

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



## **Řezání kovových materiálů vodním paprskem**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Autor práce: Michal Dojčár

© 2021 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Dojčár

Procesní inženýrství  
Technologická zařízení staveb

Název práce

**Řezání kovových materiálů vodním paprskem**

Název anglicky

**Cutting of metallic materials using water jet**

---

### Cíle práce

\* shromáždit aktuální informace o technologiích používaných pro dělení kovových materiálů se zaměřením na řezání vodou

### Metodika

\* současný stav řešeného problému (literární rešerše)

\* závěry a přínos práce

**Doporučený rozsah práce**

cca 30 stran

**Klíčová slova**

dělení materiálu; řezání vodou; abrazivo; technicko-ekonomické zhodnocení

---

**Doporučené zdroje informací**

- AWAC, spol. s r. o., systémy dělení materiálu [online]. Dostupné z [www: http://www.awac.cz/](http://www.awac.cz/) .
- BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture 2017, 16. s. 75-81.
- Časopisy zahraniční (<https://www.sic.czu.cz/cs/r-8833-odborne-databaze/r-8833-infozdroje>) a tuzemské (Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM (Svařování, dělení, spojování materiálů), Strojírenská technologie, Strojárstvo / Strojirenství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie / Svařování).
- MAŇKOVÁ, I.: Progresívne technológie. Košice, TU SF Edícia vedeckej a odbornej literatúry. Košice, Viena, vydavateľstvo a tlačiareň, 2000. 275 s.
- MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Praha, ČVUT 1993. 50 s.
- ŘAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N.: Hodnocení kvality povrchu materiálu po řezání AWJ. Strojírenská technologie, 2012, 17(3). s. 186-192.
- VALÍČEK, J. et al.: Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(11). s. 1786-1790.
- VALÍČEK, J., HLOCH, S., KOZAK, D.: Surface geometric parameters proposal for the advanced control of abrasive waterjet technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009, 41(3-4). s. 323-328.
- VOMOČIL, L.: Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. In: Technik, 2008, 16(9). s. 25-26.
- WaterJets.org ... the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z [www: http://waterjets.org/](http://waterjets.org/) .
- 

**Předběžný termín obhajoby**

2019/2020 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojirenské technologie

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2019

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 23. 04. 2021

---

### **Čestné prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Řezání kovových materiálů vodním paprskem“ vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 14.5.2021

---

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc., za jeho cenné rady, odborné vedení a vstřícnost při vypracování práce.

# Řezání kovových materiálů vodním paprskem

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá nekonvenčním způsobem dělení kovových materiálů vodním paprskem. Tato nekonvenční metoda se v současné době těší stále větší pozornosti, a to nejen díky její univerzálnosti, ale i možnosti dělit tvarově složité obrobky. V první části jsou charakterizovány další možnosti dělení materiálů. V další části je čtenář seznámen s jednotlivými druhy vodních paprsků. V práci jsou uvedeny výhody a nevýhody této technologie, její využití v průmyslu, a je také porovnána s alternativními paprskovými metody. Dále jsou popsány části konstrukce abrazivního vodního paprsku. Jsou definovány jednotlivé parametry, které se podílejí na kvalitě řezu. Na konci práce jsou charakterizovány možnosti kompenzace řezu, pro zvýšení kvality a rychlosti řezání.

**Klíčová slova:** dělení materiálu, řezání vodou, abraziva

# Cutting of metallic materials using water jet

## Abstract

The bachelor thesis examines the unconventional way of cutting metallic materials with the water jet. This unconventional method is currently enjoying increasing attention, not only due to its versatility, but also due to the possibility of dividing complex workpieces. The first part characterizes other possibilities of material divisions. In the next part reader is acquainted with various types of water jets. The work also presents advantages and disadvantages of this technology, its uses in industry, and compares it with alternative jet cutting methods. Additionally construction parts of the abrasive water jet are also described. The individual parameters that contribute to the quality of the cut are defined. At the end of the work, the possibilities of cutting compensation are characterized, for increase in quality and speed of cutting.

**Keywords:** cutting material, water jet cutting, abrasives

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Cíl práce a metodika</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Dělení kovových materiálů</b> .....	<b>3</b>
3.1 Konvenční metody dělení .....	3
3.2 Nekonvenční metody dělení.....	4
<b>4 Dělení vodním paprskem</b> .....	<b>6</b>
4.1 Kontinuální vodní paprsky .....	10
4.1.1 WJM.....	10
4.1.2 AWJM.....	10
4.1.3 Kavitační paprsek .....	11
4.1.4 Kryogenní paprsek.....	11
4.2 Diskontinuální vodní paprsky .....	12
<b>5 Části konstrukce zařízení pro řezání vodním paprskem</b> .....	<b>13</b>
5.1.1 Multiplikátor .....	13
5.1.2 Akumulátor tlaku .....	13
5.1.3 Filtrace .....	14
5.1.4 Vysokotlaké potrubí.....	14
5.1.5 Zpětný ventil .....	14
5.1.6 Tryska .....	14
5.1.7 Lapač vody.....	16
5.1.8 Abraziva.....	16
5.1.9 Řídicí systém.....	17
<b>6 Kvalita řezu</b> .....	<b>18</b>
6.1 Hydraulické parametry .....	20
6.1.1 Tlak vody .....	20
6.1.2 Velikost trysky .....	21
6.2 Řezné parametry.....	21
6.2.1 Rychlost posuvu.....	21
6.2.2 Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem (SOD = standoff distance).....	21
6.2.3 Úhel dopadu.....	22
6.3 Abrazivní parametry.....	23
6.3.1 Abrazivní materiál .....	23
6.3.2 Hmotnostní tok abraziva.....	23

<b>Shrnutí .....</b>	<b>23</b>
<b>7 Trendy vývoje .....</b>	<b>24</b>
7.1 Dynamic Waterjet (DWJ) .....	24
7.2 ProgressJet.....	24
7.3 Material feed control (MFC).....	25
7.4 6-osé řezání .....	25
<b>8 Závěr.....</b>	<b>26</b>
<b>9 Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>27</b>
<b>10 Seznam obrázků .....</b>	<b>30</b>
<b>11 Seznam tabulek .....</b>	<b>30</b>



# 1 Úvod

Voda je nedílnou součástí historie člověka, který se jí snažil zkrotit již před tisíci lety. Již staří Evropané využívali přeměny kinetické energie na mechanickou v podobě vodních mlýnů k mletí obilí. První elektrárna byla sestavena roku 1882 a byla poháněna vodním kolem. Vodní elektrárny jsou významné jako nízkoemisní a obnovitelný zdroj energie. Vynález parní turbíny jako zdroj získávání energie vody přeměny tlakové energie na kinetickou, nebyl ještě překonán a používá se dodnes.

Technologie vodního paprsku pro oddělování materiálu se začala používat s rozvojem čerpací techniky již ve druhé polovině 19. století v těžebním průmyslu pro dobývání zlata a jiných rud. Další významný vývoj tato technologie zaznamenala až v 70. letech 20. století, kdy se začala používat aditiva do paprsku vody, která zlepšila řezné vlastnosti. To pomohlo rozšířit spektrum řezaných materiálů a díky tomu se tato technologie rozšířila.

Řezání vodním paprskem má několik předností oproti konvenčnímu třískovému obrábění. Nejvýznamnější předností je možnost řezat veškeré materiály, které nejsou znehodnocovány při kontaktu s vodou. Možnost řezat tvarově náročné struktury s relativně velkou tloušťkou je další nespornou výhodou. I skutečnost, že obrobek není tepelně namáhán, pomáhá s čím dál častějším využitím této technologie.

## **2 Cíl práce a metodika**

Cílem této práce je shromáždit aktuální informace o technologii řezání vodním paprskem formou literární rešerše. Ty jsou získány z tištěných a internetových zdrojů.

Jsou zde uvedeny možné způsoby dělení kovových materiálů. Je popsán princip řezání vodním paprskem a jeho důležité komponenty. Dále je rozdělení kapalinových paprsků. Jsou popsány parametry, které se podílejí na vzniku řezné mezery. V závěru jsou shrnuty získané poznatky z celého textu bakalářské práce.

## 3 Dělení kovových materiálů

Výběr technologie pro dělení kovových materiálů má zásadní vliv na splnění stanovené kvality konstruktérem pro jeho funkčnost a na jeho výslednou pořizovací cenu.

### 3.1 Konvenční metody dělení

Konvenční technologie jsou založené na principu rozrušování za působení mechanické síly. Většinu klasických metod dělení doprovází tvorba třísky. Použitím klasických metod lze zajistit homogenitu a kolmost řezu. Důležitým aspektem je stanovení velikost přídavku na dělení materiálu. Ten je závislý zejména na technologii, velikosti prořezu, délce řezaného materiálu, kolmosti a tloušťce tepelně ovlivněné vrstvy. [1]

Dále jsou uvedeny některé konvenční technologie a jejich charakteristika:

#### **Dělení materiálu řezáním**

Materiál je ubírán břity nástroje a tvoří třísky. Jsou k tomu používány pily rámové, kotoučové nebo pásové. Řezání je nejpoužívanější způsob dělení kovových materiálů. Tato technologie je charakterizována nízkou pořizovací cenou a spotřebou energie. Nevýhodou je nízká produktivita. Výhodou je hladký řez, přesnost a kolmost řezu. [2]

#### **Dělení materiálu rozbrušováním**

Princip metody je oddělování pomocí abrazivního účinku nástroje. Nástrojem je tenký rozbrušovací brusný kotouč, který bývá vyztužen sklo-textilními vlákny. Jako brusivo je používán karbid křemíku, umělý korund nebo diamant. Největší nevýhoda technologie je vysoké zahřívání v okolí řezu. Není tedy vhodná pro dělení kovů, které se teplem znehodnotí. Další nevýhodou je rychlé opotřebování nástroje, odletování jisker a brusiva. [2]

#### **Dělení materiálu stříháním**

Materiál je oddělován pomocí smykovým působením dvou protilehlých břitů. Při dělení nevzniká tříška. Dělit materiál lze za tepla i studena. Za studena se stříhají plechy nebo oceli do pevnosti 400 MPa. Tvrdé materiály se ohřívají na teplotu kolem 700 °C. Výhodou je vysoká přesnost, schopnost vytvářet tvarově složité díly. [2]

### **Dělení materiálu lámáním**

K lámání se používají lámací stroje. Materiál se v místě, kde má dojít k dělení je nahříván kyslíko-acetylenovým plamenem, tím se vytvoří vrub a sníží se plocha průřezu. Materiál musí mít vyšší mez pevnosti než 600MPa. Pokud by neměl dostatečnou mez pevnosti, nedošlo by k lomu ale ohybu. Nevýhodou je nízká kvalita lomové plochy, riziko vzniku a šíření trhlin. [2]

### **Dělení materiálu upichováním**

Používá se pro dělení rotačních materiálu na soustruhu. Nástrojem je upichovací nůž, který je vyroben z rychlořezné oceli, na kterém jsou upevněny břitové destičky ze slinutých karbidů. Značnou nevýhodou je šířka řezné spáry, která bývá až několik milimetrů. Výhodou je kolmost a obrobení řezné plochy [19]

## **3.2 Nekonvenční metody dělení**

Nekonvenční metody dělení jsou založeny na principu působení převážně fyzikálních nebo chemických účinků. Vznikly z potřeby dělit těžkoobrobitelné materiály, které nelze dělit klasickými metodami. Nekonvenční metody lze dělit podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálu na: mechanické, chemické, elektrické, elektrochemické a tepelné procesy. [1]

Mezi nekonvenční metody patří:

### **Dělení plazmou**

Princip spočívá v proudění inertního plynu kolem netavicí se wolframové katody, která vytváří oblouk mezi s anodou (obrobkem). Oblouk ionizuje inertní plyn, tím se zahřívá a mění skupenství na plazmu. Teploty plazmy dosahují až 16 000 °C. Výhodou je vysoká rychlost úběru materiálu. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, tepelné ovlivnění řezu a široká řezná spára. [1,20]

### **Dělení laserem**

Řezání laserem je v dnešní době nejrozšířenější progresivní metodou dělení. Pracuje na principu stimulované emise záření. Světelné záření se zkoncentruje do paprsku přes polopropustné zrcadlo a následně dopadá na obrobek. Vzniklé záření je monochromatické. Průměr paprsku bývá méně než půl milimetru. Materiál je lokálně taven laserem a následně

asistenčním plynem odfukován. Výhodou je vysoká přesnost a produktivita. Nevýhodou je řezání malých tlouštěk materiálu. [1,20]

### **Dělení kyslíkem**

Jedná se o tepelný druh dělení. Materiál se nahřeje na teplotu hoření nejčastěji kyslíko-acetylenovým plamenem. Roztavený materiál se poté spaluje řezným kyslíkem. Tím se zahřeje další materiál a začne hořet taky. Touto metodou lze dělit materiály o velké tloušťce. [1]

### **Dělení ultrazvukem**

K dělení dochází abrazivním účinkem suspenze kapaliny a abraziva, která cirkuluje mezi nástrojem a materiálem. Nástroj kmitá s frekvencí kolem 20 kHz. Kmity jsou přenášeny tlakem nástroje do suspenze, která odebírá materiál. [20]

### **Dělení paprskem elektronů**

Paprsek je generován elektronovým dělem. Pracovním prostředím je vakuum, jinak by mohly elektrony reagovat s molekuly vzduchu a ztratily by kinetickou energii. Principem je přeměna kinetické energie elektronů na tepelnou energii, která taví materiál. Metoda je vhodná i pro nekovové materiály. Nevýhodou je použití vakuové komory, která omezuje rozměry děleného materiálu. [20]

### **Dělení elektroerozivním účinkem**

Jedná se o elektro-tepelný proces. Materiál je odebírán elektrickými výboji mezi obrobkem a nástrojem v dielektriku (izolant schopný polarizace). Dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou, v důsledku toho se materiál taví. Výhodou je vysoká přesnost a kvalita povrchu. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost a pomalý úběr materiálu. [1]

### **Dělení vodním paprskem**

Technologie řezání vodním paprskem je v dnešní době hojně rozšířena, především pro její univerzálnost.

Další kapitoly se zabývají detailnějším popisem této technologie.

## 4 Dělení vodním paprskem

Princip řezání vodním paprskem se zakládá na odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu vodního proudu vysokou rychlostí a kinetickou energií na obrobek.

Tlak vytvořený proudem vody působí na plochu obrobku a vyvolává na ní vysoké napětí, které vede k rozrušení materiálu erozí. Voda stlačená vysokotlakým zařízením je urychlena průchodem přes mezeru v dýze a vytváří usměrněný paprsek vody. Tento paprsek dále proniká do obrobku, kde s přibývajícím hloubkou ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Toto vychýlení je způsobeno třením mezi povrchem vody a povrchem obrobku. [1]

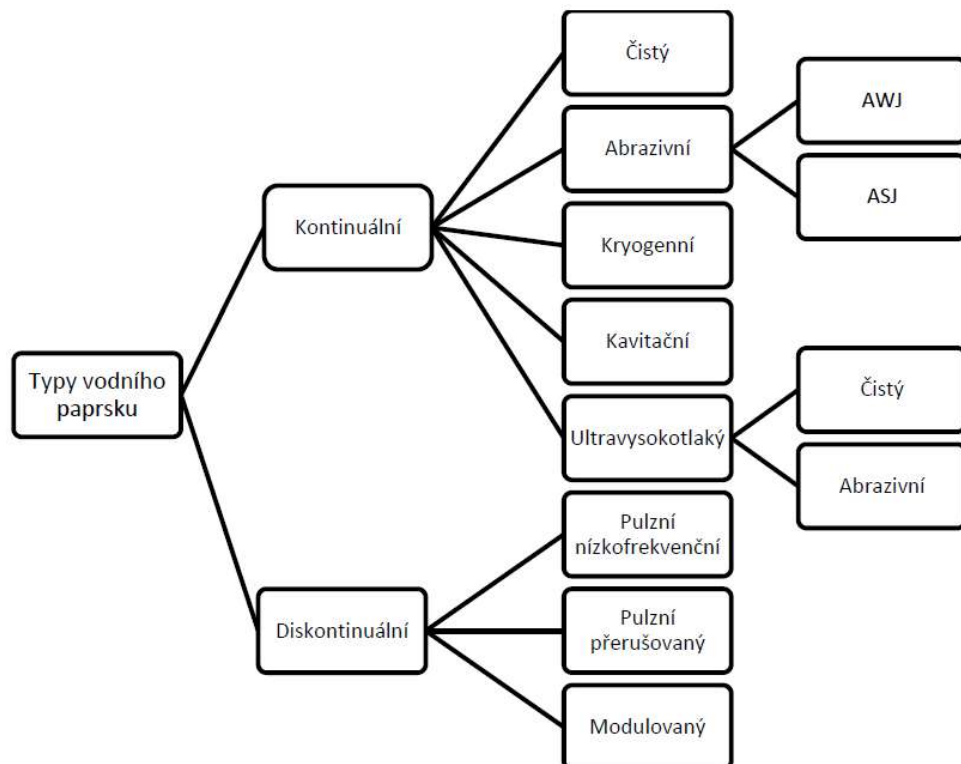
Technologii vodního paprsku lze rozdělit dle použitého média na dvě metody:

1. WJM (Water Jet Machining) – řezání vodou bez přídavného abraziva
2. AWJM (Abrasive Water Jet Machining) – řezání vodou s přídavným abrazivem

Přidáním abrazivních částic do proudu se násobně zvýší účinnost procesu. Proud vody zde slouží jako nositel k urychlení abraziva. Tento způsob je nejrozšířenější. [4]

Další významné rozdělení vodního paprsku v zásadě hodnotí nepřetržitost proudu vody z pohledu proměnné či stálé hladiny energie paprsku (obr. 1). Lze tedy dělit na kontinuální a diskontinuální vodní paprsek. [3]

Obr. 1 Rozdělení vodních paprsků [3]



#### Výhody vodního paprsku [4,6]

- Univerzálnost a jeho použití pro širokou škálu kovových a nekovových materiálů. Lze řezat i biologické materiály a potraviny.
- Řezání vodním paprskem probíhá bez dotyku nástroje a materiálu.
- Nedochozí ke vzniku mikrotrhlin v okolí řezu.
- Nevzniká mechanické pnutí.
- Obrobek není tepelně namáhán a nedochází ke změně chemické struktury. Jedná se o tzv. „studený řez“.
- Paprsek dopadající na obrobek je relativně malý, a proto lze řezat i křehké materiály - sklo, keramika, plasty atd.
- Malý prořez materiálu.
- Ekologičnost technologie, která nekontaminuje životní prostředí a použité medium a abraziva jsou recyklovatelná. Nedochozí ke vzniku plynů a proces je bezprašný.
- Bez otřepu.
- Vysoká přesnost geometrie. Možnost řezání malých děr.
- Možnost řezání pod hladinou vody.
- Jednoduché uchycení obrobku.

#### Nevýhody vodního paprsku [4]

- Nelze řezat materiály, které mohou být poškozeny vodou.
- Zvýšené riziko vzniku koroze.
- Nebezpečí oddělení vrstev při řezání vícevrstvých materiálů jako jsou kompozity, sendviče a materiály s povrchovou úpravou.
- Často delší doba řezání než u jiných technologií.
- Nutnost tlumení paprsku po průchodu obrobkem.
- Chyba úkosu.
- Nestejnorodá kontura řezné plochy.
- Hluk.

Ve strojírenství se používá vodní paprsek k:

- dělení materiálu – Řezají se především tvrdé materiály jako je titan a wolfram, tantal, těžkoobrobitelné materiály jako jsou slinuté karbidy, dále kompozity, sklo, izolační materiály. Má široké uplatnění v kosmickém, leteckém a vodárenském odvětví, kde se vyrábějí tvarově složité součástky právě z těžkoobrobitelných materiálů. Např.: turbíny, kompresory, lopatky, díly pro tryskové a raketové motory.
- soustružení
- frézování
- tryskání

Vodní paprsek pro svoji univerzálnost použití nachází i využití v dalších odvětvích:

- stavební průmysl – dělení keramických a izolačních materiálů, odstraňování betonu při sanačních pracích (zároveň i k dekontaminaci v jaderných elektrárnách)
- chemický průmysl – dělení výbušných látek (např.: dynamit, tuhá paliva)
- potravinářský průmysl – dělení ovoce a zeleniny, zmrzlých potravin
- elektrotechnický průmysl – dělení permanentních magnetů a plošných spojů
- textilní průmysl – řezání plastů a pravé kůže
- těžební průmysl – k dobývání rud
- sklářský průmysl – řezání a matování skla, vrtání do skla
- gumárenský průmysl – řezání gumy, plastů a kevlaru
- ve zdravotnictví – k rozrušování měkkých tkání, při zachování vaskulární struktury

V tab. 1 jsou porovnány vybrané paprskové metody dělení materiálů.



Tab. 1 Porovnání paprskových metod dělení [24]

Metoda	Vodní paprsek	Dělení laserem	Dělení plazmou
Dělitelné materiály	Všechny materiály	Všechny, mimo kompozitů a materiálů, které mají vysokou světelnou odrazivost	Pouze železné a neželezné kovy
Teplota řezu	Studený řez	Teplý řez	Horký řez
Vliv teploty řezu na materiál	Není	Malý	Velký
Změny struktury materiálu v místě řezu	Žádné	Malé	Velké
Kolmost řezu	Mírný odklon	Mírný odklon	Silný odklon
Drsnost povrchu obrobenej plochy	Lze dosáhnout nízké drsnosti (závisí na podmínkách)	Nízká drsnost	Výrazná striace (rýhy)
Výronek v řezné spáře	Vždy bez výronku	Většinou bez výronku	Možno bez výronku
Tvrдость řezaného materiálu	Mírně ovlivňuje rychlost řezání	Nemá vliv na rychlost řezání	Nemá vliv na rychlost řezání
Řezání plastů	Je možné	Problematické - toxicita	Není možné
Řezání kompozitů	Je velmi vhodné	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je možné, pokud jsou na bázi kovů
Řezání keramiky, skal a kamene	Je velmi vhodné s výjimkou kalených skel	Velmi omezené	Není možné
Reliéfní obrábění	Výjimečně	Je možné	Není možné
Velikost dílce	Malé i velké dílce	Malé i velké dílce	Velké dílce
Tloušťka materiálu	Velmi široký rozsah	Malá a střední	Střední a velká
Složitost tvaru	Komplikované tvary	Komplikované tvary	Jednoduché tvary
Průstřel	Je možný		
Vznik plyných emisí	Bez vývinu, nebo jen při průstřelu	Malé množství	Velké množství
Vznik oxidických povlaků	Pouze u materiálů, korodujících při styku s vodou	Pouze při řezání s kyslíkem	Vznikají

## 4.1 Kontinuální vodní paprsky

Paprsky s nepřetržitým proudem vody jsou nejrozšířenější technologií vodního paprsku. Uplatnění nachází paprsky nejen ve strojírenství, ale i v potravinářství a stavebnictví.

### 4.1.1 WJM

Čistý vodní paprsek využívá jako řezné médium vodu. Odebírání materiálu je způsobeno lokálním erozivním účinkem. Řezná síla oproti abrazivním účinkům je velmi malá, proto není tato technologie vhodná pro řezání tvrdých materiálů. Přesto lze najít její uplatnění řezání v široké škále řezání měkkých materiálů. Výhodou technologie oproti řezání laserem je, že se jedná o studený řez. To znamená, že během řezání obrobek není vystaven tepelnému namáhání v místě řezu. Další výhodou je velice malý průměr paprsku, který je obvykle v rozmezí 0,10 - 0,25 mm.

Obvykle pracuje s tlaky do 700 MPa. [7]

### 4.1.2 AWJM

Abrazivní vodní paprsek dělíme podle mísení abraziva na dva způsoby - vstříkovací a suspenzní paprsek.

#### **Vstříkovací vodní paprsek (AWJ)**

Proud vody je urychlen přes první dýzu do směšovací komory, ve které se mísí s abrazivem. Dále tato směs pokračuje do zaostřovací trysky. Směšovací komora je založená na principu ejektoru. Částice abraziva jsou strhávány vytvořeným podtlakem ve směšovací komoře a jsou nasávány do proudu vody. Dávkování abraziva lze regulovat pouze rozdílem tlaků v komoře a velikostí vstupního otvoru do komory ze zásobníku abraziva.

#### **Suspenzní vodní paprsek (ASJ)**

Při této metodě je část vodního paprsku odvedena do zásobníku abraziva, která zároveň slouží jako vysokotlaká směšovací komora bez přístupu okolního vzduchu. Výhodou je zamezení negativních účinků vstupu vzduchu do systému. Musíme také zajistit menší tlak v komoře, než je tlak vodního paprsku, aby byla suspenze dopravována k výstupní trysce. Problémem je dávkování, protože nemůžeme zajistit konstantní hmotnostní tok abraziva.

Tato technologie při stejné hloubce řezu pracuje s menším tlakem a nižším dávkováním abraziva než při vstřikovací metodě. Pracovní tlak se pohybuje v rozmezí 100 – 300 MPa. [7]

#### 4.1.3 Kavitační paprsek

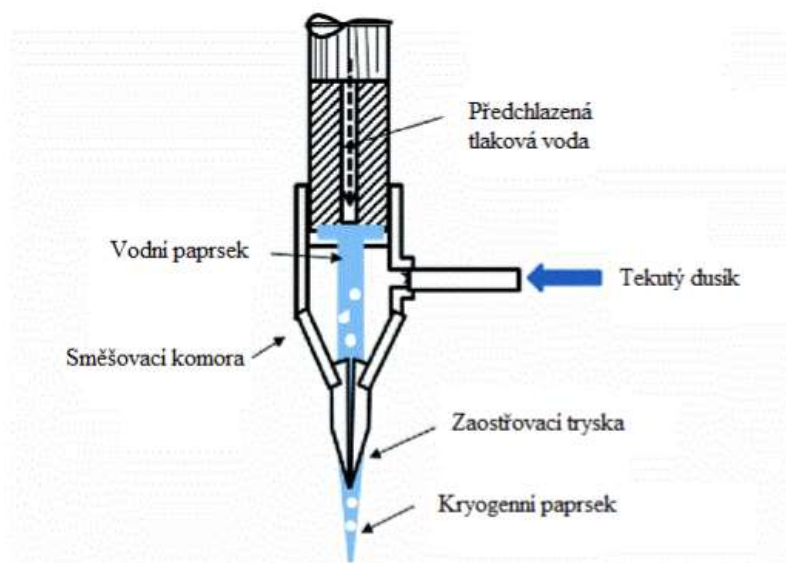
Kavitací nazýváme jev, při kterém vznikají dutiny v kapalině při lokálním poklesu tlaku pod tlak sytých par. Kavítace je nejdříve vyplněna vakuem, později se vyplní párou kapaliny a při vymizení podtlaku bublina kolabuje za vzniku rázové vlny. Tato rázová vlna má destruktivní erozivní účinek na okolní materiál. Nevýhodou je nepřesné vytváření kavitačních bublin a konstrukční složitost dýzy. [1,2]

#### 4.1.4 Kryogenní paprsek

Jedná se o zdokonalení čistého vodního paprsku bez použití abraziva. Vodní paprsek obsahuje částice ledu, které zlepšují erozivní účinky paprsku. Led může vzniknout dvojím způsobem. Buď přímo fázovou přeměnou podchlazené tlakové vody ve směšovací komoře (obr. 2) nebo přidáním externě vytvořených ledových částic v kryogenní nádrži do vodního paprsku stejným způsobem jako při technologii abrazivního vstřikovacího vodního paprsku. Teplota ledu vytvořená v nádrži, kde se mísí s tekutým dusíkem o teplotě  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  dosahuje až  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Klíčovou vlastností ledových částic je přímá závislost tvrdosti na teplotě. [9,18]

Kryogenní paprsek se používá zejména v potravinářství ke krájení masa, kostí a mražených potravin z důvodu jeho zdravotní nezávadnosti.

Obr. 2 Vytváření ledu ve směšovací komoře [18]



## 4.2 Diskontinuální vodní paprsky

Diskontinuální paprsky jsou charakterizovány proměnlivou hladinou energií paprsku.

*„Dopad kapaliny na pevný povrch probíhá ve dvou fázích. V první fázi se kapalina chová jako stlačitelná a generuje díky tzv. hydraulickému rázu impaktní tlak, který je zodpovědný za velkou část poškození způsobeného nárazem kapaliny na pevný povrch. Po odeznění impaktního tlaku začíná druhá fáze dopadu kapaliny. V okamžiku, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny, kapalina začíná proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Rychlost radiálního toku může být až pětinasobně vyšší, než je dopadová rychlost kapaliny, a v jeho důsledku tedy na povrch materiálu působí nejen normálové síly od dopadu paprsku, ale i síly smykové. V průběhu druhé fáze dopadu se kapalina chová jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší tzv. Bernoulliho stagnační tlak.“ [17]*

Střídání stagnačního a impaktního tlaku výrazně zvyšuje účinnost stroje.

### **Pulzní nízkofrekvenční**

Jednotlivé pulzy jsou generovány pomocí zařízení s volným pístem nebo hydraulickým generátorem pulzů. [3]

### **Pulzní přerušovaný**

Paprsek po výstupu z trysky je přerušován průchodem přerušovače. Jedná se o rotační matici, která tvarem a rychlostí otáčení reguluje frekvenci pulzů. To vytváří velké ztráty energie paprsku dopadem na přerušovač. [3]

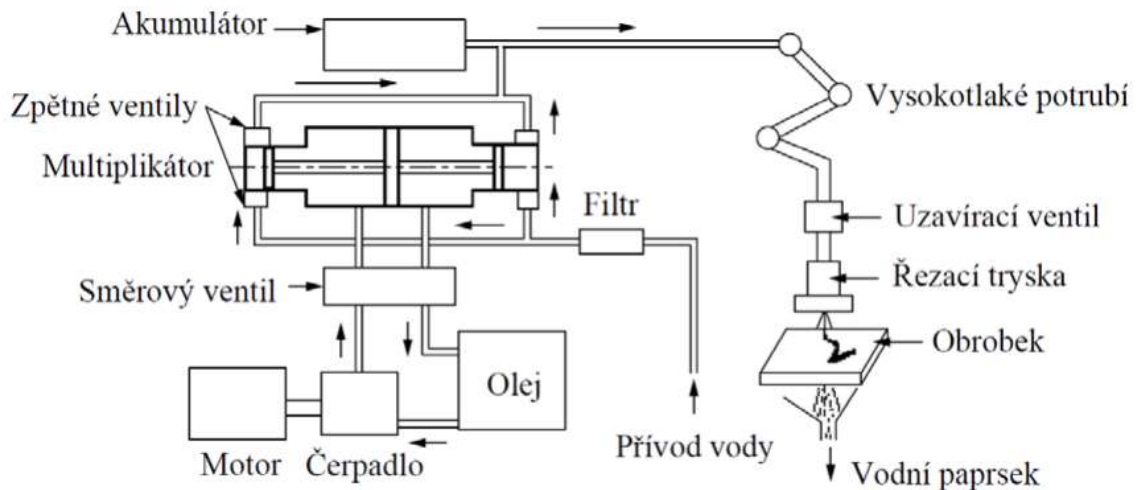
### **Modulovaný vodní paprsek**

Paprsek opouští zaostřovací trysku jako kontinuální pouze do určité vzdálenosti, poté se začíná rozpadat. Paprsek je tvořen pomocí rezonátorů nebo modulátorem průtoku. [3]

## 5 Části konstrukce zařízení pro řezání vodním paprskem

Hlavními prvky stroje jsou hydraulická jednotka pro generování pracovního tlaku, akumulátor na tlumení vznikajících rázů v kapalině, filtry a vysokotlaké potrubí pro rozvod vody, zpětné ventily, řezací tryska a lapač vody, které můžeme vidět na obr. 3. [1]

Obr. 3 Hlavní prvky technologie WJM [14]



### 5.1.1 Multiplikátor

Multiplikátor je součástí hydraulické jednotky, která má za úkol pomocí sérií hydraulických čerpadel vytvořit požadovaný pracovní tlak v kapalině.

Multiplikátor neboli hydraulický násobič se skládá ze dvou částí – nízkotlaké a vysokotlaké. Nízkotlaká část pracuje s hydraulickým olejem, který je hnán do oblasti s větším pístem o tlaku cca 21MPa. Tento tlak vytváří hydraulické olejové čerpadlo. Tlak oleje pomocí silových účinků působí na větší z pístů a generuje tlak na druhé části. Tento princip lze popsat pomocí Pascalova zákona, který říká: Působíme-li na píst tlakovou silou  $F_1$ , přenáší se tato síla v poměru ploch pístů do kapaliny, v níž vyvolává tlak  $F_2$ . Pro tlaky do 300 MPa se používají přímo poháněná rotační čerpadla. Nejpoužívanějším typem je triplexový plunžr, kde elektromotor otáčí klikovou hřídelí se třemi písty. [5,15]

### 5.1.2 Akumulátor tlaku

Generování vysokotlaké vody z podstaty činnosti multiplikační jednotky není nepřetržité. Z důvodu potřebného času na stlačení pístem je nutno tlumit rázové vlny vyvolané

vyrovnáváním tlaku v prostoru válce a v potrubí. Při netlumení rázové vlny by došlo k poškození potrubí. K tomuto účelu slouží akumulátor tlaku, který je zařazen za multiplikační jednotkou. Rázy jsou tlumeny vstupem do akumulátoru, který má několikanásobně větší průměr než potrubí, a tím zanikají. [1]

### 5.1.3 Filtrace

Čistota a kvalita vody má největší vliv na životnost jednotlivých součástí. Přítomnost rozpuštěných minerálů negativně ovlivňuje opotřebení dýzy a tlakového vedení. Filtrace probíhá v několika stupních. Pevné částice zachytává soustava pevných filtrů. Tvrdost vody upravujeme změkčováním – výměnou iontů  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$  za ionty  $\text{Na}^+$ . [1]

### 5.1.4 Vysokotlaké potrubí

Vyrábí se z nerezové oceli a je na něj kladeno několik požadavků. Musí odolávat vysokému tlaku, nesmí podléhat korozi a musí být flexibilní, aby se mohlo přizpůsobit pohybu řezné hlavy. V dnešní době jsou již tyto komponenty normalizované, zejména o vnějším průměru 1/4“, 3/8“ nebo 9/16“. [4,15]

### 5.1.5 Zpětný ventil

Před a za multiplikátor musí být umístěn zpětný ventil. Slouží k propouštění vody pouze jedním směrem. Kdybychom nepoužili před stlačením zpětný ventil, mohlo by se stát, že stlačená voda by se vrátila do nízkotlaké části a tu by poškodila. Další ventil je uzavírací ventil, který slouží k rychlému zastavení vstupu vody do řezací trysky při stisknutí nouzového vypínače. Ten zastaví řezání a pohyb řezací hlavy, vypne hydraulickou jednotku a odpustí tlak z vysokotlakého potrubí. [15]

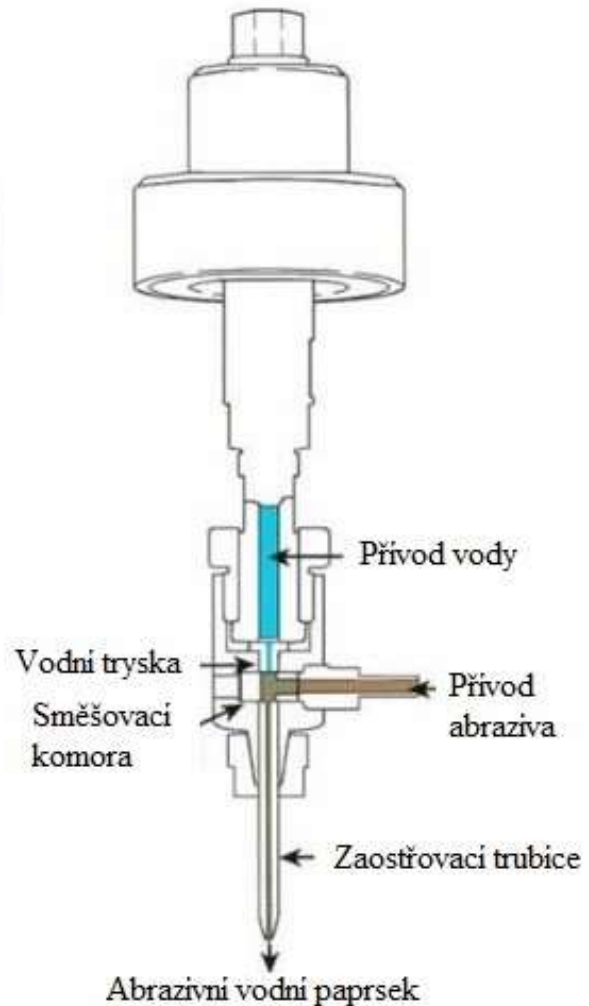
### 5.1.6 Tryska

Úkolem vodní trysky je přeměna tlakové energie vody na kinetickou energii a zformování homogenního vodního paprsku. Tato přeměna má zásadní vliv na účinnost řezání a jeho kvalitu. [1]

Výtoková štěrba dýzy je úzký otvor s průměrem od 0,075 do 1,5 mm. Tato část dýzy se vyrábí ze safíru, slinutých karbidů nebo z diamantu. Volba materiálu je závislá na pracovním tlaku. Dýza i přes filtraci se po čase zanáší nečistotami a minerálními

usazeninami z vody, proto je nutná její pravidelná údržba. Průměrná pracovní doba safírové dýzy je okolo 200 hodin, diamantová má několikanásobně delší životnost, ale i pořizovací cenu. [1]

Obr. 4 Řezací hlava [21]



Řezací hlava (obr. 4) se konstrukčně liší dle použité technologie. Při technologii AWJM rozlišujeme dva typy přívodu abraziva do směšovací komory – radiální a axiální. Ve směšovací komoře je brusivo vtahováno podtlakem vytvořeným urychlením vody přes dýzu do vodního paprsku. Ze směšovací komory už abrazivní paprsek pokrčuje do zaostřovací trysky. Zaostřovací tryska extrémně podléhá opotřebení. Její životnost je v závislosti na použitém materiálu v řádu desítek až stovek hodin. Nejrozšířenějším je karbid wolframu. Tryska se opotřebovává asymetricky (obr. 5) a úbytek materiálu bývá 0,002 mm za hodinu. [15]

Obr. 5 Opotřebení zaostřovací trysky [16]



### 5.1.7 Lapač vody

Je to nádoba, která zachytává vodní paprsek po průchodu obrobkem. Nádoba bývá vyplněna vodou nebo v některých případech i kovovým kuličkami. Obsah nádoby musí pohltit zbylou kinetickou energii paprsku, tak aby nedosáhl až na dno. Dalším účelem nádoby je tlumit hladinu hluku vyvolanou nástrojem, která může dosáhnout hodnoty až 105 dB. [1]

### 5.1.8 Abraziva

Výběr abrazivních částic má největší vliv na konečnou cenu celého procesu, proto je důležité vybrat vyhovující materiál a velikost jeho částic. Nejdůležitějšími parametry jsou řezivost, tvrdost a zrnitost, které mají přímý vliv na kvalitu řezu. Pod zrnitostí si můžeme představit velikost jednotlivých zrn. Udává se v jednotkách mesh, které představují počet ok připadajících na jeden palec síta tkaného z drátu, jehož otvory odpovídají průměru drátu. Tedy čím větší číslo mesh, tím menší jsou jednotlivá zrna. Nejběžněji se používá zrnitost mesh 80 a 120. Tvrdost zvyšuje účinnost řezání, ale i zvyšuje opotřebení řezací hlavy. Proto je dobré najít kompromis mezi tvrdostí abraziva a maximální efektivitou řezu daného materiálu. Řezivost je souhrn vlastností, které ovlivňují výkon řezného nástroje. V našem případě převažuje kritérium abraziva se netupit. Důvodem pro netupení je vnitřní struktura brusiva, kterou je kubická krystalová mřížka. Při deformaci dochází k odlupování, přičemž ostrost je zachována. Můžeme tedy opětovně použít abrazivo. [11]

Dalším požadavkem na abrazivo je jeho recyklovatelnost, ekologická a zdravotní nezávadnost. Nemalá část abraziva po průchodu obrobkem končí v lapači vody. Z této směsi se separují vibračním separátorem a dále putují do sušičky. Usušené abrazivo je ještě nutné



separovat podle velikosti zrna. Po separaci je dopravováno pneumatickým dopravníkem zpět do zásobníku (obr. 6) k opětovnému použití. [11]

*Obr. 6 Zásobník abraziva [Foto Milan Brožek]*



#### 5.1.9 Řídicí systém

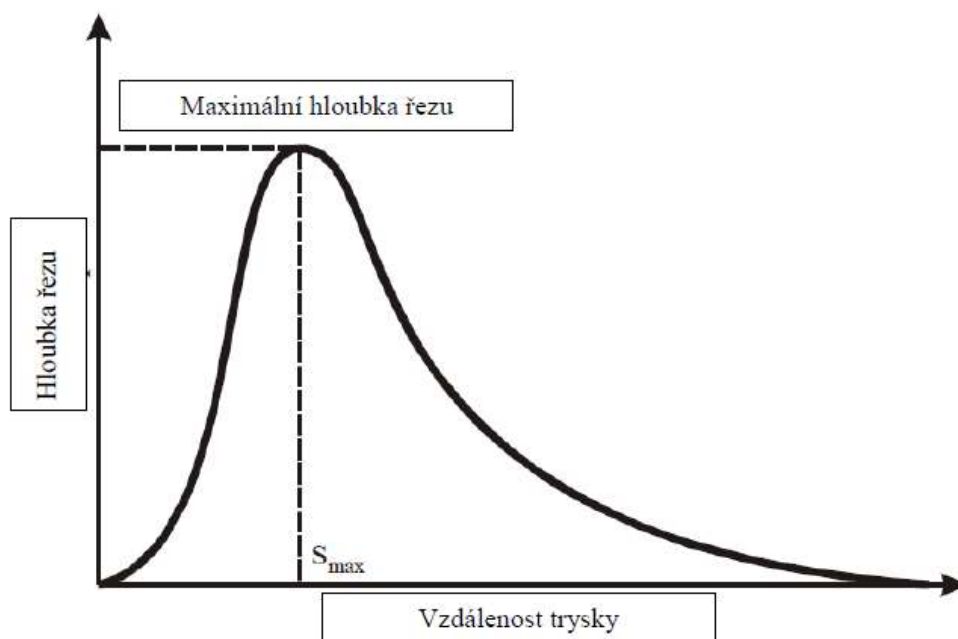
K řízení stroje se používá číslicový systém (CNC), který ovládá servomotory, které pohybují řeznou hlavou, nebo vysílá digitální signál ke spuštění a zastavení proudu vody a abraziva. Programátor přenáší výrobní výkres z CAD do výrobního programu CAM. V něm programátor přidá místa, kde se má vodní paprsek spustit a zastavit, směr trasy, kompenzaci řezu a potřebné rychlosti řezání. Součástí zařízení je konzole obsluhy, na které je možné editovat řezací plán současně s procesem řezání. [15]

## 6 Kvalita řezu

Kvalita řezu se hodnotí geometrickou přesností obrobku a kvalitou jeho povrchu. Geometrie řezu je šířka řezné spáry a její úkos. Povrch můžeme zhodnotit drsností a vlnitostí. Drsnost povrchu je jakost obráběného povrchu podle způsobu obrábění, vzhledu a hloubky po nástroji. Tedy jak povrch vypadá, jak se klikatí a kterým směrem jdou rýhy.

Kvalitu řezu ovlivňuje několik faktorů. Nejdůležitějším faktorem je dodržování stejné vzdálenosti mezi obrobkem a řezací hlavou (obr. 7). Příliš velká vzdálenost negativně ovlivňuje drsnost povrchu, kdy může docházet i k otryskávání řezní hrany. Všechny řezné parametry se podílejí přímo na kvalitě řezu. [13]

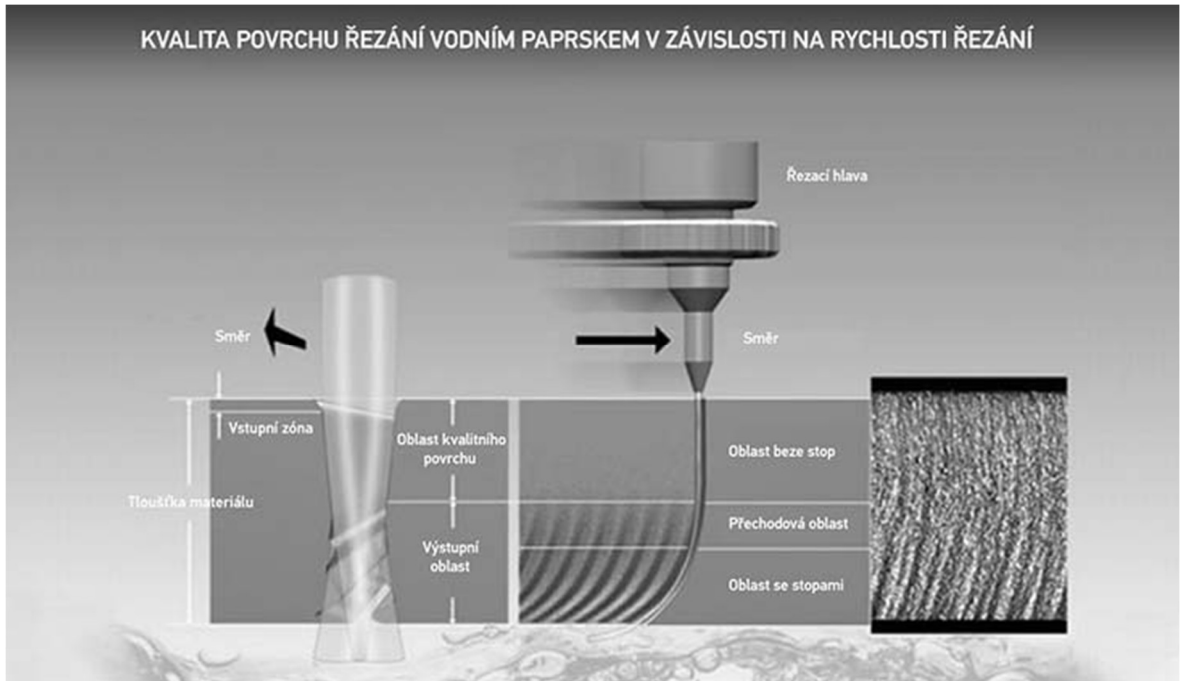
Obr. 7 Vliv vzdálenosti trysky na hloubku řezu [3,8]



Pro pochopení vlivu řezných parametrů na drsnost povrchu je nutné znát průběh vzniku řezné mezery. Nejprve při výstupu paprsku z dýzy dochází k uvolnění energie do okolního prostředí, to způsobuje rozšiřování šířky paprsku směrem od dýzy. Postupná ztráta kinetické energie při dopadu snižuje erozivní účinky a lze pozorovat zřetelné rozdělení řezu na dvě zóny. Relativně hladká oblast v horní části řezu je výsledkem řezného opotřebení a rýhovaná oblast ve spodní části řezu jako důsledek deformačního opotřebení (obr. 8,9). Řezná spára

se směrem od řezací hlavy zužuje. Pokud chceme zamezit efektu zúžení je nutné snížit rychlost posuvu, aby měl paprsek dostatečný čas proříznout obrobek se stejnou mezerou. [6]

Obr. 8 Zalomení vodního paprsku proti směru posuvu [6]



Drsnost hladké zóny řezu má minimální závislost na řezné rychlosti, naopak pro rýhovanou oblast drsnost exponenciálně roste s hloubku řezu a rychlostí posuvu.

Podle drsnosti  $R_a$  se dělí kvalita charakteru řezu od Q1 do Q5 (tab. 1). Kde Q1 se nazývá dělicím řezem a Q5 je řez nejkvalitnější (viz obr. 9). Vzhledem k povaze řezu technologie vodním paprskem je přímé změření drsnosti drsnoměrem u většiny ploch obtížné či nemožné. Využívají se bezkontaktní optické metody. [6,22]

Cílem optimalizace je najít pro materiál ideální parametr hloubky řezu, aby byla stanovena tloušťka obrobku, která se dá za těchto podmínek dělit. Obecně můžeme parametry procesu technologie řezání vodním paprskem rozdělit na: [13]

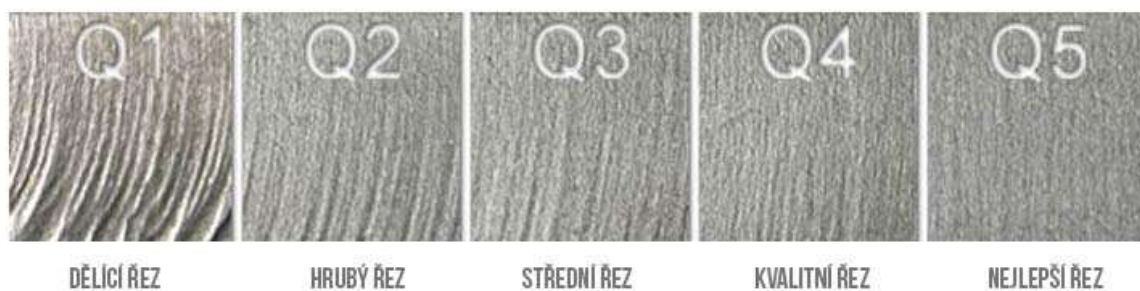
- hydraulické parametry
- řezné parametry
- abrazivní parametry

Tab. 2 Charakter řezu a jeho drsnost [6]

Stupeň	Charakter	Drsnost Ra horní	Drsnost Ra spodní	Přesnost horní	Přesnost spodní
Q1	Dělicí řez	pod 3,2	cca 3,2	± 0,1 mm	± 0,1 mm
Q2	Hrubý řez	Cca 3,2	cca 6,3	± 0,1 mm	± 0,2 mm
Q3	Střední řez	Cca 4,0	do 12,5	± 0,15 mm	dle materiálu
Q4	Kvalitní řez	Cca 4,0	do 25	± 0,2 mm	dle materiálu
Q5	Nejlepší řez	Cca 6,3	do 40	± 0,2 mm	nepřesné

Všechny uvedené hodnoty jsou pouze orientační a mohou se lišit podle typu materiálu.

Obr. 9 Drsnost povrchu a její kvalita [6]



## 6.1 Hydraulické parametry

Obecně platí, že rychlost proudu se zvyšuje s tlakem. Běžně se používá tlak do 620 MPa. Při vyšších tlacích hrozí změna skupenství vody z kapalného na pevné, například při tlaku 1000 MPa voda mrzne již při pokojové teplotě. Stlačení vody je adiabatický děj, při kterém dochází k ohřevu vody asi rychlostí 3°C/100MPa. Tento růst teploty sníží risk fázevých přeměn. [8]

### 6.1.1 Tlak vody

Hloubka řezu je lineárně závislá na tlaku vodního paprsku, avšak vedlejším jevem je zvětšení řezné mezery. Je nutné najít závislost pro optimální tlak a řeznou rychlost.

Se zvyšujícím tlakem dochází také k rychlejšímu opotřebení trysky. Rychlost vodních paprsků dosahuje až čtyřnásobnou rychlost zvuku. [1]

### 6.1.2 Velikost trysky

Větší průměr trysky vede k vyšší stabilitě paprsku, což je důležité, jak pro řezání na velké vzdálenosti, tak pro řezání složitých struktur. Na druhou stranu se také zvětší šířka řezu, takže při určitém stupni vede zvětšení průměru trysky ke snížení účinnosti řezání. Změna tlaku nemá až tak výrazný vliv na změnu průtoku oproti změně vnitřnímu průměru trysky. Při změně vnitřního průměru se tedy mění i kinetická energie paprsku. Růst energie znamená hlubší řez. Délka zaostřovací trysky má vliv na spojitost paprsku. Platí, že čím delší tryska, tím koheretní paprsek. Optimální délka trysky je mezi 75-100 mm. [10,13]

## 6.2 Řezné parametry

Řezné podmínky se volí zejména podle požadované přesnosti rozměrů, geometrického tvaru a drsnosti povrchu. Je brán i zřetel na ekonomickou stránku provozu.

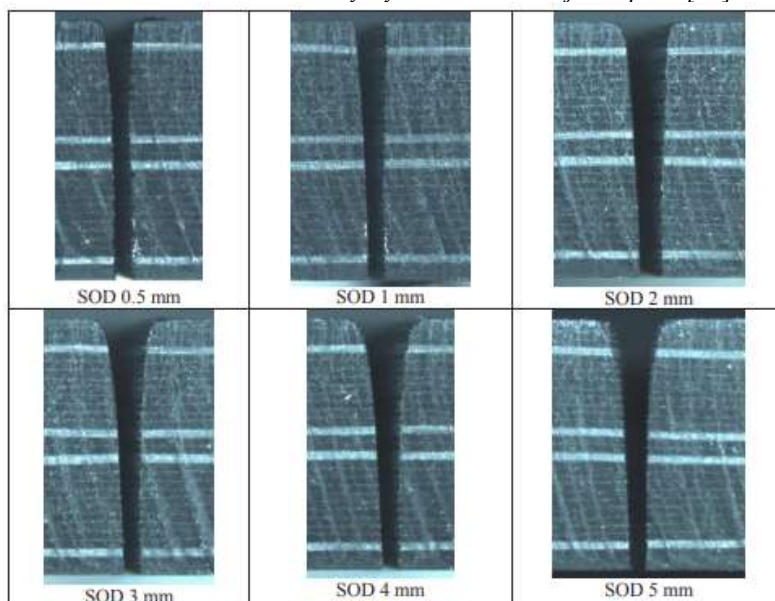
### 6.2.1 Rychlost posuvu

Zvýšení rychlosti posuvu vede ke snížení hydraulického a abrazivního účinku. Při rychlém posuvu se snižuje úběr materiálu z důvodu dopadu méně abrazivních částic na povrch. To v konečném důsledku zhoršuje kvalitu povrchu. Pro dobrou kvalitu povrchu je důležité snížit rychlost posuvu. Pokud zvolíme velmi nízké rychlosti posuvu dochází k probroušení kuželového tvaru (rozšiřuje se s hloubkou řezu), zejména u měkkých materiálů. [10]

### 6.2.2 Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem (SOD = standoff distance)

Se zvyšující se vzdáleností téměř lineárně klesá hloubka řezu. Vodní paprsek se následkem kontaktu s okolním prostředím radiálně rozšiřuje. Tento nárůst ve výsledku zvětšuje šířku řezu a drsnost povrchu kvůli většímu a náhodnému rozložení energie paprsku po expanzi. Na obr. 10 můžeme vidět různé šířky řezné mezery a rozdílný úhel úkosu při různých vzdálenostech mezi tryskou a obrobkem za konstantních parametrů. Vzdálenost bývá doporučovaná výrobcem stroje. [12,13]

Obr. 10 Vliv vzdálenosti trysky od obrobku na jeho spáru [12]



### 6.2.3 Úhel dopadu

Hloubka řezu pro tvrdé kovy dosahuje maxima při úhlu  $90^\circ$  Tedy směr paprsku kolmo na obrobek. Pro měkké kovy se používají úhly mezi  $75^\circ$  a  $80^\circ$ . Pro keramiku při použití karbidu křemičitého dochází k ideálnímu odstraňování materiálu při  $120^\circ$ . To je způsobeno sekundární erozí při zpětném toku abraziva a vody. Na obr. 11 je zobrazeno natočení řezací hlavy, které můžeme využít ve prospěch kolmosti řezu.

Obr. 11 Natočení řezací hlavy [6]



## 6.3 Abrazivní parametry

Jedná se o kvalitu a množství použitého abraziva.

### 6.3.1 Abrazivní materiál

S větší tvrdostí abraziva lze dosáhnout větší hloubky řezu při stejné rychlosti proudění a tlaku. Platí, že se zvyšující se velikostí je řezivost větší, ale velikost částic je omezena průměrem trysky. [9]

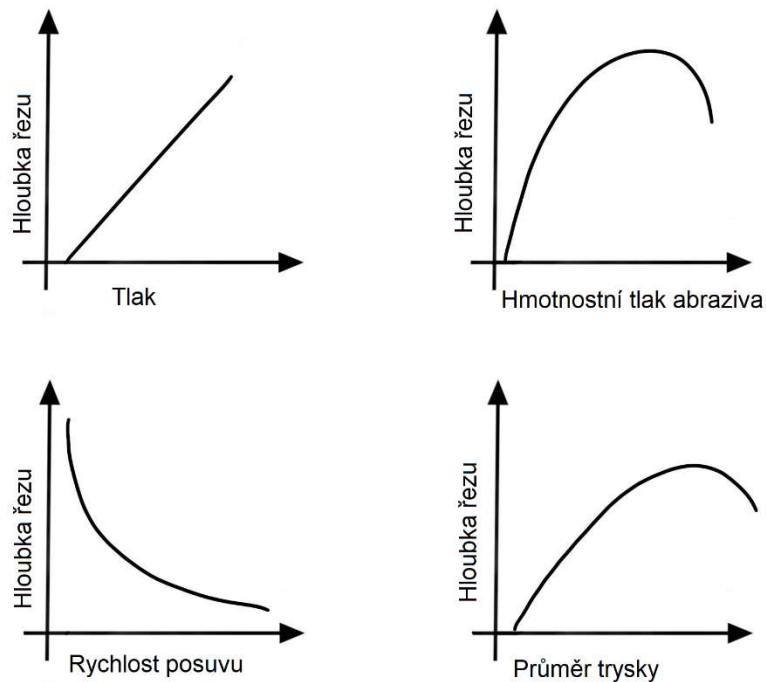
### 6.3.2 Hmotnostní tok abraziva

Zvýšením množství abrazivních částic v toku paprsku, má za následek zvýšení počtu nárazů na obrobek. To zvyšuje řeznou hloubku, ale i řeznou rychlost. Při zvýšení průtoku za konstantních hydraulických parametrů, naopak je řezná rychlost menší. Dochází k jevu, že částice abraziva do sebe narážejí, a tím se snižuje jejich kinetická energie, také i řezná rychlost. [9]

## Shrnutí

Na obr. 12 je shrnuta závislost hloubky řezu na vybraných parametrech.

Obr. 12 Závislost hloubky řezu [10]



## 7 Trendy vývoje

Hlavní nevýhoda řezání vysokotlakým vodním paprskem je chyba úkosu a doběh paprsku. Paprsek vlivem ztráty kinetické energie zaostává. Výstupní řezná spára není paralelní s horní. Pokud snížíme rychlost posuvu sníží se i rozdíl zaostávání ale za cenu chyby úkosu a vyšších nákladů na provoz.

V praxi musí vodní paprskem vlivem zaostávání zastavit v rohu a vyčkat před dalším pohybem řezací hlavy na doříznutí spodní řezné hrany. Dořezávání způsobuje v rozích vlnitost, která má za následek rozdílnou geometrii řezné spáry.

### 7.1 Dynamic Waterjet (DWJ)

DWJ je systém firmy FLOW, který pracuje s nakláněním řezací hlavy na stranu, takže veškerý úkos je na straně odřezku, tím se kompenzuje zpoždění paprsku. Kompenzace probíhá automaticky řídicím systémem na základě matematického modelu, který jej implementuje do programu. Náklon je průběžně upravován podle řezné rychlosti, řezací hlava v rohu se nakloní a zpomalí. Výsledkem je rychlejší a geometricky přesnější řezání. [15]

### 7.2 ProgressJet

Jedná se o systém firmy PTV, který eliminuje chyby vzniklé úbytkem energie paprsku, jakými jsou nekolmost a nerovnoběžnost řezných hran v obloucích. Ten má za následek zúžení řezné spáry ve směru paprsku. Chyba je znatelná při změně pohybu, zejména v rozích a obloucích. Při zaoblení má dolní spára menší poloměr zaoblení než ta horní. Kompenzace probíhá naklápěním řezací hlavy v rotačních osách, to zlepšuje kolmost povrchu bez nutnosti výrazně snížit rychlost posuvu. Jak je vidět na obr. 13, první natočení je ve směru posuvu a druhé do řezné plochy. [23]

Obr. 13 Natočení ProgressJet [23]





### 7.3 Material feed control (MFC)

Tento systém se snaží zabránit vzniku podřezu a podemletí. Řídicí systém nastavuje takovou řeznou rychlost, aby byly právě horní a dolní spáry stejně široké. Rychlost posuvu závisí na dráze pohybu, kdy v kritických místech paprsek zpomalí a dochází ke kompenzaci řezné spáry. Naopak při přímočarém pohybu systém zrychlí a využívá co největší možné rychlosti posuvu. [23]

### 7.4 6-osé řezání

Zavedením šesté osy je možné řezat složité 3D tvary s příslušnou korekcí. Řezají se především profily a trubky. Ukázky řezání jsou uvedeny na obr. 14. Pohyb řízený sedmi servomotory je současný a plynulý. Řezání je rychlejší a přesnější oproti 5-osému systému. [25]

*Obr. 14 Příklad obrobků řezaných 6-osým WJM [25]*



## 8 Závěr

Bakalářská práce je zaměřena na téma řezání kovových materiálů vodním paprskem. Cílem bylo shromáždit aktuální informace o technologiích používaných pro dělení kovových materiálů se zaměřením na řezání vodou. Čtenář je seznámen s alternativními metody dělení materiálů. Je zde uvedeno rozdělení jednotlivých technologií vodních paprsků, jejich princip a hlavní komponenty abrazivního paprsku. Dále je vysvětlen vznik řezné mezery a hodnocení kvality řezu. Řezání vodním paprskem se neustále vyvíjí, především pro strojírenský průmysl. Je zde kladen důraz na snížení provozních nákladů a zároveň zlepšení výsledné kvality. Největší předností vodního paprsku je, že nedochází k tepelnému namáhání v místě řezu jako v případě konvenčních metod. Díky tomu je možnost dělit širokou škálu materiálů v různých průmyslových odvětvích.

Nejdůležitější je optimalizovat řezné a hydraulické parametry pro daný materiál, aby výsledný řez byl ekonomicky a kvalitativně nejlépe možný. Pro zvýšení řezné rychlosti je důležité kompenzovat ztrátu kinetické energie paprsku průchodem materiálu. To způsobuje chybu úkosu a vlnitost povrchu. Možnosti dalšího vývoje směřují k rychlejšímu úběru materiálu. A to zvýšením pracovního tlaku nebo použitím jiného řezného média namísto vody. Do budoucna předpokládám druhou možnost z důvodu výrazně zvýšeného opotřebení součástí při vyšších tlacích než 600 MPa.

## 9 Seznam použitých zdrojů

- [1] MAŇKOVÁ, I. Progresívne technológie. Košice: Vienaľa, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] Technologie II: Technologie tváření kovů [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [3] SUCHÁNEK, Libor. Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/0s1oly/>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Miroslav Zetek, Ph.D
- [4] BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture 2017, 16. s. 75-81.
- [5] KRÁLOVÁ, Magda. Pascalův zákon. [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/pascaluv-zakon>
- [6] Princip řezání vodním paprskem. Morkus Moravia [online]. 2016 [cit. 2021-3-28]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [7] HUANG, Z. LI, G, Abrasive Water Jet Perforation and Multi-Stage Fracturing, Elsevier Science & Technology, San Diego. 2017 [cit. 2021-02-01].
- [8] MOHAMED, M. Waterjet Cutting Up to 900 MPa. Hannover: Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau, 2004. Doktorská práce. Dostupné také z: <https://d-nb.info/972544402/34>.
- [9] In-process generation of water ice particles for cutting and cleaning purposes. Water jetting 20 [online]. 2010, 275-283s [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:2018/eth-2018-01.pdf>
- [10] LUIS, H. a PUDE, F. Abrasive water suspension jet technology [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <http://www.china-weldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>

- [11] KOPP, F. Možnosti využití technologie vysokorychlostního abrazivního suspenzního paprsku v praxi: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 75s. Vedoucí práce: Sitek, L.
- [12] POPAN, I. CONTIU, G. a CAMPBELL, I.. Investigation on standoff distance influence on kerf characteristics in abrasive water jet cutting of composite materials. MATEC Web of Conferences. 2017, Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713701009>
- [13] MOMBER, A. a KAVACEVIC, R. Principles of abrasive waterjet machining. London: Springer Verlag, 1998. ISBN 978-1-4471-1572-4.
- [14] EL HOFY, H. Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4665-7703-9.
- [15] Slovník k Vodnímu Paprsku. Flowwaterjet [online]. Shape Technologies Group, 2019 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: [https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct\\_drive\\_pump](https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump)
- [16] Precision and quality: Water jet university. Ward Jet [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/precision-quality>
- [17] FOLDYNA J.: Use of Acoustic Waves for Pulsating Water Jet Generation. In: Beghi M. G. (ed.): Acoustic Waves – From Microdevices to Helioseismology 1. InTech Open Access Publisher, Rijeka 2011, s. 323–342. Dostupný z [www.intechopen.com/books/acoustic-waves-from-microdevices-to-helioseismology](http://www.intechopen.com/books/acoustic-waves-from-microdevices-to-helioseismology).
- [18] GUPTA, K a AVVARI, M. Ice Jet Machining: A Sustainable Variant of Abrasive Water Jet Machining [online]. 2017. Springer, 2017 [cit. 2021-5-1]. ISBN 978-3-319-51961-6. Dostupné z: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51961-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51961-6_4)
- [19] Kavítace. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>

- [20] RUSZ, R. Nekonvenční způsoby dělení materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 34 s. [cit. 2021-03-28]. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=29211](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29211)
- [21] ABDEL-RAHMAN, A.: A Closed-form Expression for an abrasive waterjet cutting model for ceramic materials. International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences 2011 5. 722-729.
- [22] VALÍČEK, J. Měření a analýza povrchu při řezání abrazivním vodním paprskem [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2021-5-10].  
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-a-analyza-povrchu-pri-rezani-abrazivnim-vodnim-paprskem>
- [23] ZETKOVA, I. JENICEK, S., et al. Influences of Cutting Process Parameters on the Cutting Quality when Water Jet Cutting, Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium, s.1286-1292
- [24] HUMÁR, A. Technologie I: Technologie obrábění – 3.část. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. [online]. [cit. 2021-04-15].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
- [25] 6 Axis Waterjet. Mavijet [online]. [cit. 2021-5-10].  
Dostupné z: <https://www.mavijetwaterjet.com/6-axis-waterjet?dil=en>

## 10 Seznam obrázků

<i>Obr. 1</i>	<i>Rozdělení vodních paprsků [3]</i>	6
<i>Obr. 2</i>	<i>Vytváření ledu ve směšovací komoře [18]</i>	11
<i>Obr. 3</i>	<i>Hlavní prvky technologie WJM [14]</i>	13
<i>Obr. 4</i>	<i>Řezací hlava [21]</i>	15
<i>Obr. 5</i>	<i>Opotřebení zaostřovací trysky [16]</i>	16
<i>Obr. 6</i>	<i>Zásobník abraziva [Foto Milan Brožek]</i>	17
<i>Obr. 7</i>	<i>Vliv vzdálenosti trysky na hloubku řezu [3,8]</i>	18
<i>Obr. 8</i>	<i>Zalomení vodního paprsku proti směru posuvu [6]</i>	19
<i>Obr. 9</i>	<i>Drsnost povrchu a její kvalita [6]</i>	20
<i>Obr. 10</i>	<i>Vliv vzdálenosti trysky od obrobku na jeho spáru [12]</i>	22
<i>Obr. 11</i>	<i>Natočení řezací hlavy [6]</i>	22
<i>Obr. 12</i>	<i>Závislost hloubky řezu [10]</i>	23
<i>Obr. 13</i>	<i>Natočení ProgressJet [23]</i>	24
<i>Obr. 14</i>	<i>Příklad obrobků řezaných 6-osým WJM [25]</i>	25

## 11 Seznam tabulek

<i>Tab. 1</i>	<i>Porovnání paprskových metod dělení [24]</i>	9
<i>Tab. 2</i>	<i>Charakter řezu a jeho drsnost [6]</i>	20