

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

Obrábění vodním paprskem

Water Jet Machining

Autor: Adam Tomášek
Studijní program: B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor: 2301R000 Bez oboru
Vedoucí práce: Ing. Pavel Novák, Ph.D.

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tomášek** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **483916**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Obrábění vodním paprskem

Název bakalářské práce anglicky:

Water Jet Machining

Pokyny pro vypracování:

1. Charakteristika a typy metody
2. Oblasti využití technologie
3. Srovnání s ostatními výrobními metodami

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Adam Tomášek
Název bakalářské práce:	Obrábění vodním paprskem
Anglický název:	Water Jet Machining
Akademický rok:	2020/2021
Obor studia:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí:	Ing. Pavel Novák, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 78
	Počet obrázků: 41
	Počet tabulek: 14

Klíčová slova: vodní paprsek, obrábění vodním paprskem, abrazivní vodní paprsek, dělení kapalinovým paprskem, vysokotlaký paprsek, nekonvenční technologie

Key words: water jet, water jet machining, abrasive water jet, liquid jet cutting, high pressure jet, unconventional technology

Anotace:

Tato bakalářská práce byla vytvořena formou literární rešerše na téma obrábění vodním paprskem. První část je věnována rozboru technologie vodního paprsku, jeho principu, rozdělení a popisu jednotlivých používaných metod. Následně byly popsány řezné parametry, vlastnosti obrobeného povrchu a bylo přiblíženo zařízení pro obrábění vodním paprskem. V poslední části je uvedeno využití vodního paprsku v průmyslové praxi a v závěru jsou porovnány vybrané alternativní metody dělení materiálů.

Abstract:

This bachelor thesis was made in the form of a literature research on the topic of water jet machining. The first part is devoted to the analysis of water jet technology, its principle, division and description of individual methods used in practice. Subsequently, the cutting parameters, the properties of the machined surface were described and the water jet machining equipment was further characterized. The last part presents the use of the water jet in industrial practice and it also compares selected alternative methods of machining and cutting materials.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Obrábění vodním paprskem* vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Pavla Nováka, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu zdrojů.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Pavlu Novákovi, Ph.D. za čas, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mi byla při studiu a tvorbě bakalářské práce vždy oporou.

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Rozdělení metod obrábění	5
2.1	Konvenční metody obrábění	5
2.2	Nekonvenční metody obrábění	5
2.2.1	Rozdělení nekonvenčních metod obrábění	5
2.2.2	Důvody zavádění nekonvenčních metod obrábění	7
2.2.3	Vlastnosti nekonvenčních metod obrábění	7
3	Charakteristika technologie vodního paprsku.....	8
3.1	Historie využití vodního paprsku	8
3.2	Princip metody vodního paprsku	10
3.3	Problematika vzniku řezného nástroje	11
3.4	Základní rozdělení vodních paprsků	13
3.5	Popis technologií vodního paprsku	14
3.5.1	Technologie WJM – Water Jet Machining.....	14
3.5.2	Technologie AWJ – Abrasive Water Jet Machining	15
3.5.3	Technologie ASJ – Abrasive Slurry Water Jet	16
3.5.4	Technologie IJM – Ice Jet Machining	17
3.5.5	Technologie DWJ – Dynamic Water Jet	17
3.5.6	Technologie LMJ – Laser MicroJet.....	18
3.6	Vlastnosti technologií vodního paprsku.....	19
4	Vlastnosti obrobeného povrchu a řezné parametry.....	20
4.1	Makromechanismus řezného procesu	20
4.2	Kvalita řezu	22
4.3	Rozšíření řezné mezery	25
4.4	Odchylka kolmosti	26
4.5	Řezná rychlost.....	27
5	Popis zařízení pro technologii vodního paprsku.....	29
5.1	Řezná kapalina a její úpravy	30
5.1.1	Filtrace	30
5.1.2	Změkčování	31
5.1.3	Deionizace	32
5.1.4	Reverzní osmóza.....	32
5.1.5	Aditiva	32

5.2	Abrazivo	33
5.2.1	Používaná abraziva	34
5.2.2	Dávkování a doprava abraziva.....	36
5.2.3	Recyklace abraziva	37
5.3	Vysokotlaké čerpadlo	38
5.3.1	Multiplikátor	39
5.3.2	Triplexový plunžr	40
5.3.3	Akumulátor rázů	40
5.4	Hydraulické rozvody	41
5.4.1	Vysokotlaké potrubí.....	41
5.4.2	Těsnění.....	42
5.5	Řezací hlava	42
5.5.1	Vodní tryska.....	43
5.5.2	Směšovací komora.....	44
5.5.3	Zaostřovací trubice	45
5.6	Souřadnicový CNC stůl.....	46
6	Využití technologie vodního paprsku	47
6.1	Aplikace vodního paprsku na metody obrábění.....	47
6.1.1	Řezání	47
6.1.2	Soustružení.....	48
6.1.3	Frézování	48
6.1.4	Vrtání	49
6.1.5	Gravírování	50
6.1.6	Trojrozměrné obrábění	50
6.2	Využití vodního paprsku v praxi.....	51
7	Srovnání s ostatními výrobními metodami	54
7.1	Dělení vodním paprskem, laserem, plazmou, plamenem a pásovou pilou	54
7.1.1	Popis principu srovnávaných metod	54
7.1.2	Porovnání metod z hlediska dělitelných materiálů	55
7.1.3	Porovnání metod z hlediska tloušťky materiálu	55
7.1.4	Porovnání metod z hlediska přesnosti a kvality řezu.....	56
7.1.5	Porovnání metod z hlediska rychlosti řezání	57
7.1.6	Porovnání metod z hlediska tepelného ovlivnění materiálu	57
7.1.7	Porovnání metod z ekonomického hlediska	57
7.1.8	Porovnání metod z ekologického hlediska	58

7.1.9	Vyhodnocení porovnání.....	58
7.2	Konvenční soustružení a soustružení vodním paprskem	59
7.3	Vrtání vodním paprskem, laserem a elektroerozivní vrtání	60
8	Závěr	62
9	Použitá literatura	63
10	Seznam obrázků.....	69
11	Seznam tabulek	71
12	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	72

1 Úvod

Ve strojírenství dochází k neustálému výzkumu a vývoji nových technologií, jejichž cílem je zrychlit a zefektivnit procesy obrábění a zpracování materiálů. Mezi tyto poměrně nové technologie se řadí i obrábění vodním paprskem. Energetický potenciál vody je znám již několik tisíc let, neboť voda je základním hybatelem všech procesů na naší planetě. V přírodě dokáže vodní proud svým pohybem neustále měnit a přetvářet celou škálu materiálů, o což se lidská společnost různými procesy snaží od nepaměti.

Inspirací v přírodě vznikla metoda obrábění vodním paprskem, která se v průmyslové praxi rozvíjí pouze necelé století, a i přesto má své pevné místo mezi ostatními výrobními metodami a stále se zlepšuje a vyvíjí. Vodní proud o vysokém tlaku fokusovaný do úzkého paprsku představuje univerzální řezný nástroj, který je použitelný a aplikovatelný na téměř všechny myslitelné materiály.

V současnosti nachází technologie vodního paprsku uplatnění ve všech možných průmyslových odvětvích, od průmyslu strojírenského až po průmysl potravinářský. Toto spektrum znázorňuje široké technologické možnosti vodního paprsku, které ani v dnešní době nejsou plně prozkoumány. Rozvoj této nekonvenční metody jde spolu s využitím moderních počítačových technologií rychle kupředu, neboť se jedná o metodu perspektivní a progresivní. Zejména v dnešní době, kdy je kladen velký důraz na ekologii, má vodní paprsek v porovnání s ostatními obráběcími procesy značnou výhodu, která ho předurčuje k rychlému rozvoji v příštích desetiletích tohoto století.

Cílem této bakalářské práce je popsat uvedenou metodu, její princip, různé dnes využívané druhy technologie vodního paprsku a jejich vlastnosti. Dále zde budou uvedeny vlastnosti obrobeného povrchu, řezné parametry a popis stroje pro obrábění vodním paprskem. Poslední část bude věnována praktickému využití vodního paprsku a jeho srovnání s konkurenčními výrobními metodami, které by mohl vodní paprsek svými výhodnými vlastnostmi nahradit.

2 Rozdělení metod obrábění

Obrábění je proces, jehož cílem je odebrání materiálu z polotovaru tak, aby výsledná součást získala požadované vlastnosti, rozměry a splnila nároky na kvalitu. Metody obrábění se dělí na konvenční, využívající k úběru materiálu výhradně mechanickou práci nástrojů a nekonvenční, které využívají i jiné druhy energie, popřípadě i jejich kombinaci [1, 2].

2.1 Konvenční metody obrábění

Konvenční metody obrábění (KMO), někdy nazývané jako metody třískové či mechanické, jsou technologie, jejichž principem je úběr materiálu z místa řezu pomocí nástroje s definovanou geometrií nebo zrny brusiva. Při úběru materiálu z místa řezu dochází k tvorbě třísek. S rozvojem moderních řezných materiálů a obráběcích strojů je možné tyto technologie používat i na dokončovací operace s vysokými nároky na dosahované výstupní parametry. Mezi konvenční metody obrábění patří soustružení, frézování, broušení, vrtání, hoblování, obrážení a další [1].

2.2 Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění (NMO), tedy metody fyzikálně-chemické, umožňují úběr materiálu fyzikálními a chemickými principy. Na rozdíl od konvenčních metod, jejichž podstatou je úběr materiálu s použitím mechanické práce nástrojů, nekonvenční technologie využívají elektrickou, chemickou nebo tepelnou energii, popřípadě i jejich kombinaci. Při procesu obrábění materiálů pomocí nekonvenčních technologií nevzniká klasická tříska, jako v případě konvenčních způsobů obrábění [1, 2].

2.2.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

V dnešní době existuje široké spektrum nekonvenčních metod, k nimž se vážou příslušné technologické procesy a operace. Tyto metody je možné rozdělit do tří hlavních kategorií podle energetického principu, jímž k samotnému úběru materiálu z místa řezu dochází [2, 3].

Oddělování materiálu tepelným, elektrotepelným nebo elektrickým účinkem:

- elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining – EDM),
- obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM),
- obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM),
- obrábění paprskem elektronů (Electron Beam Machining – EBM),
- obrábění paprskem iontů (Ion Beam Machining – IBM).

Oddělování materiálu chemickým nebo elektrochemickým účinkem:

- chemické obrábění (Chemical Machining – CM),
- elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining – ECM).

Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM),
- obrábění abrazivním paprskem vody (Abrasive Water Jet Machining – AWJ),
- obrábění proudem brusiva (Abrasive Jet Machining – AJM).

Každá z uvedených technologií je specifická svými výstupními parametry i nároky na technologické podmínky. Základní přehled výstupních parametrů charakterizujících dané metody uvádí tab. 2.1.

Tab. 2.1: Výstupní technické parametry vybraných nekonvenčních metod obrábění [3, 4, 5, 6]

Metoda obrábění	Parametr			
	Drsnost povrchu Ra [μm]	Tloušťka ovlivněné vrstvy [μm]	Objemový výkon [$\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$]	Měrná práce [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}$]
Elektroerozivní obrábění	50–1,6	10–300	5	100–1000
Obrábění paprskem laseru	50–6,3	100	0,005	až 3000
Obrábění paprskem elektronů	50–6,3	beze změn	0,01	1500
Obrábění paprskem plazmy	50–12	500–800	100	500–1000
Elektrochemické obrábění	2,5–1,6	beze změn	15–25	10–100
Ultrazvukové obrábění	6,3–0,4	beze změn	10	1000–3000
Obrábění vodním paprskem	12–1,6	beze změn	0,08–0,6	15–100

2.2.2 Důvody zavádění nekonvenčních metod obrábění

V současné době se v průmyslu stále zvyšuje míra využívání nekonvenčních technologií. Lze formulovat několik důvodů pro zavádění NMO do praxe [1, 2, 6]:

- Rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů z důvodu zvyšujících se požadavků na konstrukci strojních součástí (kalené oceli a litiny, žárupevné a žáruvzdorné materiály, slitiny titanu, kompozitní materiály).
- Zvyšující se nároky na řezné nástroje, tvarovou složitost i na rozměrovou přesnost součástí (formy, zápustky, nástroje), problémy s upínáním tvarově složitých dílů.
- Možnost opracování nepravidelných a složitých tvarů (vnitřních i vnějších).
- Zajištění vysoké kvality povrchu obráběných součástí bez nežádoucích změn struktury materiálu v důsledku tepelného ovlivnění povrchových vrstev a zamezení vzniku zbytkových napětí pod obráběným povrchem.
- Vhodnost implementace nekonvenčních metod do automatizovaných výrobních procesů, využití NC a CNC řízení a systémů CAD/CAM.

2.2.3 Vlastnosti nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční technologie mají celou řadu vlastností, kterými se odlišují od technologií konvenčních. Základní rozdílností je fakt, že materiál řezného nástroje nemusí být tvrdší než materiál obráběný. V místě řezu se neprojevuje řezný odpor, obrobek se vlivem řezných sil téměř nedeformuje a v závislosti na užitých metodě dochází k menšímu tepelnému zatěžování obráběného dílu. Problémem je však poměrně malá produktivita, v porovnání s konvenčními metodami je objemový výkon řádově nižší [2].

Tab. 2.2: Aplikační oblasti vybraných druhů nekonvenčních metod obrábění [2]

Materiál obrobku	Metoda obrábění							
	USM	WJM	ECM	CM	EDM	EBM	LBM	PBM
Vysokolegované oceli	3	1	1	2	1	2	2	1
Slitiny hliníku	3	2	2	1	2	2	2	1
Kompozitní materiály	1	1	4	2	4	2	2	4
Keramické materiály	1	1	4	3	4	1	1	4
Plasty	2	2	4	3	4	4	2	3

Hodnocení: 1 - velmi vhodné, 2 - vhodné, 3 - obtížně použitelné, 4 - nepoužitelné

3 Charakteristika technologie vodního paprsku

Technologie vodního paprsku je jednou z moderních metod dělení a obrábění materiálů. Vodní paprsek prošel největším rozvojem ve 20. století a postupně došlo k jeho rozšíření do mnoha oblastí průmyslové výroby. V dnešní době se jedná o poměrně běžnou technologii, jejíž uplatnění je vhodné zejména tam, kde jsou vlastnosti vody, jako řezného nástroje, nenahraditelné.

3.1 Historie využití vodního paprsku

První případy využití vodního paprsku v průmyslu jsou známy již z 19. století. Počátek vývoje technologie dělení materiálu vodním paprskem se datuje k roku 1853, kdy se začal v USA využívat k odstraňování hornin a těžbě drahých kovů (obr. 3.1). Následný rozvoj technologie byl podmíněn vývojem hydraulických zařízení potřebných ke generování vysokých tlaků v kapalině. V této oblasti došlo k pokrokům zejména ve 30. letech 20. století díky práci sovětských a amerických odborníků, kterým se podařilo zvýšit používaný tlak kapaliny z původních jednotek MPa až na několik desítek MPa, což zásadně ovlivnilo produktivitu báňského průmyslu [8, 9].



Obr. 3.1: Využívání hydromonitorů při těžbě v oblasti Trinity County [13]

K největšímu rozvoji technologie vodního paprsku došlo v 60. letech minulého století, kdy nastal posun ve vývoji vysokotlakých vodních čerpadel. Klíčovou osobností výzkumu v oblasti dělení materiálů vodním paprskem byl Dr. Norman Charles Franz. Na konci 60. let Dr. Franz společně se svými kolegy z Michiganské univerzity zkonstruoval prototyp stroje pro řezání čistým vodním paprskem s provozním tlakem až 400 MPa. Na tomto stroji bylo možné řezat dřevo a jiné měkké materiály, problémem však bylo dosažení kontinuálního paprsku i velmi nízká životnost zařízení. S využitím výzkumu Dr. Franze vyvinula v roce 1971 společnost McCartney Manufacturing první komerčně využívaný stroj pro řezání dřeva, který již byl schopen dělit materiál nepřetržitým vodním paprskem [10, 11].

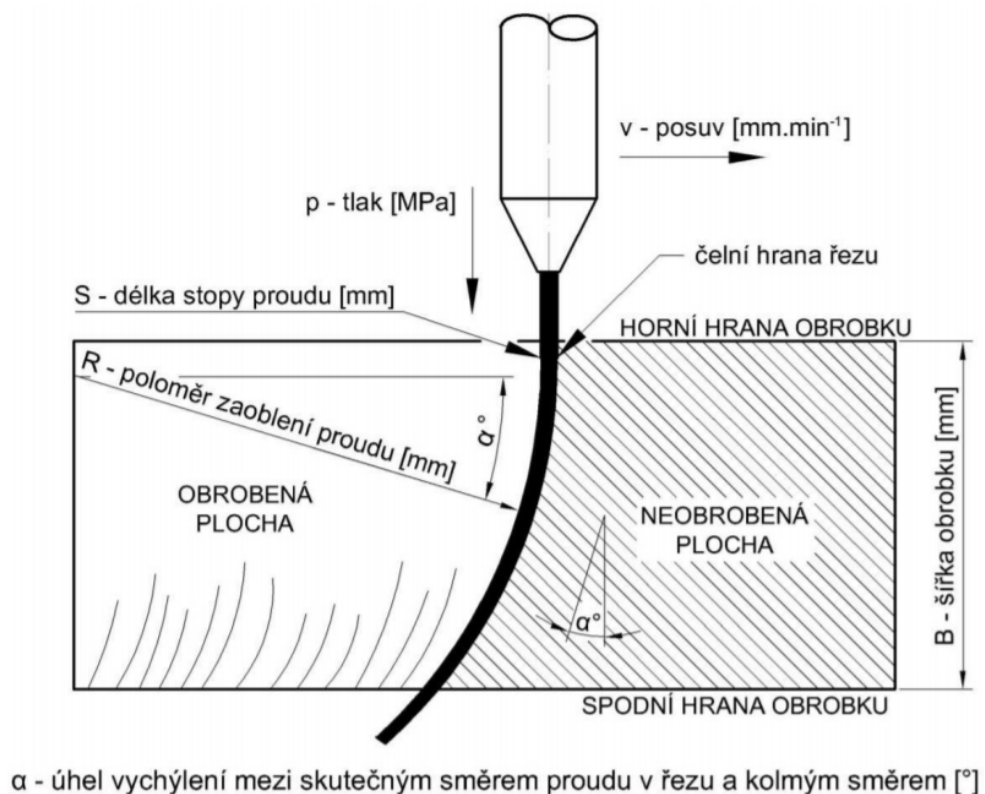
V následujících letech došlo ke komercializaci technologie a na trh vstoupily první společnosti specializující se na problematiku vodních paprsků. Pokroků v oboru dosáhla především firma Flow International Corporation díky práci Dr. Mohameda Hashishe. Ten navrhnul použít vodní paprsek v kombinaci s abrazivem a v roce 1979 společnost Flow uvedla do provozu první zařízení pro řezání materiálu vodním paprskem s příměsí abrazivních částic. Díky přidání abraziva do kapaliny pak bylo možné dělit i materiály s vyšší pevností a tloušťkou [9, 10].

V průběhu 20. století se tato technologie rozšiřovala do mnoha průmyslových odvětví, jako je potravinářský, letecký, kosmický či automobilový průmysl. Aplikace do praxe rovněž poukázala na vhodnost řízení vodních paprsků systémy CNC. V dnešní době probíhá vývoj zejména na poli vysokotlakých čerpadel, kdy lze dnes dosáhnout tlaků 600–700 MPa, je kladen důraz na inteligentní dynamické řízení, díky němuž lze zlepšit přesnost, geometrii a drsnost řezu a také se zkouší dělení v prostředí inertních a kapalných plynů [9, 12].

3.2 Princip metody vodního paprsku

Obrábění vodním paprskem (někdy nazývané hydrodynamické obrábění) je mechanicko-fyzikální metoda úběru materiálu, kdy dochází k dopadu velmi úzkého paprsku vodního proudu vysokou rychlostí na obráběnou plochu. Takto urychlený vodní paprsek se chová jako pevné těleso a působí na povrch materiálu mechanickými účinky. Mechanický účinek úběru materiálu může být zvýšen přidáním abrazivních částic [2, 8].

V průběhu obrábění vodní paprsek proniká do obrobku, přičemž dochází k přeměně kinetické energie molekul dopadající kapaliny (popřípadě její směsi se zrnky abraziva) na mechanickou práci. Při dopadu se paprsek rovněž vychyluje a pohybuje se po zaoblené dráze, jejíž poloměr je dán předchozí délkou oblouku. Podle teoretického předpokladu je vychýlení a zpomalení důsledkem tření mezi povrchem vodního paprsku a povrchem obráběného materiálu. Na obr. 3.2 je znázorněn průběh dráhy vodního paprsku definovaný poloměrem zaoblení proudu a úhlem vychýlení [2, 8, 14].



Obr. 3.2: Schématické znázornění procesu dělení vodním paprskem [8]

Z hlediska tribologie je obrábění vodním paprskem procesem vysokorychlostního erozivního opotřebení materiálu, kdy dochází k odebrání částic z povrchu důsledkem eroze. Erozní proces je závislý na pevnostních vlastnostech materiálu a úhlu nárazu částice α_0 na povrch obrobku. V tab. 3.1 jsou uvedeny kritické úhly nárazu α_0 pro tvárné a křehké materiály, kterým přísluší převládající mechanismus erozivního opotřebení [2].

Tab. 3.1: Reakce materiálu v závislosti na úhlu dopadu částice [2]

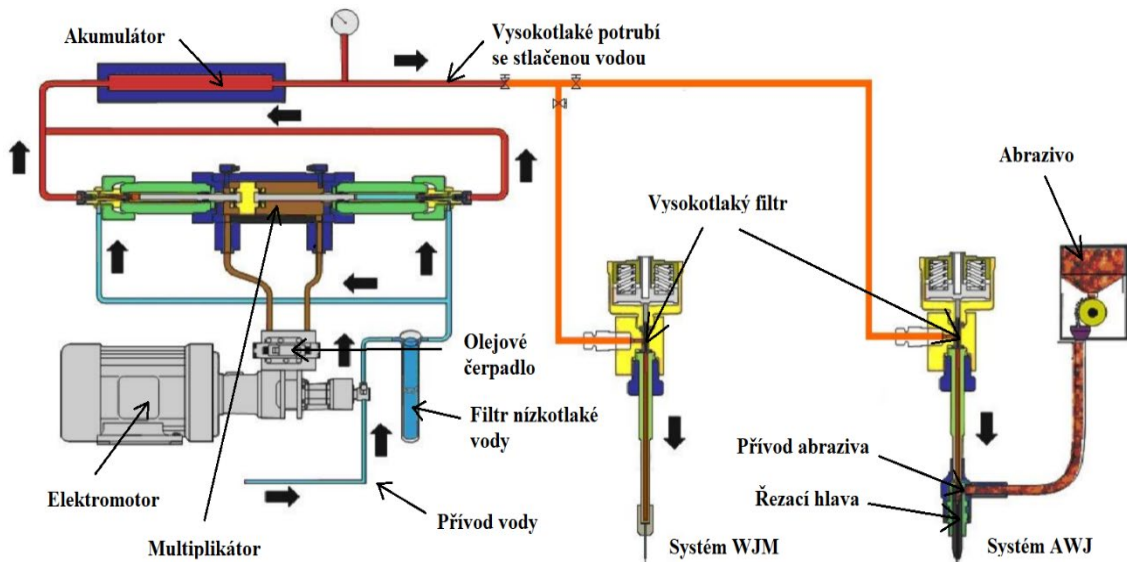
Materiál	Úhel nárazu α_0		
	< 20°	45°	90°
Tvárný	Maximální řezné opotřebení	Smíšený režim	Maximální deformační opotřebení
Křehký	Velmi malá eroze	Střední eroze	Maximální eroze

3.3 Problematika vzniku řezného nástroje

Vysokotlaký vodní paprsek jakožto řezný nástroj má počátek ve vysokotlakém čerpadle. Vysokotlaké čerpadlo sestává ze dvou okruhů, a to okruhu nízkotlakého (primárního) a vysokotlakého (sekundárního), který je pro vznik paprsku klíčový. Ke generování tlaku v sekundárním okruhu slouží triplexový plunžr, nebo častěji multiplikátor. Ten je připojen na nízkotlaký okruh řízený olejovým čerpadlem, do něž je přiváděna hydraulická kapalina a na okruh vysokotlaký, do kterého je dodávána filtrovaná voda v potřebné kvalitě. V generátoru pak dochází na základě Pascalova zákona ke znásobení vstupního tlaku p_1 na požadovaný výstupní tlak p_2 [7].

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 [Pa] \quad (3.1)$$

Generátor běžně dosahuje tlaků řádově stovek MPa, přičemž za těchto podmínek dochází ke stlačení vody až o 13 %. Z generátoru tlaku proudí voda vysokotlakým potrubím přes akumulátor rázů (pouze v případě použití multiplikátoru) a vysokotlaký filtr do pracovní řezné hlavy, kde se formuje ve výsledný řezný nástroj pomocí systému trysek. Schéma tvorby řezného nástroje je znázorněno na obr. 3.3 [7].



Obr. 3.3: Schéma zařízení pro dělení vodním paprskem [15]

Rychlost kapaliny a objemový průtok závisí na průměru trysky a požadovaném tlaku. Spojením Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity lze vypočítat objemový průtok vody Q v závislosti na výstupním tlaku [7].

$$Q = S \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_2}{\rho}} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (3.2)$$

V řezací hlavě dochází k transformaci vysokotlakého paprsku na paprsek vysokorychlostní. Výsledná rychlost vodního paprsku v závisí na výstupním tlaku a hustotě kapaliny [2].

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_2}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

Aby bylo dosaženo požadovaného úběru materiálu, je nutné vodní paprsek dostatečně urychlit. Jeho urychlení, a tedy zvýšení kinetické energie E_k , je úměrné druhé mocnině rychlosti paprsku [2].

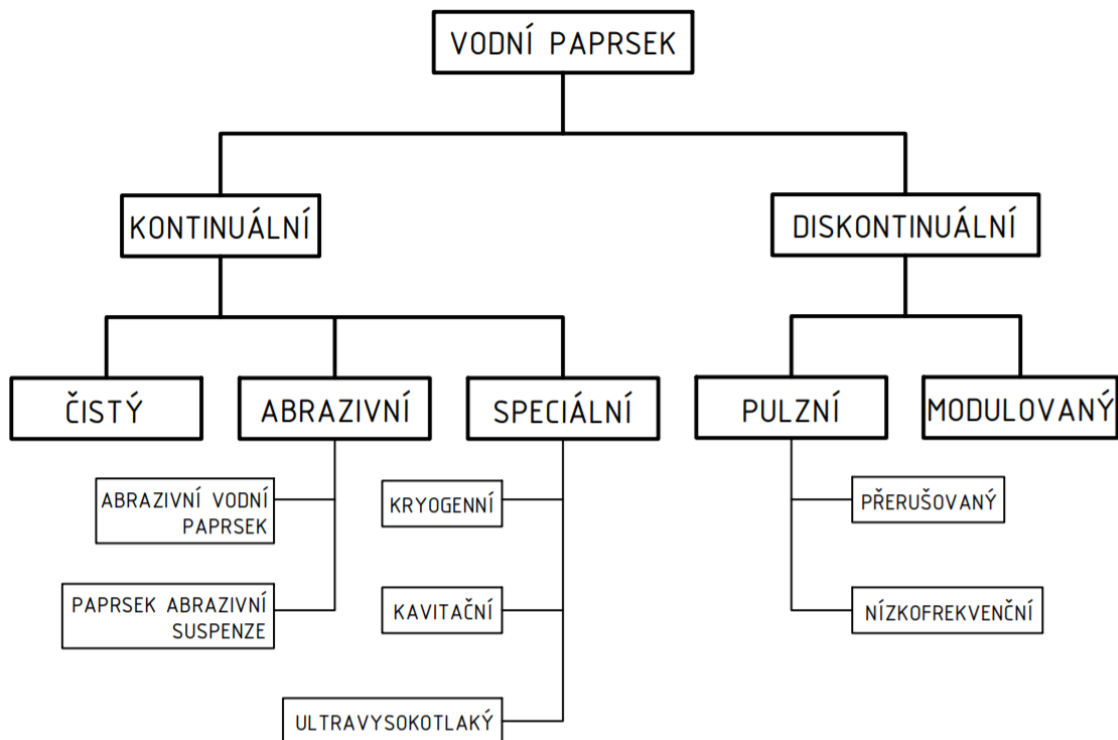
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [J] \quad (3.4)$$

Práce W vykonaná paprskem při úběru materiálu je dána rozdílem kinetických energií vodního proudu před jeho vstupem do řezaného materiálu a na výstupu z něj [2].

$$W = \Delta E_k = E_{k_1} - E_{k_2} \quad [J] \quad (3.5)$$

3.4 Základní rozdělení vodních paprsků

Vodní paprsky je možné rozdělit do několika kategorií (obr. 3.4). Primární dělení bere v potaz kontinuitu, respektive diskontinuitu řezného paprsku. Tyto základní druhy se dělí na několik dalších variant, které jsou v praxi využívány s ohledem na podmínky řezného procesu a vlastnosti obráběného materiálu [7].



Obr. 3.4: Rozdělení vodních paprsků [7]

Principem kontinuálních paprsků je použití kontinuálního proudu kapaliny, který vysokou rychlostí dopadá na povrch materiálu. V první fázi nárazu se kapalina chová jako stlačitelná a na povrch působí impaktním tlakem pomocí hydraulického rázu. V druhé fázi impaktní tlak zanikne a kapalina se začne chovat jako nestlačitelná, přičemž na materiál působí stagnačním tlakem. Tento tlak je však řádově nižší než tlak impaktní, doba trvání druhé fáze je kratší, a přitom se téměř nepodílí na porušování struktury materiálu. Z tohoto důvodu se v praxi zvyšuje podíl diskontinuálních paprsků, které díky generování tlakových pulzací kapaliny působí na obráběný povrch impaktním tlakem delší dobu, z čehož plyne vyšší efektivita a účinnost této metody [16].

3.5 Popis technologií vodního paprsku

V dnešní době existuje mnoho různých technologií vodního paprsku, v praxi však mají největší význam paprsky kontinuální. Různé technologie se mohou lišit jak použitou řeznou kapalinou, tak i druhem abraziva, využívanými řeznými tlaky a objemovým průtokem řezného média.

3.5.1 Technologie WJM – Water Jet Machining

Technologie čistého vodního paprsku (WJM) patří mezi nejrozšířenější a nejstarší z technologií kontinuálních vodních paprsků. Řeznou kapalinou je zde voda o vysokém tlaku zbavená nežádoucích příměsí. Metoda WJM je díky použití čisté vody zcela bezprašná a velmi ekologická. Podstatou této technologie je úběr materiálu mechanickým účinkem vodního proudu, který vysokou rychlostí dopadá na obrobek [2, 7].

Rychlost dopadajícího paprsku se pohybuje v rozmezí $600\text{--}900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (lze dosáhnout až rychlosti $1400\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), používané pracovní tlaky jsou od 50 MPa do zhruba 690 MPa, při vyšších tlacích již dochází k tlakovým ztrátám, zvyšování hlučnosti a snižování energetické účinnosti zařízení. Používaný průměr trysky pro technologii WJM je $0,075\text{--}0,25\text{ mm}$, přičemž šířka výstupního paprsku nabývá hodnot $0,1\text{--}1,5\text{ mm}$. Nastavená vzdálenost mezi tryskou a povrchem materiálu by měla být $2,5\text{--}6,35\text{ mm}$, použití větších vzdáleností se nedoporučuje kvůli velkému rozptylu vodního proudu. Schéma technologie WJM se nachází na obr. 3.5 vlevo [17, 19].

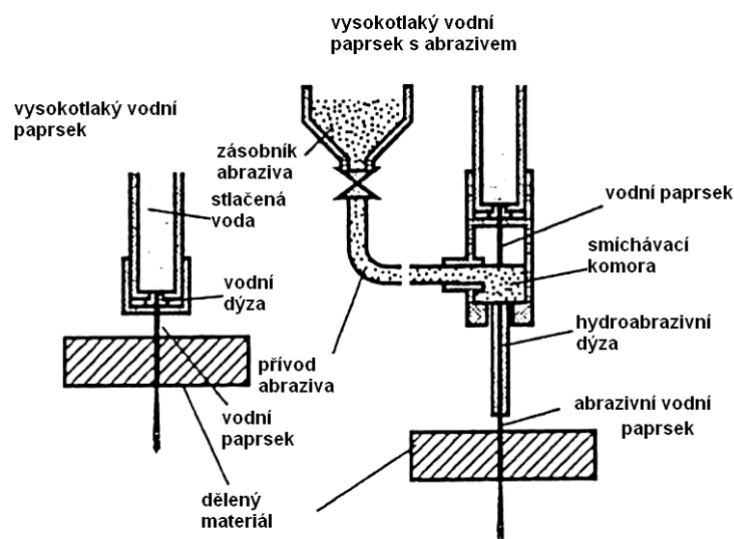
Metoda čistého vodního paprsku je vhodná zejména pro obrábění méně tvrdých nekovových materiálů, jako je sklotextil, gumotextil, kůže, lamináty, grafitové kompozity, dřevo, plasty, sádkartón, papíry a lepenky do tlouštěk zhruba 100 mm. Vhodnou oblastí využití čistého vodního paprsku je i potravinářský průmysl, a to zejména díky čistotě řezu, používán je i pro vysokotlaké čištění materiálů, odstraňování koroze, starých nátěrů a povlaků [3, 18].

3.5.2 Technologie AWJ – Abrasive Water Jet Machining

V případě technologie abrazivního vodního paprsku s přímým přívodem abraziva (AWJ) dochází ke znásobení mechanického a erozivního účinku úběru materiálu přidáním abrazivních částic. Brusné částice se nachází v zásobníku, odkud jsou vedeny do směšovací komory, kde v důsledku podtlaku dochází k jejich strhávání a urychlování vodním proudem. Díky těmto částicím je mechanismus rozrušování materiálu efektivnější a proces obrábění několikanásobně účinnější. Zároveň však při mísení vodního proudu a abraziva dochází ke zpomalování paprsku, ztrátě jeho energie a snížení řezného výkonu. Jako abrazivo je nejvíce používán granát, olivín, křemičitý písek, ocelová drť či oxid hlinitý [2, 17].

Průtok abraziva se volí v rozmezí $1\text{--}20\text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Výstupní rychlost vodního paprsku bývá stejná jako u metody WJM, tedy $600\text{--}900\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pracovní tlak vody je ale nižší, asi $50\text{--}400\text{ MPa}$. Používaný průměr trysky leží v intervalu $0,8\text{--}2\text{ mm}$ v závislosti na konkrétní aplikaci a vodní paprsek nabývá šířky $1,2\text{--}2,5\text{ mm}$. Oproti metodě WJM je u abrazivního vodního paprsku nutné zvětšit vzdálenost mezi tryskou a obrobkem až na $10\text{--}25\text{ mm}$. Schéma technologie AWJ se nachází na obr. 3.5 vpravo [17, 19].

Abrazivní vodní paprsek je vhodný i pro řezání velmi tvrdých a houževnatých materiálů. Typickými oblastmi využití této metody je obrábění ocelí, hliníkových, titanových i jiných kovových slitin, skla, kompozitních materiálů, keramiky a slinitých karbidů o tloušťkách až do 250 mm [3].

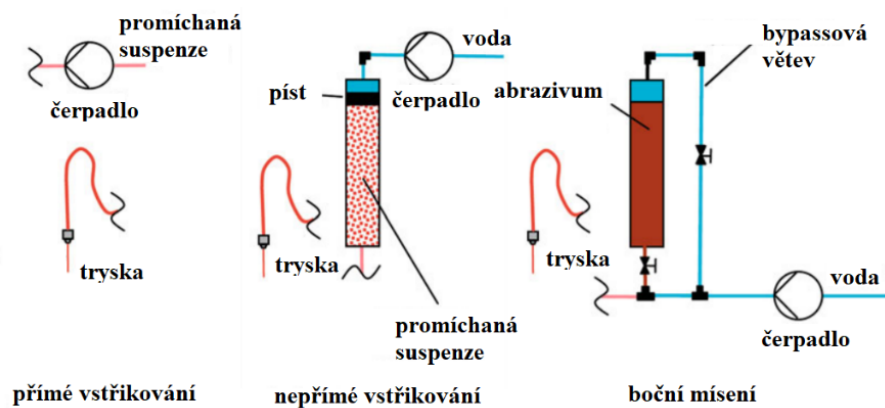


Obr. 3.5: Schéma technologií WJM (vlevo) a AWJ (vpravo) [2]

3.5.3 Technologie ASJ – Abrasive Slurry Water Jet

Principem technologie abrazivního vodního paprsku s přímým vstřikováním abraziva (ASJ) je obrábění materiálu stlačenou suspenzí přiváděnou do řezné hlavy. Tuto suspenzi tvoří částice abraziva rozptýlené ve vodě. Z hlediska tvorby suspenze existují tři základní metody jejího vzniku (obr. 3.6) [2, 20]:

- Metoda přímého vstřikování (Direct Pumping) je variantou, kdy dochází k mísení abraziva a řezné kapaliny za atmosférického tlaku. Suspenze je poté odčerpána a pod vysokým tlakem dopravena do řezné hlavy. Tato metoda není příliš využívána kvůli nadměrnému abrazivnímu opotřebení vysokotlakého čerpadla.
- Metoda nepřímého vstřikování (Indirect Pumping) spočívá v mísení řezné kapaliny přiváděné na píst tlakové nádoby, ve které je obsaženo abrazivo. Využití této metody je ovšem problematické kvůli abrazivnímu opotřebení pístu.
- Metoda bočního mísení abraziva (Bypass Principle) využívá pro mísení řezné kapaliny a abraziva boční (bypass) větve. Tou prochází část řezného média, v pístu dochází k jeho mísení se zrny abraziva a následně se tato část opět spojí s původním okruhem. Tento systém není díky své obtokové větvi náchylný na abrazivní opotřebování, řezný čas je však vzhledem k malé kapacitě pístu delší než u obou předchozích metod.

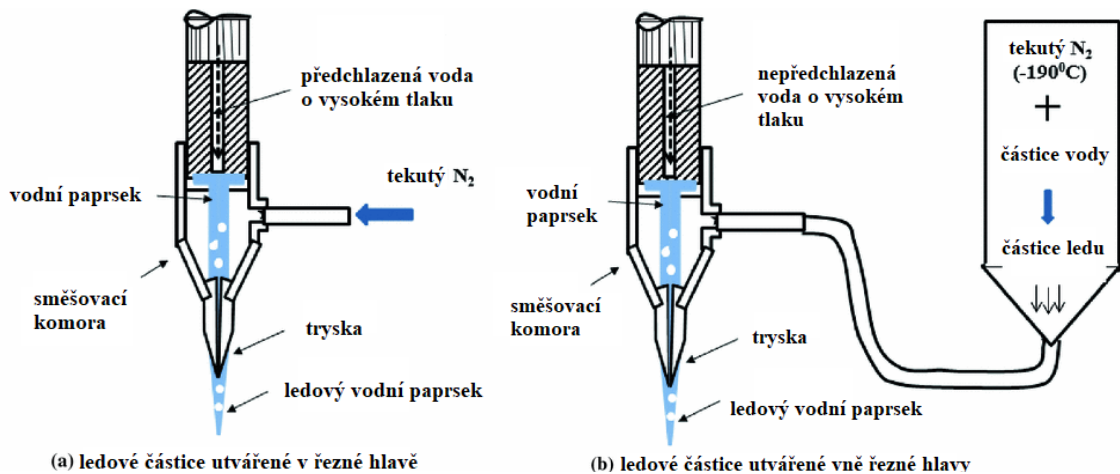


Obr. 3.6: Metody tvorby paprsku abrazivní vodní suspenze ASJ [20]

Používaný pracovní tlak metody ASJ bývá do 100 MPa, průtok suspenze se liší v závislosti na režimu řezání, od 1–3 kg·min⁻¹ pro přesné řezání až po 20 kg·min⁻¹ pro řezání s malými požadavky na přesnost. Oproti technologii AWJ je technologie ASJ účinnější, umožňuje vytvořit užší vodní paprsek, čímž lze dosáhnout kompaktnějších rozměrů řezných hlav a tím zlepšit i jejich polohovatelnost [2].

3.5.4 Technologie IJM – Ice Jet Machining

Technologie vodního paprsku s ledovými abrazivními částicemi (IJM) je metodou, kdy jsou jako abrazivo použity částice ledu. Ty jsou do vodního proudu přiváděny obdobně jako brusivo u metody AWJ nebo jsou utvářeny přímo v řezné hlavě (obr. 3.7). Ledové částice jsou nejčastěji z vody, N₂ nebo CO₂. Důvodem využití ledu jako abraziva je nedostatečná efektivita metody WJM, přílišná destrukční síla metody AWJ, tepelné zatěžování a znečišťování materiálu kontaktem s klasickým abrazivem. Tyto požadavky jsou na vodní paprsek kladeny zejména v potravinářském průmyslu a v lékařství (řezání biomateriálů, např. lidských kostí). Použití ledu je také ekologické a v porovnání s cenou konvenčního abraziva velmi levné [2, 7].



Obr. 3.7: Metody tvorby vodního paprsku s abrazivními ledovými částicemi IJM [22]

Používané pracovní tlaky pro technologii IJM se pohybují v rozmezí 200–300 MPa, teplota vodního paprsku s příměsí ledových krystalů je zhruba od -80 °C do -10 °C. Volba teploty paprsku závisí na konkrétní aplikaci, s klesající teplotou mají ledové částice větší tvrdost [7, 21].

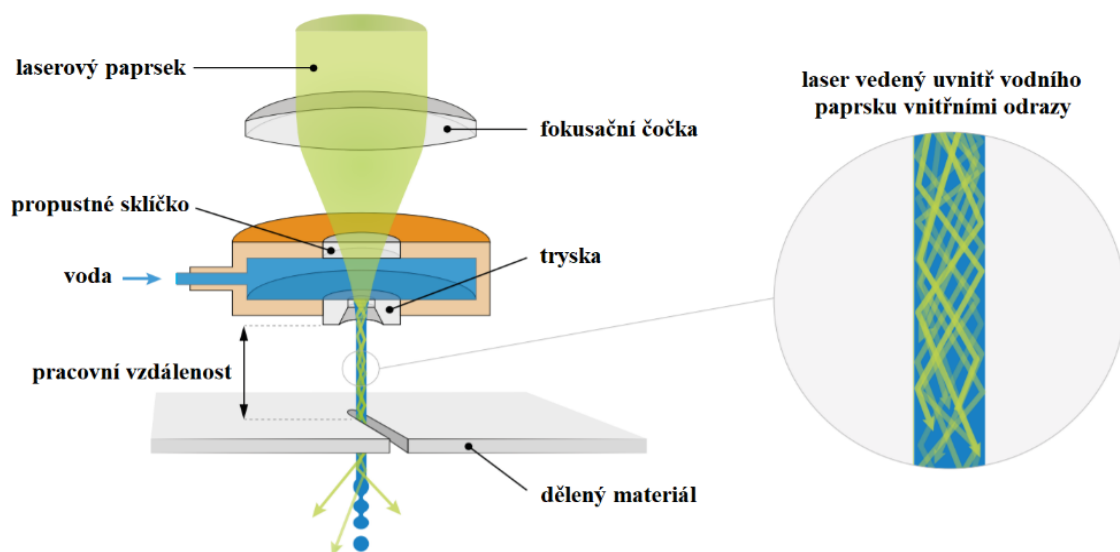
3.5.5 Technologie DWJ – Dynamic Water Jet

Technologie DWJ není samostatným druhem vodního paprsku, jedná se o moderní systém vyvinutý společností Flow, který pro řízení řezného procesu využívá speciální výkyvnou řeznou hlavu řízenou matematickým modelem. Pokročilé matematické řízení umožňuje sledovat obráběný obrys a naklápěním řezné hlavy umístěné v kloubu eliminovat ohyb paprsku. Touto kinematikou je předcházeno vzniku rýh, úkosů a jiných geometrických vad typických pro ostatní technologie vodních paprsků [23].

Metoda DWJ vyniká vysokou řeznou rychlostí, řezný čas je v porovnání s metodami WJM a AWJ 2–4krát kratší při současném zvýšení geometrické přesnosti, produktivity a snížení nákladů. Obrábění lze provádět jak čistým vodním paprskem, tak i paprskem s příměsí abraziva. Používaný pracovní tlak bývá v rozmezí 415–600 MPa při rychlosti paprsku až $950 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. DWJ se využívá pro výrobu forem, nástrojů i přesných součástí pro letecký a kosmický průmysl [23].

3.5.6 Technologie LMJ – Laser MicroJet

Technologie LMJ je hybridní technologií vodního a laserového paprsku, kterou vyvinula švýcarská společnost Synova. Kombinací těchto metod lze dosáhnout velmi rychlého a přesného řezu, který je typický pro laserovou technologii, zároveň je však dosaženo nízkého termického zatěžování obrobku v důsledku chlazení řezu vodou. Principem této metody je vedení laserového paprsku uvnitř paprsku vodního pomocí vnitřních odrazů v kapalině (obr. 3.8) [24].



Obr. 3.8: Schéma technologie LMJ [24]

Metoda LMJ využívá pevnolátkového Nd:YAG laseru o vlnové délce 1064 nebo 532 nm a výkonu 20–400 W. Pracovní tlak vodního paprsku se pohybuje v rozmezí 5–40 MPa, výstupní tryska má v průměru 20–100 μm a vzdálenost mezi tryskou a obrobkem je volena 5–50 mm. Průtok vody je v závislosti na pracovním tlaku přibližně $10 \text{ l}\cdot\text{hod}^{-1}$. Tloušťka řezaného materiálu může být až 30 mm [24].

Hybridní technologie laseru a vodního paprsku je vhodná pro řezání nerezových ocelí, hliníkových, titanových či niklových slitin, oxidové i neoxidové keramiky a v neposlední řadě polovodičových a kompozitních materiálů [24].

3.6 Vlastnosti technologií vodního paprsku

Technologie vodního paprsku má celou řadu výhod, díky kterým je využitelná v širokém spektru aplikačních oblastí, má však ale i několik nevýhod, které její použití ztěžují až znemožňují [6, 7, 8, 17].

Výhody technologie vodního paprsku:

- Vysoká energetická účinnost v porovnání s řezáním laserem či plazmou (až 80–85 % v porovnání s 10 % účinností laserového řezání), s čímž souvisí i nízký příkon stroje (25–40 kW).
- V důsledku studeného a čistého řezu (40–50 °C) nedochází k termickému zatěžování a znečištění materiálu obrobku, nedochází rovněž k mechanickému deformování obrobku díky malým řezným silám.
- Bezprašnost a ekologičnost procesu bez vzniku škodlivých plynů a par, možnost recyklace jak řezné kapaliny, tak i abrazivních částic.
- Snadná aplikovatelnost na procesy soustružení, frézování, vrtání, drážkování ad.
- Možnost dělení měkkých i tvrdých materiálů, vícesložkových kompozitních materiálů, zvlněných i sendvičových struktur.
- Malé ztráty prořezem (cca 1 mm), vyšší řezná rychlost v porovnání s klasickými způsoby obrábění, schopnost řezat i geometricky složité tvary bez potřeby upnutí součásti, poměrně dobrá přesnost i geometrie řezu, variabilita nastavení vzdálenosti mezi obrobkem a tryskou.
- Řezání pod vodou i ve výbušném prostředí, možnost použití různých řezných kapalin dle konkrétní aplikace (v potravinářském průmyslu máslo, tuky, oleje).

Nevýhody technologie vodního paprsku:

- Potřeba ošetření materiálů, které jsou v důsledku kontaktu s vodou náchylné ke korozi, nutnost vysoušení nasákavých materiálů.
- Zaoblení vnitřních rohů dané průměrem paprsku, kvalitativní zhoršení kontury řezu v důsledku výběhu paprsku z materiálu.

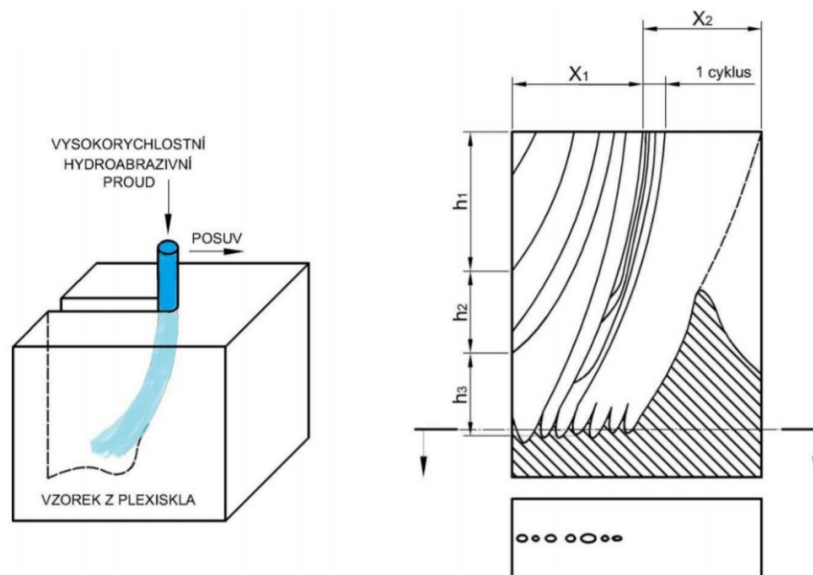
4 Vlastnosti obrobeneho povrchu a řezné parametry

Povrch obráběný vodním paprskem má specifické vlastnosti, které jsou typické pouze pro tento druh technologie. Topografii povrchu i celkovou kvalitu a efektivitu řezného procesu ovlivňuje několik parametrů [2]:

- průměr trysky,
- rychlost proudění,
- tlak vody,
- použité abrazivo a aditiva ve vodě,
- vzdálenost mezi tryskou a obráběným povrchem,
- úhel sklonu vodního paprsku.

4.1 Makromechanismus řezného procesu

V případě čistého i abrazivního vodního paprsku dochází k úběru materiálu procesem eroze, která nastává při dopadu částice kapaliny na obráběný povrch. Chování této částice kapaliny lze při vysoké dopadové rychlosti připodobnit k pevné částici, jež interaguje s povrchem a erozivně ho opotřebovává.



Obr. 4.1: Vizualizace řezného procesu pomocí (vlevo) a reliéf obrobeneho povrchu (vpravo) [8]

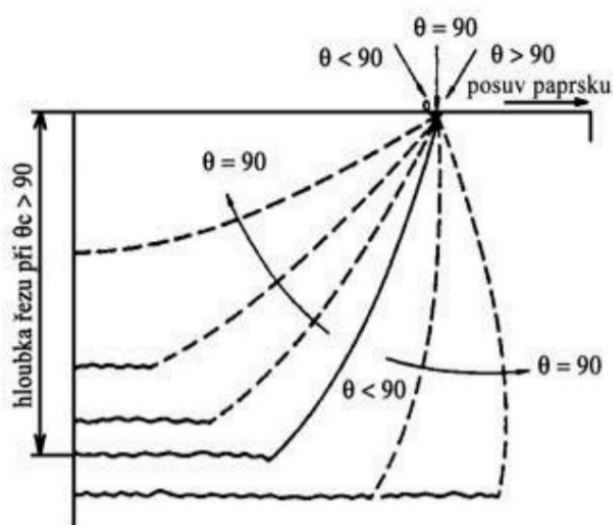
Poznatky o makromechanismu úběru byly získány analýzou povrchových struktur řezaných vzorků. Proces řezání spolu s vizualizací reliéfu obrobeneho povrchu (obr. 4.1) je možné zobrazit pomocí dělení vzorků plexiskla [8].

V první části vodní paprsek vstupuje do materiálu a ve vzdálenosti x_1 od počátku řezu dosáhne maximální hloubky řezu h_{max} .

$$h_{max} = h_1 + h_2 + h_3 \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

Proces se cyklicky opakuje do vzdálenosti x_2 . Ustálený stav řezání nastává pouze v horní erozní zóně definované hloubkou h_1 . Do této hloubky převládá řezné opotřebení materiálu a rychlost úběru je zde rovna rychlosti posuvu trysky vodního paprsku. V přechodové oblasti od hloubky h_1 do hloubky h_2 dochází k postupnému úběru materiálu, v této hloubce má proces řezu charakter nárazů. Vodní paprsek není v tomto intervalu hloubek v ustáleném stavu, jeho dráha se zakřivuje a řezné opotřebení materiálu se mění ve výhradně deformační opotřebení. V oblasti hloubky dolní erozní zóny h_3 se vodní proud stává neúčinným a zakřivuje se směrem nahoru. Při jeho pohybu vzhůru dochází ke srážkám s částicemi dopadajícího paprsku a v důsledku změny hybnosti i tyto částice v hloubce h_3 napomáhají erozi a úběru materiálu [8].

V místě, kde vodní paprsek vystupuje z řezu, se nachází zóna ve tvaru trojúhelníku, kde nedošlo k úběru materiálu. Pokud jsou obráběny materiály do hloubky h_1 , je proces ustálený a stabilní, pokud jsou však materiály obráběny až do hloubky h_3 , proces je nestabilní, hrozí neprořezání materiálu a v důsledku ohybu vodního paprsku je hloubka řezu nepravidelná. Samotnou hloubku řezu je možné změnit zmenšením či zvětšením úhlu vstupu vodního paprsku do materiálu. Závislost hloubky řezu na úhlu vstupu vodního paprsku θ do obráběného materiálu ukazuje obr. 4.2 [2, 8].

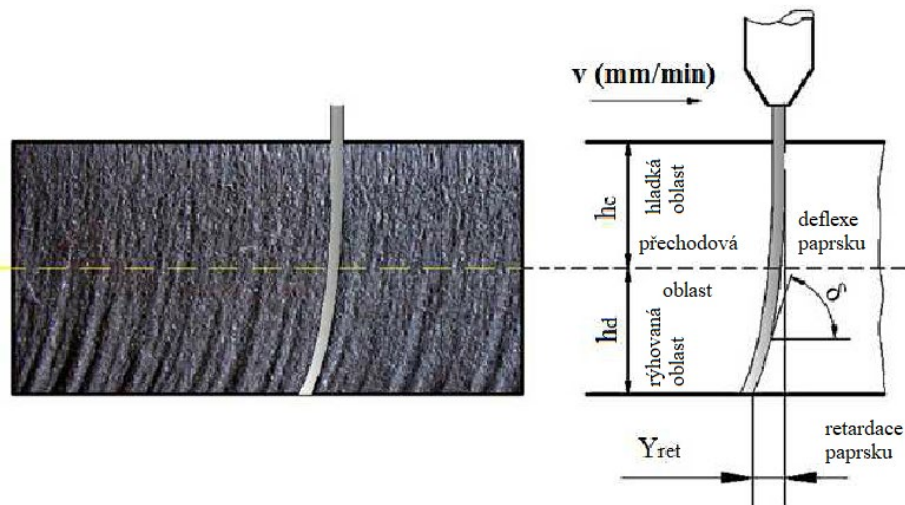


Obr. 4.2: Závislost hloubky řezu na nastaveném úhlu vodního paprsku [2]

4.2 Kvalita řezu

Plocha řezu při použití technologie abrazivního vodního paprsku nevykazuje jednotné parametry povrchu po celé délce řezu. Povrch řezu se dělí na tři základní oblasti (obr. 4.3) [2]:

- horní hladká oblast (horní erozní zóna),
- střední přechodová oblast,
- dolní rýhovaná oblast (dolní erozní zóna, zóna striací).

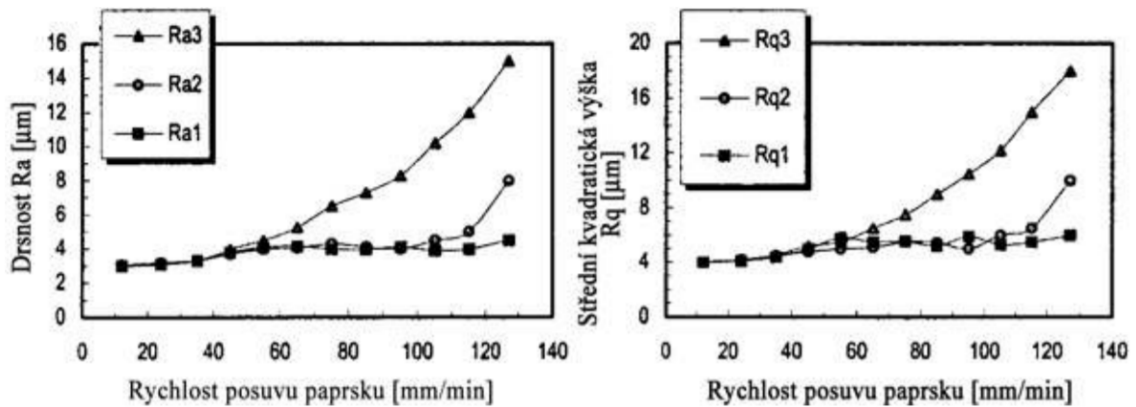


Obr. 4.3: Kvalitativně odlišné zóny povrchu řezu [26]

Hladká oblast se vyskytuje v místě vstupu vodního paprsku do materiálu a pokračuje až do určité hloubky h_c pod povrchem. Při interakci vodního paprsku dochází v této zóně k řeznému opotřebení a paprsek se téměř nevychyluje. Hladkou oblast je možné popsat jako homogenní s náhodným profilem a mírně izotropní strukturou (ve všech místech vykazuje téměř stejně vlastnosti). Parametr drsnosti R_a a parametr střední kvadratické odchylky profilu R_q jsou v hladké oblasti téměř nezávislé na hloubce řezu a řezné rychlosti [2, 25].

Drsná rýhovaná oblast, která se nachází pod hladkou oblastí do hloubky h_d , vzniká v důsledku ohybu paprsku. Vodní paprsek v důsledku tření s povrchem ztrácí kinetickou energii a ohýbá se (tzv. deflexe paprsku či „váznutí paprsku“). Tento jev je provázen zaostáváním vodního paprsku za původní trajektorii paprsku (tzv. retardace paprsku). Při úběru materiálu převažuje v této zóně deformační opotřebení. Parametr drsnosti R_a a parametr střední kvadratické odchylky profilu R_q jsou v rýhované oblasti silně závislé na hloubce řezu a řezné rychlosti a při zvyšování těchto parametrů narůstají [2, 25].

Vliv řezné rychlosti na parametr drsnosti Ra a parametr střední kvadratické odchylky profilu Rq znázorňuje obr. 4.4. Z něj je vidět, že s menší řeznou rychlostí, a tedy s nižší rychlostí posuvu paprsku se zvětšuje hladká oblast, která převažuje po téměř celé ploše řezu. Naopak, pokud řezná rychlost dosahuje vyšších hodnot, kvalitativní parametry dolní i střední oblasti řezu se zhoršují.



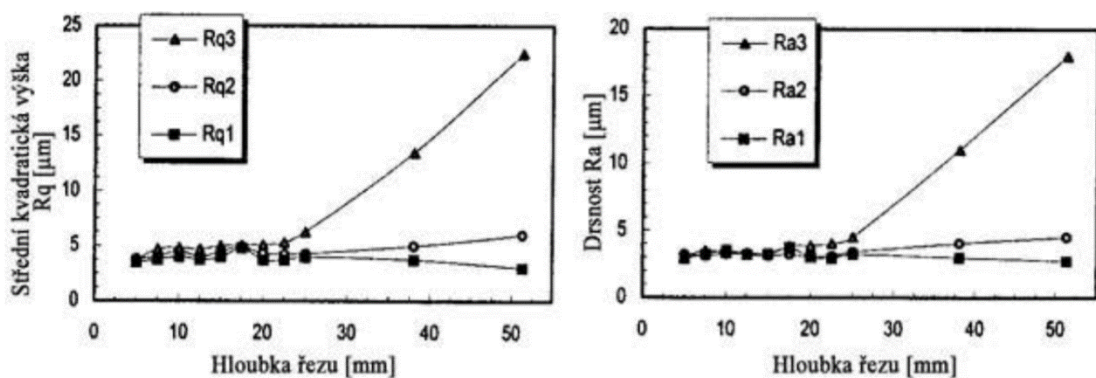
Ra₁ a Rq₁ – parametry charakterizující horní část řezu

Ra₂ a Rq₂ – parametry charakterizující střední část řezu

Ra₃ a Rq₃ – parametry charakterizující dolní část řezu

Obr. 4.4: Závislost povrchových parametrů řezu na řezné rychlosti [2]

Podobná závislost platí i mezi hloubkou řezu a parametrem drsnosti Ra a parametrem střední kvadratické odchylky profilu Rq. Tuto závislost prezentuje obr. 4.5. Z něj je patrné, že u materiálů obráběných pouze do malé hloubky nedochází ke kvalitativnímu zhoršení povrchu řezu, se zvyšující se hloubkou řezu však parametry Ra a Rq na dolní straně řezu rostou téměř lineárně a dochází k rozšiřování rýhované zóny.



Ra₁ a Rq₁ – parametry charakterizující horní část řezu

Ra₂ a Rq₂ – parametry charakterizující střední část řezu

Ra₃ a Rq₃ – parametry charakterizující dolní část řezu

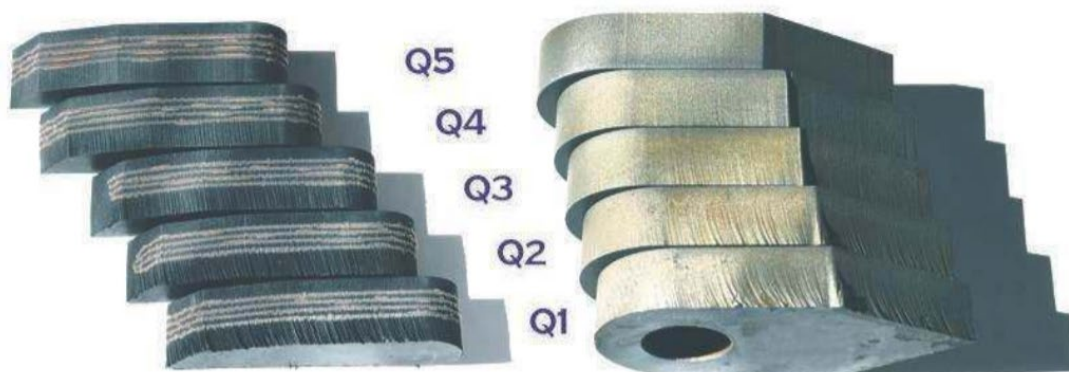
Obr. 4.5: Závislost povrchových parametrů řezu na hloubce řezu [2]

V praxi existuje několik způsobů posuzování kvality řezu vodním paprskem. Nejznámějším způsobem je rozdělení do pěti kategorií Q1 až Q5, kde kategorie Q5 značí nejlepší řez. Často je podle této metodiky prováděna vizuální zkouška, kdy je obrobený povrch porovnán s etalonem, jehož povrch spadá do jedné z kategorií Q1 až Q5. Parametry kategorií Q1 až Q5 jsou uvedeny v tab. 4.1, ukázka kvality povrchu jednotlivých kategorií se nachází na obr. 4.6 [25].

Tab. 4.1: Charakteristika základních stupňů kvality řezu [25, 27]

Stupeň kvality	Základní charakteristika	Drsnost Ra* [μm]		Tvarová přesnost* [mm]		Úkos
		kontura		kontura		
		horní	spodní	horní	spodní	
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	dle materiálu	dle materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	dle materiálu	dle materiálu
Q1	dělicí řez	4,0–6,3	do 40	+/- 0,2	výrazně nepřesné	výrazný úkos do +

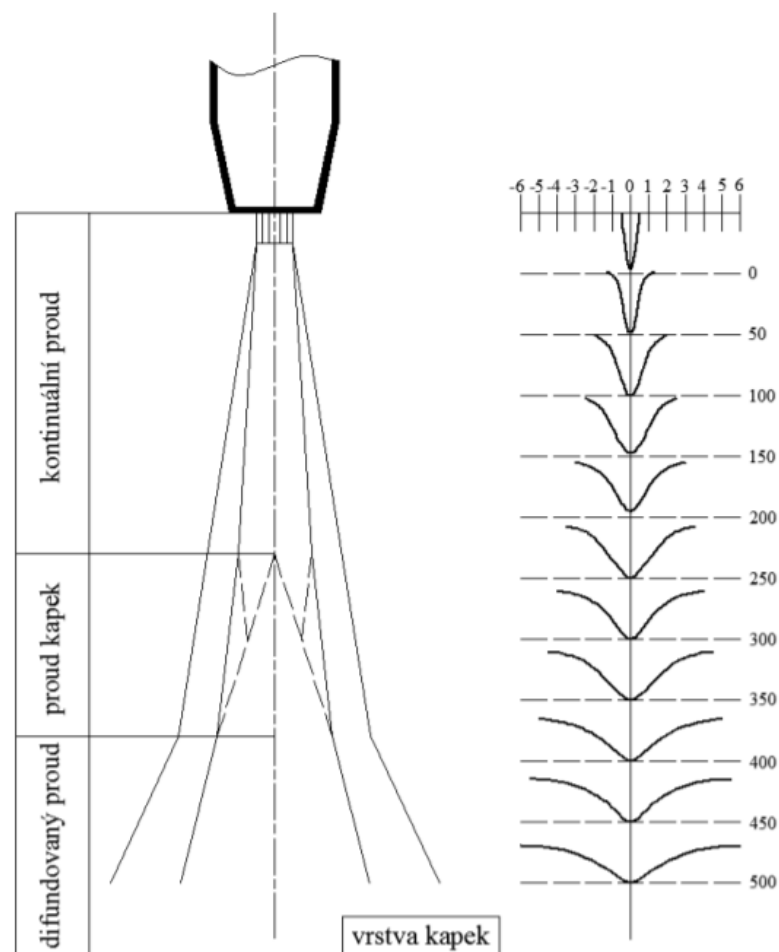
(*) Hodnoty jsou pouze orientační a mohou se lišit podle typu obráběného materiálu.



Obr. 4.6: Vzorok s ukázkou kategorií kvality řezu [27]

4.3 Rozšíření řezné mezery

Jev rozšíření řezné mezery je úzce spjat se vzdáleností vodní trysky od obrobku. Vzdálenost trysky od obráběného povrchu (tzv. stand off) je klíčovým parametrem pro zajištění kvality řezného procesu. Při výstupu z trysky vodní proud ztrácí energii a s rostoucí vzdáleností se kontinuální vodní paprsek rozpadá na nekoherentní proud kapek. To má za následek zmenšení erozního výkonu a tím pádem snížení úběru materiálu, rozšíření řezné spáry, zhoršení geometrie a kvality řezu. Výsledný tvar řezné spáry je pak totožný s tvarem rychlostního profilu vodního paprsku. Vliv rostoucí vzdálenosti trysky a obrobku na průběh rychlostního profilu je prezentován na obr. 4.7 [2, 8].



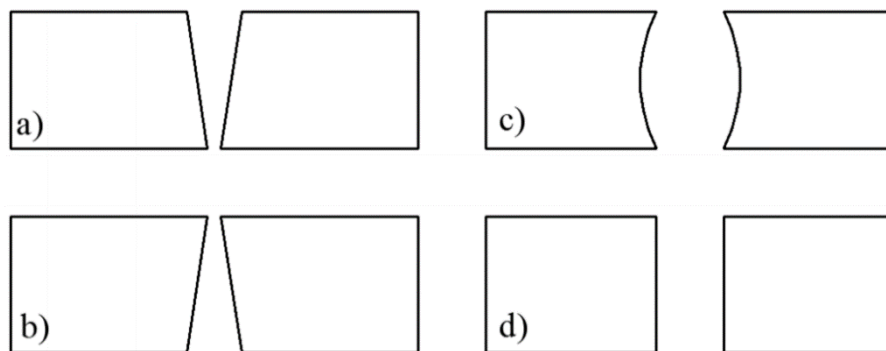
Obr. 4.7: Závislost tvaru řezné mezery na vzdálenosti mezi tryskou a obrobkem [8]

S rostoucí vzdáleností dochází k rozšíření rychlostního profilu paprsku, vnější část paprsku ztrácí energii a téměř se nepodílí na úběru materiálu. Tento vnější okraj ale způsobuje výrazné zvětšení kuželovitosti řezu, které je patrné zejména při velkých řezných vzdálenostech [8].

Maximální stand off, při kterém je dosaženo největší hloubky řezu při zachování přijatelných geometrických charakteristik, je popsán vzdáleností l_{max} . Vzdálenost l_{max} se nachází pro většinu materiálů v rozmezí hodnot 18–23 mm. Pro technologii čistého vodního paprsku je volena menší vzdálenost mezi tryskou a obrobkem, asi 2,5–6,35 mm, pro abrazivní vodní paprsek tato vzdálenost narůstá až na 10–25 mm [17, 25].

4.4 Odchylka kolmosti

Při dělení vodním paprskem dochází k zúžení stěn řezu a odchylce kolmosti, tedy úkosu. Tvar úkosu je dán časem působení vodního proudu na obrobek a vlastnostmi obráběného materiálu. Základní druhy úkosů jsou zobrazeny na obr. 4.8 [8].



- a) Odchylka kolmosti tvaru V
- b) Reverzní odchylka kolmosti
- c) Soudková odchylka kolmosti
- d) Ideální řez bez odchylky kolmosti

Obr. 4.8: Různé druhy odchylky kolmosti [8]

Odchylku kolmosti vzniklou při obrábění vodním paprskem je možné rozdělit na čtyři základní druhy [8]:

- Odchylka kolmosti tvaru V, která je vyobrazena na obr. 4.8 a). Tato odchylka vzniká při pomalém průchodu vodního paprsku materiálem. Při něm dochází k vyššímu eroznímu úběru materiálu v horní části, která je pak širší než část dolní.
- Reverzní odchylka kolmosti patrná z obr. 4.8 b). Její průběh je opačný k průběhu odchylky tvaru V a její horní erozní oblast je oproti dolní oblasti zúžená. Příčinou je rozšiřování rychlostního profilu paprsku s rostoucí vzdáleností od trysky. K této odchylce dochází velmi pomalém průchodu paprsku u měkkých materiálů.

- U soudkové odchyšky na obr. 4.8 c) dochází k rozšíření střední části řezu, která je širší než horní i dolní část řezu. Tento typ odchyšky je charakteristický pro obrábění materiálů s hrubou strukturou.
- Kosodélníková nebo lichoběžníková odchyška kolmosti, která se vyznačuje nakloněním celé řezné spáry. K němu dochází při špatném nastavení úhlu vodního paprsku.

Druh a velikost odchyšky kolmosti je ovlivněn řeznými podmínkami, popřípadě hrubostí struktury materiálu a jeho obrobiteľností. Například při vzdálenosti trysky od materiálu 2 mm je úhel úkosu asi 1,2°, při zvětšení vzdálenosti na 15 mm je úkos už 3,8°. Vzniku odchyšky lze předejít změnou úhlu řezné hlavy, změnou stand off vzdálenosti, snížením řezné rychlosti, zmenšením průměru trysky nebo použitím kvalitnějšího abraziva [8].

4.5 Řezná rychlost

Volba správné řezné rychlosti je klíčovým faktorem ovlivňujícím kvalitu a efektivitu řezného procesu. Řezná rychlost je rozdílná pro různé druhy materiálů a závisí na požadované hloubce řezu. Se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k poklesu tloušťky materiálu, který je vodní paprsek schopen dělit. Příklady řezných rychlostí a příslušných tlouštěk různých konstrukčních materiálů jsou uvedeny v tab. 4.2 pro technologii WJM a v tab. 4.3 pro technologii AWJ.

Tab. 4.2: Příklad řezných rychlostí pro technologii WJM [2]

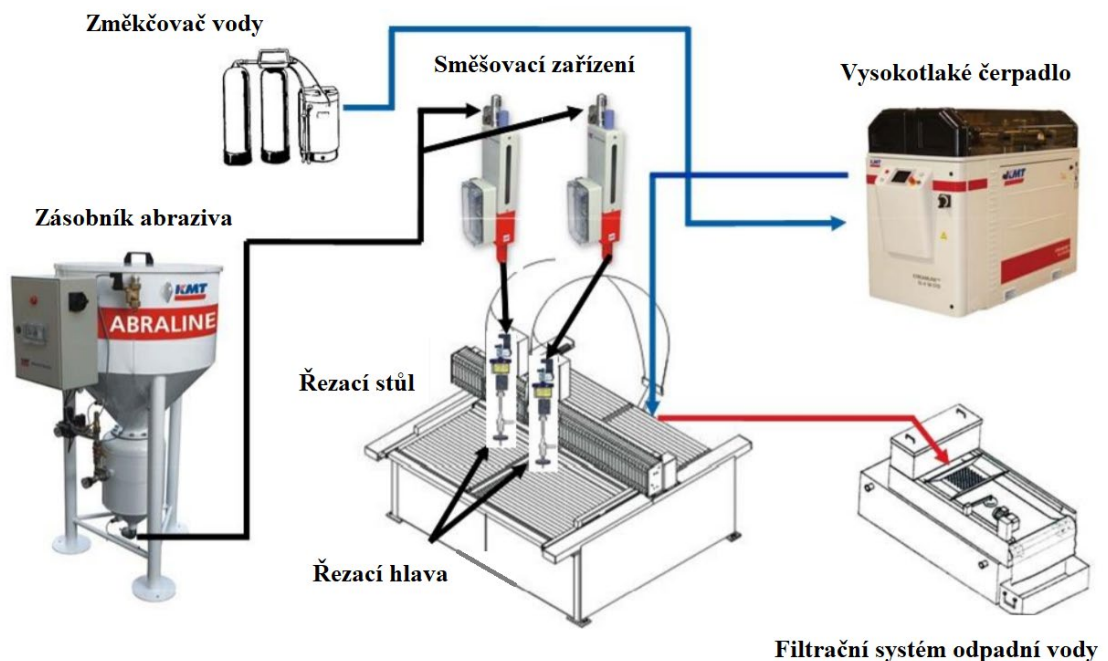
Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [mm·s ⁻¹]	Průměr trysky [mm]	Pracovní tlak [MPa]
Azbestový obklad	18	1520	0,20	190
Gumová dlaždice	3	150	0,13	380
Sklo	300	420	0,15	350
Polypropylen	2	60	0,10	380
Polyester	12	600	0,15	380
Polyvinylchlorid	0,75	300	0,10	380
Uhlíkový kompozit	1,6	10	0,15	380
Sklolaminát	1,7	40	0,20	385

Tab. 4.3: Příklad řezných rychlostí pro technologii AWJ [2]

Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]
Měkká ocel	1,6	8,34
	13	1,67
	50	0,64
	180	0,17
Korozivzdorná ocel	5	6,67
	13	2,5
	25	1,27
Hliník	1,6	21,67
	6	8,34
	25	2,17
	100	0,42
Titan	3	8,34
	6	6,67
	12	1,67
Sklo	13	21,67
	19	10
	25	2,17
Beton	250	0,42

5 Popis zařízení pro technologii vodního paprsku

Strojní zařízení pro obrábění vodním paprskem je souborem komponent nezbytných pro správnou funkci procesu obrábění. Jednotlivé komponenty lze podle různé potřeby výkonu či objemu práce vyměňovat, kombinovat či doplňovat. Zařízení pro technologii WJM i AWJ jsou svým principem velmi podobná, liší se pouze součástmi, které zajišťují dávkování abrazivních částic a jsou s nimi v kontaktu. Příklad schématu pracoviště s vodním paprskem se nachází na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Schéma pracoviště pro obrábění vodním paprskem [15]

Sestavu pracoviště pro obrábění vodním paprskem je možné rozdělit na tři základní podskupiny charakterizované příslušným systémem komponent [15]:

- Technologické zařízení, které je složeno z vysokotlakého čerpadla, abrazivního dávkovacího systému, zásobníku abraziva, řezací hlavy, zařízení na úpravu vody, filtračního systému odpadní vody, vysokotlakého rozvodu vody, chladicího zařízení a kompresoru.
- Řezací zařízení, které se skládá z pracovního stolu s možností posuvu a CNC řídicího systému.
- Softwarové vybavení, jehož součástí je program, který je integrován do stroje a řídí proces obrábění a popřípadě jiný doplňkový podpůrný software.

5.1 Řezná kapalina a její úpravy

Nejdůležitější součástí technologie vodního paprsku je voda jakožto řezná kapalina, která se formuje v řezný nástroj. Voda nejlépe plní požadavky, které jsou při výběru na řeznou kapalinu kladeny [7]:

- nízká viskozita, díky které dochází k minimálním ztrátám při průchodu potrubím, přívodními hadicemi a tryskou,
- malá toxicita, u obsluhujícího personálu nesmí dojít k poškození pokožky, dýchacích cest a zraku,
- nízký korozivní účinek vůči kovovým součástem zařízení,
- maximální produktivita a kvalita obrábění při nejmenších energetických ztrátách,
- běžná dostupnost a nízká cena.

V praxi jsou využívány i jiné druhy řezných kapalin. V medicíně je to například líh či různé druhy alkoholu, v potravinářském průmyslu může být použito mléko, máslo, kakao, glycerin nebo rostlinné oleje [7].

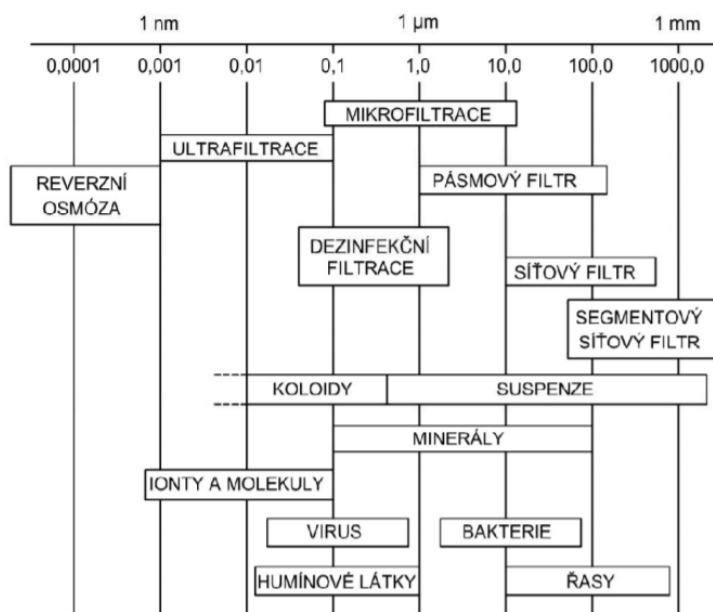
Zařízení vodního paprsku by mělo pracovat s přesně definovanou kvalitou vody. Voda o špatné kvalitě může způsobovat zkrácení intervalů údržby a nadměrné opotřebovávání otvoru trysky, ovládacích ventilů tlakových těsnění a pístů. Problémem jsou hlavně malé pevné částičky (usazeniny) a úplně rozpuštěné pevné látky (vápník, hořčík, železo). Existují tři základní způsoby, kterými se voda upravuje [7, 15]:

- mechanická úprava vody (filtrace),
- fyzikálně-chemická úprava vody,
- biologická úprava vody.

5.1.1 Filtrace

Filtrace je mechanický způsob úpravy vody, kdy dochází k separaci nerozpuštěných pevných částic a částic kapaliny. Filtrace probíhá pomocí hlubokého filtru, na kterém dochází k zachycení pevných částic. Hluboký filtr se skládá ze čtyř vrstev, které jsou seřazeny od nejvíce propustné až po nejjemnější nejméně propustnou vrstvu. První vrstva je schopná zachytit pouze hrubé usazeniny, nejjemnější vrstva odstraňuje částice menší než zhruba 1,2–0,5 μm . Oblasti využití filtračních metod znázorňuje obr. 5.2 [2, 7].

Běžně vyráběné vodní filtry jsou znovupoužitelné a procesem tzv. zpětného propláchnutí lze pevné částice odstranit a filtr opět využít. Hloubka filtru se dle objemu vody pohybuje od 150 do 2500 mm [7].



Obr. 5.2: Oblasti využití filtračních metod [7]

5.1.2 Změkčování

Změkčování vody je dalším krokem úpravy vody, který je kombinován s následnou deionizací a reverzní osmózou. Tvrdost vody je dána obsahem kationtů kovů alkalických zemin, zejména je dána obsahem vápníku a hořčíku. Tvrdost vody se zvyšuje s rostoucím obsahem právě těchto prvků. Jednotky tvrdosti jsou různé a liší se podle použití v jednotlivých zemích, používány jsou buď stupně německé nebo francouzské, častěji je tvrdost vyjadřována v látkovém množství mmol/l. Stupně tvrdosti vody v závislosti na obsahu rozpuštěných látek udává tab. 5.1 [28].

Tab. 5.1: Stupně tvrdosti vody podle obsahu rozpuštěných látek [28]

Tvrdost vody	mmol/l	°dH	°dF
velmi tvrdá	> 3,76	> 21,01	> 37,51
tvrdá	2,51–3,75	14,01–21	25,01–37,5
středně tvrdá	1,26–2,5	7,01–14	12,51–25
měkká	0,7–1,25	3,9–7	7–12,5
velmi měkká	< 0,7	< 3,9	< 7
Převodní vztahy: 1 mmol/l = 5,6 °dH = 10 °dF			

Zařízení na změkčování vody funguje na principu kationtové výměny. Jeho součástí je nádržka s pryskyřicí, slanou vodou a kontrolní záklopkou. Voda protéká přes zásobník s pryskyřicí ve formě zrněk, kde dochází k interakci a iontové výměně. Kladně nabitě částice vápníku a hořčíku jsou přitahovány a pohlcovány záporně nabitými částicemi sodíku uvolňovanými z pryskyřičné náplně. Proces probíhá, dokud jsou v systému sodíkové ionty, pak je potřeba pryskyřičnou náplň vyměnit [7].

5.1.3 Deionizace

Deionizace je proces podobný změkčování, dochází zde ale ke kationtové i aniontové výměně. Využita je zde pryskyřice aniontová i kationtová v oddělených zásobnících. Při průchodu vody přes zásobník kationtové pryskyřice dochází k přesunu kationtů uhlíku, železa a hořčíku volnými minerály kyselin. V zásobníku s aniontovou pryskyřicí jsou anionty chloridů a sulfátů nahrazeny hydroxidy. Po ukončení procesu se hydroxidy slučují za vzniku vody bez přítomnosti iontů. Výhodou deionizace je úplné odstranění všech rozpuštěných částic (TDS) [7].

5.1.4 Reverzní osmóza

Při reverzní osmóze dochází k zachycení rozpuštěných částic a nečistot na polopropustné membráně, přes kterou je vedena voda pod vysokým tlakem. Následně dochází k oddělení čisté vody od částic nečistot, které jsou odvedeny do odpadu. Procesem reverzní osmózy dochází rovněž k biologické úpravě vody, metoda je schopna efektivně odstraňovat i bakterie a jiné mikroorganismy. Reverzní osmózou je možné odstranit 97–98 % nečistot, výhodou je konzistentnější hodnota pH v porovnání s použitím pouze deionizace [7].

5.1.5 Aditiva

Pro dosažení potřebných vlastností vodního paprsku jsou do vody přidávána aditiva na bázi polymerů s lineárními molekulami. Běžnými aditivami jsou například polyakrylamid (PAA) nebo polyetyloxid (PEO). Při jejich použití dochází ke stabilizaci vodního paprsku, který se při dopadu na povrch netříští. Výsledkem je vyšší účinnost, lepší koncentrace energie do jádra paprsku při omezení nadměrných turbulencí vodního proudu. Úprava vody aditivami je vhodná při vytváření přesných a ostrých kontur [2].

V tab. 5.2 jsou uvedeny hodnoty parametrů vyjadřujících kvalitu vody podle obsahu nečistot doporučené společností KMT Waterjet Systems.

Tab. 5.2: Doporučené hodnoty kvality vody podle obsahu rozpuštěných látek [29]

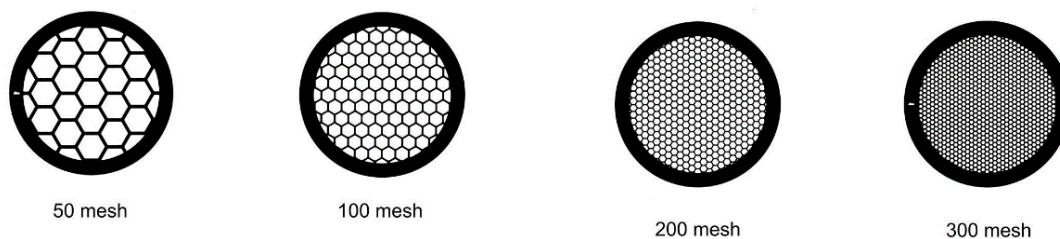
Parametr	Minimální hodnoty	Dobré hodnoty	Nejlepší hodnoty
Vápník (Ca)	25 mg/l	5 mg/l	0,5 mg/l
Chlor (Cl)	1 mg/l	1 mg/l	0,05 mg/l
Železo (Fe)	0,2 mg/l	0,1 mg/l	0,01 mg/l
Hořčík (Mg)	0,5 mg/l	0,1 mg/l	0,1 mg/l
Mangan (Mn)	0,1 mg/l	0,1 mg/l	0,1 mg/l
Sodík (Na)	50 mg/l	10 mg/l	1 mg/l
Křemík (SiO ₂)	15 mg/l	10 mg/l	1 mg/l
Alkalita	0,5 mmol/l	0,25 mmol/l	0,1 mmol/l
Celková tvrdost (ve formě CaCO ₃)	1,4 °dH	0,56 °dH	0,056 °dH
Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS)	200 mg/l	100 mg/l	35 mg/l
pH	6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5

5.2 Abrazivo

Abrazivo je velmi důležitou součástí technologie AWJ. Čistý vodní paprsek má dostatečnou energii pouze na rozrušování struktury měkkých materiálů. Při přidání abraziva vodní proud abrazivní částice urychlí a násobně zvýší efektivitu a rezný výkon. Abrazivní vodní proud je proto vhodný i pro obrábění tvrdých a houževnatých materiálů, jako jsou oceli, keramika či titan. Správný výběr abraziva má na celý proces i velký ekonomický dopad, neboť cena abraziva je jednou z nejvýznamnějších položek a může tvořit až polovinu nákladů celého obráběcího procesu. Z tohoto důvodu je také kladen důraz na výběr abrazivního materiálu vhodného k recyklaci [2, 7].

Při výběru abraziva zohledňujeme několik faktorů, které souvisí s vlastnostmi obráběného povrchu a požadovanými výstupními parametry [2, 30, 31]:

- Tvrdost abraziva, která je spjata s hloubkou řezu. Při použití tvrdšího abrazivního materiálu lze při stejných hodnotách tlaku a rychlosti vodního paprsku dosáhnout hlubšího řezu. Se zvyšující se tvrdostí stoupá také efektivita procesu, je ale nutné nalézt určitý kompromis, jelikož příliš tvrdé abrazivo nadměrně opotřebovává trysku a zaostřovací trubici.
- Zrnitost abraziva, jenž souvisí s hloubkou řezu, řeznou rychlostí, ale hlavně s kvalitou řezu. S klesající zrnitostí klesá také drsnost obráběné plochy, rovněž je také ale nižší řezná rychlost. Zrnitost je udávána v jednotkách MESH, které představují počet ok pomyslného síta. Zrna mohou být buď jemná (MESH 100, 150), středně velká (MESH 60, 80) nebo hrubá (MESH 16, 36) (obr. 5.3).
- Řezivost abraziva, která vyplývá z krystalické mřížky abrazivního materiálu. Nejvhodnější je kubická krystalická mřížka, která je velmi odolná proti otupení.
- Tvar abrazivních částic, s jehož stoupající kulatostí a kruhovitostí se zlepšuje i kvalita povrchu, zrna však mají menší abrazivní účinek a klesá hloubka řezu.



Obr. 5.3: Schéma vyhodnocení zrnitosti MESH [34]

5.2.1 Používaná abraziva

Na trhu existuje mnoho druhů abrazivních materiálů, které se liší fyzikálními vlastnostmi, chemickým a minerálním složením. Nejpoužívanější druhy společně s jejich vlastnostmi uvádí tab. 5.3. Z hlediska původu můžeme abraziva dělit na [31, 32]:

- přírodní, mezi která patří granát, korund, olivín,
- syntetická, do nichž se řadí ocelová či litinová drť, ocelový, nerezový a zinkový granulát, umělý diamant, karbid boru, umělý korund nebo karbid křemíku.

Tab. 5.3: Vlastnosti používaných abrazivních materiálů [19]

Abrazivo	Kruhovitost	Kulatost	Tvrdość dle Knoppa	Relativní tvrdość	Hustota [g·cm ⁻³]
Granát	0,48	0,78	1350	1	3,8±0,3
Křemičitý písek	0,57	0,78	700	0,7	2,5
Karbidy	0,31	0,75	2500	50	3,2
Ocelové piliny	0,55	0,82	400–800	2	7,5
Měděné piliny	0,5	0,78	1050	0,4	1,5
Sklo	1	1	400–600	0,5	2,5

Nejběžněji používaným abrazivem je granát GMA (GARNET GMA). Jedná se o nekovový minerální materiál složený převážně z čistého granátu v homogenní krystalické struktuře. Pro obrábění vodním paprskem se používá zrnitost 80 MESH. Granát je velmi tvrdý, pevný a vyznačuje se vysokou řeznou účinností. Tvar zrna je hranatý až ostrohranný. Granát je vhodný pro řezání uhlíkových a korozivzdorných ocelí, hliníku, mědi, skla, gumy i dalších materiálů. [33].

Na obr. 5.4 jsou vyobrazeny různé druhy přírodního granátu o zrnitosti MESH 80 rozdílného chemického a minerálního složení určeného pro technologii vodního paprsku. Chemické složení přírodního granátu GMA společně s jeho fyzikálními vlastnostmi je uvedeno v tab. 5.4.



Obr. 5.4: Různé druhy přírodního granátu pro vodní paprsek [32]

Tab. 5.4: Chemické složení a fyzikální vlastnosti přírodního granátu GMA [33]

Chemické složení								
Sloučenina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO
Obsah [%]	36	20	30	2	1	1	2	6
Fyzikální vlastnosti								
Sypká hmotnost [t/m ³]					2,38			
Měrná hmotnost					4,10			
Tvrдост dle Mohra					7,5–8			
Bod tavení					1250 °C			
Krystalická mřížka					kubická			

5.2.2 Dávkování a doprava abraziva

Při použití technologie abrazivního vodního paprsku ve velkých provozech je třeba vyřešit transport abraziva v dostatečném množství k více řezným hlavám. K tomuto účelu slouží systémy managementu abraziva (obr. 5.5), které sledují proces řezání a upravují průtok abraziva. Takto řízený proces je velmi ekonomický, šetří náklady i samotné abrazivo [29].



Obr. 5.5: Dávkovací a dopravní systém abraziva KMT [29]

Principem tohoto systému je posun abraziva pomocí stlačeného vzduchu potrubím ze zásobníku do odměřovacího zásobníku, který je elektronicky řízen počítačem. Počítačové řízení zajišťuje přesné dávkování a zprostředkovává zpětnou vazbu, díky níž

jsou průběžně upravovány řezné parametry pro dosažení optimálního výsledku. Systém managementu abraziva je také vybaven vizuální i akustickou signalizací upozorňující na nedostatek abraziva či ucpání potrubí [29].

5.2.3 Recyklace abraziva

Abrazivo tvoří při využití technologie abrazivního vodního paprsku většinou část nákladů, proto je vhodné ho recyklovat. Kromě ekonomických aspektů jsou tu i aspekty ekologické, jelikož většina abraziv syntetických a abraziva granátová nejsou v přírodě rozložitelná a mohou nadměrně zatěžovat životní prostředí. Z tohoto důvodu dochází k znovuvyužití a recyklaci již použitého abraziva. Stroj určený pro lokální recyklaci abraziva se nachází na obr. 5.6 [33].



Obr. 5.6: Stroj pro lokální recyklaci abraziva PTV [33]

Při procesu obrábění je využito zhruba jenom 30–50 % abrazivních částic, 50–70 % se na úběru materiálu nepodílí a zcela bez interakce s materiálem prochází až do lapače vody. Některé z těchto částic se ale i bez kontaktu s obrobkem zmenší a nejsou vhodné k recyklaci. Celkem je však asi 35 % částic, které při průchodu nezmění velikost, tvar ani vlastnosti a tyto abrazivní částice jsou vhodné k recyklaci [33, 35].

Proces recyklace probíhá ve vibračním separátoru, kam je směs částic vedena z lapače vody. Zde dochází k rozrušení hrudek recyklátu na částice abraziva, přičemž sítím propadnou částice příliš malé a rozdrčené, nevhodné k použití. Použitelné odseparované částice dále putují do sušící komory. Takto upravený recyklát je vhodný ke znovupoužití, pro konzistentní kvalitu řezu je vhodné recyklát smíchat s nepoužitým abrazivem. [33, 35].

5.3 Vysokotlaké čerpadlo

Vysokotlaké čerpadlo (obr. 5.7) je zařízení, jehož úkolem je dodávat nepřetržitý proud vody o požadovaném tlaku. Toto čerpadlo je komplexním celkem několika zařízení. Skládá se z elektromotoru, vodního čerpadla, hydraulického čerpadla a generátoru tlaku. Nejčastěji využívaným generátorem tlaku je multiplikátor nebo triplexový plunžr. Vysokotlaké čerpadlo sestává z okruhu nízkotlakého (primárního) a vysokotlakého (sekundárního). Vysokotlaký okruh je řízen okruhem nízkotlakým prostřednictvím tlaku hydraulické kapaliny, kterou je nejčastěji olej [7].



Obr. 5.7: Vysokotlaké vodní čerpadlo s multiplikátorem KMT Streamline SL-V [29]

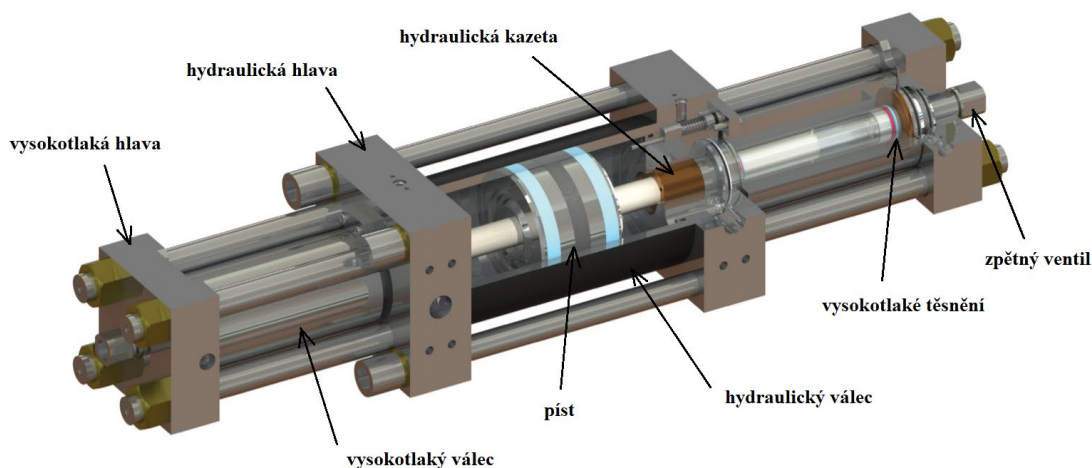
Multiplikační vysokotlaká čerpadla byla vyvinuta a používána společností Flow. Dnes existuje celá řada výrobců, která tento systém využívají. Čerpadla s multiplikátorem běžně dosahují výkonu 18–150 kW při tlaku až 750 MPa a průtoku vody 2,3–15,2 l/min. Čerpadla s triplexovým plunžrem vyvinutá japonskou společností Sugino jsou schopna dosáhnout pouze menších tlaků zhruba do 300 MPa, avšak dosahují výkonů až 440 kW při průtoku 480 l/min. Díky tomuto objemovému průtoku je lze využít v provozech, kde současně pracuje větší počet strojů s více řezacími hlavami. Parametry různých typů multiplikačních vysokotlakých čerpadel od společnosti KMT prezentuje tab. 5.5 [23, 36].

Tab. 5.5: Parametry vysokotlakých vodních čerpadel KMT Streamline SL-V [29]

Parametr	SL-V 30	SL-V 50	SL-V 75	SL-V 100
Výkon motoru [kW]	22	37	56	75
Výstupní tlak [MPa]	plynule regulovatelný až do 413,7 MPa			
Výstupní průtok [l/min]	2,27	3,79	5,68	7,57
Minimální vstupní tlak [MPa]	0,24 MPa			
Minimální vstupní průtok [l/min]	9,5	15,1	22,7	30,3
Maximální průměr trysky [mm]	0,279	0,355	0,432	0,508

5.3.1 Multiplikátor

Multiplikátor neboli hydraulický násobič (obr. 5.7) je zařízení sloužící ke generování tlaku v hydraulickém čerpadle. Ke zvýšení tlaku je využit píst, na který je z jedné strany přiváděn olej z nízkotlakého okruhu a z druhé strany voda z vysokotlakého okruhu. Podle Pascalova zákona pak dochází ke znásobení tlaku vody poměrem ploch pístů. Obvyklý poměr těchto ploch bývá 1:20 [7, 37].

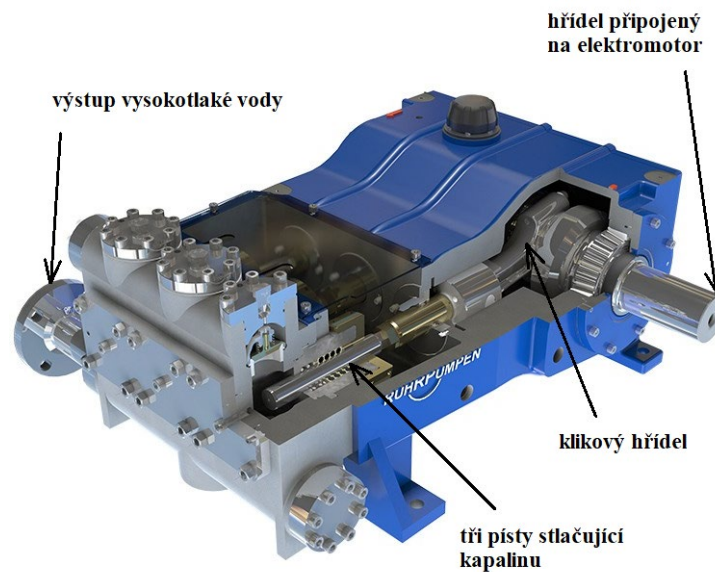


Obr. 5.8: Dvojčinný multiplikátor [38]

Při vytváření tlaku se píst působením hydraulické kapaliny pohybuje a při dosažení úvratě dojde k aktivaci koncového snímače. Tento snímač dá pokyn rozvaděči, který změni tok oleje do druhé větve, čímž dojde ke změně směru pohybu pístu. Při stlačování vody v jedné větvi se vlivem podtlaku nasává voda v druhé větvi. Tento proces se neustále opakuje přibližně tempem 50–60 cyklů za minutu. Vlivem cyklického pohybu pístu vznikají v kapalině rázy, které jsou následně pohlceny v akumulátoru [37].

5.3.2 Triplexový plunžr

Alternativou k čerpadlům s multiplikátorem jsou čerpadla s triplexovým plunžrem (obr. 5.9). Jeho princip je podobný pístovému čerpadlu, avšak pístní tyč je zde zároveň i pístem. Na rozdíl od multiplikátoru má plunžr pouze jeden tlakový okruh. Při chodu elektromotor otáčí klikovým hřídelem, který je připojen ke třem pístům generujících tlak ve vodě přiváděné do čerpací komory [37].



Obr. 5.9: Triplexový plunžr [39]

Pokud se píst pohybuje k dolní úvrati, dochází k otevření sacího ventilu a sání vody. Po dosažení úvrati se sací ventil uzavře a směr chodu pístu se obrátí. V této fázi dojde ke zvýšení tlaku až na výtlačný tlak, kdy dochází k vytlačení vody do vysokotlakého potrubí. Tlak a průtok vody je řízen otáčkami klikového hřídele. Poměrně velkou výhodou tohoto systému je zamezení pulzace kapaliny, proto není nutné instalovat akumulátor rázů. Pracovní tlak je však menší, a proto je plunžr vhodný spíše pro technologii WJM, současně je dražší, složitější a náročnější na opravu [7, 37].

5.3.3 Akumulátor rázů

Při použití multiplikátoru jakožto generátoru tlaku vznikají v důsledku cyklického pohybu pístu pulzace kapaliny, které mají za následek nestálý průběh tlaku. Tento průběh tlaku však není vhodný, jelikož na výstupu jsou zpravidla požadovány konstantní hodnoty rychlosti a tlaku vodního paprsku. Z tohoto důvodu musí být multiplikátor instalován společně s akumulátorem rázů (obr. 5.10), který pulzace kapaliny tlumí. Akumulátor je

dutá válcová nádoba s tlakovou kapalinou, která je ve vysokotlakém okruhu zařazena za multiplikátor. Při lokálním poklesu tlaku kapalina v akumulátoru expanduje, čímž je kompenzována okamžitá diference tlaku, vznikající v důsledku pohybu pístu. Přínosem akumulátoru rázu je zamezení vzniku rýh, které by v důsledku kolísajícího tlaku v trysce vznikaly [2, 37].



Obr. 5.10: Akumulátor rázů [40]

5.4 Hydraulické rozvody

Hydraulické rozvody jsou systémem armatur, spojovacích elementů a těsnění, jejichž úkolem je rozvod vysokotlaké vody napříč celým systémem. Výběr hydraulického zařízení musí akceptovat maximální hydraulický tlak, dynamické namáhání a druh hydraulického média. Většina hydraulických systémů je dnes normalizovaná a je možné jednotlivé elementy zaměňovat a kombinovat [2].

5.4.1 Vysokotlaké potrubí

Pro dopravování vysokotlaké vody až do tlaku 1500 MPa jsou používána potrubí z korozivzdorné vysokolegované oceli třídy 17 (obr. 5.11), využívány jsou například oceli 17 240, 17 349 nebo 17 351. Tato potrubí jsou dostupná v normalizovaných rozměrech až do 15 mm vnějšího průměru a 6 mm průměru vnitřního. V oblasti pracovních tlaků do 600 MPa postačují potrubí jednoplášťová, pro tlaky vyšší až do 1500 MPa se využívají potrubí dvouplášťová. Pro jednoduchost spojení jednotlivých elementů se používají závitové bezpájkové a bezsvarové armatury [2, 7, 41].



Obr. 5.11: Vysokotlaké vodní potrubí [41]

5.4.2 Těsnění

Základním problémem multiplikátoru, potažmo celého hydraulického okruhu, je utěsnění vysokotlaké komory. Při tlacích nejčastěji v rozmezí 200–500 MPa je nutné zamezit průsakům vody a zabezpečit vysokou životnost a nízké tření. Činnost těsnění je ovlivněna celou řadou faktorů, jako jsou parametry kapaliny (viskozita, znečištění), pracovní podmínky (těsněný tlak, teplota, rychlost kapaliny) i parametry samotného těsnění (geometrie, fyzikální a chemické vlastnosti materiálu). Z tohoto důvodu je třeba dodržovat předepsané provozní parametry, aby se předešlo degradaci materiálu a porušení funkce těsnění. Materiálem těsnění bývají nejčastěji elastomery (polyuretan, kaučuky), plasty (polyamid, polyester), kovy nebo tkaniny. Sadu vysokotlakých těsnění ukazuje obr. 5.12 [7].



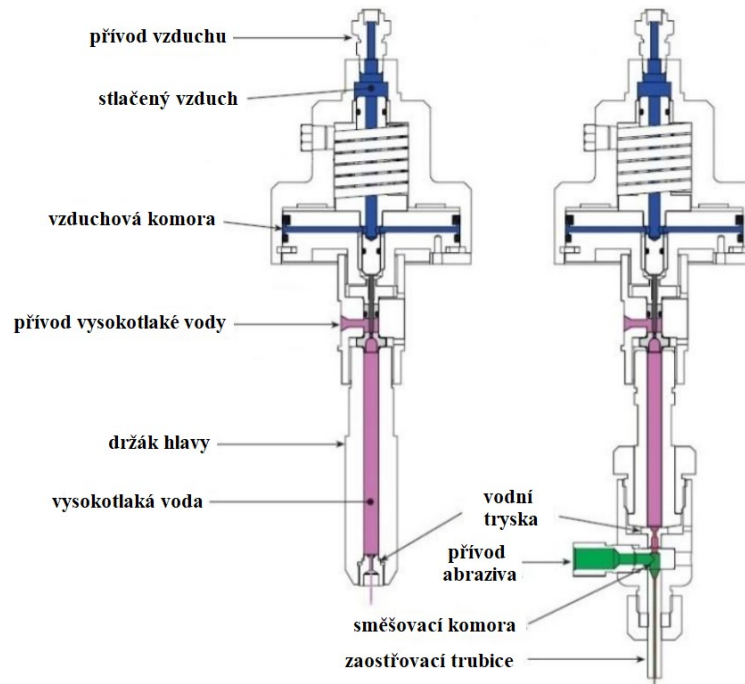
Obr. 5.12: Vysokotlaká vodní těsnění [40]

5.5 Řezací hlava

Řezací hlava je jednou z nejdůležitějších součástí technologie vodního paprsku. Jejím úkolem je transformace proudu přiváděné vody na úzký fokusovaný vysokotlaký paprsek pomocí trysky. Řezací hlava utváří charakter paprsku a přímo ovlivňuje tvar, kvalitu i přesnost řezu.

Podle použité technologie se rozlišují dva typy řezacích hlav, a to hlavy abrazivní a hlavy pro čistý vodní paprsek. Hlavy pro technologii WJM jsou konstrukčně jednodušší, jelikož obsahují pouze jednoduchou trysku a přívod vody. Voda z potrubí pokračuje do vodní trysky, kde se utvoří paprsek schopný narušovat měkké a středně tvrdé materiály. Oproti tomu řezací hlava pro technologii AWJ je složitější, obsahuje abrazivní vodní trysku, přívod abraziva, směšovací komoru a zaostřovací trubici. Vysokotlaká voda zde

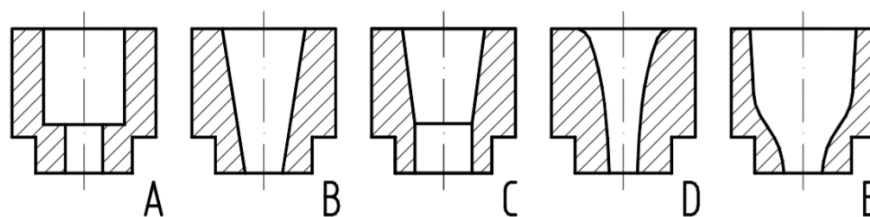
putuje potrubím skrz trysku do směšovací komory, kde je abrazivo nasáto a výsledná směs pokračuje do zaostřovací trubice. Takto zformovaný paprsek může obrábět i těžkoobrobitelné materiály. Schéma obou systémů řezacích hlav s popisem je znázorněno na obr. 5.13 [2, 7].



Obr. 5.13: Řezací hlavy pro technologii WJM (vlevo) a AWJ (vpravo) [42]

5.5.1 Vodní tryska

Vodní tryska je klíčovou součástí řezné hlavy i technologie vodního paprsku jako celku, neboť v ní je vysokotlaký vodní proud formován na úzký vysokorychlostní vodní paprsek. Kvalita vodního paprsku, s níž souvisí řezný výkon, kvalita a přesnost obrobeneé plochy, je dána kvalitou samotné trysky, její drsností a tvarem. V praxi existuje několik tvarů trysek, které jsou voleny podle konkrétní aplikace, pracovního tlaku a druhu řezné kapaliny (obr. 5.14) [2, 7, 30].



A - válcová, B - kuželová, C - kombinovaná, D - kónická, E - složená

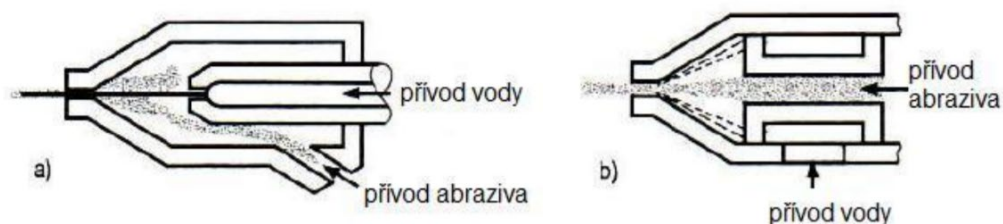
Obr. 5.14: Používané tvary vodních trysek [7]

Materiál trysek se liší dle používaného pracovního tlaku. Pro nižší tlaky do 150 MPa jsou používány trysky z tvrdokovu nebo korozivzdorné oceli. Pro střední tlaky zhruba do 250 MPa jsou využívány trysky z keramiky nebo slinutých karbidů. Pro nejnáročnější podmínky v tlacích nad 250 MPa jsou voleny trysky safírové, rubínové či trysky ze syntetického diamantu. Diamantové trysky mají až desetinásobně vyšší životnost než trysky safírové se životností okolo 200 hodin. Cena diamantové trysky je ale až desetkrát vyšší než cena safírové trysky. Používaný průměr trysek se pohybuje od 0,075 mm výše [2, 7, 30].

5.5.2 Směšovací komora

Ve směšovací komoře dochází u technologie AWJ k mísení abraziva s proudem vody. Při výtoku vody do směšovací komory dochází ke změně laminárního proudění vody na turbulentní, což má za následek víření kapaliny a vznik podtlaku. Tímto podtlakem je nasáváno abrazivo. Prakticky rozlišujeme dva druhy směšovacích komor podle způsobu přívodu abraziva [2]:

- Směšovací komora s radiálním přívodem abraziva (obr. 5.15 a)) a axiálním přívodem vody, jejíž výhodou je jednoduchá a levná konstrukce. Lze ji také v případě potřeby aplikovat bez použití abraziva na technologii čistého vodního paprsku.
- Směšovací komora s axiálním přívodem abraziva (obr. 5.15 b)) a radiálním přívodem vody, která disponuje lepším smísením vody a abraziva a je méně náchylná na abrazivní opotřebení.



a) Směšovací komora s radiálním přívodem abraziva

b) Směšovací komora s axiálním přívodem abraziva

Obr. 5.15: Způsoby směšování abraziva s vodním paprskem [2]

5.5.3 Zaostrňovací trubice

Zaostrňovací (fokusační) trubice je výstupní částí řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek. Úkolem trubice je usměrnění směsi vody a abraziva do koherentního vodního paprsku. Průměr zaostrňovací trubice se pohybuje v rozmezí 0,8–2,2 mm [7].



Obr. 5.16: Zaostrňovací trubice pro abrazivní vodní paprsek [43]

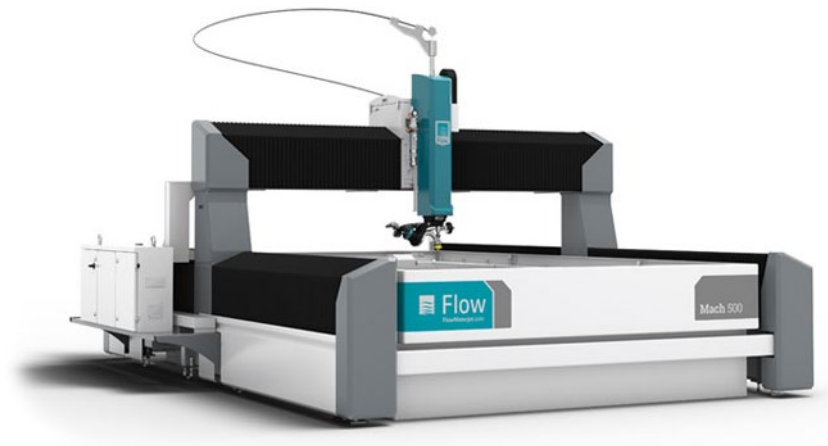
Jelikož je zaostrňovací trubice vystavena silnému abrazivnímu účinku ostrých částic, musí být vyrobena z tvrdého a otěruvzdorného materiálu. Z tohoto důvodu jsou trysky vyráběny z karbidu wolframu nebo kubického nitridu boru metodami práškové metalurgie. Tab. 5.6 uvádí životnost zaostrňovacích trubic rozdílného materiálu a jejich vlastnosti [7, 30, 43].

Tab. 5.6: Životnost a popis materiálů zaostrňovacích trubic [30]

Materiál	Životnost [hod]	Popis
Standartní karbid wolframu	4–6	Původní zaostrňovací trubice. Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají sklon k mimoosovému opotřebenému, požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karbid	35–60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů nebo pro zaučování nového operátora.
Středně kvalitní kompozitní karbid	80–90	Vhodné pro všechny aplikace dělení materiálů.
Kompozitní karbid nejvyšší kvality	100–150	Nejlepší vlastnosti. Vykazuje souosé a předvídatelné opotřebenění. Užívá se pro přesné řezání i každodenní práce.

5.6 Souřadnicový CNC stůl

Souřadnicový řezací stůl (obr. 5.17) slouží k upevnění obrobku při procesu obrábění. Stůl by měl být vybaven dostatečně tuhou mechanickou konstrukcí. Obrobek bývá při obrábění upevněn na loži z roštů či kuličkových loží. Účelem je kromě upnutí i zachycení energie vodního paprsku, odvedení použité vody, abraziva a materiálu do lapače umístěného pod stolem. Vzhledem k požadavkům na automatizovaný provoz jsou stoly vybaveny počítačovým řízením pomocí systémů CAD/CAM [23].



Obr. 5.17: Souřadnicový CNC stůl Flow Mach 500 [23]

Souřadnicové stoly se vyrábí v mnoha různých velikostních kombinacích, od rozměrů 1,3 x 1,3 m až po velikosti 4 x 15 m. K polohování stolu jsou používány stejnosměrné servomotory s bezvůlovou převodovkou. Nižší řady strojů pro běžné použití dosahují přesnosti desetin milimetru, dražší stroje jsou schopny s vysokou přesností opakovaného najetí obrábět s přesností až na setiny milimetru. Vlastnosti a parametry výše uvedeného stroje z obr. 5.17 uvádí tab. 5.7 [23, 65].

Tab. 5.7: Parametry souřadnicového CNC stolu Flow Mach 500 [23]

Lineární přesnost	$\pm 0,038$ mm/m
Maximální rychlost pojezdu	17,8 m/min
Zrychlení	0,1 g
Přesnost opakovaného najetí	$\pm 0,03$ mm
Kruhovitost	$\pm 0,064$ mm
Zdvih v ose Z	dle konfigurace 305 mm nebo 610 mm
Základna Y	dle konfigurace 2 m až 8 m
Základna X	dle konfigurace 2 m až 4 m

6 Využití technologie vodního paprsku

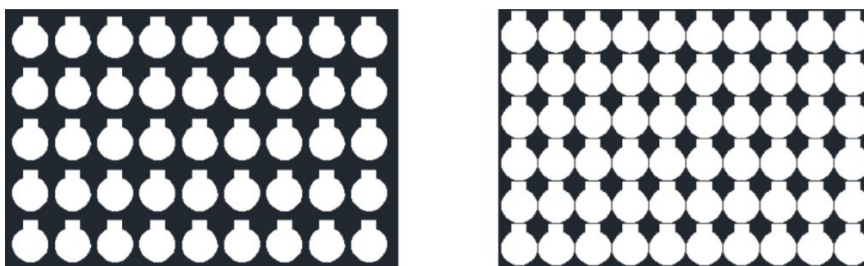
Vodní paprsek je vysoce perspektivní strojírenskou technologií, která kromě historického uplatnění v oblasti dobývání nerostných surovin nachází uplatnění i v celé řadě průmyslových odvětví. Výčet aplikací zahrnuje celou škálu dnes využívaných činností od dělení plochých i tvarových materiálů jako oceli, litiny, sklo, hliník nebo kompozitní a keramické materiály až po aplikaci vodního paprsku na metody soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů [2].

6.1 Aplikace vodního paprsku na metody obrábění

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, technologie vodního paprsku je využívána kromě dělení materiálů i při soustružení, frézování, vrtání nebo gravírování. Důvodem, proč je tato technologie ve velké míře využívána a aplikována na klasické metody obrábění, je rostoucí podíl těžkoobrobitelných materiálů. V této oblasti je využíván zejména abrazivní vodní paprsek, který nahrazuje konvenční řezné nástroje v situacích, kdy je použití tradičních řezných nástrojů příliš problematické, jejich životnost a efektivita je nízká nebo dochází k přílišnému termickému zatěžování obrobků [2, 7].

6.1.1 Řezání

Řezání (dělení) materiálů je základní a historicky první aplikací vodního paprsku ve strojírenství. I v dnešní době jsou technologie WJM i AWJ nejvíce používány pro klasické dělení materiálů. Metodou řezání je možné získat velmi přesný obrobek, u něhož není potřeba provádět žádné další dodatečné úpravy. Výsledná kvalita obrobku nezávisí na materiálovém složení a rovněž nezáleží ani na tvarové složitosti dílce. V současné době je možné řezat jak materiály jednovrstvé, tak i materiály vícevrstvé a materiály se sendvičovou strukturou. Obr. 6.1 ukazuje efektivnější využití materiálu při použití vodního paprsku, než při využití konvenčních metod jako je klasické vystřihování [7].

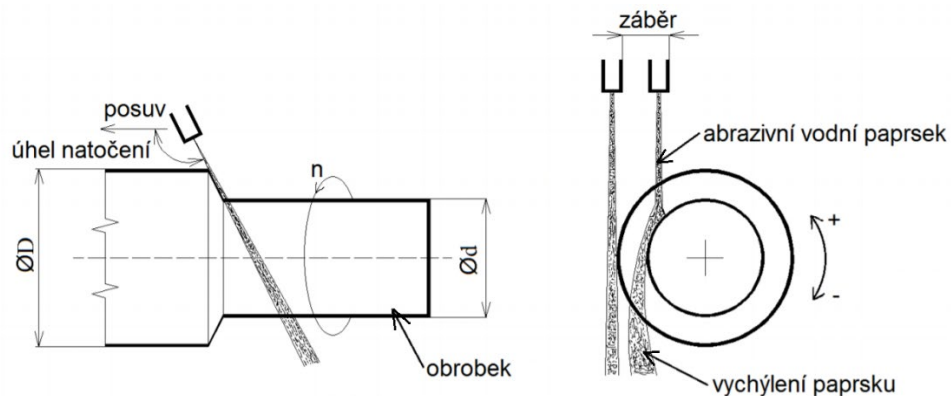


Obr. 6.1: Využití polotovaru metodou ražení (vlevo) a metodou řezání vodním paprskem (vpravo) [7]

6.1.2 Soustružení

Vodní paprsek je v průmyslové praxi využíván i při soustružení. V případě klasických obráběných materiálů, jako jsou oceli, není jeho využití při soustružení příliš ekonomicky výhodné. Využití nachází technologie AWJ zejména při soustružení těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou lamináty, grafitové i keramické kompozity či titanové slitiny. Například při obrábění titanových slitin je výběr klasických nástrojů velmi omezený a jejich životnost a objem odebíraného materiálu je značně menší, než je tomu například u konstrukčních ocelí. Při použití vodního paprsku tyto nedostatky zanikají a výběrem vhodného abraziva a řezných podmínek je možné při obrábění titanových slitin dosáhnout oproti konvenčnímu soustružení lepších výsledků. Vzhledem k malým řezným silám je soustružení vodním paprskem málo náchylné na geometrické parametry obrobku, díky čemuž je možné obrábět i obrobky dlouhé a tenké [2, 7, 44].

Při soustružení obrobek rotuje kolem své osy a abrazivní vodní paprsek se ve směru této osy pohybuje. Úběr materiálu je stejně jako u soustružení konvenčními nástroji realizován radiálním přísuvem vodního paprsku do požadované hloubky (obr. 6.2). Pro soustružení lze použít jeden vodní paprsek, ale je možné využít i speciální metodiku soustružení dvěma vodními paprsky [2].



Obr. 6.2: Soustružení vodním paprskem [2]

6.1.3 Frézování

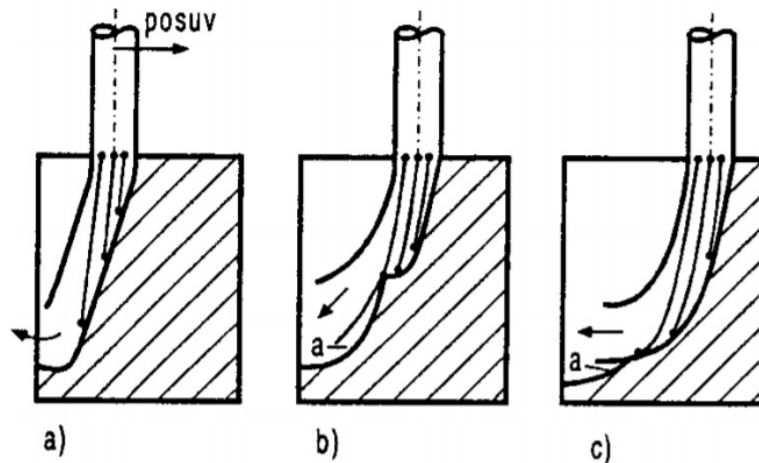
Frézování vodním paprskem je proces, při kterém dochází k řezání materiálu, ale nedochází k jeho dělení. Vodní paprsek postupně několika průchody po obráběné ploše vytváří požadovaný tvar. Metoda frézování vodním paprskem je využívána u materiálů

skleněných, kovových i nekovových. Je vhodná také pro tvarově složité obrobky, proto je její potenciál velký zejména při výrobě tvářecích nástrojů [2, 45].



Obr. 6.3: Frézování různých geometrických tvarů vodním paprskem [2]

Frézovací cyklus se skládá ze tří fází. V první fázi (obr. 6.4 a)) dochází k tvorbě stopy řezu. V druhé fázi (obr. 6.4 b)) dochází ke stabilizaci stopy řezu, přičemž v řezu jsou viditelné jednotlivé stupně posuvu vodního paprsku. Ve třetí fázi (obr. 6.4 c)) se vodní paprsek nadále posouvá a dochází k vyrovnání stupňovitosti řezu [2].

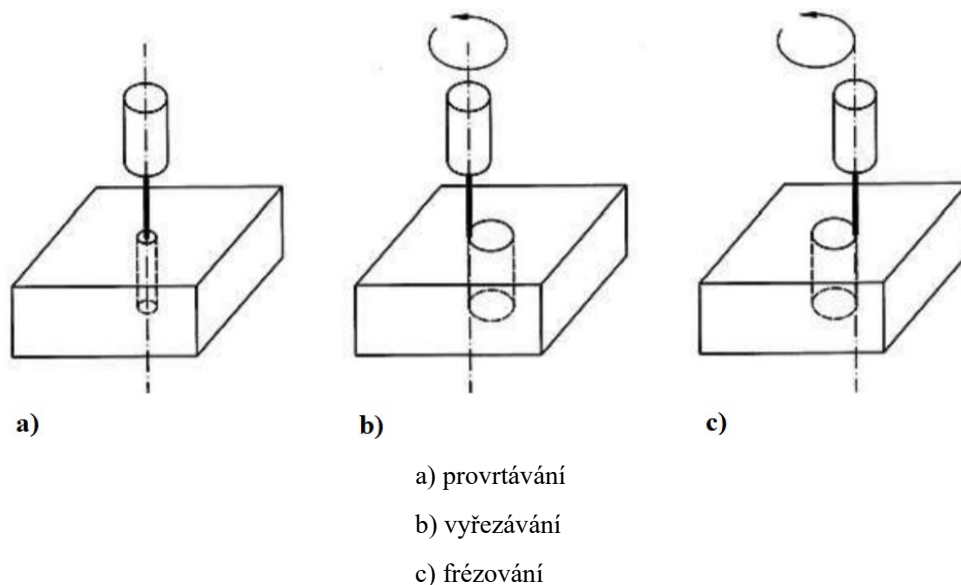


Obr. 6.4: Řezné fáze frézovacího cyklu [2]

6.1.4 Vrtání

Vrtání metodou AWJ je perspektivní technologie, již je využíváno hlavně v oblastech vrtání těžkoobrobitelných materiálů, jako je keramika, sklo nebo niklové slitiny. Právě vrtání niklových slitin je využíváno ve strojírenském průmyslu při výrobě plynových turbín. Vodní paprsek je možné používat na různé metody vytváření otvorů, například provrtávání, vyřezávání a frézování otvorů. V současné době je vyvinuto a používá se několik způsobů vrtání otvorů, které jsou charakterizovány vzájemným pohybem vodního paprsku a obrobku [2]:

- vrtání stacionárním vodním paprskem i obrobkem,
- vrtání s vibrujícím vodním paprskem a stacionárním obrobkem,
- vrtání rotujícím vodním paprskem.



Obr. 6.5: Způsoby vrtání vodním paprskem [2]

6.1.5 Gravírování

Gravírování je podobné metodě frézování vodním paprskem, také zde dochází k řezání materiálu, ale bez úplného prořezání. Při gravírování vodním paprskem dochází k vytvarování určitého reliéfu do materiálu, který může být následně dopsacován a dobroušen. Vodní paprsek v této oblasti začíná konkurovat laserovému gravírování i konvenčním metodám jako je mechanické rytí, jelikož zde není žádným způsobem omezen výběr gravírovaného materiálu. Touto metodou je možné gravírovat materiály křehké, špatně obrobiteľné pružné i sendvičové, materiály hořlavé i tepelně citlivé. Nejčastěji se gravírují skla, minerály, keramika, plasty, eloxovaný hliník, ale i různé vícevrstvé kombinace plastů a kombinace plastů s kovem [45].

6.1.6 Trojrozměrné obrábění

Trojrozměrné obrábění je jednou z nejmodernějších metod obrábění vodním paprskem. Metoda prostorového obrábění je spjata s moderním počítačovým řídicím systémem v kombinaci s 3D řezacími hlavami, které mají možnost pohybu v pěti osách a zároveň jsou schopny rotace kolem hlavní osy o 360° a kolem os vedlejších o $\pm 90^\circ$. Dynamické zpětnovazební řízení dokáže na základě polohy řezné hlavy eliminovat úkos i jiné potenciálně nežádoucí jevy. Tato metoda je používána pro obrábění různých deskových a prostorových polotovarů z keramiky, plastů, kovů, skla a pryže [23].

6.2 Využití vodního paprsku v praxi

Technologie vodních paprsků nachází své uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích. Díky výzkumu a vývoji v oblasti obrábění vodním paprskem se tato metoda stala plně konkurenceschopná nejen vůči konvenčním metodám, ale i vůči ostatním nekonvenčním metodám. Pro svou jednoduchost, efektivitu a účinnost se její pole působnosti postupně rozšiřuje.

Strojírenský průmysl

- Dělení titanu, wolframu, tantalu, molybdenu, kobaltu, niklu, vysokopevnostních ocelí, slitin s rozdílnou tepelnou vodivostí, uranu, sendvičových materiálů, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi Ni a Co), kompozitních materiálů, tepelně, elektricky a radiačně izolačních materiálů, skelných materiálů, obrábění PCD, PcBN, a CVD řezných nástrojů [17, 24, 46].

Letecký a kosmický průmysl

- Výroba lopatek a trysek z titanu, hliníkových slitin, žáruvzdorných slitin, turbín a turbokompresorů, vnitřních ovládacích panelů, brzdových komponent, podvozkových komponent, dělení titanových plátů pro výrobu trupu vojenských letadel, dělení kovových plátů pro ocasní a křídlovou sekci letadel, vrtání do součástí z kompozitů s keramickou maticí (např. kryty sekce vysokotlaké turbíny proudových motorů CFM LEAP a GE9X od GE Aviation), odstraňování chromových povlaků a vysokorychlostních žárových HVOF nástřiků ze součástí motorů (Pratt & Whitney) [24, 46, 47, 48, 53].

Automobilový průmysl

- Výroba vnitřního obložení, čalounění a jiných interiérových částí vozu, dělení různých plastických a kompozitních hmot, řezání materiálů ze skelných vláken, izolačních materiálů a pěn, plastických folií, dekoračních obkladů, gumy, kůže, vyřezávání otvorů skel a otvorů palivové nádrže (Renault), výroba těsnění, nádrží, nárazníků, přístrojových desek, kol z lehkých slitin, řezání platinových elektrod zapalovacích svíček (Bosch Automotive) [24, 46, 48, 49].

Metalurgický průmysl

- Apretace odlitků, metalografické rozборы, řezání horkých a žhavých materiálů, otryskávání odlitků [46].

Elektrotechnický a elektronický průmysl

- Řezání tištěných spojů, kaptonu, feritů, amorfních kovů permanentních magnetů, elektroizolačních materiálů, odizolování kabelů, výroba krytů elektrických zařízení, ovládacích panelů, součástí pro přenosné generátory, polovodičových Si, GaAs i SiC součástek, ořezávání hran CMOS čipů (Sony Japan) [24, 46, 48].

Potravinářský průmysl

- Řezání ovoce a zeleniny v syrovém, mraženém i sušeném stavu, tabáku v syrovém i sušeném stavu, masa a ryb v zmraženém i syrovém stavu, pečiva, dortů, sýrů, čokolády, výroba komponent pro linky na zpracování potravin, manipulaci a balení potravin, výrobu nápojů [46, 48].

Energetický průmysl

- Vrtání chladících otvorů lopatek horké sekce turbín s povlaky tepelné bariéry (obr. 6.6), vrtání kulatých i tvarových (čtvercových, lichoběžníkových, šikmých) otvorů difuzoru turbín (GE Power a GE Turbomachinery) [24].

Plastikářský a gumářský průmysl

- Řezání gum a plastických hmot, plastických hmot v kombinaci s kovy a kevlarem, plastových vláken, řezání automobilových pneumatik [46].

Stavební průmysl a architektura

- Řezání izolačních materiálů jako je polyuretan, polystyren, čedičová vata, sklovláknité materiály, střešních azbestocementových krytin a tvarovek, plastbetonů, keramiky, tvorba uměleckých děl a nástěnných maleb, ozdobných architektonických prvků, gravírování nápisů na tabulky z mramoru, skla, hliníku, mosazi i plastu [46, 48].

Sklářský průmysl

- Řezání skel, vrtání a matování skel, provádění tvarových řezů [46].

Papírenský průmysl

- Řezání papíru, fólií, kartonů, buničiny [46].

Obuvnický a galanterní průmysl

- Řezání pravé i umělé kůže, různých plastických hmot [46].

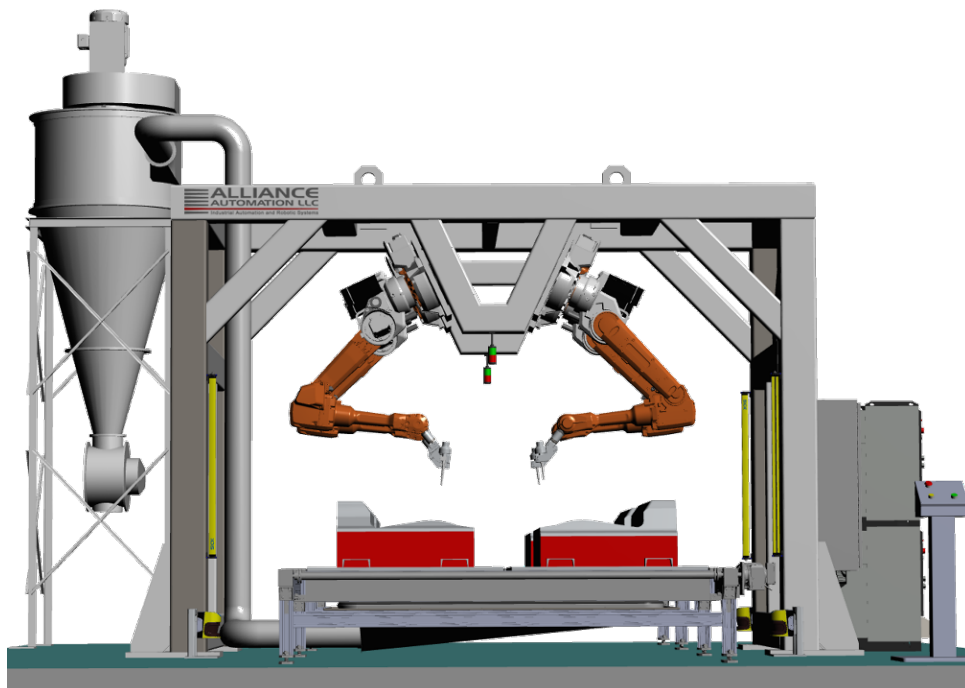
Lékařství

- Čištění chirurgických nástrojů, řezání a obrábění komponent protéz, výroba uhlíkových výztuh a ortopedických pomůcek, prototypování modelů [48].



Obr. 6.6: Výroba otvorů v lopatce turbíny General Electric metodou LMJ [24, 52]

S rostoucím využitím technologií vodního paprsku v průmyslu také stoupá potřeba automatizace a robotizace pracovišť. Ta je vhodná zejména pro tvarově náročné díly či pro potřebu velkosériové produkce. Roboty jsou využívány v mnoha průmyslových odvětvích, jako je automobilový, letecký nebo potravinářský a elektronický průmysl. Tyto roboty vyvíjí například společnost KUKA, používají se pro řezání, vrtání a čištění různých materiálů. Příklad takového robotizovaného pracoviště je na obr. 6.7 [54].



Obr. 6.7: Robotizované pracoviště pro řezání vodním paprskem [54]

7 Srovnání s ostatními výrobními metodami

Technologie vodního paprsku je velmi často využívanou metodou zejména v oblasti dělení materiálů. Zde je ale možné použít celou řadu technologií, které mohou být pro vodní paprsek dobrou alternativou. Z tohoto důvodu je vhodné porovnávat jednotlivé způsoby dělení pro konkrétní aplikaci. Vodní paprsek je také v poslední době využíván i pro soustružení, kde může být oproti klasickému soustružení efektivnější při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. V neposlední řadě je také možné srovnávat technologii vodního paprsku aplikovanou na vrtání a mikrovrtání s procesy laserového vrtání nebo i elektroerozivního vrtání.

7.1 Dělení vodním paprskem, laserem, plazmou, plamenem a pásovou pilou

Dělení materiálů je základní aplikační oblastí pro výše uvedené metody. Kromě pásové pily jsou tyto metody vhodné zejména pro dělení plochých materiálů a vyřezávání tvarů, jsou ale rovněž využitelné pro řezání polotovarů a v případě CNC řízení s polohovatelnou hlavou i pro dělení tvarově členitých obrobků.

7.1.1 Popis principu srovnávaných metod

Jednotlivé metody dělení jsou odlišné principem účinku na materiál i svou fyzikální podstatou. Vodní paprsek a jeho technologie využívá přírodního procesu vodní eroze, kdy nastává působením značně urychleného vodního paprsku narušování integrity materiálu a jeho úběr z místa řezu [1, 2].

Laserová technologie je založena na erozi materiálu fotony a materiál je odebírán v důsledku koncentrovaného působení laserového paprsku na povrch materiálu. Laser je tedy schopen poměrně velkou energii soustředit do úzkého svazku s velkou hustotou výkonu [2, 6].

Metoda plazmového dělení je od předchozích metod odlišná, neboť dělení je prováděno extrémně vysokou teplotou (více než 10000 °C), kdy nastává tavení materiálu. Této vysoké teploty je dosaženo v důsledku rozkladu molekul plynu při průchodu elektrickým obloukem, který je vytvořen mezi katodou a řezaným materiálem, který tvoří anodu [6].

Řezání plamenem je také tepelný druh dělení materiálu, podstatou je ale nahřátí materiálu nejčastěji kyslíko-acetylenovým plamenem na teplotu spalování a jeho následném spálení v proudu kyslíku [55].

Poslední srovnávanou metodou je řezání pásovou pilou, což je konvenční mechanická metoda dělení materiálů, při níž koná mechanickou práci nástroj. Nástrojem je v tomto případě „nekonečný“ pilový pás, jehož pohybem dochází k úběru a dělení materiálu [56].

7.1.2 Porovnání metod z hlediska dělitelných materiálů

Rozsah dělitelných materiálů je prvním kritériem při výběru dané metody. Vodní paprsek je v tomto ohledu nejuniverzálnější a dokáže dělit všechny druhy materiálů, v případě materiálů citlivých na kontakt s vodou je ale třeba daný materiál vhodně upravit, popřípadě do vody přidat nezbytná aditiva. Laserem je také možno řezat celou škálu materiálů, nelze ale dělit kompozity a takové materiály, které mají vysokou světelnou odrazivost nebo naopak průzračnost. Dělení plazmou je aplikovatelné pouze na kovy železné a neželezné. Pokud je pro řezání použit kyslík, respektive plamen, tak vzhledem k průběhu oxidační reakce lze řezat pouze uhlíkové nízkolegované a nelegované oceli. Mechanický způsob dělení pásovou pilou bývá nejčastěji využíván u kovových polotovarů, pila ale dokáže řezat i textil, plasty, dřevo a různé stavební materiály a hmoty. [6, 17, 55, 56].

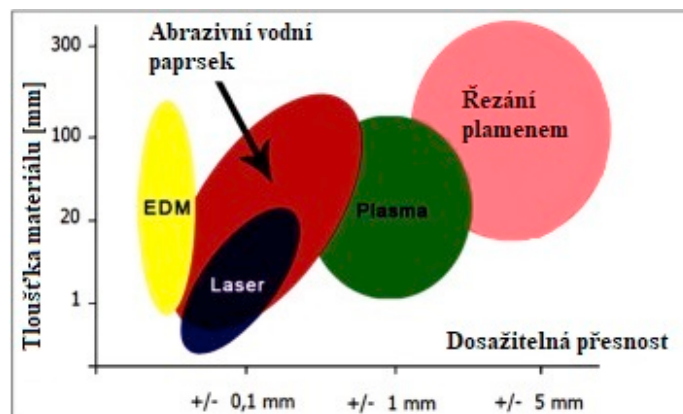
7.1.3 Porovnání metod z hlediska tloušťky materiálu

Dalším důležitým aspektem je tloušťka děleného materiálu. Vodní paprsek je schopen dělit materiály od tloušťky 0,1 mm až po 200 mm, tato hodnota je však hraniční a jde již o dělicí řez s poměrně zhoršenými kvalitativními parametry. Tloušťka materiálů dělených laserovým způsobem dosahuje až 50 mm, obecně je však laser vhodný zejména pro tenké plechy, kdy hospodárně dělí materiály tloušťky asi 7 mm. V případě plazmového dělení záleží na konkrétním druhu děleného materiálu, běžné oceli lze řezat v případě tloušťky materiálu zhruba do 50–100 mm, Al a Cu slitiny až do 150 mm. Dělení plamenem je při řezání silných materiálů vhodnou volbou, neboť tloušťka materiálů může nabývat hodnot až 300 mm a v případě speciálních hořáků až 2000 mm. Pokud je pro dělení zvolen pilový pás, tloušťka děleného materiálu závisí na konkrétní specifikaci stroje, druhu polotovaru a úhlu řezu. Běžně se však maximální dělený rozměr například

v případě kruhového polotovaru pohybuje v rozmezí od 200 mm do 350 mm, pokud to ale konstrukce stroje umožňuje, je pásová pila schopna dělit i polotovary o rozměru až 1000 mm [17, 55, 57].

7.1.4 Porovnání metod z hlediska přesnosti a kvality řezu

Z hlediska přesnosti a kvality řezu se porovnávané metody poměrně výrazně liší. Technologie vodního paprsku dosahuje přesnosti řezu až $\pm 0,1$ mm a parametr drsnosti povrchu Ra se nejčastěji pohybuje v rozmezí 1,6–12 μm , obě hodnoty se však se vzrůstající řeznou rychlostí a tloušťkou materiálu poměrně rychle zhoršují. Šířka řezu bývá různá podle použité trysky a nachází se v rozmezí 0,3 mm až 1,5 mm. Laserová technologie a její přesnost závisí na druhu použitého laseru a také přesnosti ovládacího mechanismu, obecně je ale možné dosáhnout přesnosti $\pm 0,03$ mm až $\pm 0,1$ mm při drsnosti povrchu Ra 0,8–6,3 μm a velmi malé šířce řezu 0,02–1 mm. Řezání plazmou není obecně příliš vhodnou metodou pro přesné dělení materiálů, jelikož přesnost rozměrů nabývá hodnot nejlépe ± 1 mm a nejlepší dosažitelná drsnost povrchu Ra bývá 12 μm , často se však blíží až k hodnotě Ra 50 μm . Šířka řezu je taktéž podprůměrná, v závislosti na řezné rychlosti asi 2–10 mm s rozdílnou hodnotou na vstupu paprsku do materiálu a výstupu z něj. V tomto ohledu je řezání plamenem velmi podobné, přesnost řezu ± 1 mm až ± 5 mm a velmi špatné hodnoty drsnosti nejsou pro dosažení kvalitního řezu dostatečné. V případě pásové pily nejsou hodnoty přesnosti ani drsnosti přesně udávány či specifikovány, avšak v případě ostrého a dobře seřízeného pilového pásu je možné dosáhnout velmi dobré kvality řezu při zachování úzké řezné spáry. Porovnání přesnosti jednotlivých metod ukazuje obr. 7.1 [6, 17].



Obr. 7.1: Srovnání přesnosti jednotlivých metod dělení materiálů v závislosti na jejich tloušťce [58]

7.1.5 Porovnání metod z hlediska rychlosti řezání

Neméně důležitou vlastností, která je ve výrobě přímo spjata s efektivitou procesu, je rychlost řezání. Rychlost řezání je u konvenčních i nekonvenčních technologií silně ovlivněna tloušťkou polotovaru a materiálovými vlastnostmi. Z tohoto důvodu lze jednotlivé metody poměrně obtížně srovnávat, neboť v rámci zvoleného materiálu o určité tloušťce lze zvolit různé hodnoty rychlosti řezání, přičemž výsledek se poté liší zejména kvalitou řezu a dosahovanou přesností. Orientační srovnání lze uvést pro dělení polotovaru ze standartní oceli třídy 11 o tloušťce 20 mm. Pro vodní paprsek se nejčastěji volí rychlost řezání v rozmezí 10–100 mm/min, v případě vyšší rychlosti ale hrozí zhoršení kvality řezu či neprořezání. Laser a plazma jsou z hlediska rychlosti řezání efektivnější technologie, běžně volená řezná rychlost bývá 300 až 1200 mm/min v závislosti na výkonu laseru, respektive kolem 550 mm/min pro plazmu. Srovnatelnou efektivitu má v tomto případě i dělení plamenem, rychlost řezání se pohybuje zhruba okolo 375 mm/min. V případě pásové pily je potřeba uvedené rychlosti řezání porovnat s doporučenými hodnotami posuvu, ty se nacházejí pro zvolený materiál a tloušťku v rozmezí hodnot 90–140 mm/min [2, 17, 59, 66].

7.1.6 Porovnání metod z hlediska tepelného ovlivnění materiálu

Jelikož jsou v mnoha případech dělené materiály při jejich následném používání mechanicky či jinak namáhány, je změna jejich struktury v důsledku tepelného ovlivnění při řezném procesu nežádoucí. Z tohoto pohledu je třeba posuzovat zejména vhodnost použití laseru, plazmy a plamene, jelikož vnáší do obrobku poměrně velké množství tepla a hrozí vznik trhlin, vnitřních pnutí a zakalení materiálu. Tento efekt může v menší míře nastat i v případě mechanického dělení pásovou pilou, nejlepší možností s porovnávaných metod je ale vodní paprsek, kdy v důsledku studeného řezu nedochází k žádným změnám mikrostruktury materiálu [17].

7.1.7 Porovnání metod z ekonomického hlediska

Ekonomické hledisko je jedním z nejdůležitějších aspektů při výběru konkrétní technologie, neboť základním cílem je co nejrychlejší dosažení návratnosti investice. Do nákladů se řadí nejenom nákup stroje, ale i provozní náklady a náklady na opravu společně s časovými prostoji při odstávce zařízení. Nákup stroje je z vyjmenovaných nákladů největší položkou. V případě moderních zařízení s CNC řízením jsou výše

uvedené technologie velmi nákladné, cena se může pohybovat od jednotek až po desítky milionů Kč. Výjimkou je pásová pila, kde lze najít kvalitní stroje za cenu v řádu stovek tisíc Kč. Při provozu stroje je nutné počítat s provozními náklady. V neprospěch technologie vodního paprsku, plazmy a plamene hovoří poměrně velké výdaje za náhradní díly, neboť u vodní trysky a hořáků je v důsledku silného opotřebovávání nutné tyto díly často vyměňovat, popřípadě vyměňovat i jiné tlakem a teplotou namáhané součásti. S tímto jsou spjaty také náklady za pracovní prostoj při opravě. Laser je z tohoto úhlu pohledu nenáročný (záleží na typu) a spolehlivý, případná výměna komponent je ale velmi drahá. Poslední zástupce, tedy pásová pila, je na provoz nenákladná a k poruchám vzhledem k jednoduchosti zařízení téměř nedochází, náklady za výměnu pilového pásu jsou ale významnou finanční položkou při provozu zařízení [17, 23, 56, 60].

7.1.8 Porovnání metod z ekologického hlediska

V poslední době je neméně důležitým kritériem ekologičnost metody. V případě tepelných metod, jakými jsou laser, plazma a plamen, může docházet v důsledku zahřívání materiálu ke vzniku škodlivých par, které mohou mít špatný vliv jak na zdraví obsluhujících osob, tak i na životní prostředí. Z tohoto pohledu lze zařadit vodní paprsek jako zcela bezpečný, neboť nedochází k zahřívání materiálu a vzniku par. V případě pořízení recyklační jednotky abraziva a vody je dokonce možné říct, že je vodní paprsek vůči životnímu prostředí nejšetnější. Neméně důležitou roli hraje i spotřeba energie, kde nad ostatní metody zřetelně vystupuje plazmová technologie, neboť příkon stroje může v závislosti na konkrétním zařízení dosahovat až 150 kW. S ekologií je spjata i hlučnost procesu dělení. V tomto srovnání je naopak vodní paprsek společně s plazmou nejhorší a takřka není možné se v případě vodního paprsku dostat pod 100 dB, respektive 120 dB u plazmy, tudíž je vhodné pracoviště odhlučnit a pracovníky vybavit ochrannými prostředky [2, 17, 61].

7.1.9 Vyhodnocení porovnání

Z daného srovnání vyplývá, že pro zvolení konkrétní metody dělení je třeba zvážit celou řadu kritérií, neboť jednotlivé technologie nelze využít pro různé aplikace zcela libovolně. Při zvážení a srovnání všech metod se zpravidla vybere metoda nejlevnější, či metoda nejuniverzálnější s nejširší oblastí využití a největší perspektivou do budoucna. Subjektivní vyhodnocení vytvořeného porovnání uvádí tab. 7.1.

Tab. 7.1: Subjektivní porovnání metod dělení materiálů dle nalezených informací

Parametr	Vodní paprsek	Laser	Plazma	Plamen	Pásová pila
Dělitelné materiály	1	2	3	4	3
Tloušťka materiálu	2	4	3	1	2
Přesnost a kvalita řezu	2	1	4	5	3
Řezná rychlost	4	1	2	3	4
Tepelné ovlivnění	1	3	5	5	2
Ekonomičnost	3	4	3	2	2
Ekologičnost	1	3	4	3	2
Porovnáno podle stupnice od 1 - nejlepší vlastnosti až 5 - nejhorší vlastnosti					

7.2 Konvenční soustružení a soustružení vodním paprskem

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, soustružení vodním paprskem je stále více se rozšiřujícím způsobem obrábění, jenž v mnoha případech nahrazuje technologii konvenčního soustružení. Konvenční soustružení je velmi rozšířený a obecně velmi dobře využitelný způsob obrábění pro širokou škálu materiálů, v současné době je však velmi problematické soustružení velmi tvrdých materiálů s nízkou tepelnou vodivostí. Mezi takové těžkoobrobitelné materiály se řadí například slitiny titanu se složkou γ (γ -Ti-Al slitiny), slitiny hliníku (Al-Si slitiny), sklo či keramika. V případě klasického soustružení těchto slitin se objevuje celá řada problémů, kdy v důsledku nízké tepelné vodivosti dochází ke zvýšenému přenosu tepla do nástroje, k jeho vyššímu dynamickému zatížení a v důsledku silného abrazivního působení Si částic těchto slitin může dojít k poškození břitu nástroje i povrchu obrobku, který následně ztratí lomovou houževnatost. Z těchto důvodů je velmi limitován výběr břitových destiček a jejich povlaků, bývá dosahováno pouze malého úběru materiálu, je třeba velmi opatrně volit řezné podmínky a využívat speciální řezné kapaliny [44, 62].

Soustružení vodním paprskem s příměsí abrazivních částic AWJ výše zmíněné nevýhody z velké části eliminuje. Není zde potřeba řešit životnost řezného nástroje (kromě trysky) ani odvod tepla z místa řezu díky proudě vody. Vzhledem k tomu, že také není potřeba omezovat řezné podmínky, je úběr materiálu řádově větší a dochází ke snížení řezných sil a termickému i silovému namáhání obrobku. Z těchto důvodů je konvenční soustružení stále častěji nahrazováno soustružením vodním paprskem, je

ovšem třeba říct, že celá řada aplikací je stále ve fázi experimentu, jelikož ne vždy je využití vodního paprsku jednoduše a dobře využitelné, ekonomicky rentabilní a jistě nedojde k výraznějšímu nahrazení konvenčního soustružení touto metodou [44, 62].

7.3 Vrtání vodním paprskem, laserem a elektroerozivní vrtání

Technologie vodního paprsku, laseru a technologie EDM jsou perspektivními metodami v procesech vrtání, respektive mikrovrtání. Mikrovrtání je moderní a progresivní metodou, která je využívána zejména v elektrotechnickém, leteckém a energetickém průmyslu. Velký význam má při vrtání odlehčovacích a chladících otvorů průměru 0,5–1 mm při úhlu vrtání 30–90° v leteckých motorech a lopatkách turbín. Oproti konvenčnímu vrtání mají uvedené metody výhodu při vrtání velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, rovněž jsou jednodušeji použitelné pro vrtání otvorů s velkým poměrem délky k průměru [63, 64].

Vzhledem k požadavku na velikost otvoru je důležitým parametrem nejmenší možný vrtaný průměr. Technologie EDM dosahuje v tomto ohledu nejlepších parametrů s nejmenším průměrem díry 0,02 mm. Laserové vrtání umožňuje rovněž v závislosti na použité technologii laseru vrtat otvory s průměrem 0,025–0,2 mm, vodní paprsek je v porovnání s těmito metodami nejhůře využitelný, neboť i při použití kvalitní trysky je možné dosáhnout rozměrů díry pouze více než 0,8 mm [17].

Z hlediska produktivity a řezné rychlosti jsou laser a vodní paprsek mnohonásobně účinnější než EDM vrtání, dosahovaná rychlost vrtání se může u laseru pohybovat až do 8000 mm/min, v případě vodního paprsku až 1000 mm/min, ale při elektroerozi bývá erozní rychlost při vrtání otvoru zhruba do 50 mm/min, což je značným limitem zejména při aplikaci na hlubší či průchozí otvory [17].

Uvedené technologie lze srovnávat i z pohledu výsledné kvality vyvrtaného otvoru. I v tomto ohledu je nejlepší volbou technologie EDM, jak z hlediska dosahované přesnosti 0,01–0,2 mm, tak i parametry drsnosti povrchu Ra 0,08–0,5 μm. Laserem je možné dosáhnout stejné přesnosti rozměrů, avšak drsnost se v důsledku odpařovaného materiálu pohybuje v rozmezí 0,8–6,3 μm. Nejméně výhodná je zde opět technologie vodního paprsku, kde je přesnost rozměrů i drsnost povrchu otvoru o řád horší. V případě nežádoucích změn materiálu je však vrtání vodním paprskem velmi výhodné, neboť

nedochází k žádnému ovlivnění povrchových vrstev. Tomuto ovlivnění u obou dalších metod nelze předejít, laser strukturu materiálu ovlivňuje do hloubky cca 0,5 mm, metodou EDM je mikrostruktura materiálu zasažena až do hloubky 1,8 mm [17].

Z výše uvedeného srovnání vyplývá, že opět neexistuje univerzální volba nekonvenční vrtací metody. Nejlepších parametrů lze dosáhnout elektroerozivním procesem, velkou nevýhodou je ale nízká řezná rychlost a nemožnost vrtání elektricky nevodivých materiálů. Tato vlastnost například značně omezuje její využití při vrtání materiálů s keramickými tepelně izolačními povlaky (TBC) na povrchu. Řešením může být výše vysvětlená moderní metoda Laser MicroJet, která kombinuje výhodné vlastnosti paprsku laseru a vody, díky kterým je v procesech mikrovrtání hojně využívána [63, 64].

8 Závěr

V této bakalářské práci byla v rámci rešeršní činnosti přiblížena technologie obrábění vodním paprskem. Vodní paprsek je poměrně novou a moderní technologií, která má již ale své pevné místo ve strojírenské výrobě. V současné době probíhá na tomto poli neustálý výzkum a vylepšování této technologie, což má za následek zvyšování konkurenceschopnosti vodního paprsku v porovnání s ostatními alternativními konvenčními i nekonvenčními technologiemi.

V první části této práce byla vytvořena krátká charakteristika konvenčních a nekonvenčních metod obrábění. Dále pak byly vyjmenovány a stručně popsány druhy a vlastnosti ostatních nekonvenčních metod obrábění.

V dalších kapitolách byla uvedena a přiblížena historie a princip metody vodního paprsku. Následně je práce zaměřena na problematiku vzniku řezného nástroje a popis jednotlivých v dnešní době používaných technologií vodního paprsku společně s uvedením základních parametrů. Těchto metod je dnes v praxi využívána široká škála, dochází k vylepšování již používaných metod i výzkumu a zkoušení metod zcela nových. Navazující kapitola blíže uvádí vlastnosti obrobeného povrchu, řezné parametry a ostatní jevy spjaté s technologií vodního paprsku. Neméně důležitou částí je popis součástí stroje pro obrábění vodním paprskem, včetně rozboru řezné kapaliny a jejích úprav. Řeznou kapalinou nemusí být pouze voda, ale podle konkrétní aplikace například i olej nebo mléko. Důraz byl kladen také na používané druhy abraziva, které umožňuje obrábět tvrdé a houževnaté materiály.

V poslední části je práce věnována využití technologie v praxi. V dnešní době je technologie vodního paprsku rozšířena do mnoha průmyslových odvětví, jako je strojírenství, elektrotechnický průmysl, ale i potravinářství. Dále pojednává o aplikaci technologie na metody obrábění, kdy je možné vodním paprskem řezat, soustružit, frézovat, vrtat i gravírovat. Závěr práce je věnován porovnání rozebírané metody s ostatními konkurenčními metodami, zejména v oblasti dělení materiálů. Uplatnění nachází ale i při soustružení, kde při specifickém použití konkuruje konvenčnímu soustružení. V nemalé míře je vodní paprsek využíván také pro mikrovrtání, kde jsou však úspěšně využívány technologie elektroeroze a laseru.

9 Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. 2. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Vienala, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- [3] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
- [4] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [5] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 3. část: Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program* [online]. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, 2005 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [6] BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [7] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi: WJM*. Bratislava: Mračko, 1998. ISBN 80-8057-091-4.
- [8] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. Ostrava: [nakladatel není známý], 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [9] HLOCH, Sergej. *Water Jet | Surface | Quality | Control* [online]. Fakulta výrobných technologií Technickej univerzity v Košiciach so sídlom v Prešove, 2012 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: https://www.integrita.zcu.cz/download/skola1/presov_prez.pdf
- [10] *WJTA Jet News* [online]. Prosinec 2007, 12 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf
- [11] SHIMIZU, Seiji. *Tribology in Water Jet Processes. New Tribological Ways* [online]. InTech China, 2011, s. 14 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/new-tribological-ways/tribology-in-water-jet-processes>
- [12] SUMMERS, David A. *Waterjetting Technology*. London: CRC Press, 1995. ISBN 978-0419196600.

- [13] Monitors – Water Cannons of Hydraulic Mining. In: *Sierra College Press: Journal of Sierra Nevada History and Biography* [online]. 2009 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.sierracollege.edu/ejournals/jsnhb/v2n1/monitors.html>
- [14] ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-336-3.
- [15] KMEC, Ján, Emil SPIŠÁK, Daniel KUČERKA, Miroslav GOMBÁR a Martin PODAŘIL. *Technológia vodný lúč: odborná kniha*. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2015. ISBN 978-80-7468-090-8.
- [16] FOLDYNA, Josef. *Pulzující vodní paprsek – technologie budoucnosti?* Vesmír [online]. 2013, 92 [cit. 2021-02-24]. ISSN 1214-4029. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2013/cislo-12/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti.html>
- [17] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [18] EL-HOFY, Hassan. *Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes*. New York: McGraw-Hill, 2005. ISBN 0-07-145334-2.
- [19] VPL. Obrábění vysokoenergetickým vodním paprskem. *Technik*. 2014, 22(1-2), 20-21. ISSN 1210-616X.
- [20] LOUIS, H., F. PUDE a Ch. VON RAD. Abrasive Water Suspension Jet Technology Fundamentals, Application and Developments. *Welding in the World* [online]. 2007, 51(9-10), 11–16 [cit. 2021-02-28]. ISSN 1878-6669. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03266595#author-information>
- [21] JERMAN, Marko, Andrej LEBAR, Izidor SABOTIN, Pavel DRESAR a Josko VALENTINCIC. ICE JET TECHNOLOGY. *MM Science Journal* [online]. 2018, 6, 2379–2384 [cit. 2021-03-01]. ISSN 1805-0476. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/june-2018/articles/ice-jet-technology>
- [22] GUPTA, Kapil, Muralidhar AVVARI, Able MASHAMBA a Manjaiah MALLAIAH. Ice Jet Machining: A Sustainable Variant of Abrasive Water Jet Machining. *Sustainable Machining* [online]. 2017. Springer, Cham, 67–78 [cit. 2021-03-01]. ISBN 978-3-319-51961-6. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-51961-6_4
- [23] *Flow International Corporation* [online]. [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.com>

- [24] *Synova S.A.* The Laser MicroJet® Technology [online]. [cit. 2021-03-02].
Dostupné z: <https://www.synova.ch>
- [25] DVOŘÁK, J.: *Integrita rozhraní materiálů obráběných progresivními technologiemi*. Disertační práce. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. Počet stran 109, počet příloh 3. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [26] TOSUN, Nihat, Ihsan DAGTEKIN, Latif OZLER a Ahmet DENIZ. Abrasive Waterjet Cutting of Aluminum Alloys: Workpiece Surface Roughness. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2013, 404, 3–9. [cit. 2021-03-14]. ISSN 1662-7482. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/269359541_Abrasive_Waterjet_Cutting_of_Aluminum_Alloys_Workpiece_Surface_Roughness
- [27] *CHPS s.r.o.* [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.chps.cz>
- [28] *Pražské vodovody a kanalizace, a.s.* Tvrdost vody [online]. [cit. 2021-03-23].
Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/vlastnosti-vody/tvrdost-vody/>
- [29] *KMT Waterjet Systems*. [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z:
<https://www.kmtwaterjet.com/default-eu.aspx>
- [30] VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Ostrava: Ámos Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. ISBN 978-80-254-3588-5.
- [31] MARTINEC, Petr. *Abrasives for AWJ cutting*. Ostrava: Institute of Geonics, Academy of Sciences of the Czech Republic, [2002]. ISBN 80-86407-02-0.
- [32] *ABRANOVA, s.r.o.* Abraziva a tryskací materiály [online]. [cit. 2021-03-23].
Dostupné z: <https://www.abranova.cz/abraziva-a-tryskaci-materialy>
- [33] *PTV, spol. s r.o.* Abrazivo [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z:
<http://www.ptv.cz/abrazivo/>
- [34] *Agar Scientific Ltd.* Hexagonal mesh grids [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z:
<https://www.agarscientific.com/catalog/product/view/id/6225>
- [35] BISHOP, Michael. *Reusing waterjet cutting abrasive*. The Fabricator [online]. 2009, [cit. 2021-03-28]. ISSN 1752-2153. Dostupné z:
<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/waterjetcutting/reusing-waterjet-cutting-abrasive>

- [36] *Sugino Machine Limited* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.sugino.com/index-e.html>
- [37] *WARDJet. Waterjet University* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.wardjet.com/waterjet/university>
- [38] *Hypertherm. HyPrecision Predictive waterjet pumps* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/hypertherm/hyprecision/hyprecision-predictive-pump/>
- [39] *Ruhrpumpen. Reciprocating Triplex and Quintuplex Plunger Pumps* [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <https://www.ruhrpumpen.com/en/products/reciprocating-pumps/rdp-pump>
- [40] *Foshan HaiRan Waterjet Cutting Technologies Co.,Ltd. Water Jet Accumulator Attenuator* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: https://www.hairanwaterjet.com/cs/pro_cat/water-jet-accumulator-attenuator/
- [41] *Sandvik Materials Technology. High-pressure tubes* [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://www.materials.sandvik.cz/produkty/tube-pipe-fittings-and-flanges/tubular-products/high-pressure-tubes/>
- [42] *Jet Edge Waterjet Systems. Abrasivejet Cutting Heads* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://jetedgewaterjets.com/product-category/water-jet-accessories/>
- [43] *Kennametal. ROCTEC Abrasive Waterjet Nozzles* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/us/en/products/carbide-wear-parts/abrasive-waterjet-nozzles.html>
- [44] UHLMANN, Eckart a Karsten FLÖGEL. *Soustružení abrazivním kapalinovým paprskem zvyšuje trvanlivost*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2013, 36 [cit. 2021-04-04]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-abrazivnim-kapalinovym-paprskem-zvysuje-trvanlivost>
- [45] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007, 4 [cit. 2021-04-04]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>
- [46] Strojnická společnost. *Vysokoenergetický kapalinový paprsek: využití v čs. průmyslu : [Sborník statí]*. Praha: Dům techniky ČSVTS, 1989. s. 6. ISBN 80-02-99757-3. Dostupné také z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:64194880-ad59-11e3-b74a-5ef3fc9ae867>

- [47] GARDINER, Ginger. Plant Tour: GE Aviation, Asheville, NC, US.
In: *compositesworld.com* [online]. 25.5.2017 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z:
<https://www.compositesworld.com/articles/plant-tour-ge-aviation-asheville-nc-us>
- [48] ARNOLD, Chris. What applications can waterjet cutting be used for?
In: *icee.co.uk* [online]. 29.8.2017 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z:
<https://www.icee.co.uk/what-applications-can-waterjet-cutting-be-used-for/>
- [49] Science Photo Library. *Robot arm using waterjet cutter for car production* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z:
<https://www.sciencephoto.com/media/344849/view/robot-arm-using-waterjet-cutter-for-car-production>
- [50] Laserfab. *Waterjet Cutting Services for the Chemical Mixing Industry* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://laserfab.net/waterjet-cutting/waterjet-cutting-services-chemical-mixing-industry/>
- [51] Kärcher. *High Pressure Water Jetting in Chemical Industry* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://s3.kaercher-media.com/asset/12989/1453665573/brochurewomachemie.pdf>
- [52] KELLNER, Tomáš. Watch This Water-Guided Laser Machine Cut The Tiniest Holes In The Toughest Metals In: *ge.com* [online]. 19.5.2016 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.ge.com/news/reports/major-laser-this-water-guided-laser-machine-cuts-the-tiniest-holes-in-the-toughest-metals>
- [53] Pratt & Whitney. *Pratt & Whitney Launches PurePulse Waterjet Technology* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://newsroom.prattwhitney.com/2012-05-23-Pratt-Whitney-Launches-PurePulse-Waterjet-Technology>
- [54] *Alliance Automation, LLC* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.roboticwaterjets.com/>
- [55] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
- [56] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Technologie II*. 2. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [57] *PILOUS-pásové pily, spol. s r.o.* Pásové pily na kov [online]. [cit. 2021-06-23]. Dostupné z: <https://www.pilous.cz/metal/pasove-pily-na-kov>

- [58] AKKURT, Adnan. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2015, 18(3), 303–308 [cit. 2021-06-23]. ISSN 2215-0986. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098614000561>
- [59] KAŠPAR, Jan. *Tepelné dělení materiálu kyslíkem*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2011, 4 [cit. 2021-06-26]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-deleni-materialu-kyslikem>
- [60] Weldclass CNC Plasma. *Plasma vs Waterjet vs Laser vs Oxy | How Economical is CNC Plasma?* [online]. [cit. 2021-06-29]. Dostupné z: <https://www.cncplasmacutters.com.au/blogs-and-news/Plasma-vs-Waterjet-vs-Laser-vs+Oxy>
- [61] HUTT, Rebecca. *Literature review: Noise from high pressure water jetting*. Health & Safety Laboratory Derbyshire, 2004. [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: https://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2004/hsl0415.pdf
- [62] UHLMANN, Eckart, Karsten FLÖGEL, Michael KRETZSCHMAR a Fabian FALTIN. Abrasive waterjet turning of high performance materials. *Procedia CIRP* [online]. 2012, 1, 409–413. [cit. 2021-07-01]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000741>
- [63] HLAVÁČEK, Petr, Tomáš ZLÁMAL, Libor SITEK. ABRASIVE WATER JET DRILLING OF COOLING HOLES IN AEROENGINES: PRELIMINARY EXPERIMENTAL STUDY. *MM Science Journal* [online]. 2018, 3, 2218–2222 [cit. 2021-07-04]. ISSN 1805-0476. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2018/articles/abrasive-water-jet-drilling-of-cooling-holes-in-aeroengines-preliminary-experimental-study>
- [64] National Jet Company. *Mechanical vs. EDM vs. Laser* [online]. [cit. 2021-07-04]. Dostupné z: <https://www.najet.com/mechanical-vs-edm-vs-laser/>
- [65] Water Jet Sweden AB. *They won the bid for the giant 5-axis waterjet machine* [online]. [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.waterjetsweden.com/news/they-won-the-bid-for-the-giant-5-axis-waterjet-machine>
- [66] Pilana Metal. *VOLBA ŘEZNÝCH PODMÍNEK* [online]. [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/volba-rezne-rychlosti.html>

10 Seznam obrázků

<i>Obr. 3.1: Využívání hydromonitorů při těžbě v oblasti Trinity County [13]</i>	8
<i>Obr. 3.2: Schématické znázornění procesu dělení vodním paprskem [8]</i>	10
<i>Obr. 3.3: Schéma zařízení pro dělení vodním paprskem [15]</i>	12
<i>Obr. 3.4: Rozdělení vodních paprsků [7]</i>	13
<i>Obr. 3.5: Schéma technologií WJM (vlevo) a AWJ (vpravo) [2]</i>	15
<i>Obr. 3.6: Metody tvorby paprsku abrazivní vodní suspenze ASJ [20]</i>	16
<i>Obr. 3.7: Metody tvorby vodního paprsku s abrazivními ledovými částicemi IJM [22]</i>	17
<i>Obr. 3.8: Schéma technologie LMJ [24]</i>	18
<i>Obr. 4.1: Vizualizace řezného procesu pomocí (vlevo) a reliéf obrobeneho povrchu (vpravo) [8]</i>	20
<i>Obr. 4.2: Závislost hloubky řezu na nastaveném úhlu vodního paprsku [2]</i>	21
<i>Obr. 4.3: Kvalitativně odlišné zóny povrchu řezu [26]</i>	22
<i>Obr. 4.4: Závislost povrchových parametrů řezu na řezné rychlosti [2]</i>	23
<i>Obr. 4.5: Závislost povrchových parametrů řezu na hloubce řezu [2]</i>	23
<i>Obr. 4.6: Vzorky s ukázkou kategorií kvality řezu [27]</i>	24
<i>Obr. 4.7: Závislost tvaru řezné mezery na vzdálenosti mezi tryskou a obrobkem [8]</i>	25
<i>Obr. 4.8: Různé druhy odchylky kolmosti [8]</i>	26
<i>Obr. 5.1: Schéma pracoviště pro obrábění vodním paprskem [15]</i>	29
<i>Obr. 5.2: Oblasti využití filtračních metod [7]</i>	31
<i>Obr. 5.3: Schéma vyhodnocení zrnitosti MESH [34]</i>	34
<i>Obr. 5.4: Různé druhy přírodního granátu pro vodní paprsek [32]</i>	35
<i>Obr. 5.5: Dávkovací a dopravní systém abraziva KMT [29]</i>	36
<i>Obr. 5.6: Stroj pro lokální recyklaci abraziva PTV [33]</i>	37
<i>Obr. 5.7: Vysokotlaké vodní čerpadlo s multiplikátorem KMT Streamline SL-V [29]</i> ..	38
<i>Obr. 5.8: Dvojčinný multiplikátor [38]</i>	39
<i>Obr. 5.9: Triplexový plunžr [39]</i>	40
<i>Obr. 5.10: Akumulátor rázů [40]</i>	41
<i>Obr. 5.11: Vysokotlaké vodní potrubí [41]</i>	41
<i>Obr. 5.12: Vysokotlaká vodní těsnění [40]</i>	42
<i>Obr. 5.13: Řezací hlavy pro technologii WJM (vlevo) a AWJ (vpravo) [42]</i>	43
<i>Obr. 5.14: Používané tvary vodních trysek [7]</i>	43
<i>Obr. 5.15: Způsoby směšování abraziva s vodním paprskem [2]</i>	44

<i>Obr. 5.16: Zaostřovací trubice pro abrazivní vodní paprsek [43]</i>	45
<i>Obr. 5.17: Souřadnicový CNC stůl Flow Mach 500 [23]</i>	46
<i>Obr. 6.1: Využití polotovaru metodou ražení (vlevo) a metodou řezání vodním paprskem (vpravo) [7]</i>	47
<i>Obr. 6.2: Soustružení vodním paprskem [2]</i>	48
<i>Obr. 6.3: Frézování různých geometrických tvarů vodním paprskem [2]</i>	49
<i>Obr. 6.4: Řezné fáze frézovacího cyklu [2]</i>	49
<i>Obr. 6.5: Způsoby vrtání vodním paprskem [2]</i>	50
<i>Obr. 6.6: Výroba otvorů v lopatce turbíny General Electric metodou LMJ [24, 52]</i>	53
<i>Obr. 6.7: Robotizované pracoviště pro řezání vodním paprskem [54]</i>	53
<i>Obr. 7.1: Srovnání přesnosti jednotlivých metod dělení materiálů v závislosti na jejich tloušťce [58]</i>	56

11 Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1: Výstupní technické parametry vybraných nekonvenčních metod obrábění [3, 4, 5, 6]</i>	<i>6</i>
<i>Tab. 2.2: Aplikační oblasti vybraných druhů nekonvenčních metod obrábění [2]</i>	<i>7</i>
<i>Tab. 3.1: Reakce materiálu v závislosti na úhlu dopadu částice [2]</i>	<i>11</i>
<i>Tab. 4.1: Charakteristika základních stupňů kvality řezu [25, 27]</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 4.2: Příklad řezných rychlostí pro technologii WJM [2]</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 4.3: Příklad řezných rychlostí pro technologii AWJ [2]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 5.1: Stupně tvrdosti vody podle obsahu rozpuštěných látek [28]</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 5.2: Doporučené hodnoty kvality vody podle obsahu rozpuštěných látek [29]</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5.3: Vlastnosti používaných abrazivních materiálů [19]</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 5.4: Chemické složení a fyzikální vlastnosti přírodního granátu GMA [33]</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5.5: Parametry vysokotlakých vodních čerpadel KMT Streamline SL-V [29]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5.6: Životnost a popis materiálů zaostřovacích trubic [30]</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5.7: Parametry souřadnicového CNC stolu Flow Mach 500 [23]</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7.1: Subjektivní porovnání metod dělení materiálů dle nalezených informací</i>	<i>59</i>

12 Seznam použitých zkratek a symbolů

KMO	konvenční metody obrábění	[-]
NMO	nekonvenční metody obrábění	[-]
EDM	Electro Discharge Machining	[-]
PBM	Plasma Beam Machining	[-]
LBM	Laser Beam Machining	[-]
EBM	Electron Beam Machining	[-]
IBM	Ion Beam Machining	[-]
CM	Chemical Machining	[-]
ECM	Electro Chemical Machining	[-]
USM	Ultrasonic Machining	[-]
WJM	Water Jet Machining	[-]
AWJ	Abrasive Water Jet Machining	[-]
AJM	Abrasive Jet Machining	[-]
ASJ	Abrasive Slurry Water Jet	[-]
IJM	Ice Jet Machining	[-]
DWJ	Dynamic Water Jet	[-]
LJM	Laser MicroJet	[-]
NC	Numerical Control	[-]
CNC	Computer Numerical Control	[-]
CAD	Computer-Aided Design	[-]
CAM	Computer-Aided Manufacturing	[-]
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet	[-]
TDS	celkový obsah rozpuštěných pevných látek	[mg/l]
PAA	polyakrylamid	[-]
PEO	polyetyloxid	[-]
PCD	polykrystalický diamant	[-]
PcBN	polykrystalický kubický nitrid boru	[-]
CVD	chemický povlak deponovaný z plynné fáze	[-]
HVOF	vysokorychlostní žárový nástřik	[-]
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	[-]
TBC	tepelně izolační povlaky	[-]
N ₂	dusík	[-]
Ca	vápník	[-]
Cl	chlor	[-]
Fe	železo	[-]
Mg	hořčík	[-]
Mn	mangan	[-]
Na	sodík	[-]
Ni	nikl	[-]

Co	kobalt	[-]
Si	křemík	[-]
Al	hliník	[-]
Cu	měď	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
SiO ₂	oxid křemičitý	[-]
CaCO ₃	uhličitan vápenatý	[-]
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý	[-]
FeO	oxid železnatý	[-]
Fe ₂ O ₃	oxid železitý	[-]
TiO ₂	oxid titaničitý	[-]
MnO	oxid manganatý	[-]
CaO	oxid vápenatý	[-]
MgO	oxid hořečnatý	[-]
SiC	karbid křemíku	[-]
GaAs	arsenid gallitý	[-]
α_0	úhel nárazu částice	[°]
p_1	vstupní tlak	[Pa]
p_2	výstupní tlak	[Pa]
S	plocha průřezu trysky	[m ²]
S ₁	plocha vstupní strany pístu	[m ²]
S ₂	plocha výstupní strany pístu	[m ²]
Q	objemový průtok	[m ³ ·s ⁻¹]
μ	výtokový součinitel	[-]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
E _k	kinetická energie	[J]
m	hmotnost	[kg]
W	práce	[J]
h_{\max}	maximální hloubka řezu	[mm]
h_1	hranice horní erozní zóny	[mm]
h_2	hranice přechodové oblasti	[mm]
h_3	hranice dolní erozní zóny	[mm]
x_1	vzdálenost definující hranici horní erozní zóny	[mm]
x_2	vzdálenost definující hranici přechodové oblasti	[mm]
x_3	vzdálenost definující hranici horní dolní zóny	[mm]
Θ	úhel vstupu paprsku	[°]
h_c	šířka hladké oblasti	[mm]
h_d	šířka rýhované oblasti	[mm]
l_{\max}	maximální vzdálenost trysky od obráběného povrchu	[mm]
pH	vodíkový exponent	[-]