chladicí voda *	5 LPM / 20°C	5 LPM / 20°C

STREAMLINE PRO

Oba modely nabízí systém proporcionálního řízení tlaku pro plynulé nastavování řezacího tlaku.



PRO 60

PRO 125S

Jmenovitá třída výkonu	45/60 kW/PS	93/125kW/PS
Max. průtok	2,8 l/min	5,4 l/min
Rozměry	1.9x0.9x1.4 m	2.2x1.5x3.1 m
Hmotnost	1565 kg	3107 kg
Hladina hlasitosti	72,5 dBA	84 dBA
Ovládací napětí	24 VDC	24 VDC
Chladicí voda *	13,2 l/min	24,6 l/min

PŘÍLOHA 8 - 2/3

Katalog firmy Rychlý TOM s.r.o.

Vysokotlaké čerpadla TECHNI

WATERJET QUANTUM

Nejnovější technologie použitá při výrobě vysokotlakého čerpadla je založena na revolučním a unikátním konceptu.



ESP-55 GEN 2

ESP-66 GEN 2

Max. tlak	3800 bar	4550 bar
Max. spotřeba vody	3.8 LPM	3.2 LPM
Rozměry	1.6x0.6x1.1 m	1.6x0.6x1.1 m
Hmotnost	525 kg	525 kg
Hladina hlasitosti	68 dB	68 dB
Napájení *	3 PH 380-480 VAC, 50-60 Hz, 60 Amp (15 kW)	3 PH 380-480 VAC, 50-60 Hz, 60 Amp (15 kW)
Chladicí voda **	5 LPM / 20°C	5 LPM / 20°C

WATERJET QUANTUM/DUAL

Nejnovější technologie použitá při výrobě vysokotlakého čerpadla je založena na revolučním a unikátním konceptu.



ESP-55 DUAL GEN 2

ESP-66 DUAL GEN 2

Max. tlak	3800 bar	4550 bar
Max. spotřeba vody	7,6 LPM	6.4 LPM
Rozměry	1.7x0.9x1.0 m	1.7x0.9x1.0 m
Hmotnost	1020 kg	1020 kg
Hladina hlasitosti	70 dB	70 dB
Napájení *	3 PH 380-480 VAC, 50-60 Hz, 80 Amp (30 kW)	3 PH 380-480 VAC, 50-60 Hz, 80 Amp (30 kW)
Chladicí voda **	7.5 LPM / 20°C	7.5 LPM / 20°C

PŘÍLOHA 8 - 3/3

Katalog firmy Rychlý TOM s.r.o.

PĚTIOSÁ ŘEZACÍ HLAVA PAC-60

*Precizní pětiosá řezací hlava
s technologií přímého pohonu.*



PAC-60™

Přesnost lineárního pohybu	± 0,025 mm
Přesnost otáčivého pohybu	± 0,1°
Maximální rychlost otáčení	720°
Maximální pojezdová rychlost	25 m/s
Maximální řezná rychlost *	12,5 m/s
Zrychlení	400 mm/s ²

PŘÍLOHA 9 - 1/5

Katalog firmy Flow International Corporation



PŘEHLED SYSTÉMŮ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM ŠIROKÉ SPEKTRUM PRODUKTŮ

ŘADA MACH

Špičkový výkon vodního paprsku pro každé použití a rozpočet.



MACH 2

ZÁKLADNÍ STROJ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM

Cenově dostupné výkonné řešení společnosti Flow. Řada Mach 2 nepřekonává pouze nabídku v oboru běžných systémů na řezání vodním paprskem, ale dokonce v této kategorii vítězí.

Rozměry systému Mach 2

Rozsah rozměrů od: 1,3 m x 1,3 m do 4 m x 2 m



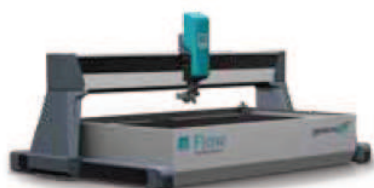
MACH 3

SVĚTOVĚ NEJROZŠÍŘENĚJŠÍ VODNÍ PAPSSEK

Řada Mach 3 si díky instalaci tisíců systémů po celém světě zaslouhuje označení *Světově nejrozšířenější vodní paprsek*.

Rozměry systému Mach 3

Rozsah rozměrů od: 1,3 m x 1,3 m do 7,3 m x 2 m



MACH 4

LÉTA NÁSKOKU

Rychlejší řezání. Rychlejší zisky. Bezkonkurenční pohodlí operátora navržené pro maximální efektivitu. Pokročilá technologie s mnohaletým náskokem.

Rozměry systému Mach 4

Rozsah rozměrů od: 2 m x 2 m do 4 m x 14 m

PŘÍLOHA 9 - 2/5

Katalog firmy Flow International Corporation

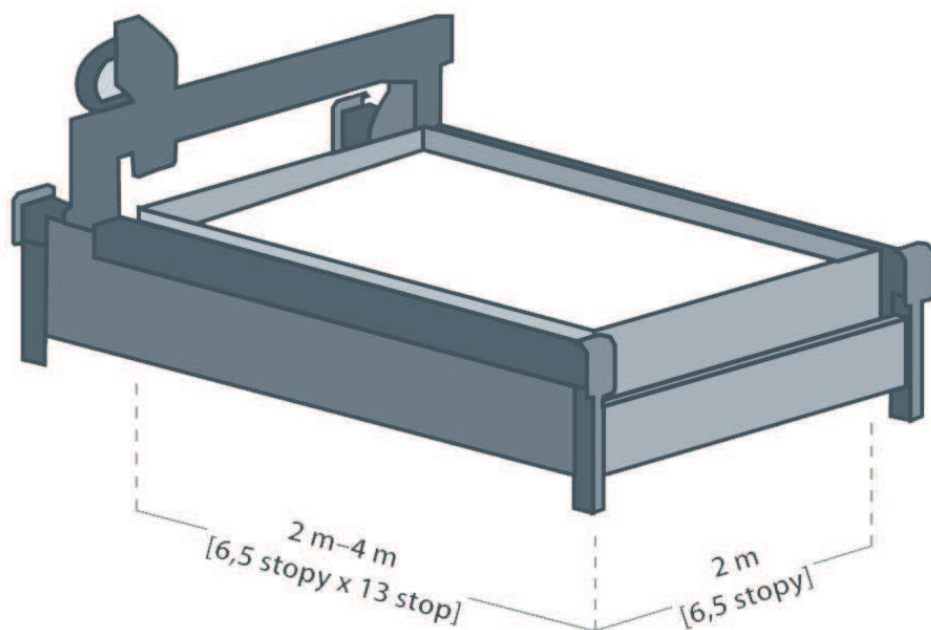
PŘEHLED NABÍZENÝCH PRODUKTŮ

	Mach 2	Mach 3	Mach 4
ULTRA VYSOKOTLAKÉ ČERPADLA			
4 150 barů [60 000 psi] HyPlex® Prime	•	•	•
4 150 barů [60,000 psi] ESL Intensifikátor	•	•	•
6 500 barů [94 000 psi] HyperJet®		•	•
ŘEZACÍ HLAVY			
Čistý vodní paprsek	•	•	•
Standardní abrazivní paprsek	•	•	•
Dynamic Waterjet®		•	•
Dynamic Waterjet XD		•	•
Programovatelná osa Z	•	•	•
DOPLŇKY			
Pohyblivý ovládací panel	•	•	•
Pomůcka pro navrtávání materiálu UltraPierce™	•	•	•
Výškový snímač Dynamic Contour Follower™		•	•
Chlazení	•	•	•
Odkalovací systém pro abrazivo HydroClean™		•	•
Kryt proti stříkající vodě		•	•
Bezpečnostní světelná závora	•	•	•
Nástroj pro vyjímání součástí ProXtract™	•	•	•
Pneumatická vrtací hlava		•	•
Laserový zaměřovač	•	•	•
Balíček pro pohodlí operátora		•	•
Bezdrátový ovladač pro SW FlowTeach™	•	•	
Dálkový ovladač			•
SOFTWARE			
Balíček FlowMaster® CAD/CAM	•	•	•
Balíček FlowXpert™ 3D CAD/CAM		•	•
Převodník FlowCode™ G-Code	•	•	•
FlowNest™	•	•	•
Kompatibilní balíček CATIA		•	•
Software k převodu rastrových a vektorových dat	•	•	•

PŘÍLOHA 9 - 3/5

Katalog firmy Flow International Corporation

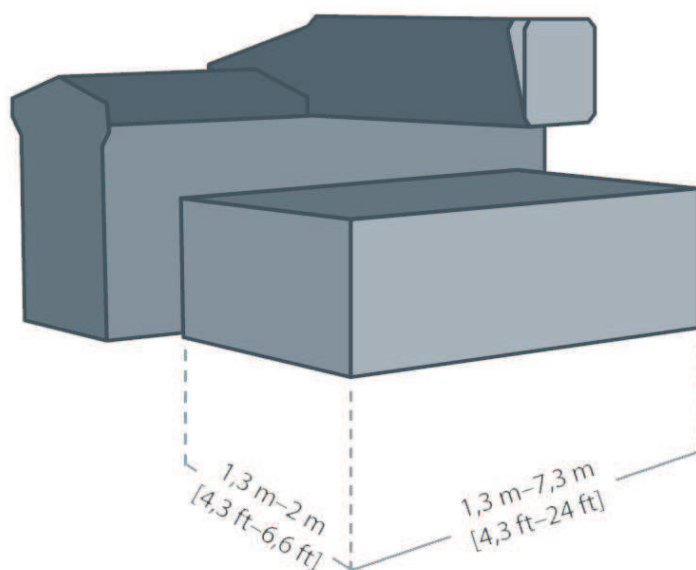
MACH2
c series



Mach 2c – technické údaje	
Přesnost polohování	± 0,125 mm
Rychlost řezání	až 20 m/min
Rychlost pojezdu	až 20 m/min
Přesnost opakovaného najetí	0,050 mm
Zdvih v ose z	152 mm
Rozměry	
2020c	2 m x 2 m
2030c	2 m x 3 m
2040c	2 m x 4 m

PŘÍLOHA 9 - 4/5

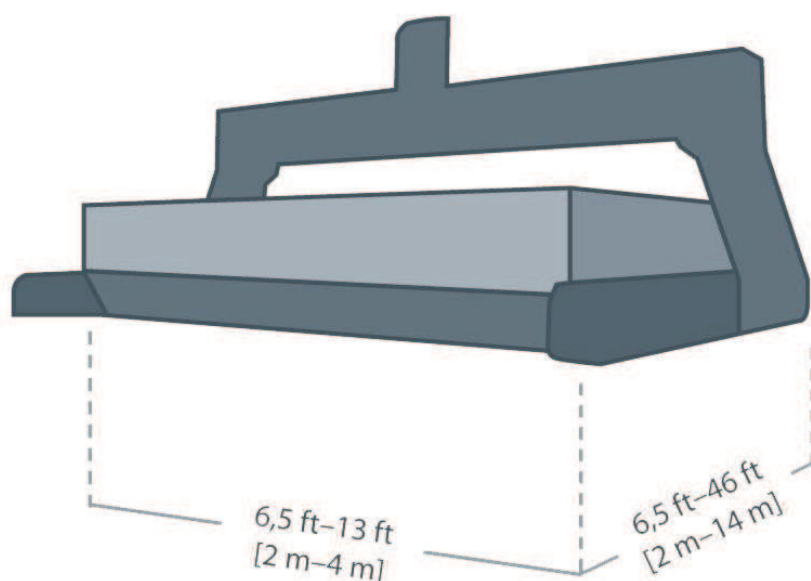
Katalog firmy Flow International Corporation



Specifikace Mach 3	
Lineární přesnost polohování	0,0381 mm / 1 m
Rychlost řezu	7,6 m / min.
Příčná rychlost	12,7 m / min.
Přesnost opakovaného najetí	0,050 mm
Vzdálenost na ose z	178 mm
Rozměry	
1313b	1,3 m x 1,3 m
2513b	2,5 m x 1,3 m
3020b	3 m x 2 m
4020b	4 m x 2 m
7320b	7,3 m x 2 m

PŘÍLOHA 9 - 5/5

Katalog firmy Flow International Corporation



Specifikace Mach 4		
Lineární přesnost polohování	0,001 in/3 ft	0,025 mm/m
Přesnost opakovaného najetí	0,001 in	0,025 mm
Maximální rychlost	1 400 ipm	36 m / min.
Zdvih v ose z	12 in	305 mm
Portál (osa x)	6,5 ft, 10 ft, 13 ft	2 m, 3 m, 4 m
Základna (osa y)	6,5 ft-46 ft	2 m-14 m (přírůstky po 1m)