**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

***ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE***

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

# OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM

**2017**

**TOMÁŠ ROSSÝ**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rossý** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **419933**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Obrábění vodním paprskem**

Název bakalářské práce anglicky:

**Water jet machining**

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metod obrábění vodním paprskem
2. Oblasti využití obrábění vodním paprskem
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Novák Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

| Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky) |
|---|---|---|

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

28.4.2017 — Datum převzetí zadání

Rossý — Podpis studenta



© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Tomáš Rossý
2017

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

..... .....

Datum Tomáš Rossý

# PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

# ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá obráběním vodním paprskem. Zaměřuje se na jeho charakteristiku a typy metod, které při obrábění používá. Dále popisuje oblasti, kde se obrábění vodním paprskem využívá. Nakonec tuto technologii porovná s ostatními výrobními metodami.

**Klíčová slova**

vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, řezání kapalinovým paprskem

# ANNOTATION

This thesis deals with water jet cutting. It focuses on its characteristics and the types of methods is used when machining It also describes the areas where water jet cutting is used. Finally, it compares this technology with other manufacturing methods.

**Key words**

water jet, abrasive water jet, liquid jet cutting

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| Zkratka / Symbol | Jednotka | Popis |
|---|---|---|
| AWJM | - | obrábění abrazivním paprskem vody |
| CNC | - | číslicové řízený systém |
| ⌀ d | [mm] | průměr trysky |
| EBM | - | obrábění paprskem elektronů |
| EDM | - | elektroerozivní obrábění |
| l | [mm] | vzdálenost od povrchu obrobku |
| L | [db] | hladina intenzity zvuku |
| mach | - | rychlost zvuku |
| p | [MPa; bar] | pracovní tlak |
| P | [kW] | elektrický výkon |
| PCB | - | deska plošných spojů |
| PE | - | polyetylen |
| PP | - | polypropylen |
| $Q_V$ | [l/min] | objemový průtok kapaliny |
| Ra | [μm] | průměrná aritmetická úchylka profilu |
| t | [h] | životnost trysky |
| UHP | - | velmi vysoký tlak |
| v | [m/min] | řezná rychlost |
| v | [m/min] | rychlost proudění |
| $v_f$ | [mm/min] | rychlost posuvu |
| WJM | - | obrábění paprskem vody |

# OBSAH

PROHLÁŠENÍ ..... 3
PODĚKOVÁNÍ ..... 4
ANOTACE ..... 5
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ ..... 6
1 POPIS A CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE ..... 9
1.1 Historie ..... 9
1.2 Princip obrábění vodním paprskem ..... 10
1.3 Princip obrábění abrazivním vodním paprskem ..... 10
1.4 Obráběcí systém WJM ..... 12
1.5 Obráběcí systém AWJM ..... 15
1.6 Kvalita povrchu řezu ..... 18
2 OBLASTI VYUŽITÍ ..... 19
2.1 Obráběné materiály ..... 19
2.2 Technologie WJM a AWJM ..... 20
2.3 Výhody a nevýhody WJM a AWJM ..... 23
3 POROVNÁNÍ OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM S OSTATNÍMI VÝROBNÍMI METODAMI ..... 25
3.1 Porovnání nekonvenčních technologií ..... 25
ZÁVĚR ..... 28

# ÚVOD

Obrábění vodním paprskem patří mezi nekonvenční metody obrábění. Tyto metody odebírají materiál mechanickým, elektrotepelným, elektrochemickým nebo chemickým účinkem. Na materiál nepůsobí silou a nevznikají u nich klasické třísky objevující se při obrábění konvenčními metodami. Obecně se nekonvenční metody obrábění používají tam, kde z nějakého důvodu nelze použít metody konvenční.

Tato bakalářská práce ukazuje historii vzniku a postupný vývoj obrábění vodním paprskem. Popisuje dva základní způsoby použití vodního paprsku, a to čistý vodní paprsek a vodní paprskem s abrazivem. V práci je popsáno zařízení pro obrábění vodním paprskem včetně principu funkcí jednotlivých jeho částí spolu s používanými nástroji. U oblastí využití se zabývá druhy obrábění, ke kterým lze vodní paprsek použít a materiály, které jsou pro obrábění vodním paprsek vhodné a ty které ne. Obrábění vodním paprskem se používá napříč všemi oblastmi průmyslu. V práci je také ukázáno porovnání vodního paprsku s dalšími výrobními metodami.

# 1 POPIS A CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE

## 1.1 Historie

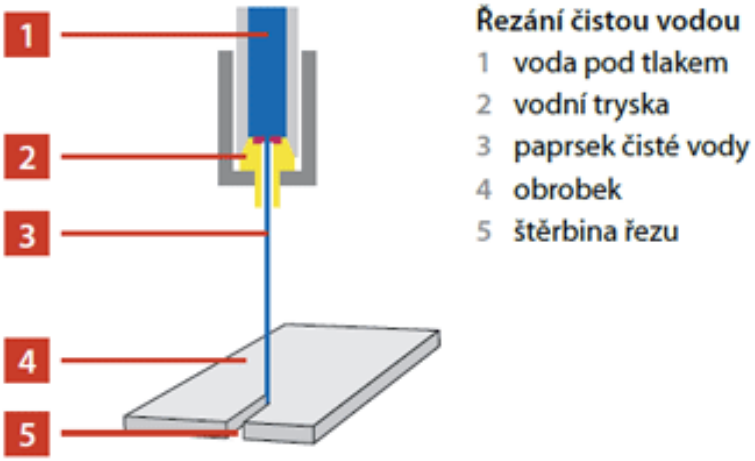
Historie řezání vodním paprskem sahá až do 19. století. Jako první ho za použití nízkého tlaku začali využívat kalifornští zlatokopové kolem roku 1870. Vodním paprskem odstraňovali nánosy písku a vrstvy kamení [1].

Obr. 1.1 Těžba zlata na potoce Bonanza Creek v roce 1907 [5]

Ve dvacátých letech 19. století se začal vodní paprsek aplikovat ve stavebnictví při řezání kamene, uhlí a dřeva. Použité trysky dosahovaly velkých rychlostí toku za tlaku několika desítek až stovek barů. V Rusku byl vodní paprsek poprvé patentován pro vrtání děr v báňském průmyslu, kde vrtal otvory v uhelných slojích. Dr. Norman Franz považovaný za „Otce vodního paprsku“ jako první použil v padesátých letech velmi vysoký tlak (UHP), při kterém musí vodní paprsek minimálně dosáhnout tlaku 207 MPa. Technologie řezání různorodých materiálů vodním či hydroabrazivním paprskem byla vyvíjena v 70. a 80. letech 20. století firmou FLOW International (USA) z počátku především pro vojenský a kosmický program. Již ve 2. polovině 80. let se technologie široce uplatňovala na americkém a potom i evropském teritoriu. Dnes je celosvětově využívána ve všech oblastech průmyslu [1, 2, 3, 4].

## 1.2 Princip obrábění vodním paprskem

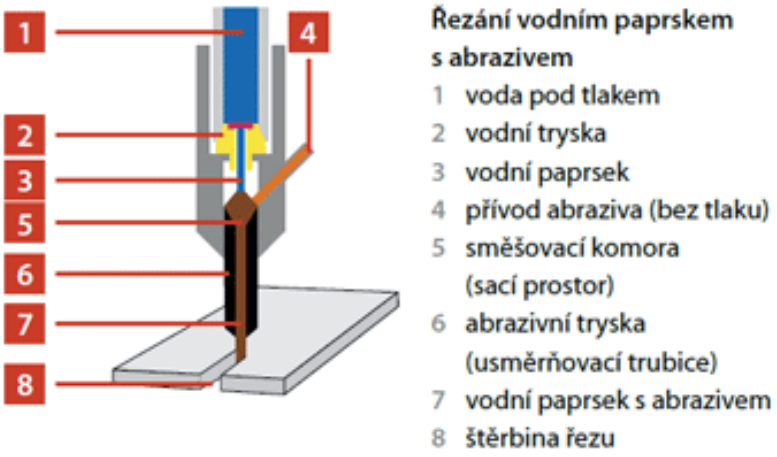
Klíčovým prvkem pro obrábění vodním paprskem (WJM) je proud vody, který se pohybuje rychlostí okolo 900 m/s (přibližně Mach 3). Když proud dopadá na povrch obrobku, erozivní síla vody rychle odstraňuje materiál. Voda v tomto případě působí jako pila a řeže úzkou drážku v materiálu obrobku. Kinetická energie vodního paprsku je po nárazu na pracovní plochu snížena na nulu. Většina kinetické energie vodního paprsku se přemění na tlakovou energii [6].



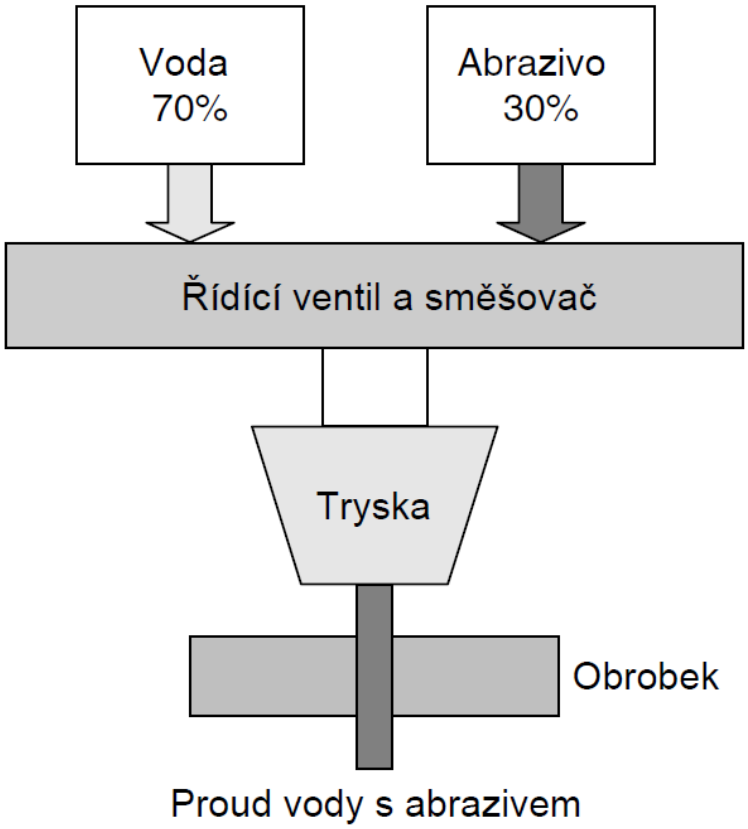

Obr. 1.2 Řezání čistou vodou [7]

## 1.3 Princip obrábění abrazivním vodním paprskem

WJM je vhodný pro řezání plastů, potravin s gumovou izolace a většiny textilů. Tvrdší materiály, jako je sklo, keramika, beton a tvrdé kompozitu lze řezat přidáním abraziva do proudu vody tedy abrazivním obráběním vodním paprskem (AWJM), který byl poprvé vyvinut v roce 1974 k čištění kovu před jeho povrchovou úpravou. Přidání brusiva do vodního paprsku zvyšuje rychlost odstraňování materiálu a vytváří řezné rychlosti mezi 51 a 460 mm/min. Obecně platí, že AWJM řeže 10krát rychleji než konvenční metody obrábění kompozitních materiálů. AWJM používá nízký tlak 500-4150 barů pro urychlení velkého množství vody (70 procent) a abrazivní směsi (30 procent) až do rychlosti 1000 m/s (obr 1.4). Jako abrazivní materiály se obvykle používají karbidy křemíku, korund, a skleněné kuličky o velikosti zrna 10 až 150 µm. Otřepy vzniklé po broušení jsou odstraněny erozním účinkem. Zavedení stlačeného vzduchu do vodního paprsku zlepšuje odstraňování otřepů[6].



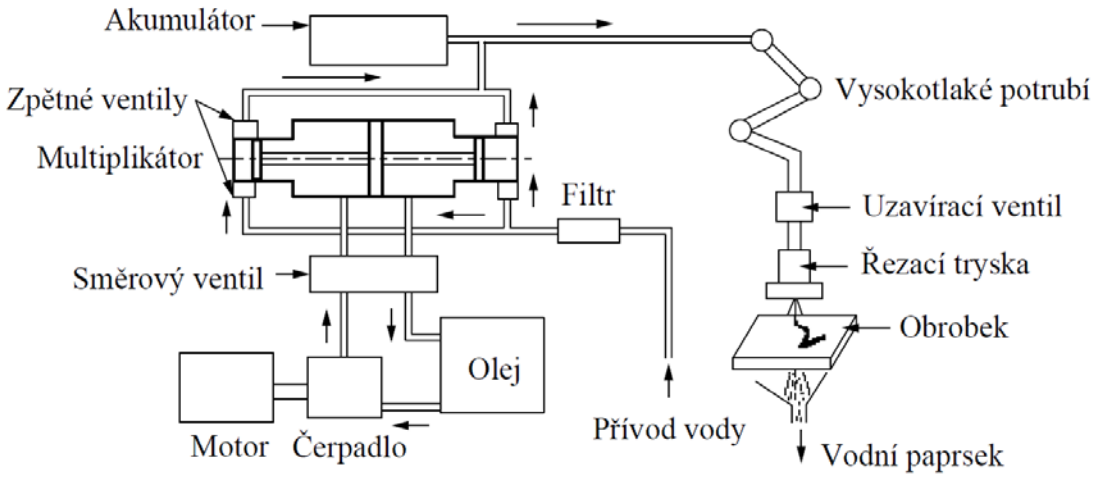

Obr. 1.3 Řezání vodním paprskem s abrazivem [7]




Obr. 1.4 Princip AWJM [6]

## 1.4 Obráběcí systém WJM

Obrázek 1.5 ukazuje WJM systém a hlavní části, z nichž je složen.




Obr. 1.5 Schéma systému WJM [6]

### Hydraulické čerpadlo

Hydraulické čerpadlo je napájeno z elektromotoru o výkonu 12-110 kW a dodává olej při tlacích okolo 117 barů s cílem řídit vratný pohyb plunžrového čerpadla, která se nazývá *multiplikátor*. Hydraulické čerpadlo nabízí úplnou flexibilitu pro řezání vodním paprskem a pro čistící použití. Podporuje jednu nebo více řezných stanic pro zvýšenou produktivitu obrábění [6, 8].

### Multiplikátor

Multiplikátor přijímá vodu při nízkém tlaku (obvykle 4 bary) a vypouští ji prostřednictvím *akumulátoru*, při tlacích vyšších než 3800 barů. Multiplikátor přeměňuje energii z hydraulické kapaliny s nízkým tlakem na vodu o vysokém tlaku. Hydraulický systém zajišťuje dodávání kapaliny na vratně se pohybující píst ve střední části multiplikátoru. Koncový spínač, který se nachází na každém konci pohybu pístu, signalizuje elektronickému ovládání k posunu řídicího ventilu a k otáčení směru pohybu pístu. Zesilovač s plunžrem na každé straně pístu, vytváří tlak v obou směrech. V okamžiku, kdy je jedna strana zesilovače ve vstupním zdvihu, se na opačné straně vytváří výstup vysokého tlaku. Při vstupním zdvihu plunžru, filtrovaná voda vstupuje

do vysokotlakého válce přes sestavu zpětného ventilu. Poté, co plunžr obrátí směr, voda je stlačena a vystupuje při vysokém tlaku [6].

**Akumulátor**

Akumulátor udržuje nepřetržitý tok vody o vysokém tlaku a eliminuje kolísání tlaku. Spoléhá se na stlačitelnost vody (12 procent při 3800 barech), aby se udržel jednotný výstupní tlak a rychlost vodního paprsku, když píst zesilovače mění svůj směr pohybu [6].

**Vysokotlaké hadice**

Vysokotlaká hadice dopravuje pod tlakem vodu do řezné hlavy. Běžné průměry hadic jsou 6 až 14 mm. Zařízení umožňuje flexibilní pohyb řezné hlavy. Řezná akce je řízena buď ručně nebo prostřednictvím dálkového ovládání ventilu [6].

**Lapač**

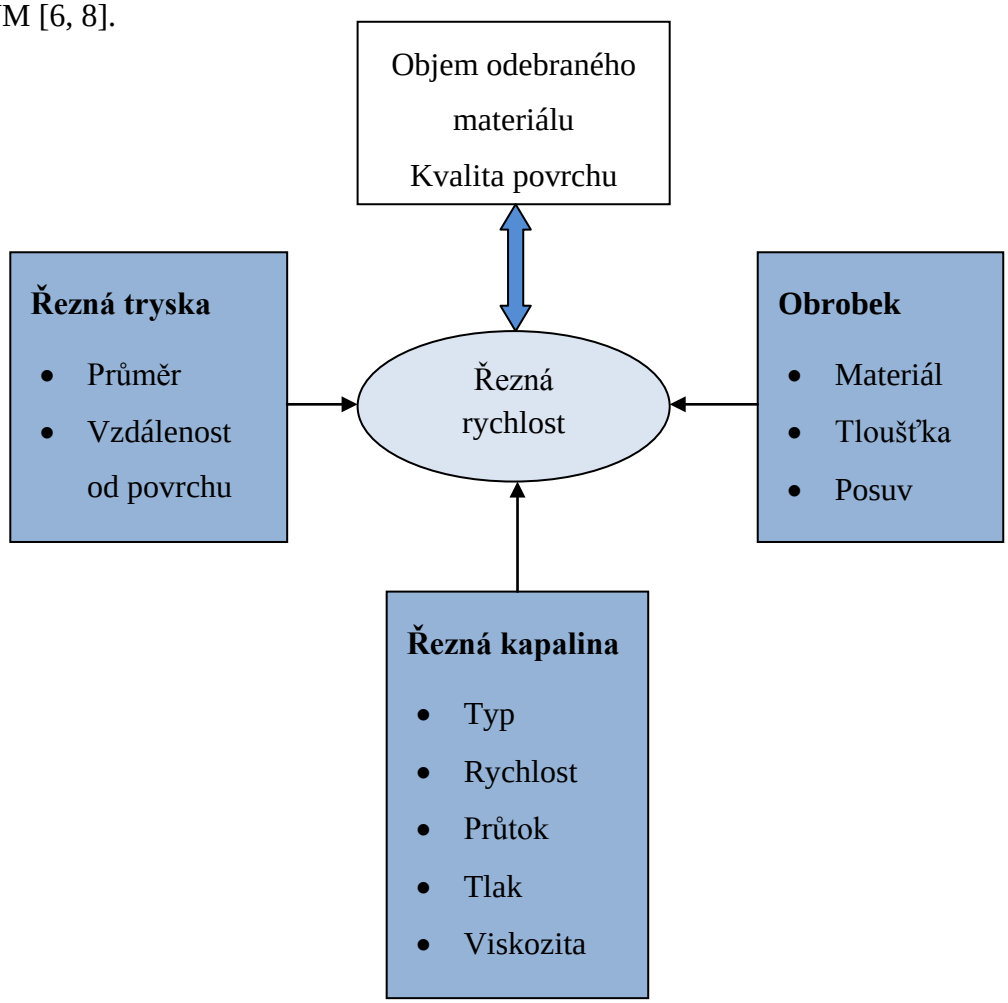
Lapač působí jako zásobník pro shromažďování obráběných nečistot unášených v proudu vody. Také snižuje hladinu hluku [105 decibelů (dB)] a snižuje rychlost proudu vody z Mach 3 na podzvukovou rychlost [6].

**Řezná tryska**

Tryska poskytuje koherentní proud vody pro optimální řezání materiálu s nízkou hustotou a měkkého materiálu, které jsou považován konvenčními metodami za neobrobitelné. Trysky jsou obvykle vyrobeny ze syntetického safíru. Životnost trysky je asi 200 h, než je poškozena částicemi nečistot a nashromážděnými usazeninami minerálů na otvoru v důsledku erozivní tvrdosti vody. Delší životnost trysky lze získat vícestupňovou filtrací, která odstraní nežádoucí pevné látky o velikosti větší než 0,45 µm. Kompaktní konstrukce hlavy pro řezání vodním paprskem podporuje integraci systémů řízení pohybu od dvouosých (XY) stolů až po sofistikovaná víceosá robotická zařízení. Tryska má obvykle průměr 0,1 - 0,3 mm. Vzdálenost mezi tryskou a povrchem obrobku bývá 2,5 až 6 mm. U materiálů použitých pro desky s plošnými spoji, může být zvýšena na 13 až 19 mm. Při větší vzdálenosti nastává pokles hloubky řezu. Při řezání vláknových kompozitů zvýšení rychlosti obrábění a použití malého průměru trysky zvyšuje šířku poškozené vrstvy [6].

**Řezná kapalina**

Používané tlaky jsou 150 až 1000 MPa při průtoku kapaliny 1,2 až 5,2 l/min. Pro daný průměr trysky zvýšení tlaku umožňuje použít větší výkon v obráběcím procesu, tím zvýšit hloubku řezu. Rychlosti proudu se pohybují mezi 540 až 1400 m/s. Kvalita řezu se zvyšuje při vyšších tlacích, rozšířením průměru paprsku a snížením rychlosti pohybu. Za takových podmínek lze řezat materiály větších tlouštěk a hustot. Čím větší je tlak kapaliny, tím větší bude hloubka řezu. Použitá kapalina musí mít nízkou viskozitu, aby se minimalizovaly ztráty energie a být nekorozní, netoxická, běžně dostupná a levná. Voda je nejběžnější používaná tekutina, do které se přidávají přísady jako jsou alkoholy, ropné produkty a glycerol, které se mohou rozpustit ve vodě, aby se zlepšily vlastnosti kapaliny. Voda se běžně používá pro řezání legovaných ocelí. Alkohol se používá pro řezání masa, zatímco oleje na vaření jsou doporučeny pro řezání zmrazených potravin. Obrázek 1.6 shrnuje různé parametry, které ovlivňují výkonnost WJM [6, 8].




Obr. 1.6 Parametry ovlivňující řezání WJM [6]

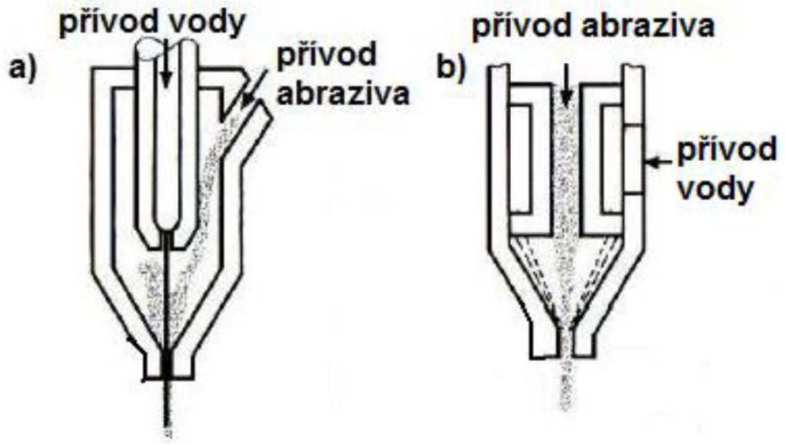
**CNC stůl**

Řezaný materiál se upevňuje na stůl. Přesná mechanická konstrukce s kvalitním řídícím systémem zaručuje vysokou kvalitu a přesnost řezu. CNC sůl se skládá z portálového souřadnicového systému a vany (*lapače*). Zařízení má vysokou dynamiku díky nízko osazenému portálu, digitálně řízeným stejnosměrným servomotorům s bezvůlovou převodovkou a precizním nerezovým lineárním vedením. Veškeré lineární osy jsou zakrytovány kvůli zvýšení životnosti stroje při zachování přesnosti. Používané rozměry stolů jsou od 1,3 x 1,3 m po 5 x 24 m [3, 8].

Obr. 1.7 CNC zařízení pro řezání vodním paprskem [3]

## 1.5 Obráběcí systém AWJM

U AWJM systému proud vody zrychluje abrazivní částice, které způsobují odstraňování materiálu. Poté, co je vytvořen čistý proud vody, se přidá brusivo buď formou injekce (a) nebo suspenze (b) znázorněné na obr. 1.8. Důležitými parametry brusiva jsou struktury materiálu, tvrdost, mechanické vlastnosti, tvar zrn, velikost zrn a distribuce. Oproti WJM používá AWJM jinou řeznou hlavu a navíc zásobník abraziva [6].

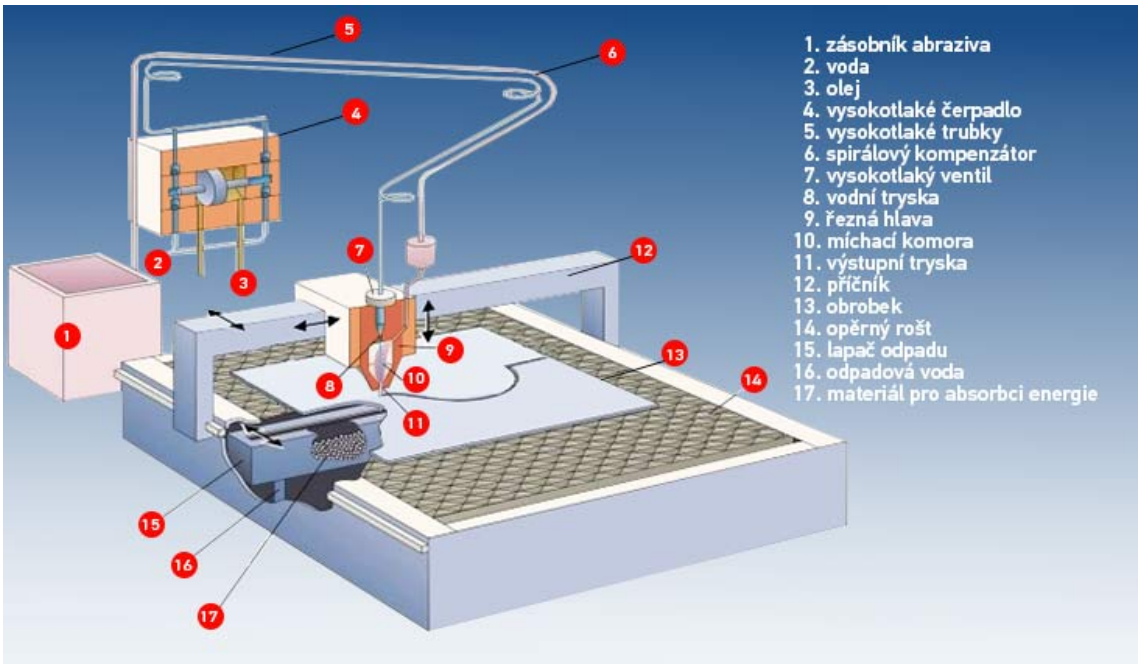



Obr. 1.8 Typy trysek pro přívod abraziva [9]
a) formou injekce, b) formou suspenze

Typické parametry obrábění zahrnují tlak, průměr trysky, vzdálenost od obrobku, typ abraziva a posuv obrobku. Abrazivní vodní paprsek prořízne betonové desky o tloušťce 356,6 mm nebo ocelové desky o tloušťce 76,6 mm při rychlosti 38 mm/min během jednoho pohybu. Produkovaná drsnost povrchu Ra se pohybuje mezi 3,8 a 6,4 μm, přičemž lze dosáhnout tolerancí ± 0,13 mm. Jako abrazivo se obvykle používá přírodní granát dále pak křemičitý písek, korundová nebo SiC zrna [6].

Při obrábění skla dosáhne řezné rychlosti 4 až 6krát větší než pro kovy. Drsnost povrchu je závislá na materiálu obrobku, velikosti zrna, a typu brusiva. Materiál s vysokou rychlostí odstraňování vytváří velkou drsnost povrchu. Snížení drsnosti povrchu při menší velikosti zrna souvisí s menší hloubkou řezu a nedeformovaným průřezem třísky [6].

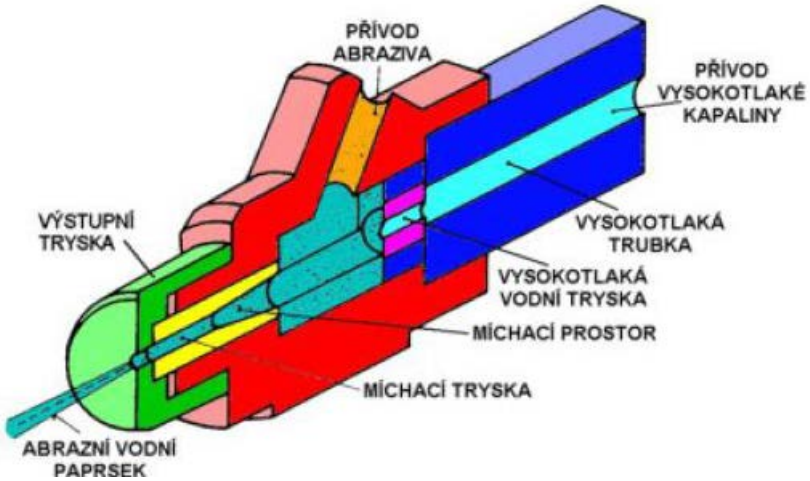
Transportní kapalina sestávající z vody s antikorozními přísadami má mnohem větší hustotu než vzduch. To přispívá k vyššímu zrychlení zrn s následnou vyšší rychlostí zrn a zvýšenou rychlostí odstraňování kovu. Navíc se transportní kapalina rozprostírá nad povrchem, vyplňuje dutiny a vytváří fólii, která znemožňuje nárazové působení zrn [6].




Obr. 1.9 Systém AWJM [10]

## Řezná hlava

V posledních letech se začíná používat řezná hlava s integrovanou diamantovou tryskou. Oproti ostatním výrobkům nemá tato řezná hlava diamantovou trysku pevně vestavěnou v tělese řezné hlavy, ale je osazena v přesně lícovaném nosiči, takže při poškození nebo skončení životnosti diamantové vodní trysky není nutné měnit celou řeznou hlavu, ale vymění se pouze samotná tryska s nosičem. Výhodou diamantových trysek je jejich dlouhá životnost (min. 500 provozních hodin, v průměru prakticky 1 000 hodin – v závislosti na kvalitě a tvrdosti vody), další výhodou je větší a delší soudržnost paprsku a tím lepší řezací parametry, zvýšení produktivity a nižší provozní náklady [7].




Obr. 1.10 Schéma řezné hlavy AWJM [11]

## 1.6 Kvalita povrchu řezu

Kvalita povrchu řezu se dělí do pěti základních skupin a závisí na rychlosti řezání. Pro vysoké rychlosti posuvu se zvyšuje zakřivení a po celé hloubce řezu jsou viditelné rýhy.

Obr. 2.1 Kvalitativní stupně řezu [10]

Tab. 2.2 Stupně kvality řezných ploch [2, 10]

| Stupeň kvality | Charakter řezu | Drsnost horní | Drsnost spodní | Přesnost horní | Přesnost horní | Úkos |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Q5 | Nejlepší | pod 3,2 | cca 3,2 | ±0,1 | ±0,1 | Většinou mírný podřez |
| Q4 | Kvalitní | cca 3,2 | cca 6,3 | ±0,1 | ±0,2 | Většinou minimální |
| Q3 | Střední | cca 4,0 | do 12,5 | ±0,15 | Podle materiálu | Podle materiálu |
| Q2 | Hluboký | cca 4,0 | do 25 | ±0,2 | Podle materiálu | Podle materiálu |
| Q1 | Dělící | 4,0 – 6,3 | do 40 | ±0,2 | Výrazně nepřesné | Výrazný úkos do + |

Hodnoty jsou pouze orientační a dle typu materiálu se mohou lišit, Hodnoty drsnosti jsou Ra

# 2 OBLASTI VYUŽITÍ

## 2.1 Obráběné materiály

Křehké materiály se budou lámat, zatímco tvárné půjdou řezat dobře. Tloušťky těchto materiálů jsou v rozsahu od 0,8 do 25 mm nebo více. Tabulka 2.1 znázorňuje rychlosti posuvu pro různé tloušťky materiálů [6].

Tab. 2.1 Rychlosti posuvu pro WJM [6]

| Materiál | Tloušťka [mm] | Rychlost posuvu [m/min] |
|---|---|---|
| Kůže | 2,2 | 20 |
| Vinylchlorid | 3,0 | 0,5 |
| Polyester | 2,0 | 150 |
| Kevlar | 3,0 | 3 |
| Grafit | 2,3 | 5 |
| Sádrokarton | 10,0 | 6 |
| Lepenka | 7,0 | 200 |
| Papír | 2,0 | 120 |
| Překližka | 6,0 | 1 |

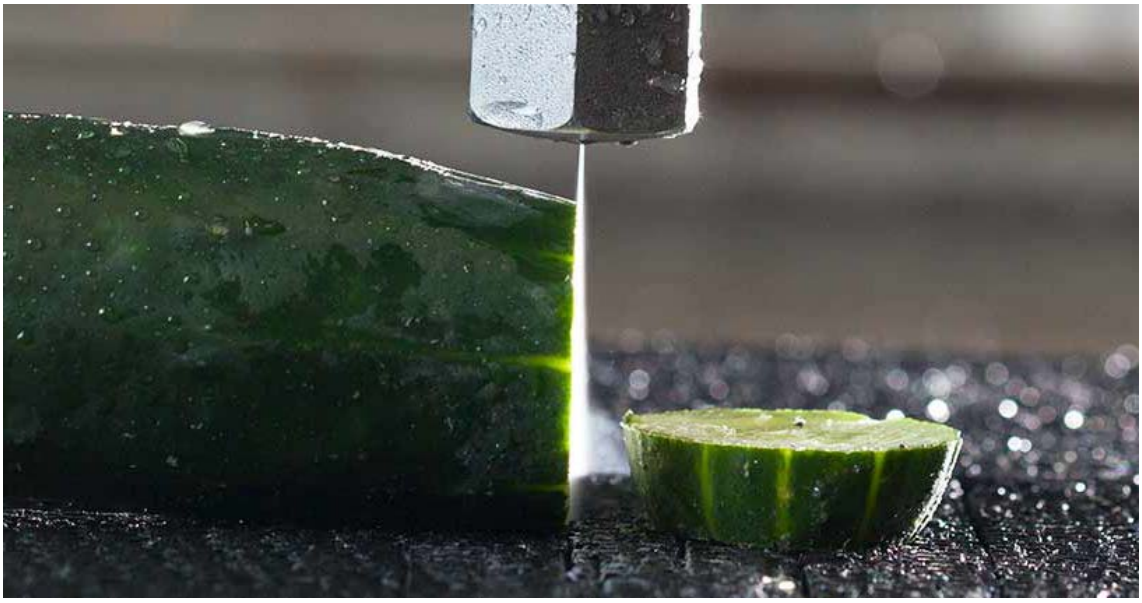
WJM se používá na kovy, papír, tkaniny, kůže, gumy, umělé hmoty, potraviny a keramiku. Jedná se o univerzální a efektivní proces řezání, který může být použit jako alternativa k tradičním metodám obrábění. Zcela eliminuje tepelně ovlivněné zóny, toxické výpary, vytvrzování a tepelné namáhání. Jedná se o nejflexibilnější a nejúčinnější čistící metodu, která je k dispozici pro různé průmyslové potřeby. Obvykle má řezaný povrch pískovaný vzhled. U tvrdších materiálů se vzniká lepší okrajový povrch [6, 10].

## 2.2 Technologie WJM a AWJM

### Řezání

WJM má omezení na sklolaminát a vlnité dřevo. Obrázek 2.2 ukazuje typický příklad řezání kamene vodním paprskem, zatímco Obr. 2.3 ukazuje typické použití v potravinářském průmyslu [6].

Obr. 2.1 Řezání kamene [10]



Obr. 2.2 Řezání potravin [3]

**Vrtání**

Vrtání otvorů s přesným úhlem a tvarováním v různých materiálech, pro které jsou jiné procesy, jako je EDM nebo EBM, příliš nákladné nebo příliš pomalé [6].

**Obrábění vláknových kompozitů**

Tepelné poškození materiálu je u nich zanedbatelné. Efektivně vedený nástroj přesně řeže obrysy. Hlavní nevýhodou je deformace vodního paprsku vlákny uloženými v matrici, který vyčnívají po obrábění. Dosažitelná řezná rychlost závisí na požadované kvalitě povrchu. Tabulka 2.3 ukazuje omezené rychlosti řezání pro řezání vodním paprskem vláknových kompozitů [6].

Tab. 2.3 Řezné rychlosti WJM pro řezání vláknových kompozitů [6]

| Materiál | Tloušťka [mm] | Rychlost posuvu [m/min] |
|---|---|---|
| Laminát | 2,2 | 20 |
| | 3,0 | 0,5 |
| | 5,0 | 150 |
| Aramid | 1,0 | 3 |
| | 2,0 | 5 |

**Řezání hornin**

Při pokusu McGeougha (1988) vodní paprsek řezal 51 mm hlubokou drážku v žule pomocí dvou oscilačních trysek při 275 MPa a 14 průchodech za rychlosti posuvu 25,4 mm/s McGeough (1988). Oscilační tryskový systém, pracující při stejné rychlosti posuvu a tlaku 172 MPa, s nastavenou vzdáleností odstupu každým průchodem byl použit k vyříznutí 178 mm hluboké štěrbiny v pískovci[6].

**Odstraňování otřepů**

Vodním paprskem se odstraňují otřepy vzniklé po výrobních operacích závitování, lapování, vrtání nebo broušení. Nemění se vlastnosti materiálu, rozměry ani geometrie dílu. Rovněž jsou zachovány přímé úhly a kvalita povrchu. Lze jednoduše čistit i vnitřní oblasti, které jsou obtížně ručně dosažitelné. Čistění lze použít pro libovolný kov, od měkkého hliníku po nejtvrdší titan [3].

**Řezání desek plošných spojů**

Použitím vodního paprsku s malým průměrem, který je umístěn v blízkosti hrany, může být deska s plošnými spoji (PCB) řezána rychlostí přesahující 8 m/min s přesností ± 0,13 mm [6].

**Povrchové úpravy**

Využívá se v mnoha aplikacích včetně [6]:

- Odstranění nánosů a usazenin bez toxických chemikálií, což eliminuje nákladné čištění a problémy s likvidací
- Čištění povrchu trubek a odlitků, dekorativní úpravy, jaderná dekontaminace, čištění potravin, odmašťování, leštění, příprava na přesnou kontrolu a povrchové strukturování
- Ekonomická příprava povrchu a odstraňování povlaku
- Odstranění koroze, zbytků postřiku, rozpustných solí, chemikálií a poškození povrchu před nanášením nátěru nebo nátěrem.

**Odizolování drátů**

Tato metoda může odstraňovat izolační materiál z drátů bez poškození kovu nebo odebírat cínování na měděných drátů. Doba zpracování může být snížena na asi 20 procent oproti manuální metodě odizolování [6].

Tab. 2.4 Aplikace vodního paprsku v průmyslu [12]

| **PRŮMYSL** | **APLIKACE** |
|---|---|
| **Automobilový** | Dělení 3D součástek (např: nádrže, nárazníky, karosérie, přístrojové desky, opěrky hlavy a rukou, čalounění a interiérové materiály na bázi PVC, kompozity, polyuretáty, fólie, gumy, koberce, keramické materiály, těsnění a další mechanické součástky). |
| **Důlní** | Stavební a důlní aplikace, vrtné soustavy pro vrty v horninách, vrty pro uložení kabelů systém FLOW-MOLE. |
| **Elektrotechnický** | Dělení plošných spojů, elektroizolačních materiálů, skla a keramiky. |
| **Chemický** | Obrábění výbušných látek, plastických hmot, těžkoobrobitelných materiálů, kompozitů. |
| **Kamenický** | Dělení různých druhů kamene, mozaiky, dlaždice, dekorace. |
| **Kosmický a letecký** | Dělení keramiky, kompozitů, titanu, interiérových panelů, |

| | |
|---|---|
| | hliníkových částí skeletu letadel. |
| **Medicína** | Operace mozkových nádorů, klinické a experimentání aplikace. |
| **Metalurgický** | Metalografické rozbory, čištění odlitků. |
| **Obuvnický** | Dělení kůží, plastických hmot. |
| **Papírenský** | Řezání papíru, buničiny, novinového papíru, papírových plen. |
| **Potravinářský** | Dělení ryb, hub, tabáku, ovoce, zeleniny, čokolády, zákusků a sýra. |
| **Sklářský** | Dělení skla, plexiskla, matování skla. |
| **Stavební** | Dělení izolačních materiálů, polystyrénu, sklovitých materiálů, azbestu, plastbetonu, keramiky. |
| **Strojní** | Výroba metalografických vzorků, obrábění rotačních součástek, čištění povrchů, soustružení, frézování. |
| **Textilní** | Dělení jemných textilií s maximální úsporou vysokokvalitního polovýrobku. |
| **Vojenský** | Odminování, demilitarizace (zneškodňování raketových munic, binárních chemických zbraní, a jednosložkových chemických zbraní), dělení pancéřů pro obrněná vozidla. |
| **Mobilní aplikace** | <u>Dělení:</u><br>• dělení železobetonu do hloubky 600 mm včetně ocelové výztuže,<br>• dělení ocelových desek pancíře a ušlechtilých ocelí do hloubky 400 mm,<br>• dělení ocelových nádob a potrubí,<br>• vyřezávání otvorů do ocelových nádob a betonových konstrukcí. |
| | <u>Úpravy povrchu:</u><br>• odstraňování rzi a barev z ocelových konstrukcí,<br>• odstraňování barev a ochranných nátěrů z betonových konstrukcí,<br>• odstraňování degradovaných vrstev betonu,<br>• čištění povrchů - fasády, omítky, studně, kulturní památky,<br>• předsanační úpravy komínů, chladicích věží, pilířů mostů. |

## 2.3 Výhody a nevýhody WJM a AWJM

**Výhody** [6, 13, 14]**:**

- tepelně neovlivňuje řezaný materiál
- lze začít řezat na libovolném místě bez potřeby předvrtat otvory
- zvlhčení materiálu obrobku je minimální
- ve zbytku obrobku nedochází k žádné deformaci
- vytváří minimum otřepů

- extrémně přesná geometrie
- obvykle velmi vysoká řezná rychlost (do 20m/min)
- extrémně nízké řezné síly
- jednoduché uchycení obrobků
- tato metoda je šetrná k životnímu prostředí
- nevzniká polétavý prach z děleného materiálu
- velmi malá ztráta materiálu způsobena řezáním
- neporušuje předchozí povrchové úpravy materiálu (broušení, leštění)
- je ideální pro hrubování materiálu s téměř přesným tvarem
- umožňuje řezání měkkých materiálů až do 100mm tloušťky (umělou hmotu, PP, PE, gumu, různé pěnové materiály, izolační materiály – tepelné izolační materiály)
- řeže velmi tlusté materiály, jako například 383 mm titanu

**Nevýhody** [6, 13, 14]:

- kovové materiály nutno vhodně ošetřit
- delší vysoušení u nasákavých materiálů
- Není vhodný pro hromadnou výrobu z důvodu vysokých požadavků na údržbu.

# 3 POROVNÁNÍ OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM S OSTATNÍMI VÝROBNÍMI METODAMI

## 3.1 Porovnání nekonvenčních technologií

Z nekonvenčních technologií se nejčastěji pro řezání materiálů používá laser, plazma a vodní paprsek.

**Princip řezání laserem**

„Řezání laserem je tavný proces, kdy soustředěný paprsek laserového světla roztaví materiál a laserový plyn ho vyfoukne z řezné mezery“ [3].

**Princip řezání plazmou**

„Řezání plazmou je tavný proces, kdy se materiál pomocí oblouku vysokoteplotního ionizovaného plynu roztaví a vyfoukne z řezné mezery“ [3].

Tab. 3.1 Srovnání paprskových technologií [15]

| Posuzovaný parametr | Typ paprskové metody | | |
|---|---|---|---|
| | **LASER (LBM)** | **PLAZMA (PAM)** | **VODA (AWJ)** |
| **Dělitelné materiály** | Všechny kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí | Železné a neželezné kovy | Téměř všechny materiály |
| **Teplota řezu** | Teplý řez | Horký řez | Studený řez |
| **Vliv teploty řezu na materiál** | Malý | Velký | Žádný |
| **Kolmost řezu** | Mírný sklon | Velký nepravidelný sklon | Mírný sklon |
| **Výronek na řezné spáře** | Většinou bez výronku | Většinou bez výronku | Vždy bez výronku |
| **Kvalita řezané plochy** | Malá drsnost | Výrazné vlny (striace) | Malá drsnost nahoře, dole vlny (dle řezné rychlosti a tloušťky řezaného materiálu) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Závislost tvrdosti řezaného mat. na rychlosti** | Žádná | Žádná | Tvrdost mírně snižuje řeznou rychlost |
| **Řezání plastů** | Omezeně | Nelze | Vhodné |
| **Řezání kompozitních materiálu** | Možno (pokud mají složky stejnou teplotu tav.) | Možno (pokud jsou na bázi kovů) | Vhodné |
| **Řezání keramiky, skla, kamene** | Omezeně | Nelze | Vhodné |
| **Reliéfní obrábění** | Možné | Nelze | Omezeně |
| **Velikost mat.** | Velké i malé dílce | Velké dílce | Velké i malé dílce |
| **Tloušťka materiálu standardní** | Malé a střední polotovary do 25 mm | Střední a silné polotovary | Malé i velké tloušťky |
| **Vliv na pracovní prostředí** | Malé exhalace, hluk | Velké exhalace, hluk | Hluk |
| **Jakost povrchu Ra (cca, měřitelné u malých tlouštěk)** | Až 3,2 | 12,4 | Až 3,2 |
| **Běžné tolerance rozměrů (cca, u malých tlouštěk)** | Až ±0,1 | Velký rozptyl až ±0,25 | ±0,1 |

**Ukázky výrobků**

Na obrázcích 3.1, 3.2 a 3.3 je stejný díl vyrobený pomocí různých technologií.

Obr. 3.1 Řezání laserem [3]

Obr. 3.2 Řezání plazmou [3]

Obr. 3.3 řezání vodním paprskem [3]

# ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je shrnutí poznatků o současném obrábění vodním paprskem. Popsal jsem principy této technologie spolu s používaným zařízením. Zabýval jsem se využitím vodního paprsku, jeho výhodami a nevýhodami. Při srovnání s ostatními výrobními metodami jsem porovnával řezání vodním paprskem s řezání laserem a plazmou.

Díky své univerzálnosti se vodní paprsek začíná více rozšiřovat do všech oblastí průmyslu. I přes svou všestrannost se pro řezání nejčastějšího materiálu - oceli, kterou můžeme řezat vším - plazmou, laserem a konvenčními metodami dělení materiálu, se dostatečně nevyužívá. Důvodem toho jsou náklady na údržbu, které je náročnější než pro ostatní technologie. Trysky jsou drahé a rychle se opotřebovávají. V okamžiku, kdy se přesuneme od běžných materiálů například k plastům, kompozitům, keramice, sklu, papíru nebo potravinám, je jeho studený řez téměř jediným způsobem, který lze použít. Oproti konkurenčním technologiím zvládne dobře řezat jak měkké tak i těžkoobrobitelné materiály větších tlouštěk. Snaha výrobců o snížení nákladů vede i k výrobě menších a méně výkonných zařízení, která si také najdou své uplatnění. Výrobci budou v budoucnu kromě snižování provozních nákladů, zvyšovat používané tlaky a přesnost řezání. Tato technologii je i ekologická, protože lze recyklovat vodu i abrazivo.

Obrábění vodním paprskem je přesná a všestranná technologie, která by se snižováním provozních nákladů mohla stát převládajícím způsobem dělení materiálu.

# SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Alcom Alval s.r.o. *O vodním paprsku* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html

2. MM Průmyslové spektrum. *Stroje pro nekonvenční technologie obrábění*. [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/6.3.pdf

3. Flow International Corporation [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.flowwaterjet.cz/

4. NASA [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/

5. MINING ARTIFACTS & HISTORY. *CANADIAN MINES* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.miningartifacts.org/Canada-Mines.html

6. EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill Professional, 2005. ISBN 9780071453349.

7. Bystronic Czech Republic s.r.o. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: https://www.bystronic.cz/cs/produkty/systemy_rezani_vodnim_paprskem/#

8. MM Průmyslové spektrum. *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html

9. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.

10. MORKUS Morava s.r.o. [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.rezani-cnc.cz/index.html

11. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 3.část.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf

12. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1. vydání. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

13. KOVOJUZA s.r.o. *Vodní paprsek* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.kovojuza.cz/vodni-paprsek/

14. TALPA - RPF s.r.o. *Řezání vodou* [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php

15. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. Nekonvenční technologie obrábění. Brno, 2012, 96 s. [online]. [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf