

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



## **Bakalářská práce**

**Studium faktorů ovlivňujících obrábění perspektivních  
materiálů pomocí technologie CNC řezání vodním  
paprskem**

**Holas Martin**

**© 2024 ČZU v Praze**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Martin Holas**

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Studium faktorů ovlivňujících obrábění perspektivních materiálů pomocí technologie CNC řezání vodním paprskem**

Název anglicky

**Study of factors influencing machining of prospective materials using CNC waterjet cutting technology**

---

## **Cíle práce**

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice technologie WJ, AWJ a PWJ. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

## **Metodika**

Současný stav řešeného problému (literární rešerše). Závěry a přínos práce.

1906

## **Doporučený rozsah práce**

cca 30 stran

## **Klíčová slova**

aplikační oblast, kvalita řezu, SWOT analýza, technologické parametry, technologie vodního paprsku

---

## **Doporučené zdroje informací**

Časopis: Composites Part A, B, Polymers, Materials, Journal of Cleaner Production, Manufacturing Technology, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing

Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Polymer Degradation and Stability, Wear, Tribology International atd.

DAVIM, J. P.: Surface integrity in machining. London: Springer, 2010. Firemní literatura a sborníky z konferencí

GAMBLIN, R.: Machine tools: specification, purchase, and installation. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

GUPTA, J.K.: Abrasive Water Jet Machining of Engineering Materials. Springer: Cham, 2020. KOCMAN, K.: Technologické procesy obrábění. Brno: CERM, 2011.

LIANG, S. Y., SHIH, A.: Analysis of machining and machine tools. New York: Springer, 2016. MARTINEC, P.: Abrasives for AWJ cutting. Ostrava: Institute of geonics AS CR, 2002.

MOMBER, A. W., KOVACEVIC, R.: Modeling of Abrasive Water-Jet Cutting Processes. Principles of Abrasive Water Jet Machining. London: Springer, 1998.

MOMBER, A.W., KOVACEVIC, R.: Principles of Abrasive Water Jet Machining, Springer: London. 1998.

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2023/2024 LS – TF

## **Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

## **Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2023

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Studium faktorů ovlivňujících obrábění perspektivních materiálů pomocí technologie CNC řezání vodním paprskem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 7.3.2024



---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval panu profesorovi Miroslavu Müllerovi za cenné rady a podporu v oblasti tohoto tématu. Jeho odborné znalosti a ochota sdílet své poznatky mi velmi pomohly a já si jeho příspěvků a komentářů velice vážím. Díky jeho vedení jsem byl schopen lépe porozumět tématu a také dosáhnout kvalitního zpracování. Zároveň bych chtěl poděkovat panu Davidu Kučerovi z korporace AWAC s.r.o. za zodpovězení mých dotazů ohledně nejasností a možnost exkurze na jejich provozním pracovišti – řezárny v Praze, Hostivaři, vybavené devíti řezacími stoly s největším plošným rozměrem 3 000 mm x 6 000 mm, CNC s pětiosým systémem pro 3D řezání s eliminací úkosu (kolmý řez) pro řezání téměř všech druhů materiálů v tloušťce od 0,1 mm do 250 mm.

# **Studium faktorů ovlivňujících obrábění perspektivních materiálů pomocí technologie CNC řezání vodním paprskem**

## **Abstrakt**

Cílem práce je poskytnout detailní přehled o technologiích využívající vodní paprsek k provedení řezu. Zaměřuje se na obě hlavní metody, kterými jsou kontinuální a diskontinuální způsoby. Zkoumá širokou škálu technologií od těch, které využívají pouze čistý vodní paprsek, až po ty, které zahrnují například použití tekutého dusíku. Práce detailně popisuje sestavení jednotlivých zařízení a zároveň analyzuje faktory, které je nutné zohlednit při jejich používání. Vedle toho se zabývá jak výhodami, tak nevýhodami těchto technologií a provádí komparaci s průmyslově využívanými moderními obráběcími stroji. Cílem je poskytnout čtenářům komplexní povědomí o tomto specifickém způsobu zpracování materiálu, umožnit mu porozumět a čím tato technologie vyniká.

**Klíčová slova:** vodní paprsek, abrazivum, analýza, obrábění

# **Study of factors influencing machining of prospective materials using CNC waterjet cutting technology**

## **Abstract**

The aim of this work is to provide a detailed overview of waterjet technologies for cutting. It focuses on the two main methods, which are the continuous and discontinuous methods. It examines a wide range of technologies from those that use only a pure waterjet to those that involve, for example, the use of liquid nitrogen. The thesis describes in detail the set-up of each device and also analyses the factors that need to be considered when using them. In addition, it discusses both the advantages and disadvantages of these technologies and makes comparisons with modern machine tools used industrially. The aim is to provide readers with a comprehensive understanding of this specific method of material processing, enabling them to understand it and what makes this technology stand out.

**Keywords:** waterjet, abrasive, analysis, machining



# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>2 Historie</b> .....	<b>13</b>
2.1 Řezání vodním paprskem.....	13
<b>3 Dělení vodních paprsků a jejich princip</b> .....	<b>14</b>
3.1 Typy vodních paprsků.....	15
3.2 Kontinuální (nepřerušovaný) vodní paprsek.....	15
3.3 Princip řezání čistým vodním paprskem.....	16
3.4 Úkos a průřez materiálu.....	18
3.4.1 Kategorie průřezu materiálu.....	18
3.4.2 Tabulka průřezu materiálu.....	19
3.5 Pětiosá hlavice pro obrábění CNC vodním paprskem.....	20
3.6 Abrazivní vodní paprsek.....	21
3.7 Abrazivní suspenzní vodní paprsek.....	22
3.8 Ultravysokotlaký vodní paprsek.....	22
3.9 Kryogenní vodní paprsek.....	22
3.10 Diskontinuální (přerušovaný) vodní paprsek.....	25
3.10.1 Pulzní.....	25
3.10.2 Pulzní přerušovaný.....	26
3.10.3 Modulovaný.....	26
<b>4 Sestava pro vodní paprsky</b> .....	<b>27</b>
4.1 Základní komponenty.....	27
4.2 Abrazivní a abrazivní suspenzní vodní paprsek.....	29
4.3 Tryska pro suspenzní (slurry) obrábění.....	29
4.4 Tryska pro abrazivní obrábění.....	30
4.5 Zásobník abraziva.....	30
<b>5 Faktory technologií CNC řezání vodním paprskem</b> .....	<b>31</b>
5.1 Vliv čistoty vody.....	31
5.2 Aditiva.....	31
5.3 Abraziva.....	31
5.4 Tuhost a tvrdost materiálu.....	33
5.5 Tloušťka materiálu.....	33
5.6 Hustota abraziva.....	33
5.7 Přítlak.....	33
5.8 Průměr trysky.....	33
5.9 Vzdálenost trysky.....	34

<b>6</b>	<b>Technologie CNC řezání vodním paprskem.....</b>	<b>35</b>
6.1	Software .....	35
6.2	Využití.....	36
6.3	Ekonomická analýza obrábění – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....	36
<b>7</b>	<b>SWOT.....</b>	<b>39</b>
7.1	Výhody.....	39
7.2	Nevýhody .....	39
7.3	Porovnání obráběcích technologií.....	40
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>42</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 / Typy vodních paprsků.....	14
Obrázek 2 / Typy vodních paprsků .....	15
Obrázek 3 / Úhel záběru .....	17
Obrázek 4 / Schématický obrázek úkosu .....	18
Obrázek 5 / Průřez materiálem na obrobku .....	19
Obrázek 6 / Průřez materiálem .....	19
Obrázek 7 / Schéma 5-ti osého CNC .....	20
Obrázek 8 / Kryogenní paprsek s tekutým dusíkem .....	23
Obrázek 9 / Tryskající kryogenní paprsky rozdílných teplot při 550 barech .....	24
Obrázek 10 / Řez proveden na prasečí kosti pomocí kryogenního paprsku .....	24
Obrázek 11 / Znázornění pulzního paprsku .....	25
Obrázek 12 / Znázornění pulzního přerušovaného paprsku .....	26
Obrázek 13 / Znázornění modulového přerušovaného paprsku .....	26
Obrázek 14 / Čistý vodní paprsek schéma .....	27
Obrázek 15 / Multiplikátor .....	28
Obrázek 16 / Schéma abrasive water jet machine .....	29
Obrázek 17 / Detailní schéma trysky pro suspenzní paprsek .....	29
Obrázek 18 / Detailní schéma trysky pro abrazivní vodní paprsek .....	30
Obrázek 19 / Granát MESH snímek z mikroskopu .....	32
Obrázek 20 / Nákladový graf.....	38

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 / Druhy řezů a jejich drsností ..... 19

## **Seznam použitých zkratk**

**WJ – water jet (vodní paprsek)**

**AWJ – abrasive water jet (abrazivní vodní paprsek)**

**AWJM – abrasive water jet machine (stroj pro abrazivní vodní paprsek)**

**ASJ – abrasive slurry jet (abrazivní suspenzní vodní paprsek)**

**PWJ – pure water jet (čistý vodní paprsek)**

# 1 Úvod

Technologie řezání vodním paprskem je jedním z nejrychleji se rozvíjejících hlavních obráběcích procesů na světě. To, co lze řezat vodním paprskem, nemá prakticky žádná omezení. Její výjimečnost spočívá v unikátním spojení precizního řezání s širokým spektrem materiálů, které dokáže zpracovat, a to vše s minimálním teplem a deformací materiálu. Tato technologie významně překračuje hranice tradičních způsobů úpravy a obrábění materiálů. Nabízí tak inovativní přístup k jejich řezání a tvarování. Má schopnost upravovat materiál s širokým rozsahem tloušťek a zároveň dosahovat precizních výsledků ve složitých tvarech. Momentálně je nepostradatelná převážně v průmyslovém prostředí. Tato revoluční technologie otevírá dveře k novým možnostem a dosud nepoznaným perspektivám v oblasti materiálového zpracování.

## 2 Historie

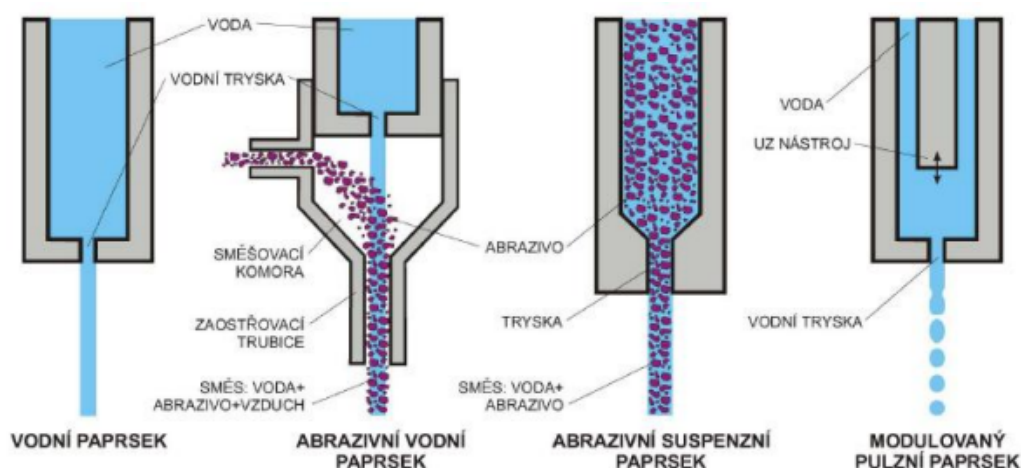
### 2.1 Řezání vodním paprskem

Úplné počátky využití vodního paprsku jsou datovány od 19. století, kdy byla voda pod tlakem používána primárně na odstraňování nánosů hlíny z nerostů a zemin v těžebním průmyslu. Postupným rozvojem se tato technologie uplatnila v tiskařských firmách, které využívaly vodní paprsek k řezání papíru. První patent na stroj pro řezání vodním paprskem byl získán Normanem Franzem, který působil jako profesor na Univerzitě Britské Kolumbie a také jako lesní inženýr v Kanadě. Jeho inovativní metoda zahrnovala využití vodního paprsku pod extrémním tlakem 700 barů. (1)

Po druhé světové válce se objevila technologie vodního paprsku, která přinesla revoluci v oblasti dělení materiálů. Rozvoj vysokotlakých čerpadel byl zásadní pro tuto transformaci. Carl Johnson v roce 1956 představil techniku, která umožnila separovat polymery pomocí tenkého vysokotlakého vodního proudu. Na konci padesátých let 20. století inženýři vyvinuli revoluční systém, který překonal dosavadní limity tlaku vody a dosáhl až 6900 barů. Tento průlomový systém představoval významný milník ve vývoji metody řezání pomocí vodního paprsku. Jeho jádrem bylo speciální čerpadlo s hypersonickým proudem kapaliny, které bylo schopno řezat i extrémně odolné slitiny, jako je nerezová ocel. V roce 1962 přinesla nová technologie způsob v podobě pulzního vodního paprsku, který byl schopný řezat kovy, kámen a jiné podobné materiály. Hlavní snahou dalšího vývoje bylo najít nejlepší tvar trysky pro ultra-vysokotlaký paprsek. V sedmdesátých letech 20. století proběhla studie zaměřená na prodloužení životnosti trysek. Vědci použili korund jako abrazivo a dosáhli tak zlepšení odolnosti trysek proti opotřebení. Dalším významným krokem v sedmdesátých letech byl vývoj trysky s průměrem 0,05 mm a tlakem 4830 barů, který provedl Norman Franz. Na začátku devadesátých let se staly skutečností inovace v řízeném pohybu paprsku, jeho polohování, rychlosti řezání a změně polohy paprsku. (2) (3)

### 3 Dělení vodních paprsků a jejich princip

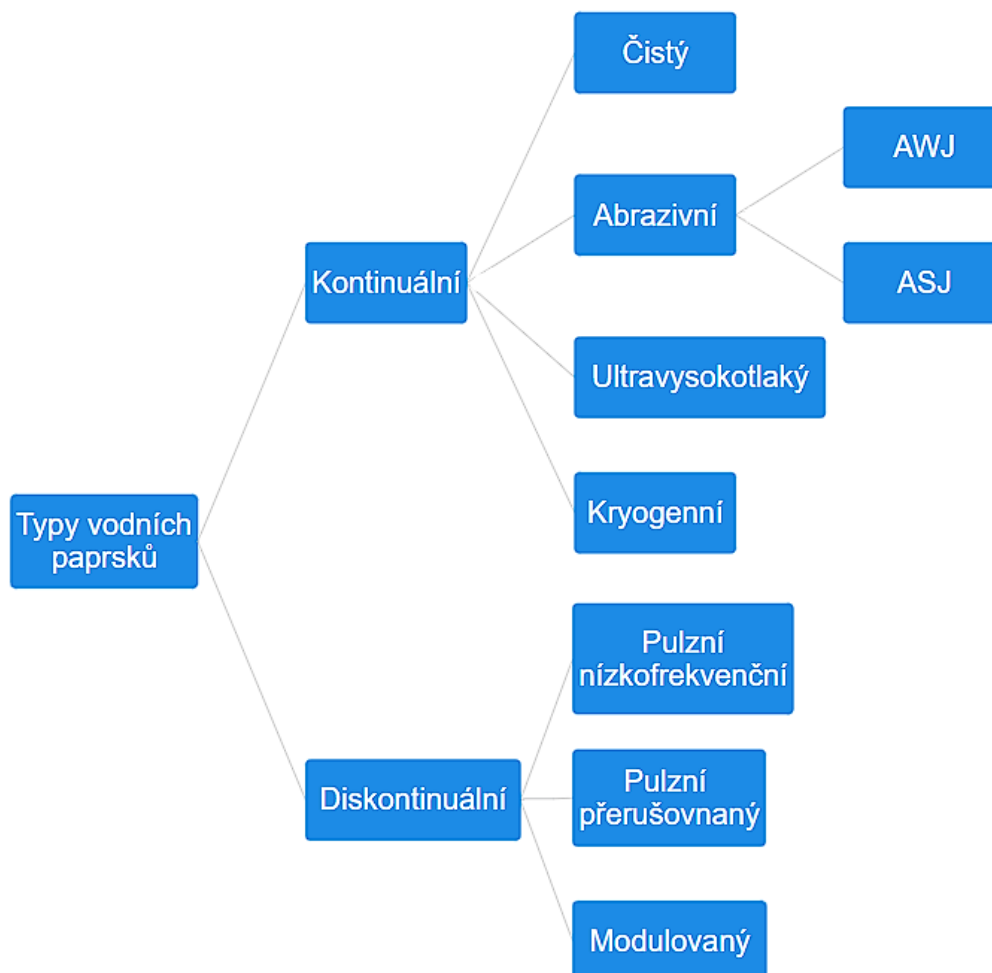
Na obrázku je zobrazeno několik typů vodních paprsků, které se dělí na kontinuální a diskontinuální. Mezi kontinuálními paprsky je vodní paprsek, který je čistě vodní bez přídavku abraziva. Dále je zde abrazivní vodní paprsek, kde se abrazivo mísí s vodou až v trysce, a abrazivní suspenzní paprsek, kde dochází k míchání abraziva již v mísící komoře. Přidání abraziva do vodního paprsku efektivně zvyšuje účinnost řezu. Mezi diskontinuálními paprsky je na obrázku zobrazen modulovaný paprsek. Tento paprsek v určitých intervalech snižuje průtok, což vede k větší efektivnosti paprsku. Modulace průtoku může být využita k optimalizaci procesu řezání a snížení spotřeby energie. Každý z těchto paprsků má své specifické využití a výhody, a volba mezi nimi závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích na řez. Obě technologie vodního paprsku mohou na první pohled působit podobně, ale skutečně se zásadně liší v použití a výkonnosti. Čistý vodní paprsek pracuje pouze s vysokotlakou vodou, která slouží k narušování materiálu. Naopak u abrazivního paprsku je voda pouze urychlovačem, zatímco samotné narušování materiálu probíhá abrazivem, což je tvrdý materiál přidávaný do paprsku. V tomto případě se voda stává spíše prostředkem k urychlení a usměrnění abrazivního materiálu než samostatným nástrojem k erozi. Na obrázku č. 1 jsou vyobrazeny základní druhy vodních paprsků. (2) (4) (5)



Obrázek 1 / Typy vodních paprsků (15) (44)

### 3.1 Typy vodních paprsků

Toto grafické znázornění na obrázku č. 2 napomáhá lépe porozumět rozdělení vodních paprsků na kontinuální, diskontinuální a jejich podsložky.



Obrázek 2 / Typy vodních paprsků (21)

### 3.2 Kontinuální (nepřerušovaný) vodní paprsek

Kontinuální vodní paprsek je forma vodního paprsku, která má konstantní a neustále proudící charakter. To znamená, že voda nebo abrazivní směs je dodávána do trysky bez přerušování. V tomto případě je tlak vody udržován na konstantní úrovni, což umožňuje stabilní a neustálý tok paprsku během procesu řezání nebo obrábění. Kontinuální vodní paprsek je často využíván v přesném řezání a obrábění materiálů, kde je důležitá konzistence a přesnost paprsku. (6)

### 3.3 Princip řezání čistým vodním paprskem

Řezání vodním paprskem je výrobní technika s širokým spektrem využití, která umožňuje precizní řezání různých materiálů. Tato technologie vyniká poměrně hladkým a čistým řezným povrchem, což minimalizuje potřebu dodatečných úprav. Klíčovým prvkem této techniky jsou vysokotlaká čerpadla, která zajišťují konzistentní a spolehlivé výsledky. (7)

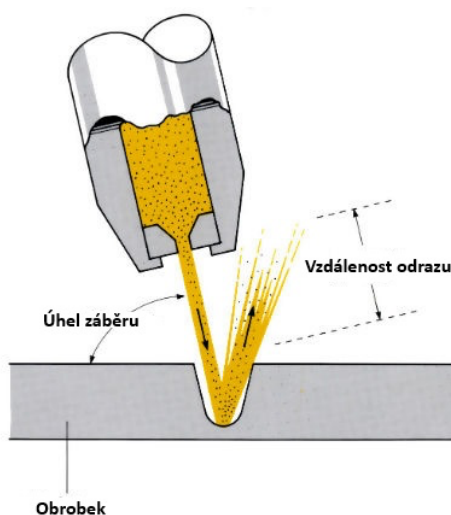
Řezání vodním paprskem spočívá v procesu řezání materiálů za studena pomocí vysokotlakého proudu vody (v podstatě neviditelný). Tato vlastnost je zvláště výhodná při zpracování pokročilých kovových slitin, neboť zachovává vnitřní strukturu materiálu beze změn. Při řezání kompozitních materiálů je navíc voda schopna zachytit a shromáždit odpadní částice do vodní nádrže, což minimalizuje šíření prachu a zajišťuje bezpečnější pracovní prostředí a šetrný přístup k životnímu prostředí. (7)

Klíčovou roli v procesu řezání vodním paprskem mají používané trysky. Trysky mohou být vyrobeny ze safíru, kalené oceli nebo nerezové oceli a jejich průměr se pohybuje v rozmezí od 0,075 mm do 0,40 mm. Volba vhodného průměru trysky závisí na materiálu, který bude řezán. Menší trysky poskytují jemnější a preciznější řezy, zatímco pro silnější materiály je třeba použít větší trysky. Zvětšení průměru trysky zvyšuje řezný výkon, ale také zvyšuje energetické nároky na proces. (8)

Životnost trysek je výrazně ovlivněna kvalitou použité vody. Demineralizovaná, deionizovaná a filtrovaná voda s velikostí filtru 0,5  $\mu\text{m}$  přispívá k delší životnosti trysek. To znamená, že pokud je voda udržována v optimálním stavu, trysky budou moci pracovat efektivně a bez potřeby časté výměny. Úhly záběru trysek jsou dalším důležitým faktorem. Tyto úhly se mohou pohybovat od 0° do 30° s tím, že kladné úhly náběhu obvykle zlepšují řezný výkon, znázorněno na obrázku č. 3. Volba správného úhlu náběhu může být klíčová pro dosažení požadovaných řezných vlastností. (8)



Další významnou roli v procesu řezání hraje i odstupová vzdálenost mezi tryskou a materiálem. Tato vzdálenost závisí na různých faktorech, jako je tloušťka materiálu, řezná rychlost a požadovaná kvalita řezu. Obvykle se pohybuje od 2,5 mm do 50 mm, s typickým odstupem kolem 5 mm. Větší odstupová vzdálenost může znamenat více hluku a menší průnik materiálu, což je důležité při plánování procesu řezání. (8)

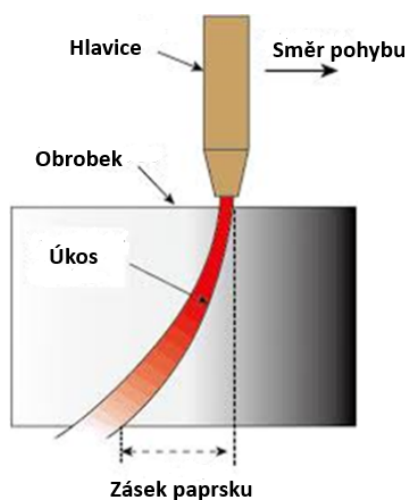


Obrázek 3 / Úhel záběru (8)

Technika řezání vodním paprskem má široké uplatnění v řezání různých materiálů, přičemž nejvhodnější je pro nekovové materiály a tenké měkké kovy, jako jsou hliník, měď, olovo a měkká ocel. V současné době je možné řezat materiály jako plasty, kompozity, dřevo, papír, azbest, kůži, textilie, potraviny a keramiku pomocí této techniky, pokud jde o měkký a tenký materiál, lze položit více vrstev na sebe. Při řezání tvrdých kovů však tato metoda není obvykle úspěšná, a tvrdé, husté materiály podobné sklu, jako jsou akryláty, polykarbonáty a styren, se řezou obtížně, pokud nejde o tenké pláty. Laminované kompozity mohou mít tendenci k delaminaci (oddělování vrstev), ale tuto potíž lze často vyřešit snížením řezné rychlosti a pečlivým monitorováním řezných parametrů. Celkově lze říci, že řezání vodním paprskem je flexibilní technika, která je vhodná pro různorodé materiály, ale je důležité zvážit specifické vlastnosti materiálu a optimalizovat parametry řezání pro dosažení požadovaných výsledků. (8)

### 3.4 Úkos a průřez materiálu

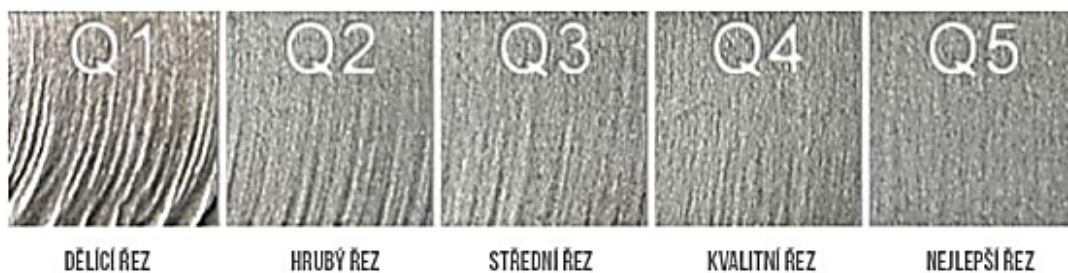
Kvalitu povrchu řezu lze rozdělit do pěti kategorií, které odpovídají výsledné kvalitě. Přímá souvislost mezi kvalitou povrchu a rychlostí řezání je patrná. Při vysokých rychlostech posuvu dochází k zvýšení zakřivení, po celé hloubce řezu jsou zřetelné rýhy. Tyto rýhy zohledňují stupně drsnosti a přesnost v obou zónách řezu, včetně úkosů. Vytvoření jednotlivých kvalit řezu může být buď záměrné s cílem snížit ekonomické náklady, nebo může dojít k horším výsledkům kvůli nedostatečné optimalizaci řezného procesu. Jelikož s rostoucí tloušťkou síla vodního paprsku postupně klesá dochází k pozdržení paprsku, jak je zobrazeno na obrázku č. 4. (9) (10)



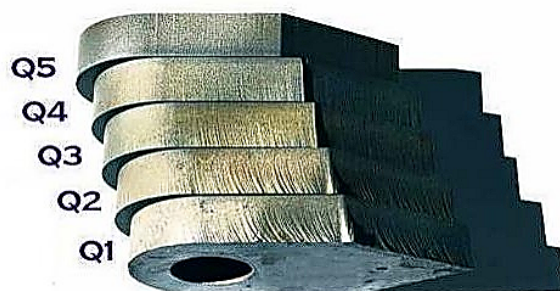
Obrázek 4 / Schématický obrázek úkosu  
(43)

#### 3.4.1 Kategorie průřezu materiálu

Kvalita povrchu řezu je kategorizována do pěti skupin. Při vyšších rychlostech posuvu dochází k zvýšení zpoždění paprsku, což je patrné po celé hloubce řezu ve formě viditelných kanálků. Tento jev demonstruje komplexní interakci mezi rychlostí řezání a výslednou kvalitou povrchu. Na obrázku č. 5 a č. 6 jsou detailně zobrazeny drsnosti průřezu materiálu (9)



Obrázek 5 / Průřez materiálem (9)



Obrázek 6 / Průřez materiálem na obrobnku (35)

### 3.4.2 Tabulka průřezu materiálu

V této tabulce, která navazuje na obrázek č. 5 a 6, jsou obsaženy detailní informace týkající se průřezu. Zahrnují podrobný popis provedení řezu, drsnosti řezu, přesnosti provedení řezu a také údaje o úkosu, což poskytuje komplexní přehled o vlastnostech průřezu zobrazeného materiálu na zmíněném obrázku. (9)

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra v horní kontuře [μm]	Drsnost Ra ve spodní kontuře [μm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost ve spodní kontuře [mm]	Úkos
Q1	Dělicí řez	4,0-6,4	do 40	+/-0,2	Dle typu a síly materiálu	Výrazný úkos
Q2	Hrubý řez	cca 4	do 25	+/-0,2		
Q3	Střední řez	cca 4	do 12,5	+/-0,15		
Q4	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/-0,1	+/-0,2	Minimální
Q5	Nejlepší řez	Pod 3,2	cca 3,2	+/-0,1	+/-0,1	Mírný podřez

Tabulka 1 / Druhy řezů a jejich drsností (9)

### 3.5 Pětiosá hlavice pro obrábění CNC vodním paprskem

Tradiční metody řezání, včetně prvních fréz pro řezání vodním paprskem, byly omezeny na tříosé obrábění. Těmito osami byly osa X, osa Y a osa Z. Ty umožňovaly řezným nástrojům pro řezání vodním paprskem vytvářet lineární řezy v libovolném materiálu podle potřeby. Při pětiosém řezání vodním paprskem, což je typ pětiosého obrábění, se řezná hlava pohybuje kromě tří tradičních os ještě ve dvou dalších osách, takže celkem má 5 os, obrázek č. 7 je nápomocný k snazšímu představení:

Osa X: Řezací vozík se pohybuje vodorovně (zleva doprava) ve směru příčného nosníku.

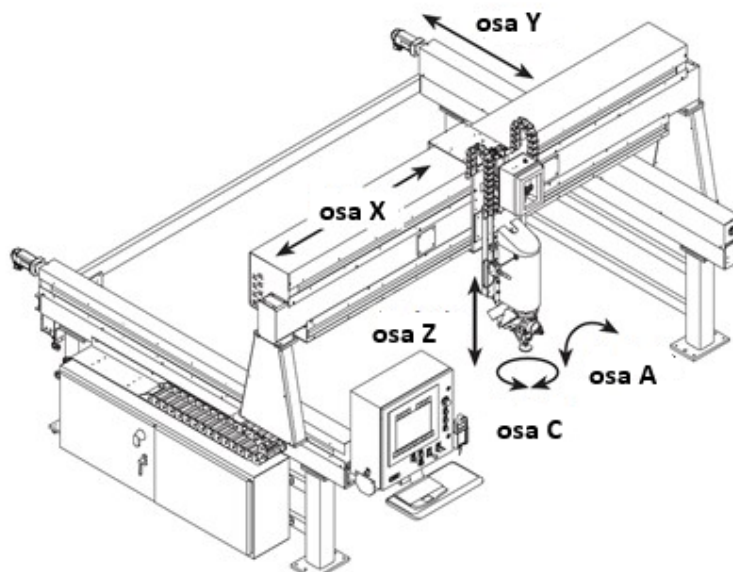
Osa Y: Příčný nosník pohybuje řezací hlavou dopředu a dozadu (dopředu-dozadu) podél bočních nosníků.

Osa Z: Řezací hlava se pohybuje vertikálně (nahoru-dolů).

Osa A: Řezací hlava se naklání v rozsahu řezných úhlů až do 60 stupňů. Úhlovým řezáním lze vytvářet úkosy a další tvary.

Osa C: Řezací hlava se otáčí kolem osy Z, což umožňuje řezání různých tvarů. (1)

Řezání vodním paprskem se obvykle provádí na CNC řízených stolech. Pohyb řezací hlavy, tedy i dráha řezu je řízena počítačem na základě předem sestaveného programu. Tím je možné provést i ty nejvíce tvarově náročné řezy během jedné operace. V současné době se stále více prosazuje 3D řezání s eliminací úkosů. (9) (11)



Obrázek 7 / Schéma 5-ti osého CNC (37)

### 3.6 Abrazivní vodní paprsek

Abrazivní obrábění, které je často označováno jako abrazivní řezání, je sofistikovaný proces, který využívá fyzikální principy pro manipulaci s materiálem. Tento proces spočívá v přidání částic o velikosti desítek mikrometrů do proudu vzduchu. Tyto částice, známé jako abraziva, jsou obvykle vyrobeny z tvrdých materiálů, které zefektivňují obyčejné obrábění vodním paprskem. Proces obrábění abrazivním vodním paprskem je vhodný pro širokou škálu materiálů, ať už jsou měkké, jako pryže nebo pěna, nebo tvrdé a křehké, jako kovy, keramika a sklo. Díky řízeným pohybům počítačem je řezný proud schopen vytvářet objekty efektivně a s vysokou přesností. Materiály, které by jinak bylo obtížné řezat pomocí termálního nebo laserového řezání, lze ideálně zpracovat prostřednictvím procesu AWJM. (12) (13)

Abrazivní vodní paprsek funguje na principu mechanické eroze, což znamená, že řezání materiálu probíhá díky rychlé erozi způsobené vysokou kinetickou energií směsi vody a abraziva. Rychlost vodního paprsku, spolu s přítomností abrazivního materiálu, hraje v tomto procesu klíčovou roli. Průměrná rychlost vodního paprsku často dosahuje hodnoty 300 m/s, ale v některých speciálních aplikacích může dosáhnout až 900 m/s. Tato vysoká rychlost přináší vysokou kinetickou energii směsi, což umožňuje efektivní erozi cílového materiálu a přesné řezání. (13) (12)

Transport vody od čerpadla pod vysokým tlakem k řezací hlavě je zajištěn vodovodním systémem, který zahrnuje různé typy ventilů, spojů a vysokotlaké potrubí. Tyto prvky společně tvoří základní komponenty systému pro přívod vody. Rychlost průtoku vody může dosáhnout až 11 litrů za minutu. Činnost systému s abrazivním vodním paprskem spočívá v čerpání vody pod vysokým tlakem pomocí vysokotlakého systému, který následně distribuuje vodu do celého systému. Tlak běžných vodních čerpadel dosahuje hodnot od 1500 barů až do 4500 barů [b]. (14)

Celkově lze říct, že abrazivní vodní paprsek je inovativní technologie, která našla uplatnění v různých odvětvích a umožňuje precizní řezání a tvarování materiálů díky vysoké rychlosti a kinetické energii vodního paprsku a abrazivního materiálu. (14)

### **3.7 Abrazivní suspenzní vodní paprsek**

Proces suspenzního paprsku je navržen tak, že abrazivní materiál je smíchán s vodou ještě předtím, než vstoupí do vstupního systému. Umožní tak dosáhnout homogenní směsi abraziva a vody. Tryska, která je zodpovědná za vytvoření samotného paprsku, musí být pečlivě navržena a vyrobena tak, aby byla schopna správně manipulovat s touto směsí a vytvořit optimální řezací podmínky. Tato tryska poskytuje prostředí pro efektivní míchání obou složek. Abrazivní materiál je pečlivě integrován s tlakovou vodou ve směsné komoře trysky. Tento krok umožňuje homogenní distribuci abrazivních částic v tekutém médiu, což je klíčové pro dosažení požadovaného abrazivního efektu. Voda dosahuje hodnot až 1000 barů. Tento vysoký tlak je klíčový pro vytváření dostatečně silného paprsku, který je schopen účinného abrazivního obrábění. Průtok suspenze je okolo 20 kg/min. Způsob tohoto obrábění se používá zejména s velmi jemným brusivem (MESH 220). (11) (15) (6) (16)

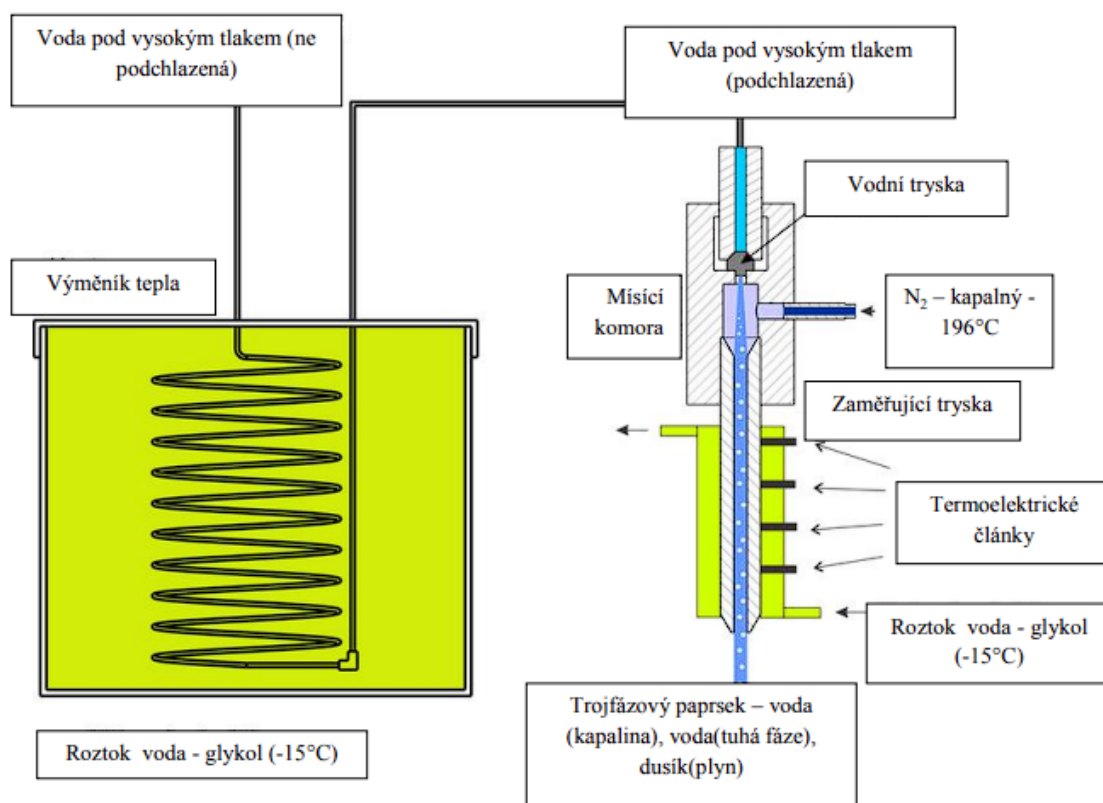
### **3.8 Ultravysokotlaký vodní paprsek**

V současné době jsou k dispozici čerpadla, která vykazují vysokou výkonnost tím, že jsou schopna generovat tlak vodního média přesahující hodnotu 6000 barů. Pro dosažení tohoto velikého tlaku lze využít dvojstupňové čerpadlo které zdvojnásobí průchozí tlak jednou tolik díky druhému dodatečnému čerpadlu. Ke zvýšení tlaku vody lze také využít multiplikátor, avšak jeho konstrukční stránka je komplexnější. (2)

### **3.9 Kryogenní vodní paprsek**

Samotný čistý vodní paprsek není schopen řezat tvrdé materiály, kdežto s abrazivním paprskem je to možné, avšak zanechává celkově znečištěné a nesterilní prostředí. Především kvůli lékařským účelům byl vyvinut způsob, který využívá jako abrazivum zmrzlou vodu. Pro úspěšné fungování tohoto systému je nezbytné využití rezervoáru předchlazeného dusíku, dochlazovačů a dalších klíčových komponent. Led po kontaktu s materiálem odpadáva do zásobníku, kde se mění v kapalně skupenství a je zde možnost jej po nezbytné filtraci znovu využít. Všechny prvky této technologické sestavy musí být precizně navrženy s ohledem na provoz v extrémně nízkých teplotách, až do teplotní úrovně -190°C. (2) (17) (18)

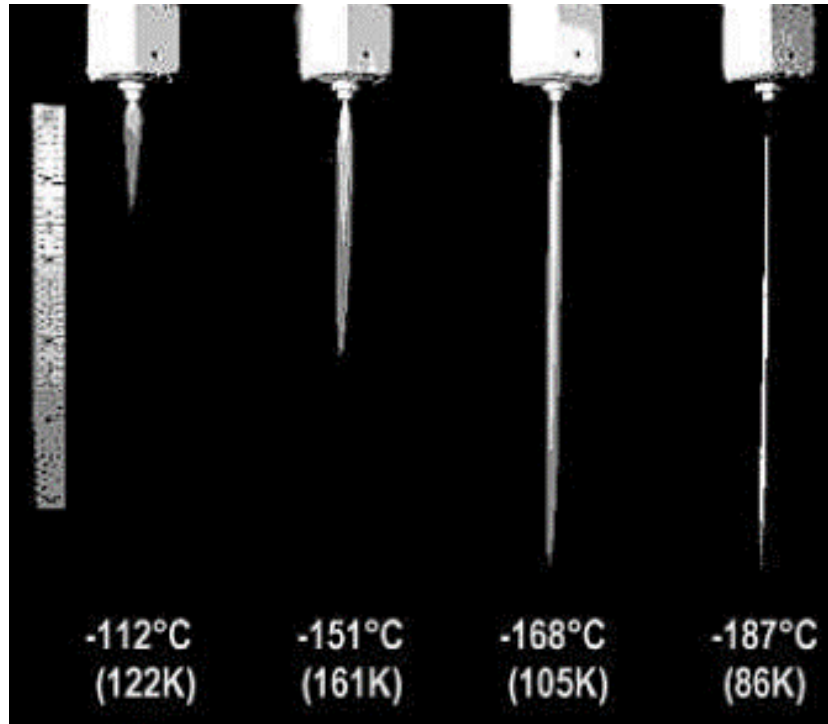
Existují dva způsoby provedení této metody, první je na principu abrazivního vodní paprsku, kdy jsou ledové částice využity jako příměs s vodou. Druhý způsob funguje na principu předchlazení vody v okruhu a dodatečným přidáním zkapalněného plynu například dusíku. Celý tento proces je znázorněn na obrázku č. 8. (2)



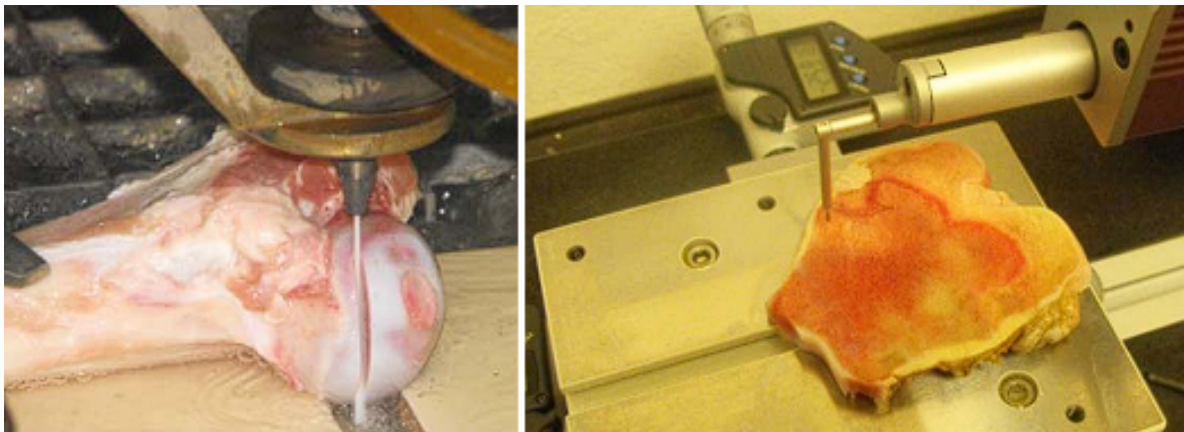
Obrázek 8 / Kryogenní paprsek s tekutým dusíkem (2)

Studie z Ústavu geoniky ukazují, že efektivita vodního paprsku je přímo úměrná teplotě dusíku – čím nižší je teplota, tím účinněji dokáže paprsek provádět řezání. Při teplotách přesahujících  $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$  začíná dusík příliš rychle odpařovat, což má za následek ztrátu rezného výkonu. Avšak při extrémní teplotě  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  paprsek dosahuje stejného výkonu jako při řezání klasickým vodním paprskem. Celý tento proces je zachycen na snímku č. 9, který se nachází na následující straně spolu s využitím kryogenního paprsku ve zdravotnictví na snímku č. 10. Výraznou výhodou této metody je šetrnost k životnímu prostředí, způsobená vypařováním rezného média, což vede k eliminaci odpadu. Tato technologie tak kombinuje extrémně nízké teploty s efektivním řezáním a současně klade důraz na udržitelnost a ekologické aspekty. (17)





Obrázek 9 / Tryskající kryogenní paprsky rozdílných teplot při 550 barech (17)



Obrázek 10 / Řez proveden na prasečí kosti pomocí kryogenního paprsku (39) (38)

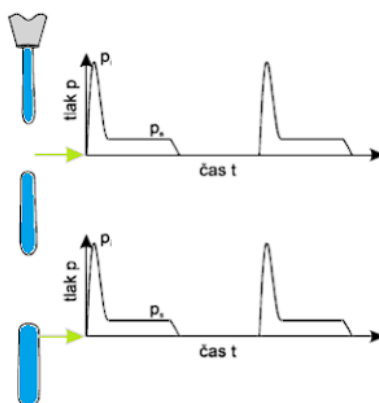


### 3.10 Diskontinuální (přerušovaný) vodní paprsek

Diskontinuální vodní paprsek je charakterizován cyklickým nebo přerušovaným prouděním vody nebo abrazivní směsí z trysky. Oproti kontinuálnímu paprsku dochází k opakovaným zastavením a spouštěním toku. Diskontinuální paprsek může mít různé cykly tlaku a průtoku. Na obrázcích pod odstavci k diskontinuálním paprskům jsou zobrazeny schémata související s danými tématy, které poskytují vizuální podporu a doplnění k informacím uvedeným v textu, viz. obrázky č. 11, č. 12 a č. 13. (19) (17)

#### 3.10.1 Pulzní

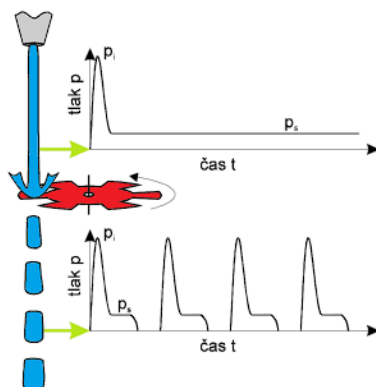
Pulzní proud je formován jednotlivými paprsky vody, které při nárazu na povrch materiálu vyvolávají prudký nátlak, kdy počáteční tlak převyšuje koncový stav tlaku několikanásobně. Následně dochází k postupnému snižování tlaku na úroveň před stykem kapaliny a materiálu. Tento princip funguje v cyklech, intenzita je závislá na rychlosti a velikosti tlaku vodního paprsku, s nimiž je možné tyto impulsy generovat. (20) (21)



Obrázek 11 / Znáznornění pulzního paprsku (20)

### 3.10.2 Pulzní přerušovaný

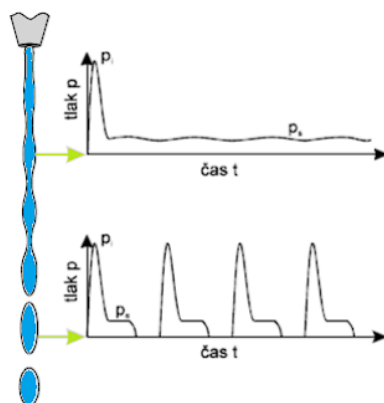
Pulzní přerušovaný paprsek je v první fázi inicializován jako nepřerušovaný tok vody. V druhé fázi je paprsek vody dělen pomocí rotačního kotouče, což vytváří oddělené paprsky vody s rozměry v řádu jednotek milimetrů. Nevýhodou kotouče je, že rapidně dochází k jeho opotřebení. (20) (21)



Obrázek 12 / Znázornění pulzního přerušovaného paprsku (20)

### 3.10.3 Modulovaný

Modulovaný paprsek funguje na základě cyklického snižování průtokové rychlosti. Toto snížení průtoku vody vede k vytváření jednotlivých paprsků, které poté efektivně procházejí materiálem. (21)



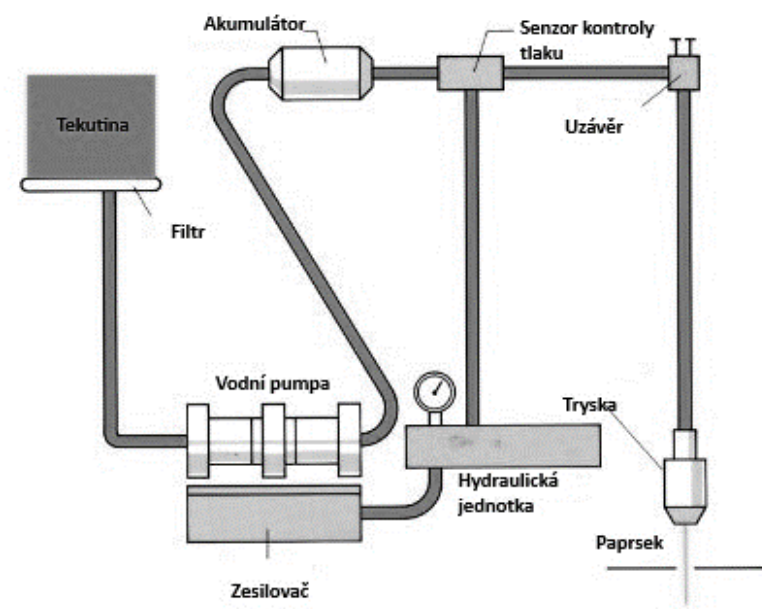
Obrázek 13 / Znázornění modulového přerušovaného paprsku (20)

## 4 Sestava pro vodní paprsky

### 4.1 Základní komponenty

CNC sestavu tvoří komplexní zapojení po sobě jdoucích komponent. Součástí stroje pro vodní paprsek je také samotný stůl, který slouží jako lapač vody. Celá tato sestava je vyobrazena na obrázku č. 14. (22)

Lapač vody, který je součástí CNC stolu pro vodní řezání je určený k zachycení již použité vody z vodního paprsku, případně vodního paprsku s abrazivem, který prochází skrze obrobek. Do lapače odtéká jak znečištěná voda, tak zadržené třísky. Záchytný lapač musí disponovat dostatečnou hloubkou pro efektivní rozptýlení paprsku ještě před jeho dotykem se dnem. Doporučená hloubka nádoby se pohybuje v rozmezí od 300 mm do 600 mm. V případě nedostatku místa je možné zvolit jako alternativu mělké nádoby, které jsou naplněny kovovými kuličkami. (23) (6)



Obrázek 14 / Čistý vodní paprsek schéma (8)

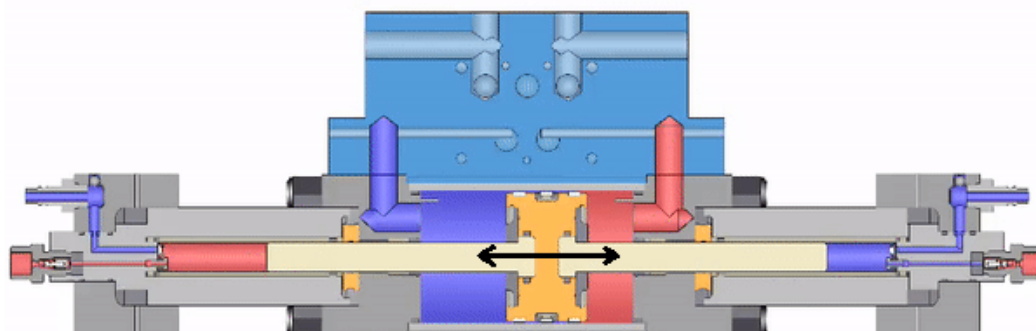
Filtr je prvotní součástí celkové soustavy, se kterou přijde kapalina do styku. Představuje nedílnou součást zařízení, slouží k filtrování kapaliny a odstraňuje nečistoty v rozmezí velikosti od 1,2  $\mu\text{m}$  do 0,5  $\mu\text{m}$ . Zároveň zabezpečuje ochranu vodního čerpadla před možným poškozením, způsobeným nežádoucími příměsmi. (6) (23)

Hydraulický akumulátor je tlaková nádoba, má za cíl kompenzovat nepravidelnosti v čerpání kapaliny způsobené stlačením vody. Jeho hlavní funkcí je zajištění stabilního tlaku a průtoku vody. Tento přístroj tedy slouží jako tlumič pro nekonzistentní čerpání kapaliny. (6) (23)

Vodní čerpadlo, konstruované pro generování vysokotlakého vodního paprsku pomocí sestavy hydraulických čerpadel, funguje jako prvek pro vysokotlaký vodní paprsek. Po průchodu akumulátorem je tento vodní paprsek dále zesílen hydraulickým systémem s multiplikátorem. Tímto způsobem se vodní čerpadlo stává klíčovým prvkem v procesu eskalace vodního paprsku. (6) (23)

Multiplikátor (obrázek č. 15), zařízení ve kterém dochází ke zvýšení tlaku pomocí oleje. Základní princip spočívá v přenosu tlaku z velkého pístu na malý. Rozdíl ve velikosti těchto pístů způsobí dramatické zvýšení hydraulického tlaku ve vodní části, a to více než 30krát. To znamená, že při vstupním hydraulickém tlaku 200 barů je vytvořen tlak vody až 6200 barů. (24)

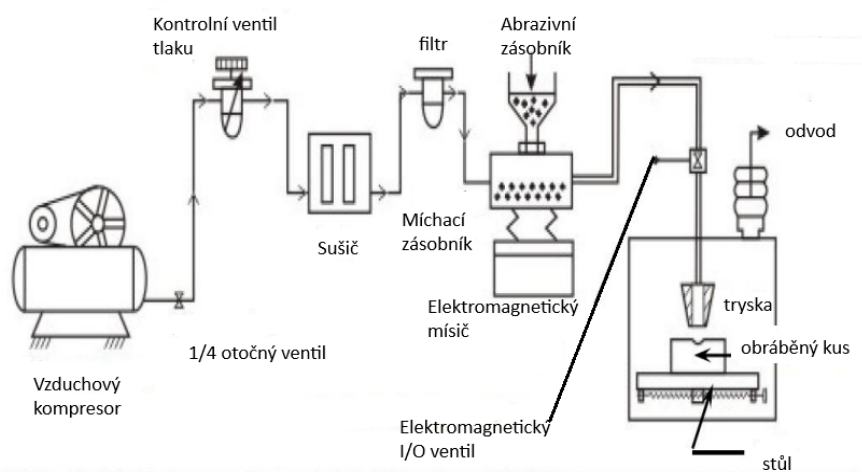
Intenzifikační čerpadla jsou považována za nejšetrnější a nejvíce dynamické řešení pro vytváření ultra vysokého tlaku. Tato technologie nachází uplatnění v mnoha oblastech, mezi které patří průmyslové řezání vodním paprskem. Zde je vysoký tlak vody nezbytný pro efektivní řezání různorodých materiálů. (24)



Obrázek 15 / Multiplikátor (24)

## 4.2 Abrazivní a abrazivní suspenzní vodní paprsek

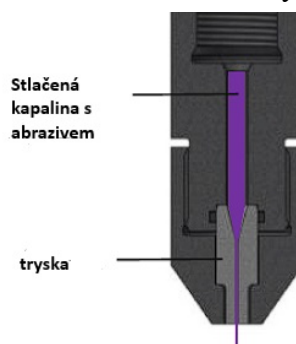
Příkon energie suspenzního vodního paprsku je zajištěn tlakem vzduchu, maximální pracovní tlak je 350 barů. Směs abraziva a vody je nejprve vedena násypkou do zásobníku, kde dochází k mísení, poté následuje transport suspenze pomocí vzdušného tlaku potrubím do trysky. Celý tento proces se pro lepší vizualizaci nachází na obrázku č. 16. Tento postup se odlišuje od abrazivního vodního paprsku, kde je princip identický s vodním paprskem, akorát je abrazivum přidáno do řezací hlavy pomocí vzduchu na konci procesu. (14)



Obrázek 16 / Schéma abrasive water jet machine (14)

## 4.3 Tryska pro suspenzní (slurry) obrábění

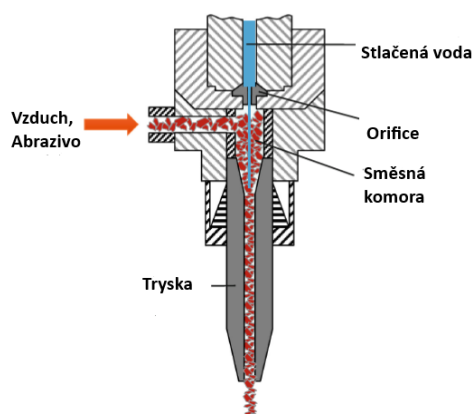
Konstrukce této trysky je velice jednoduchá. Směs abraziva a vody proudí pomocí stlačeného vzduchu přímo do trysky. Tyto systémy, konkrétně systém s abrazivní suspenzí nebo kalovým proudem, pracují s postupným přidáváním abraziva do proudící vody, které se mísí v nádobě a tím vytváří směs pro obrobení, poté je pod tlakem vzduchu dopravena do trysky. Tento proces umožňuje rovnoměrné rozložení abraziva v kapalině a zajišťuje efektivní a přesné provedení úkonu řezání či obrábění. Tento celý systém je náročnější na údržbu, oproti obrábění s abrazivem, které se mísí až v trysce. Jednoduché schéma trysky se nachází na obrázku č. 17. (25)



Obrázek 17 / Detailní schéma trysky pro suspenzní paprsek (25)

## 4.4 Tryska pro abrazivní obrábění

Sestava trysky, resp. řezací hlava, se skládá ze směšné komory, orifice a abrazivní trysky s vodním paprskem. Její sestavení je zobrazeno na obrázku č. 18. Řezací hlava slouží k zajištění a řízení vysokotlakého vodního paprsku. Její průměr se obvykle pohybuje mezi 1 mm až 5 mm. Orifice je zodpovědná za dopravu vysokotlaké vody do vysokorychlostního vodního paprsku. Mezi nejčastěji používané materiály pro orifici patří diamant a safír. Diamantová orifice obvykle vydrží pracovat až 2 000 hodin, zatímco safírová orifice může pracovat pouze 200 hodin. Prostor, kde se mísí abrazivní částice a voda, kam voda proudí pod tlakem, je prostor směšné komory, který se nachází mezi tryskou a orificí. (26) (13)



Obrázek 18 / Detailní schéma trysky pro abrazivní vodní paprsek (25)

## 4.5 Zásobník abraziva

Zásobník abraziva je zařízení, které je navrženo s cílem usnadnit a optimalizovat proces manipulace s abrazivním materiálem ve výrobním prostředí. Jeho základní konstrukce se skládá z kovového rámu, který nese samotný zásobník, víko, přetlakový přepad vybavený systémem filtrace a výpustní ventil. Tato konstrukce je navržena s ohledem na pohodlné a kontinuální plnění zásobníku s využitím vysokozdvíhových vozíků. S pomocí vysokozdvíhových vozíků je možné efektivně vyprazdňovat celé pytle s abrazivem do zásobníku. Přetlakový přepad má za úkol zachytit nečistoty a případně nevhodně tvarované částice abraziva. Výpustný ventil poskytuje možnost přesného a kontinuálního dávkování, tímto způsobem se zajišťuje optimální výkon a efektivita procesu řezání vodním paprskem. (27)

## **5 Faktory technologií CNC řezání vodním paprskem**

### **5.1 Vliv čistoty vody**

Hlavní roli v ochraně průtokového ústrojí před zanesením hraje úprava vody. Nejlepší volbou je destilovaná voda, která snižuje riziko usazení nečistot v tryskové šterbině. V závislosti na čisté vodě dochází k menšímu opotřebení průtokového systému, jakožto rozvodů potrubí a ventilů. Čistota vody také ovlivňuje rychlost řezání, kvalitu konečného výrobku a celkových finančních nákladů. (6)

### **5.2 Aditiva**

Přísady do vody, známé také jako aditiva, obsahují různé lineární molekuly polymerů. Když se do vody přidají polymery jako PAA (polyakrylamid) nebo PEO (polyetyloxid), vytvoří se homogenní vodní proud, který zůstává soudržný i po kontaktu s materiálem. Díky tomu je paprsek při řezání účinnější, vodní proud je stálý a udržuje si své soudržné jádro. Úprava vody polymery je nezbytná například pro dosažení ostrých hran na řezaných dílech. Při řezání pryže a jiných měkkých materiálů není třeba klást takový důraz na přítomnost pomocných přísad ve vodě. (6)

### **5.3 Abraziva**

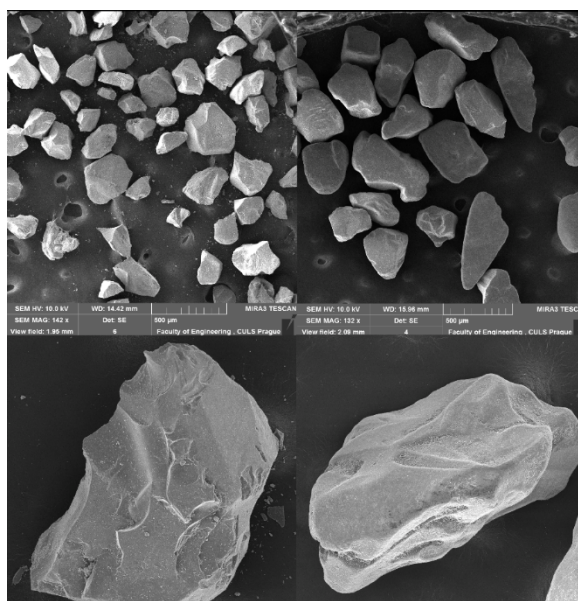
Abraziva jsou zásadním prvkem procesu vodního řezání. Používají se pro prořezávání materiálů s vysokou tloušťkou nebo materiálů s vysokou hustotou. (28)

Výsledná kvalita povrchu a účinnost řezání jsou významně ovlivněny třemi faktory: množstvím abraziva, které je do procesu zavedeno, druhem abraziva a jeho zrnitostními vlastnostmi, jako je velikost a tvar zrn. Z výsledků pokusů vyplývá, že nejlepší hloubky řezu se obvykle dosahují při použití abraziva s průměrnou velikostí zrn, která se pohybuje v řádech desítek mikrometrů [ $\mu\text{m}$ ]. (16)

- Olivín: tvrdost dle Mohse 6,5; barva je žlutozelená, olivově zelená, až po nahnědlou (29)
- Mletý korund: tvrdost dle Mohse 9; pro obrábění se nejčastěji používá hnědý a bílý (30)
- Karbid křemíku: tvrdost dle Mohse 9,5; obvykle šedočerná až černá barva (30)
- Granát: tvrdost dle Mohse 6,5-7,5; barva závisí na chemickém složení, nejčastěji je červená až rudá (14)

Mezi nejčastěji využívaná abraziva patří přírodní Granát MESH. Jeho vynikající tvrdost a pevnost zrn zajišťují maximální produktivitu a vynikající kvalitu řezu. Granát je hlavním představitelem, který ukazuje vhodné využití pro rozsáhlou škálu materiálů, ať už jde o řezání uhlíkové oceli, mědi, žuly, hliníku, gumy, skla, nerezové oceli, mramoru, dřeva či jiných materiálů. (27)

Co se týče granátu, je to přirozeně se vyskytující, tvrdý, ostrohranný minerál s lesklými hranami. Na Mohsově stupnici tvrdosti se nachází přibližně na 7. stupni, kde diamant je na 10. Díky své tvrdosti se jako abrazivum tolik nedrolí, nepráší a vydrží na několik tryskacích cyklů. Granát je čistý přírodní produkt, složený ze skupiny prvků s proměnlivým obsahem hliníku, hořčíku, železa a vápníku. Díky tomu je granát poměrně hodně tvrdý, nejběžnějším granátem je železnatý granát Almandin. Neobsahuje azbest ani těžké kovy. Je také vhodný jako abrazivní příměs pro použití u technologie otryskávání. Na obrázku č. 19 pod textem je znázorněn granát před a po obráběcím procesem. (31) (32)



Obrázek 19 / Granát MESH snímek z mikroskopu (46)



## **5.4 Tuhost a tvrdost materiálu**

Tuhost a tvrdost řezaného, resp. obráběného materiálu jsou klíčové vlastnosti, které ovlivňují řeznou rychlost. Materiály s vyšší tuhostí a tvrdostí obecně vyžadují nižší řeznou rychlost, protože se obtížněji obrábí. (2)

## **5.5 Tloušťka materiálu**

Tloušťka materiálu je dalším faktorem, který ovlivňuje řeznou rychlost. Silnější materiály obecně vyžadují nižší řeznou rychlost, protože při stejném množství brusiva je třeba odebrat více materiálu. (2)

## **5.6 Hustota abraziva**

Rozptyl abrazivních materiálů v obráběcích procesech má zásadní vliv na efektivitu a produktivitu práce. Hustota abrazivního materiálu je jedním z klíčových faktorů ovlivňujících účinnost tryskání. Vyšší hustota abrazivních materiálů umožňuje zvýšit produktivitu práce při obrábění vodním paprskem. To je způsobeno tím, že abrazivní materiály s vyšší hustotou dodávají povrchu, na který jsou aplikovány, vyšší množství energie. Tato energie se přenáší do procesu průřezu povrchu, což znamená rychlejší a efektivnější práci. (32)

## **5.7 Přítlak**

Přítlak ovlivňuje nejen maximální možnou hloubku řezu, ale také řeznou rychlost. S rostoucím tlakem je možné zvýšit řeznou rychlost, když tlak stoupá, opotřebení trysky se zvyšuje a může dojít k narušení stability řezného procesu. Přesto se při řezání dosahují podobné výsledky, což je téměř přímočará závislost. (2)

## **5.8 Průměr trysky**

S narůstajícím průměrem trysky se zvyšuje nejenom její průřez, ale i rychlost řezání. Tento nárůst je omezen, jelikož hydraulická roste kvadraticky s průměrem trysky. To znamená, že jak se průměr trysky zvětšuje, tak se zvyšují i nároky na výkon čerpadla, což může omezit možnosti zvýšení rychlosti řezání. (2)

## 5.9 Vzdálenost trysky

Jako řezný nástroj funguje vodní proud, a proto je nezbytné nastavit vzdálenost trysek na co nejmenší hodnotu, aby se minimalizovala odchylka paprsku a zároveň i ztráty. Tato vzdálenost se obvykle pohybuje v rozmezí 2,5 mm až 50 mm. Zároveň čím více je tryska vzdálená, tím bude obrobek méně přesněji vyřezán. Pokud je cílem udržet kompaktní paprsek na delší vzdálenosti a zvýšit řeznou sílu, lze do paprsku přidat polymery s lepším pojivým efektem. Tyto polymery mohou pomoci udržet paprsek kompaktní a zvýšit jeho řeznou sílu tím, želepší jeho kohezi a sníží jeho tendenci k divergenci. (2)

## 6 Technologie CNC řezání vodním paprskem

### 6.1 Software

Většina moderních zařízení pro obrábění vodním paprskem jsou ovládána převážně prostřednictvím NC a CNC

- NC: Numerical Control – ovládání pomocí ovládacího panelu, který je propojen s displejem k řídicí jednotce počítače pro vodní paprsek. Zmíněné programování je časově a kreativně náročné. Parametry jako jsou průtoková rychlost a rychlost posuvu je zakomponovaná již při tvorbě programu, avšak lze jí změnit manuálně při výrobním procesu.
- CNC: Computer Numerical Control – ovládání pomocí předem vytvořeného (naprogramovaného) výrobního postupu. Nejčastěji se využívají programy podporující CAD (Computer aided design). Pomocí CADu lze vytvářet nákresy prvotního polotovaru, až postupně k požadovanému hotovému výrobku. V dnešní době umožní programovací systém vytvořit nealternativnější podobu obráběcího procesu, to znamená docílení převážně nejkratší trajektorie a zároveň rychlost posuvu. Jakmile je proces programování dokončen, tak jsou data přenesena například pomocí flashdisku do řídicí jednotky.

Primární funkcí řídicího softwaru je efektivně zprostředkovat interakci mezi uživatelem a zařízením s cílem dosáhnout adekvátního provozu stroje. Softwarové rozhraní v novodobých řídicích jednotkách umožňuje uživatelům pracovat s CNC strojem bez potřeby hlubších znalostí programování, jelikož je uživatelsky přívětivé. Pro zahájení práce je potřeba zadat pouze základní parametry, jako je typ materiálu, jeho tloušťka a požadovaná kvalita řezu. (33) (27)

## 6.2 Využití

Technologie vodního paprsku je v současné době široce aplikována v mnoha průmyslových sektorech. V oblasti výroby automobilů dochází k použití vodního paprsku pro řezání různých dílů, od nárazníků až po gumové podlahové krytiny. V těžebním sektoru se využívá pro vrtné soustavy, odstranění nánosů nerostů. V chemickém odvětví se využívá pro řezání plastických hmot, jako jsou trhaviny. V kamenickém oboru se uplatňuje pro dělení různých druhů kamene a dlaždic. V lékařství se využívá pro operace mozkových nádorů a šetrné řezání kostí. V obuvnickém průmyslu se uplatňuje pro dělení kůží, gum nebo pryže. V papírenském průmyslu se využívá pro řezání papíru a fólií. V potravinářském průmyslu se uplatňuje pro dělení masa, ovoce a zeleniny, a to jak v čerstvém, tak zmraženém stavu. Ve sklářském průmyslu se využívá pro řezání skla. Ve stavebním průmyslu se uplatňuje pro dělení skelné zateplovací pěny, polystyrenu nebo betonu. Ve strojírenství se využívá pro dělení kovových a nekovových součástek. V textilním průmyslu se uplatňuje pro dělení textilií, aby se předešlo jejich poškození. (34)

## 6.3 Ekonomická analýza obrábění – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Náklady na tryskové řezání se skládají z investičních nákladů, které jsou fixní bez ohledu na provoz stroje, a provozních nákladů, které jsou závislé na době provozu stroje. Všechny údaje jsou pouze orientační, nebyly poskytnuty přesné informace. Tyto informace poskytují podklady k výpočtu hodinových investičních nákladů a hodinových provozních nákladů.

Kapitálové náklady – v případě pořízení stroje za 2 300 000 Kč, který je financován pětiletým úvěrem s úrokovou sazbou 8,5 %, činí měsíční splátka 46 615 Kč. Při provozu 70 hodin týdně činí hodinové kapitálové náklady 166,50 Kč.

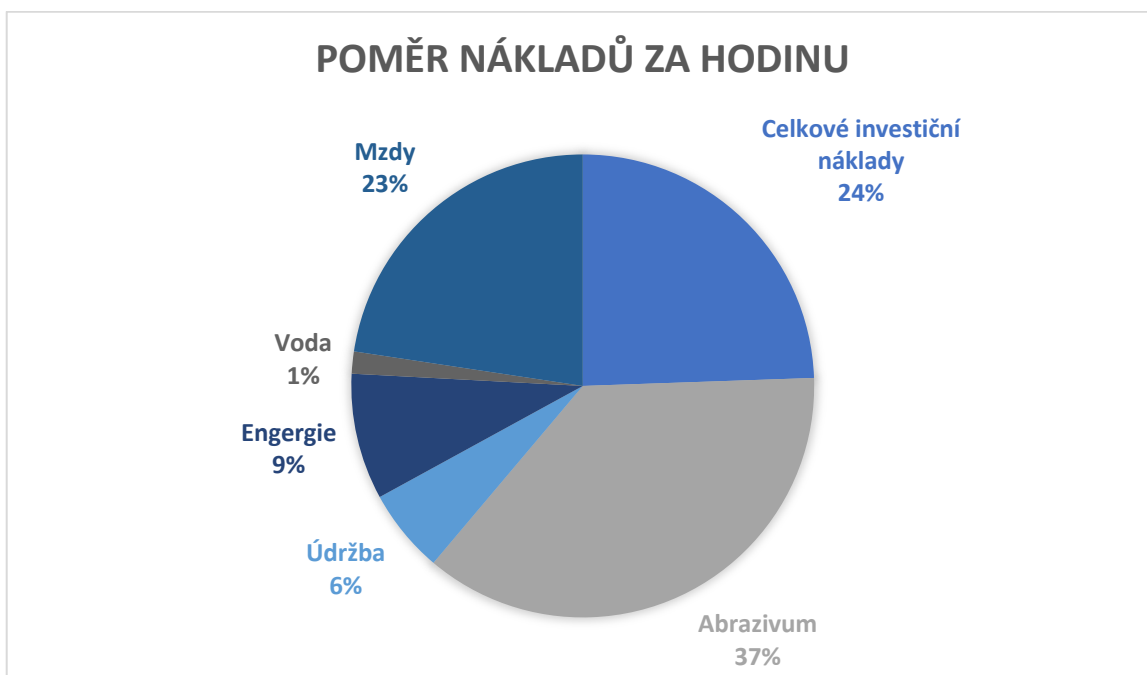
Náklady na pracovní sílu – operátor může dostávat mzdu až 220 Kč na hodinu s příplatky za dovolenou, zdravotní pojištění a další benefity ve výši 40 %. To znamená, že hodinové náklady činí 308 Kč. Stroj pro tryskové řezání však po úvodním nastavení pracuje víceméně sám a jeden operátor může obsluhovat více strojů nebo vykonávat jiné užitečné úkoly, zatímco stroj dokončuje svou práci. Pro tento případ jsou tedy náklady 154 Kč za hodinu.

Abraziva představují největší náklady na spotřební materiál při řezání abrazivním paprskem. Náklady na granátová brusiva jsou velmi závislé na dopravě a velkoobjemové odběry se pohybují přibližně od 13 Kč/kg. Náklady také do jisté míry závisí na kvalitě granátu a mohou se lišit až trojnásobně v závislosti na kvalitě. Obecně není dobré provozovat tryskový řezací stroj s nekvalitním granátem plným prachu a částecek nečistot, protože tyto nečistoty způsobují časté ucpávání trysek a ztráty ve výrobě. Adekvátní cena granátu je přibližně 20 Kč/kg.

Abrazivní tryskací stroje mají vyšší náklady na údržbu než většina ostatních obráběcích strojů. Proudící abrazivo opotřebovává všechny části, kterých se dotkne, a zejména směšovací trubice, v nichž je abrazivo vodou urychlováno na vysokou rychlost, se opotřebuje přibližně za 100 hodin. Na výměnu dílů opotřebovaných brusivem je třeba vyčlenit až 40 Kč za hodinu.

Mnoho podniků považuje elektrickou energii za režijní náklady, stejně jako nájem budovy, ale jedná se o skutečné náklady na provoz systému řezání abrazivním paprskem. Náklady závisí na typu použitého čerpadla. Při ceně 4,5 Kč za kilowatthodinu stojí 1 milimetrový otvor pracující při tlaku 3800 barů využívající čerpadlo s klikovým pohonem asi 60 Kč za hodinu, zatímco méně účinné čerpadlo s intenzifikátorem stojí asi 75 Kč za hodinu elektrické energie.

Mnoho veřejných služeb účtuje pevnou sazbu za spotřebu vody, která zahrnuje i poplatek za stočné. Obvyklá cena se pohybuje kolem 0,07 Kč/litr. Otvory o průměru 1mm pracující při tlaku 3800 barů odebírají necelých 100 l/h za cenu 7 Kč za hodinu. Čerpadlo s intenzifikátorem je často chlazeno dalšími 50 litry vody za hodinu, což vede k celkovým nákladům na vodu 10,5 Kč za hodinu.



Obrázek 20 / Nákladový graf

Účelem pořízení strojů je získání finančního zisku prostřednictvím jejich provozu. Nákup stroje sám o sobě neznamená generování příjmů, ale pouze jeho nasazení a využití ve výrobním procesu umožňuje výtěžek. Investice do stroje pro tryskové řezání představuje vyšší počáteční náklady ve srovnání s běžnějšími variantami, avšak takový stroj obvykle nabízí vyšší produktivitu. Při rozhodování o nákupu stroje je nezbytné zvážit cenu zařízení, jeho produktivitu a schopnosti tak, aby vyhovovalo požadavkům dané pracovní činnosti. Na obrázku č. 20 je vidět, že největší náklady představuje abrazivum, kterého se spotřebuje poměrně velké množství. Náklady na pořízení stroje a mzdy hrají také velkou součást nákladů. Naopak náklady na vodu jsou paradoxně nejmenší.

## 7 SWOT

### 7.1 Výhody

Technologie vodního paprsku představuje univerzální metodu obrábění, která nabízí řadu výhod. Jednou z nich je schopnost zpracovávat širokou škálu materiálů bez nutnosti zohledňovat jejich obrobiteľnost nebo provádět tepelnou úpravu. V místě řezu nedochází k ovlivnění materiálu teplem, což umožňuje efektivní zpracování materiálů s nízkou tepelnou vodivostí, jako jsou plasty, gumy, pryž nebo dřevo. Současně nedochází k nežádoucí změně krystalické struktury ani k vnitřnímu napětí, což činí tuto metodu vhodnou pro zpracování konstrukční oceli, martenzitu nebo austenitu. (35)

Další výhodou je možnost zpracování materiálů citlivých na oxidaci, jako jsou titan, nikl, kobalt a jejich slitiny. Výhodou redukováné teploty v oblasti řezu je možné manipulovat s materiály bez obav z jejich narušení. Navíc, kapalinový proud umožňuje zpracování tvarově komplexní a méně pevné díly bez potřeby jejich pevného uchycení. (35)

Flexibilita této technologie se projevuje v širokém spektru jejich aplikací, které zahrnují řezání, vyřezávání tvarů, vrtání, úkosování, otryskávání, soustružení, gravírování a frézování. Tato široká škála možností využití přispívá k vysokému tržnímu potenciálu technologie vodního paprsku. (35)

### 7.2 Nevýhody

Jedním z nejvlivnějších nepříznivých faktorů využití technologie vodního paprsku je hluchost, která může být v některých prostředích problematická. Dále je třeba počítat s vysokými pořizovacími náklady na zařízení a potřebu kvalifikované obsluhy. Vzhledem k tomu, že technologie využívá abraziva, je nutné zahrnout do nákladů také jejich cenu a případně počítat s možností jejich recyklace nebo likvidace. Technologie má také svá specifická omezení vzhledem k typu materiálu. (35)

Interakce materiálu s vodou je nezbytná, což u absorpčních materiálů může vyvolat prodlouženou dobu sušení, nebo může vést k poškození materiálů korozí. Produkce malých komponentů může být náročná. Navíc může být obtížné obrábění dutých profilů, jelikož vodní proud řeže i po průchodu vrstvou materiálu. (35) (34)

Kovové materiály je nutno vhodně ošetřit, zároveň je třeba zvolit adekvátní tloušťku řezaného materiálu, aby došlo k proříznutí a u nasákavých materiálů je třeba počítat s delším vysoušením. Z důvodu vysokých požadavků na údržbu není technologie vhodná pro hromadnou výrobu. Přesto však technologie vodního paprsku nabízí řadu výhod a možností, které ji činí atraktivní volbou pro mnoho průmyslových aplikací. (35) (34)

### **7.3 Porovnání obráběcích technologií**

Porovnání tří metod řezání – plazma, laser a vodní paprsek

Je charakterizována horkým řezem, což má velký vliv na materiál a vede k velkým změnám struktury materiálu v místě řezu. Povrch po řezu má výrazné rýhy a dochází k silnému odklonu řezu. Plazma nemá vliv na tvrdost řezaného materiálu, ale není možné s ní řezat plasty a kompozity na bázi kovu. Vznikají při tom velké množství plynných emisí a oxidických povlaků. (36)

Laser umožňuje řezat všechny materiály, s výjimkou kompozitů. Je charakterizován teplým řezem, který má malý vliv na materiál a vede k malým změnám struktury materiálu v místě řezu. Povrch po řezu má nízkou drsnost a dochází k mírnému odklonu řezu. Laser mírně ovlivňuje rychlost řezání v závislosti na tvrdosti řezaného materiálu. Řezání plastů je problematické a řezání kompozitů je těžce proveditelné. Při řezání s kyslíkem vznikají oxidické povlaky. (36)

Vodní paprsek je vhodný pro řezání všech materiálů. Je charakterizován studeným řezem, který nemá vliv na materiál a nevede k žádným změnám struktury materiálu v místě řezu. Drsnost povrchu po řezu je v závislosti na podmínkách. Vodní paprsek umožňuje řezání plastů a je velmi vhodný pro řezání kompozitů. Řezání skla, keramiky a kamene je vhodné, s výjimkou kalených skel. Oxidické povlaky vznikají pouze u korodujících materiálů v kontaktu s vodou. Vodní paprsek nevytváří žádné emise. (36)



## 8 Závěr

Cílem této práce bylo prozkoumat a analyzovat technologii řezání vodním paprskem, která je jednou z nejmodernějších a nejefektivnějších metod obrábění. Byla provedena podrobná analýza různých typů vodních paprsků, jejich principů a aplikací. Byly také zkoumány různé faktory ovlivňující proces řezání vodním paprskem, včetně čistoty vody, aditiv, abraziv, tuhosti a tvrdosti materiálu, tloušťky materiálu, hustoty abraziva, tlaku, průměru trysky a vzdálenosti trysky.

Díky této technologii se předejde veškerým postprocesovým úpravám a zároveň nedochází k porušení vnitřní struktury materiálů. V případě plastů, kompozitů, keramiky a potravin je v podstatě jediným možným způsobem pro realizaci úpravy těchto materiálů.

V ekonomickém hodnocení jsem dospěl k závěru, že nejvýznamnějšími nákladovými položkami jsou náklady spojené s abrazivem a pořizovací náklady na zařízení. Zlepšení efektivity využití abraziva mohou významně přispět ke snížení celkových nákladů a zvýšení konkurenceschopnosti této technologie v rámci ekonomického prostředí. Je také důležité zohlednit investiční náklady a návratnost investice do zařízení.

I přes vysoké počáteční investice je technologie řezání, či obrábění vodním paprskem pro společnosti, zabývající se uvedenou technologií, velmi perspektivní do budoucna. A současně i přes počáteční nedůvěru zákazníků zájem o řezání vysokotlakým vodním paprskem neustále narůstá, neboť se projevují přednosti uvedené technologie spočívající v dosažené kvalitě řezu bez trhlin, tvarového výrobku jedinou operací a v možnosti dělit i velmi problematické materiály.

## 9 Seznam použitých zdrojů

1. **Schlick, Jonathan.** Techni Waterjet. [Online] GMM Group Company, 11. Březen 2023. [Citace: 21. Zář 2023.] <https://www.techniwaterjet.com/waterjet-cutting-history>.
2. **Suchánek, Libor.** Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem. [Online] 2017. [Citace: 27. Listopad 2023.] [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/27913/1/Libor\\_Suchanek\\_DP\\_2016\\_2017.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/27913/1/Libor_Suchanek_DP_2016_2017.pdf).
3. **Intelligent Cutting Solutions.** ICS. ICS. [Online] Intelligent Cutting Solutions, 2. Zář 2020. [Citace: 21. Zář 2023.] <https://www.icscuts.com/blog/press/the-history-of-waterjet-cutting>.
4. **Kolb, Marcel.** *Waterjet cutting: material processing with a high-pressure.* Moderne industrie. München : autor neznámý, 2006. ISBN 39-378-8954-X.
5. **cncdelfin.cz.** cncdelfin.cz. [Online] [Citace: 12. listopad 2023.] <https://www.cncdelfin.cz/cnc-technologie>.
6. **Horáček, Lukáš.** Využití nekonvenčních paprskových technologií (Laser/Vodní paprsek) ve strojírenství. *Vysoké učení technické v brně.* [Online] 2008. [Citace: 27. Listopad 2023.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5663](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663).
7. **Resato.** <https://resato-waterjet.com/>. [Online] Resato, 23. březen 2023. [Citace: 7. října 2023.] <https://resato-waterjet.com/how-it-works/>.
8. **Royal Charter .** The Open University. *The Open University.* [Online] Financial Conduct Authority, 6. Března 2018. [Citace: 7. Říjen 2023.] <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/water-jet-cutting-hydrodynamic-cutting>.
9. **Morkus Morava s.r.o.** [Online] [Citace: 12. Listopad 2023.] <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>.
10. **Hloch, Sergej, Mullerová, Jana a Valíček, Jan.** ABRASIVE TYPE INFLUENCE ON SURFACE ROUGHNESS AT ABRASIVE WATERJET CUTTING. [Online] 10. Listopad 2008. [Citace: 27. Listopad 2023.] [https://mechaning.com/journal/Archive/2008/10-11-2008/1\\_17.Hloch,Mullerova,Valicek\\_abrasives.pdf](https://mechaning.com/journal/Archive/2008/10-11-2008/1_17.Hloch,Mullerova,Valicek_abrasives.pdf). ISSN 1313-0226.
11. **Brym, Radek.** Trendy vývoje obrábění vodním paprskem (2008). [Online] 2006. [Citace: 5. Leden 2024.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5167](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5167).
12. *Process analysis and monitoring in abrasive water jet machining of alumina ceramics.* **Choi, Gi Sang a Choi, Gi Heung.** 295-307, místo neznámé : International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1997, Sv. 37.3.
13. *Enhancing abrasive waterjet cutting of ceramics by head oscillation techniques.* **SIORES, E., et al.** 327-330, místo neznámé : CIRP annals, 1996, Sv. 45.1.
14. **Jagadish a Kapil, Gupta.** *Abrasive Water Jet Machining of Engineering Materials.* místo neznámé : Springer International Publishing AG, 2019. str. 2. 978-3-030-36000-9.
15. **Dvořák, Jiří.** TECHNOLOGIE VÝROBY VYMEZOVACÍ PODLOŽKY. [Online] 2011. [Citace: 27. Listopad 2023.] <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/8148/final-thesis.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.

16. **Zouhar, Ondřej.** ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM. *Vysoké učení technické v brně.* [Online] 2011. [Citace: 27. Listopad 2023.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40134](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40134).
17. **Jáchym, Jan.** ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM. [Online] 2009. [Citace: 27. Listopad 2023.] <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/13032/final-thesis.pdf?sequence=-1>.
18. **Hloch, Sergej a Valíček, Jan.** *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením.* Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. ISBN 978-80-254-3588-5.
19. **Veselý, Radek.** Řezání materiálu vodním paprskem. *Vysoké učení technické v brně.* [Online] 2008. [Citace: 27. Listopad 2023.]
20. **Foldyna, Josef.** Ultrazvuková modulace vysokorychlostních vodních paprsků. *Akademie věd České republiky, Ústav geoniky.* 1996, str. 67.
21. **Klich, Ondřej.** Technická univerzita Ostrava. [Online] 2013. [Citace: 9. Únor 2024.] <https://core.ac.uk/download/pdf/17306133.pdf>.
22. **Chmelař, Zdeněk.** ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM. *VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.* [Online] 2013. [Citace: 9. Únor 2024.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64917](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64917).
23. **Maňková, Ildikó.** *Progresivné technológie.* Košice : VIENALA, 2000. 80-7099-430-4.
24. **H2O Jet.** [waterjetparts.com](http://waterjetparts.com). *waterjetparts.* [Online] Shape Technologies Group UK Ltd. [Citace: 7. Říjen 2023.] [https://waterjetparts.com/products/waterjet-pumps/?fbclid=IwAR3KRF8AHimY11tx\\_MzM\\_bVPBuZ18Vg5xVrcK4iEcmngGUp3OppWDGIAgGw](https://waterjetparts.com/products/waterjet-pumps/?fbclid=IwAR3KRF8AHimY11tx_MzM_bVPBuZ18Vg5xVrcK4iEcmngGUp3OppWDGIAgGw).
25. **Klichová, Dagmar, a další.** *Advances in Water Jetting : Selected Papers from the International Conference on Water Jet 2019 - Research, Development, Applications.* Čeladná : Springer International Publishing AG, 2019. 978-3-030-53491-2.
26. *Evaluation of surface integrity after high energy machining with EDM, laser beam machining and abrasive water jet machining of alloy 718.* **Holmberg, Jonas a et, al.** 1575-1591, místo neznámé : The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, Sv. 100.
27. **PTV.cz.** Výroba strojů pro řezání vysokotlakým vodním paprskem. *Abrazivo.* [Online] PTV. [Citace: 11. Únor 2024.] <http://www.ptv.cz/abrazivo/>.
28. **Geryk, Vladan.** Abraziva pro řezání tvrdých materiálů. *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.* [Online] Hornicko-geologická fakulta, 2013. [Citace: 11. Únor 2024.] [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/98219/GER113\\_HGF\\_B2102\\_3911R001\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/98219/GER113_HGF_B2102_3911R001_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
29. **EPPI.** Olivín (Peridot). *EPPI.cz.* [Online] [Citace: 15. Únor 2024.] <https://www.eppi.cz/napoveda/drahokamy/olivin-peridot>.
30. **Koltex color.** Brusiva. *Koltex color, s.r.o.* [Online] 2013. [Citace: 15. Únor 2024.]
31. **Abraziva.cz.** *Abraziva.* [Online] [Citace: 11. Únor 2024.] <https://abraziva.cz/sortiment/granat/>.
32. **Pískovačka.cz.** *Pískovačka - vše o pískování.* [Online] Pískovačka. [Citace: 11. Únor 2024.] <https://www.piskovacka.cz/prirodni-granat-abrazivo/>.
33. **Kopečný, Libor.** ABRAZIVNÍ VODNÍ PAPERSEK. [Online] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2011. [Citace: 28. Únor 2024.] [https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39159](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39159).

34. **Rossý, Tomáš.** Obrábění vodním paprskem. [Online] 2017. [Citace: 28. Únor 2024.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72888/F2-BP-2017-Rossy-Tomas-Obrabeni%20vodnim%20paprskem.pdf>.
35. **Voborník, Jan.** Optimalizace výroby těsnění využitím technologie. [Online] 2019. [Citace: 28. Únor 2024.] [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45395/voborn%C3%ADk\\_2019\\_dp.pdf?sequence=1](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45395/voborn%C3%ADk_2019_dp.pdf?sequence=1).
36. **Humár, Anton.** Technologie I Technologie obrábění - 3. část. *FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ*. [Online] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2005. [Citace: 2. Březen 2024.] <https://adoc.pub/technologie-i-technologie-obrabni-3-ast.html>.
37. **Branch, John.** Jet Edge. *jetedgewaterjets*. [Online] 16. Listopad 2020. [Citace: 25. Listopad 2023.] <https://blog.jetedgewaterjets.com/water-jet-machines/advantages-of-5-axis-water-jet-cutting-machines>.
38. **Martin.** Univerzita Komenského v Bratislave. [Online] 2011. [Citace: 27. Listopad 2023.] <https://www.jfmed.uniba.sk/fileadmin/jlf/Pracoviska/ustav-osetrovatelstva/Konferencia-zbornik-program/2011-konferencia-fulltext-web.pdf#page=90.978-80-89544-00-4>.
39. **Hloch, Sergej a et, al.** *Hydroabrazívne delenie v ortopédii*. Prešov : Express Print, s.r.o., 2011. 978-80-970623-4-7.
40. **Bendix.** Bendix. *Bendix*. [Online] 4. Únor 2010. [Citace: 22. Zář 2023.] <https://web.archive.org/web/20100306041003/http://www.bendixbrakes.com/>.
41. **Flowwaterjet.** Flowwaterjet. *Flowwaterjet*. [Online] Shape Technologies Group UK Ltd., 7. Prosinec 2015. [Citace: 21. Zář 2023.] <https://www.flowwaterjet.com/explore/how-it-all-began-the-origins-of-waterjet>.
42. **Wikipedia.** Wikipedia: the free encyclopedia. *Wikipedia*. [Online] 2014. [Citace: 12. listopadu 2023.] [http://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_jet\\_cutter](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter).
43. **WANG, Shu.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. stránky 1685–1688. 1433-3015.
44. **Sitek, Libor a Foldyna, Josef.** *Vodní paprsek ve strojírenství*. místo neznámé : Strojárstvo-strojírénství, 2004. stránky 100-101. 1335-2938.
45. **Momber, Andreas a Kovacevic, Radovan.** *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. místo neznámé : Springer Science & Business Media, 2012. 9781447115724.
46. **Müller, Miroslav.** Snímky mikroskopu granátu MESH. Praha - Suchdol : ČZU - TF, 2020.
47. **Sadílek, Marek.** *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava : VŠB – TU , 2009. 978-80-248-2107-8.
48. **ICSCUTS.** ICS. *the-history-of-waterjet-cutting*. [Online] 2. Srpen 2020. [Citace: 13. Březen 2024.]