

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Řezání abrazivním vodním paprskem

Bakalářská práce

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

Autor práce: Daniel Janda

Praha 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Daniel Janda

Zemědělské inženýrství

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Řezání abrazivním vodním paprskem

Název anglicky

Cutting using abrasive water jet

Cíle práce

- shromáždit informace o technologiích používaných pro dělení kovových materiálů se zaměřením na řezání vodou.

Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

dělení materiálu; řezání vodou; abrazivní vodní paprsek; abrazivo

Doporučené zdroje informací

- AWAC, spol. s r. o., systémy dělení materiálu [online]. Dostupné z www: <http://www.awac.cz/> .
- BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture 2017, 16, 75-81. Časopisy zahraniční (<https://www.sic.czu.cz/cs/r-8833-odborne-databaze/r-8883-infozdroje>) a tuzemské (Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM – Svařování, dělení, spojování materiálů, Strojírenská technologie, Strojárstvo/Strojírnoství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie/Svařování).
- MAŇKOVÁ, I.: Progresívne technologie. Košice, TU SF Edícia vedeckej a odbornej literatúry, Vienala, vydavateľstvo a tlačiareň 2000. 275 s.
- ŘAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N.: Hodnocení kvality povrchu materiálu po řezání AWJ. Strojírenská technologie, 2012, 17(3), s. 186-192.
- VALÍČEK, J. et al.: Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(11), s. 1786-1790.
- VALÍČEK, J., HLOCH, S., KOZAK, D.: Surface geometric parameters proposal for the advanced control of abrasive waterjet technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009 41(3-4), s. 323-328.
- VLASTNÍK, J.: Dělení materiálů paprskem kapaliny (Kandidátská disertační práce). Praha, ČVUT FS 1983. 125 s.
- VOMOČIL, L.: Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. In: Technik, 2008, 16(9), s. 25-26.
- WaterJets.org ... the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z www: <http://waterjets.org/> .
-

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 21. 1. 2020

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 18. 03. 2021

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Řezání abrazivním vodním paprskem vypracoval/a samostatně a použil/a jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 14.5.2021

.....

Daniel Janda

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za jeho odborné vedení a poskytnutí cenných informací při zpracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé přítelkyni a rodině za neutuchající podporu při celém mém studiu na vysoké škole.

Abstrakt: Bakalářská práce na téma „Řezání abrazivním vodním paprskem“ zkoumá problematiku dělení kovových materiálů za použití abrazivního vodního paprsku. Úvodní části práce popisují technologie využívané pro dělení kovových materiálů s detailnějším popisem nekonvenčních technologií. Následující část práce je věnována technologii vodního paprsku včetně popisu jednotlivých částí zařízení sloužícího pro jeho generování. Poslední úsek práce zkoumá řezný proces spolu s vybranými faktory, které ho ovlivňují.

Klíčová slova: dělení materiálu; řezání vodou; abrazivní vodní paprsek; abrazivo

Cutting using abrasive water jet

Summary: This bachelor's thesis on the subject „Abrasive water jet cutting“ examines the issue of cutting metallic materials using an abrasive water jet. The introductory parts of the work describe the technologies used for cutting metal materials with a more detailed description of unconventional technologies. The next part of the work is devoted to the technology of the water jet, including a description of the individual part of the device used to generate it. The last part of the work examines the cutting process together with selected factors that affect it.

Keywords: material separation; water jet cutting; abrasive water jet; abrasive

Obsah

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	2
3	METODIKA PRÁCE	2
4	METODY PRO DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	3
4.1	MECHANICKÉ PROCESY.....	4
4.2	ELEKTROTEPELNÉ PROCESY.....	5
4.2.1	<i>Elektroerozivní dělení.....</i>	<i>5</i>
4.2.2	<i>Dělení paprskem koncentrované energie</i>	<i>5</i>
4.3	CHEMICKÉ PROCESY.....	5
4.4	ELEKTROCHEMICKÉ PROCESY	6
5	ÚVOD DO TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPERU	7
5.1	ZÁKLADNÍ PRINCIP VODNÍHO PAPERU.....	8
5.1.1	<i>Přednosti vodního paprsku</i>	<i>8</i>
5.1.2	<i>Nevýhody vodního paprsku</i>	<i>9</i>
5.2	METODA WJM – WATER JET MACHINING.....	9
5.3	METODY S ABRAZIVEM.....	11
5.3.1	<i>Technologie AWJM – Abrasive Water Jet Machining.....</i>	<i>11</i>
5.3.2	<i>Technologie ASJ – Abrasive Slurry Jet.....</i>	<i>12</i>
5.3.3	<i>Technologie IJM – Ice Jet Machining</i>	<i>13</i>
6	ZAŘÍZENÍ VODNÍHO PAPERU	14
6.1	GENEROVÁNÍ VYSOKOTLAKÉ VODY	14
6.2	MULTIPLIKÁTOR	14
6.3	AKUMULÁTOR.....	15
6.4	VYSOKOTLAKÉ POTRUBÍ.....	16
6.5	UZAVÍRACÍ VENTIL.....	16
6.6	ŘEZACÍ HLAVA	16
6.6.1	<i>Jednopaprskové řezací hlavy</i>	<i>16</i>
6.6.2	<i>Vícepaprskové řezací hlavy.....</i>	<i>18</i>
6.6.3	<i>Vodní tryska.....</i>	<i>18</i>
6.7	LAPAČ VODY	18
6.8	ÚPRAVA VODY.....	19

6.8.1	<i>Filtrace</i>	19
6.8.2	<i>Deionizace</i>	19
6.8.3	<i>Změkčování vody</i>	19
6.8.4	<i>Reverzní osmóza</i>	20
7	VLIVY HLAVNÍCH FAKTORŮ NA VÝSLEDNÝ ŘEZ	21
7.1	RYCHLOST POSUVU ŘEZACÍ HLAVY	22
7.2	VLIV ABRAZIVA	24
7.2.1	<i>Úseky řezání</i>	26
7.3	VLASTNOSTI ABRAZIVA OVLIVŇUJÍCÍ PROCES ŘEZÁNÍ	26
7.4	PRACOVNÍ TLAK VODY	28
8	ZÁVĚR	30
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	31
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	35

1 Úvod

Voda už dávno neslouží pouze ke konzumaci nebo k očištění našeho těla. Postupem času člověk nalézal další a další uplatnění pro tuto čirou kapalinu skrze všechna průmyslová odvětví. S výrobky, které za svou existenci vděčí právě vodě, přicházíme do styku každý den, i když o tom třeba ani nevíme, např. plastové láhve, kdy na výrobu jedné lahve o objemu 0,5 litru je potřeba přibližně 1,65 litru vody, která se spotřebuje hlavně na mytí a chlazením při výrobním procesu. [1]

První doložené pokusy o „řezání“ vodním paprskem sahají do 19. století, kdy kalifornští zlatokopové používali nízkotlaké vodní paprsky pro odstranění kamení a nánosů písku. Největšího rozmachu se technologie dočkala v padesátých letech dvacátého století, kdy byl proud čiré vody obohacen o abrazivo a zároveň bylo použito i velmi vysokého tlaku. Technologie si však na své první komerční využití počkala až do sedmdesátých let dvacátého století, kdy byla zdokonalena technika pro přimísení abraziva k vodnímu proudu. Od doby vzniku, technologie vodního paprsku urazila dlouhou cestu a člověk brzo zjistil, že výhody této technologie převyšují její nevýhody. [2]

Dělení materiálu vodním proudem se dělí na dvě hlavní podskupiny. První podskupina používá čistý proud vody, který nachází své využití při dělení zejména nekovových materiálů jako jsou např. lamináty, pryže, sklotextily nebo pěny. Druhá podskupina využívá syntetických nebo přírodních příměsí přimísených do vodního proudu neboli abraziv. Práce pojednává hlavně o druhé podskupině se zaměřením na dělení kovových materiálů.

2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je shromáždit informace o technologiích používaných pro dělení kovových materiálů se zaměřením na řezání vodou. U výčtu technologií používaných pro dělení kovových materiálů se práce soustředí hlavně na technologie nekonvenční, jelikož do této skupiny spadá i technologie vodního paprsku. Dalším cílem práce je popsat technologii vodního paprsku a uvést parametry, kterými v současné době disponuje.

3 Metodika práce

Práce je zpracována literární rešerší, kdy čerpá především z doporučených literárních zdrojů. Každá kapitola práce poskytuje informace o části řešené problematiky.

4 Metody pro dělení kovových materiálů

„Dělení lze nazvat jako výrobní proces, při němž dochází ke změně tvaru pevného tělesa, a přitom se místně odstraní soudržnost.“ [3]

K dělení kovových materiálů je využíváno velké množství odlišných technologií. Tyto technologie dělíme podle mechanismu na konvenční a nekonvenční.

Pojmem konvenční technologie označujeme tradiční postupy využívané pro dělení materiálu. Podle Ildikó Maňkové jsou konvenční technologie založené na mechanické povaze zpracování materiálů, kdy hlavním zdrojem pro úběr materiálu je mechanická energie [4]. Mezi konvenční postupy řadíme [5]:

- Řezání pilami v podobě listů, kotoučů, pásů
- Rozbrušování
- Frikční dělení
- Lámání, stříhání nebo sekání
- Řezání plamenem nebo elektrickým obloukem

Následující kapitola pojednává o nekonvenčních technologiích, do kterých spadá i technologie abrazivního vodního paprsku (AWJ). Pojem nekonvenční technologie označuje postupy, které nejsou v praxi použity v takové míře jako technologie konvenční. Nekonvenční postupy často využívají nových poznatků a technologií, a proto se jejich seznam neustále rozšiřuje. V některých případech představují nekonvenční technologie jedinou možnost, jak danou součást vyrobit.

Charakteristická vlastnost pro nekonvenční metody je ta, že pro řezání materiálu většinou nevyužívají mechanickou práci, na místo toho jsou použity různé chemické a fyzikální principy, které na materiál působí bez silových účinků a dochází tedy k dělení bez vzniku charakteristické třísky. Dělení materiálu zde tedy nezávisí na jeho mechanických vlastnostech, nýbrž na vlastnostech fyzikálních. [4, 5]

Hlavní důvody zavádění nekonvenčních technologií jsou [5]:

- Rostoucí nároky na konstrukční materiály strojních součástí, kdy roste podíl použití těžkoobrobitelných materiálů
- Neustále narůstající tvarová složitost součástí
- Rostoucí požadavek na přesnost vyrobených součástí
- Narůstající potřebu automatizování výroby pro stroje s CNC řízením a systémy CAD/CAM

Zavedení nekonvenčních technologií sebou nese i jisté nedostatky, kdy za největší úskalí je považována vysoká pořizovací cena strojů spolu s malou produktivitou a vysokou energetickou náročností. [5]

Nekonvenční technologie nejčastěji dělíme z hlediska principu dělení materiálu. Dělení je blíže uvedeno v tab. 1.

Základní rozdělení nekonvenčních metod dělení materiálu		Tabulka 1
Mechanické procesy		
	Dělení ultrazvukem	
	Dělení vodním paprskem	
	Dělení proudem brusiva	
Elektro - tepelné procesy		
	Dělení elektroerozivní	
	Dělení paprskem koncentrované energie	
	Laserový paprsek	
	Plazmový paprsek	
	Elektronový paprsek	
	Iontový paprsek	
Chemické procesy		
Elektro - chemické procesy		

Tabulka 1 – Rozdělení nekonvenčních technologií [5]

4.1 Mechanické procesy

Stejně jako konvenční technologie, tak i tato podskupina nekonvenčních technologií, využívá jako primární zdroj pro úběr materiálu mechanickou energii. V případě abrazivního paprsku a ultrazvuku mluvíme o úběru materiálu za pomoci abrazivního mechanického účinku, který je zde způsoben dopadem abrazivních částic s vysokou kinetickou energií na plochu materiálu.

Jiný je však princip u technologií využívající vodní paprsek, kde dochází k úběru materiálu erozivním opotřebením s využitím hydromechanické energie. [4, 5]

Mechanická podskupina nekonvenčních technologií je obvykle používána při práci s velmi tvrdými materiály, kdy je ve srovnání s konvenčními metody ekonomicky výhodnější. [5]

4.2 Elektrotepelné procesy

Elektrotepelné procesy dělíme na dvě hlavní skupiny. První skupina využívá elektrický oblouk, který slouží k odebírání materiálu. Druhá skupina využívá koncentrovaného toku částic, které reagují s částicemi obrobku, což vede k úběru materiálu. [6]

4.2.1 Elektroerozivní dělení

Elektroerozivní princip využívá k úběru materiálu rychle se opakující periodické impulzy jiskrového výboje. Pomocí výbojů jsou z obráběného materiálu odstraňovány mikročástice vlivem tavení a odpaření. Výboj probíhá mezi dvěma elektrody, jedna je obráběný materiál (materiál musí být elektricky vodivý) a druhá je nástroj (také musí být elektricky vodivý). Mezi elektrody je poté udržována stálá mezera, ve které protéká dielektrická kapalina, která mimo jiné slouží pro odplavení oddělených mikročástic. Cílem celého procesu je dosáhnout maximálního úběru materiálu na elektrodě představované obráběným materiálem a co nejmenšího úběru materiálu na elektrodě druhé (nástroj). [4, 5]

4.2.2 Dělení paprskem koncentrované energie

Paprsek koncentrované energie je definován jako usměrněný tok extrémně malých energetických částic, podle jejichž typu paprsky rozlišujeme. Odebírání materiálu je v tomto procesu následkem reakce elementárních částic paprsku na částice obráběného materiálu. [6]

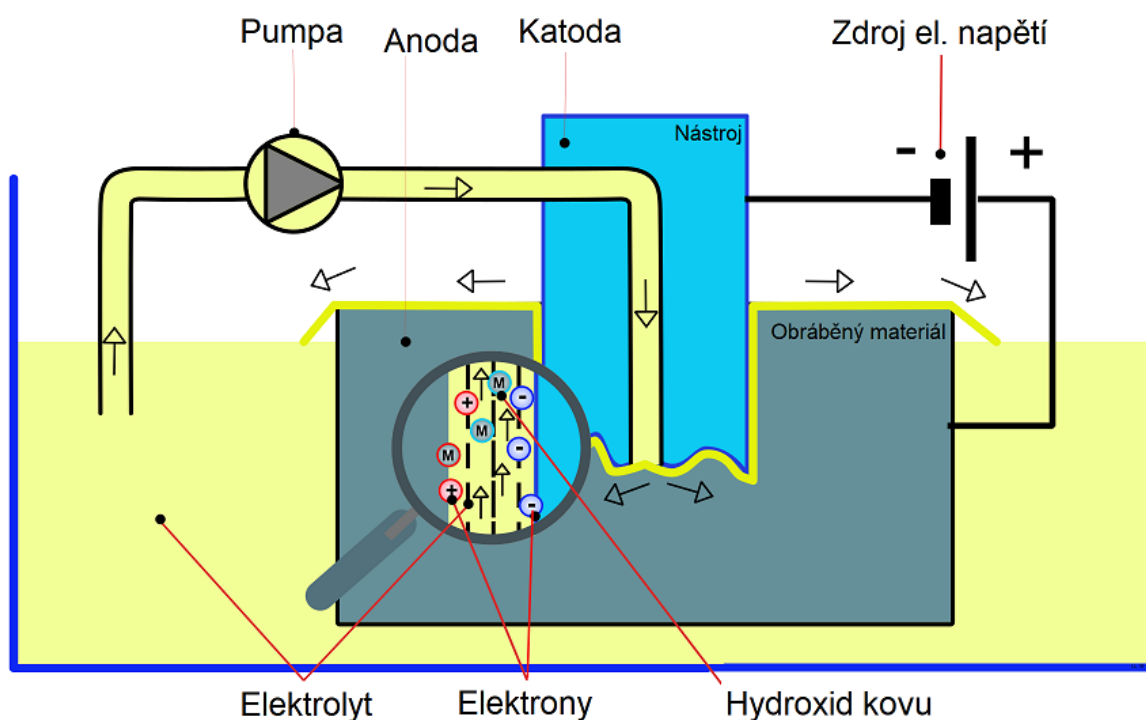
4.3 Chemické procesy

Chemické procesy využívají kontrolované odleptávání povrchu, kdy jsou postupně rozpouštěny jednotlivé vrstvy materiálu až do hloubky několika milimetrů. K odleptávání dochází při chemické reakci mezi obráběným materiálem a reaktivním prostředím (leptadlem). Jako reaktivní prostředí slouží leptací roztoky se speciálními přísady pro zvýšení smáčivosti. Složení leptacích roztoků se pak liší na základě obráběného materiálu např. pro leptání oceli a hliníku jsou používány kyseliny, naopak pro leptání niklu a mědi jsou využívány zásady. [4]

Při procesu odleptávání je důležité, aby plochy materiálu, které nechceme narušit, byly zakryty tzv. maskami. Masky mají nejčastěji podobu speciálních povlaků, tvořených z chemicky odolných materiálů, např. pryže či plastu. [4]

4.4 Elektrochemické procesy

Při elektrochemickém procesu se využívá principu elektrolýzy, kdy dochází k chemickým změnám mezi obráběným materiálem (anodou) a nástrojem (katodou) připojeným na zdroj stejnosměrného napětí (obr. 1). Mezi obráběným materiálem a nástrojem se během procesu udržuje ustálená mezera, která slouží k průtoku elektrolytu. Nástroj, nejčastěji mosazná deska s členitým tvarem, je postupně přibližována k povrchu materiálu, kdy dochází k úběru obráběného materiálu vlivem anodického rozpouštění. Na konci procesu je tvar nástroje „zkopírován“ do obráběného materiálu. [6]



Obrázek 1 – Princip elektrochemického obrábění [7]

5 Úvod do technologie vodního paprsku

První zmínky o průmyslovém používání vodního paprsku pochází z Kalifornie, z poloviny 19. století. Paprsek vody byl tehdy použit při těžbě zlata k odstranění nežádoucích hornin ze svrchních vrstev lomu. K podobnému využití docházelo v uhelných dolech v Rusku a na Novém Zélandu, kdy proud vody sloužil k odstranění materiálu z ložiska uhlí. Vodní paprsek však nedosahoval takových vlastností jako je tomu dnes, poněvadž do začátku 20. století, byly používány tlaky nepřesahující hodnotu několika desítek megapascalů. [2, 8, 9]

Dalších uplatnění technologie nalezla ve 30. letech 20. století, kdy byla použita pro dělení papíru. Technologie vodního paprsku dosáhla rozvoje později tohoto století, kdy si inovátoři začali všimnout lepších řezných vlastností po přidání abrazivních složek do samotného proudu vody. Tato nová technologie abrazivního paprsku byla však v praxi zatím nepoužitelná z důvodu příliš krátké životnosti trysky. [10]

O jeden z největších rozvojų v oblasti řezání vodním paprskem se zasloužil v 50. letech 20. století lesní inženýr Dr. Norman Franz, který si povšiml destruktivních vlastností unikající páry na násadě od koštěte, která byla používána pro testování úniků páry u vysokotlakých kotlů. Pára unikající z těchto vysokotlakých nádob měla takovou sílu, že opakovaně zvládla porušit či dokonce oddělit část násady koštěte. Dr. Franz se později snažil tento nápad rozvinout, avšak se ukázalo, že použití páry jako řezného nástroje bylo velice komplikované. Dr. Franz proto začal experimentovat s vlastní jednoduchou soustavou zařízení používající vodu v kapalném skupenství jako řezný nástroj, která byla schopna vyvinout impulsivní tlak o hodnotě přesahující 345 MPa. Vytvořený paprsek byl natolik výkonný, že dokázal štípat dříví nebo oddělovat daleko pevnější materiály, než tomu bylo doposud. Paprsek byl ovšem přetržitého charakteru, což bránilo v jeho použití na poli průmyslu. [2, 10, 11]

Dr. Franz musel najít čerpadlo, které by bylo schopné čerpat vodu nepřetržitě, tak aby byla zachována stabilita paprsku. Od společnosti McCartney Manufacturing si tedy zřídil půjčku v podobě vysokotlakého čerpadla, dříve používaného pro vstřikování katalyzátoru při výrobě polyethylenu. Později čerpadlo společně s tryskou duplikoval a integroval systém pro vytvoření relativního pohybu mezi paprskem a obrobkem. Vytvořené zařízení bylo uvedeno do komerčního provozu v roce 1971, kdy bylo zakoupeno firmou Alton Box Board Company, která se specializovala na výrobu nábytku. Jednalo se tak o první komerční využití vodního paprsku. [2, 8, 11]

Další zásadní průlom v technologii vodního paprsku měla na svědomí společnost Flow Research, jejíž tým techniků v čele s Dr. Mohamedem Hashishem, podstatně zdokonalil trysku pro abrazivní vodní paprsek. Životnost zdokonalené trysky již nebyla v řádech minut jako tomu bylo doposud, což umožňovalo využití této technologie v průmyslové výrobě. Společnost Flow tak roku 1983 přichází na trh s prvním komerčním zařízením využívající abrazivní vodní paprsek. [11, 12, 13]

5.1 Základní princip vodního paprsku

Jak už bylo řečeno v předešlé podkapitole o mechanických procesech, řezání vodním paprskem spočívá v úběru materiálu mechanicko-fyzikálním procesem, kdy vysokotlaká kapalina, kontinuálně prochází tryskou o velmi malém průměru výtokového otvoru. Kombinace vysokého tlaku vody a malého výtokového otvoru utvoří úzký vodní paprsek s velkou kinetickou energií a rychlostí proudící kapaliny. Vodní paprsek představuje u následujících metod řezný nástroj, který nepodléhá opotřebení, jako je tomu u metod konvenčních. Podle příměsí do pracovního média dělíme technologii vodního paprsku na dvě základní kategorie: [4]

- WJM (Water Jet Machining)
- AWJM (Abrasive Water Jet Machining)

5.1.1 Přednosti vodního paprsku

Tak jako každá technologie má i tato své výhody a nevýhody. Technologie vodního paprsku se řadí mezi velice oblíbené nekonvenční metody hlavně kvůli možnosti dělení tvrdých, měkkých, lepicích nebo drolících se materiálů. Další výhodou, která jistě stojí za zmínku je velmi vysoká přesnost a libovolná opakovatelnost řezů, jelikož pohyb řezací hlavy na souřadnicovém stoje je ovládán programem v počítači. Díky tomuto procesu ovládní pohybu je možno dosáhnout přesnosti až 0,13 mm. [14, 15]

Dalším plusem technologie je rychlost, s jakou zvládne materiál řezat. Tato rychlost se odvíjí hlavně od tvrdosti a tloušťky řezaného materiálu. Při použití abrazivního paprsku (AWJ) se rychlost řezání pohybuje od 10 mm/min (tvrdé materiály – titan, kobalt) až do 2500 mm/min (měkké materiály – sklo, hliník, vrstvené kompozity). Pro bezabrazivní paprsek (WJM) jsou rychlosti řezání o poznání nižší. Zde můžeme dosáhnout rychlostí od 5 mm/min (kevlar, lamináty) až do 400 m/min (papír, lepenky, pěny). [5, 15, 16]

U WJM technologie musíme vzít v potaz, že při obrábění zde nevzniká žádný jiný odpadní materiál kromě vody. Tento fakt je velice důležitý pro využití paprsku např. v potravinářském průmyslu.

Další výhody technologie vodního paprsku [4, 5, 16]:

- Možnost řezat tvarově složité plochy s malými tolerancemi
- Minimální tepelné ovlivnění obráběného povrchu
- Obrábění bez vzniku zbytkových pnutí v materiálu
- Možnost řezání pod vodou nebo ve výbušných prostředích
- Minimální ztráty prořezem
- Vysoká energetická účinnost ve srovnání s řezáním laserem

5.1.2 Nevýhody vodního paprsku

Nevýhody technologie vodního paprsku se týkají hlavně jejího pracovního média – vody. Při obrábění vodním paprskem musíme počítat s tím, že se s ním obráběný materiál dostane do kontaktu. Kovové materiály je proto nutno vhodně ošetřit a u nasákavých materiálů po procesu provést vysušení. U některých materiálů může vyvolat kontakt s vodou změnu barvy či jiné nežádoucí následky. Se zmíněnými nevýhodami je nutno při samotném procesu počítat a případně vykonat kroky k odstranění jejich následků. [16]

Jelikož rychlost vodního paprsku dosahuje v některých případech i trojnásobku rychlosti zvuku, je nutno počítat se zvýšeným hlukem. Pro snížení hladiny hluku slouží součást zařízení zvaná lapač vody. Lapač slouží především pro absorbování energie dopadu vodního paprsku. I přes opatření dosahuje hladina hluku při řezání až 120 dB. Hluk o hodnotě 120 dB již může trvale poškodit lidský sluch, tudíž je nutné si ho při práci s přístrojem chránit. [16]

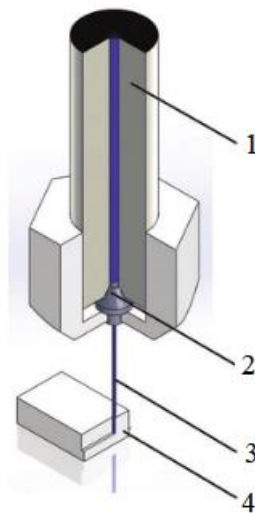
Jistou nevýhodou může být také cena zařízení pro tvorbu vodního paprsku. Při pořízení základního systému od společnosti FLOW se jedná o přibližně 5 000 000 Kč (MACH 100). [13]

5.2 Metoda WJM – Water Jet Machining

Jedná se o základní metodu při dělení vodním paprskem. U metody WJM nejsou přidávány žádné minerální ani jiné druhy abraziva do vodního paprsku. Úběr materiálu je zde realizován

mechanickým účinkem při dopadu úzkého proudu vodního paprsku na povrch obráběného materiálu. Dopadající paprsek má vysokou rychlost a kinetickou energii, čímž je schopen proniknout skrze materiál a odebírat jeho částice. Čirý vodní paprsek s absencí abraziva nedosahuje takového řezného efektu jako skupina abrazivních paprsků. Z tohoto důvodu je WJM metoda využívána hlavně pro dělení měkkých nekovových materiálů, jako jsou např. plasty, dřeva, překližky, pryže, sádkokartonky či lepenky nebo pěny. Kvůli nezávadnosti pracovní kapaliny lze metodu WJM použít také ve zdravotnickém nebo potravinářském průmyslu. [15]

Vznik paprsku je principiálně velmi jednoduchý. Voda je pod vysokým tlakem dopravena do řezací hlavy a zde protlačena skrz úzký otvor v trysce. Průměr výtokového otvoru v trysce se pohybuje od 0,075 do 0,4 mm, přičemž průměr paprsku, který je produkován se pohybuje mezi 0,1 – 1,5 mm. Průměr paprsku je ovlivněn průměrem výtokového otvoru v trysce, stejně tak jako šířka výsledného řezu, která je přibližně o 0,3 mm širší než průměr výtokového otvoru. Tryska je obvykle vyrobena z velmi pevných materiálů, jako např. ze safíru, syntetického diamantu či slinutého karbidu. Řezací hlava pro WJM metodu se oproti řezací hlavě pro abrazivní metody liší v absenci mísící komůrky (viz. obr. 2). [4, 15]



Obrázek 2 – Schéma WJM řezací hlavy [17]

1 - Přívod vysokotlaké kapaliny; 2 - Tryska; 3 - Vysokorychlostní paprsek; 4 - Obráběný materiál

Pracovní tlak vody může u WJM metody dosahovat až 620 MPa, kdy výsledný paprsek dosahuje rychlosti přes 900 m/s. Pracovní čerpadlo, které umožňuje vytvořit daný tlak, je schopno dodat 2-7 l/min pracovní kapaliny do řezací hlavy. Kontrola tlaku probíhá skrze

senzory, které zvládají odstavit čerpadlo do 30 milisekund v případě, že nastane problém např. s potrubím. [5, 15, 18]

5.3 Metody s abrazivem

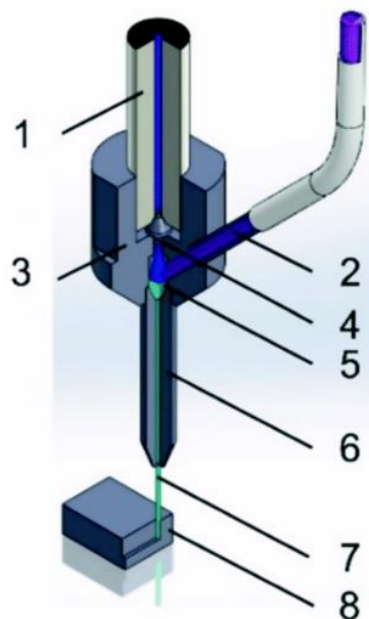
U abrazivních metod je do čirého vodního paprsku přiměšováno syntetické nebo minerální abrazivo. Tyto abraziva zvyšují řeznou účinnost paprsku a umožňují použití technologie pro řezání kovových či jiných pevných materiálů.

Odebírání materiálu abrazivním vodním paprskem je erozivní proces, kdy se využívá vysokorychlostní paprsek vody pro urychlení abrazivních částic, které slouží jako řezný nástroj. Erozivní síla u abrazivních vodních paprsků bývá až stokrát větší než erozivní síla u paprsků čistě vodních. Při nárazu abrazivních částic na povrch obrobku dochází k objemovému odstraňování částic, které jsou poté odnášeny proudem do lapače vody. [14]

Na rozdíl od metody WJM, zde vzniká jako odpadní proces obrábění použité abrazivo. Kvůli tomu se abrazivní metody nehodí pro práci v potravinářském a lékařském průmyslu (výjimkou je nová technologie IJM, viz. níže).

5.3.1 Technologie AWJM – Abrasive Water Jet Machining

AWJ neboli Abrasive Water Jet je nejvíce využívaná abrazivní metoda vodního paprsku. AWJ technologie využívá systém přímého přívodu abraziva do vodního paprsku. K přimísení abraziva dochází uvnitř řezací hlavy v části zvané „směšovací komora“ (obr. 3). Abrazivo je do směšovací komory přiváděno ze zásobníku a následně je strháváno a urychlováno vysokorychlostním vodním paprskem. Při procesu strhávání vzniká ve směšovací komoře podtlak, který napomáhá při dalším pohybu abrazivních částic směrem k paprsku do zaostřovací trubice. Obsažené abrazivo zvětšuje průměr paprsku (oproti WJM) na 1,2 – 2,5 mm. Zaostřovací trubice, někdy nazývána fokusační trubice nebo abrazivní tryska, slouží k usměrnění abrazivních částic, tak aby sdílely směr s vodním paprskem. Usměrněný vysokorychlostní tok abraziva a vody po průchodu zaostřovací trubicí dopadá na povrch obráběného materiálu. [4, 15]



Obrázek 3 – Schéma AWJ řezací hlavy s bočním přívodem abraziva [17]

1 - Přívod vysokotlaké kapaliny; 2 - Přívod abraziva; 3 - Tělo řezací hlavy; 4 - Tryska; 5 – Směšovací komora;
6 - Zaostřovací trubice; 7 - Abrazivní vodní paprsek; 8 - Obráběný materiál

Při výběru abraziva je nutno kontrolovat, zda je rozměr zrn menší než průměr otvoru v zaostřovací trubici. Pokud by byla zrna větší, hrozilo by ucpání trubice. Pro plynulý chod stroje se doporučuje, aby průměr otvoru v trubici byl alespoň pětkrát větší než průměrná velikost zrn. [15]

Pracovní tlak vody se u AWJ metody pohybuje v rozmezí 300–500 MPa s hmotnostním tokem abraziva kolem 1 kg/min. [4]

5.3.2 Technologie ASJ – Abrasive Slurry Jet

ASJ modifikace je nejpodobnější AWJ technologii, kdy jediný rozdíl mezi jejich mechanismy je v přivádění abraziva do vodního paprsku. ASJ technologie neboli systém s přímým vstřikováním brusiva přivádí do trysky již suspenzi abraziva a vody, která je před tím namísena v tlakové nádobě. Skutečnost, že abrazivo není do proudu vměšováno až v mísící komůrce řezací hlavy, umožňuje technologii ASJ použití trysky kompaktnějších rozměrů a vytvoření paprsku s menším průměrem. [4]

ASJ využívá pracovních tlaků až 400 MPa, kdy průtok suspenze dosahuje až 20 kg/min. Pro pevnou část suspenze jsou nejčastěji využívána velmi jemná brusiva. Jemná abraziva se ovšem špatně mísí s vodou tudíž je nutné zvýšit tlak vody pro vytvoření správné suspenze.

Pokud je abrazivo správně vmíseno do vody, metoda ASJ dosahuje lepší kvality opracovaného povrchu než při užití AWJ technologie. To je způsobeno vyšším obsahem abraziva ve vytvářeném paprsku, kterého není schopna technologie AWJ dosáhnout. [14]

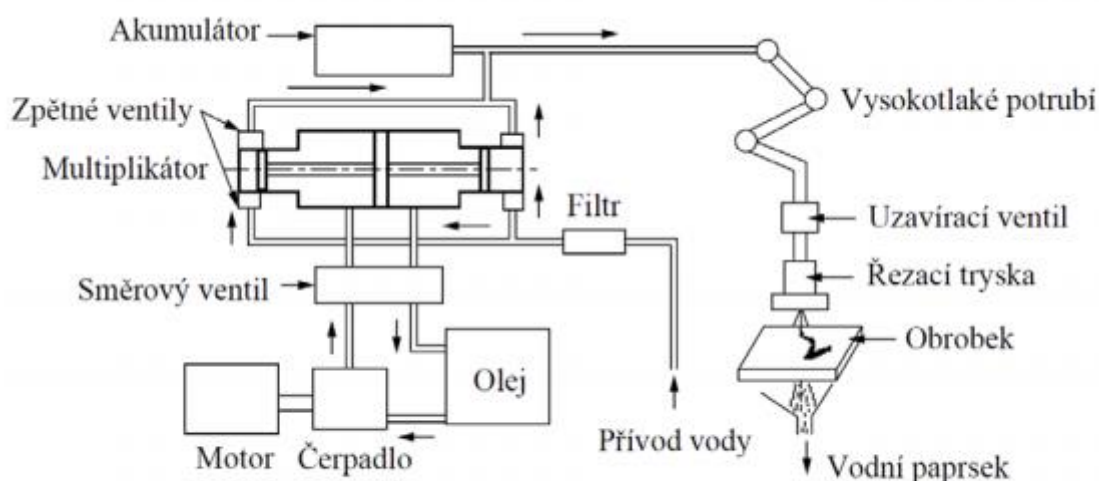
Hlavní výhodou ASJ metody je vyšší obsah abraziva ve vytvářeném paprsku spolu s vyšší účinností, než je tomu u technologie AWJ. Další výhodou je možnost implementace užší trysky, a tudíž produkování tenčího paprsku. Nevýhoda ASJ metody spočívá ve větším opotřebením vnitřních ploch součástí, jelikož suspenze abraziva a vody musí pod vysokým tlakem projít celým zařízením. [4]

5.3.3 Technologie IJM – Ice Jet Machining

Ice jet technologie, také známá jako Ice abrasive water jet (IAWJ) je nová technologie, která je momentálně ve fázi vývoje. Technologie využívá ledové částice vody namísto standardního minerálního abraziva. Cílem IAWJ modifikace je rozšířit možnosti využití čistého vodního paprsku, jehož hlavní výhodou je, že ledové částice po procesu dělení roztají a odpadní produkt je pouze voda. S možností využití ledu jako abraziva je spojeno snížení nákladů na abrazivo i když tento fakt je kompenzován nižší účinností řezného procesu. Bezodpadový proces dělení umožňuje využití technologie např. v potravinářském nebo lékařském průmyslu. [19]

6 Zařízení vodního paprsku

Nejdůležitější prvky zařízení jsou zobrazeny na obr. 4, jedná se o hydraulické čerpadlo, akumulátor, multiplikátor, vysokotlaké potrubí, uzavírací ventil, řezací hlava s tryskou, lapač vody a postupy pro nezbytnou úpravu vody. Zařízení jsou v současné době doplněna o řídicí stanici v podobě počítače, kterým se ovládá chod vodního paprsku a X-Y souřadnicový systém. [20]



Obrázek 4 – Schéma zobrazující zařízení vodního paprsku (WJM systém) [20]

6.1 Generování vysokotlaké vody

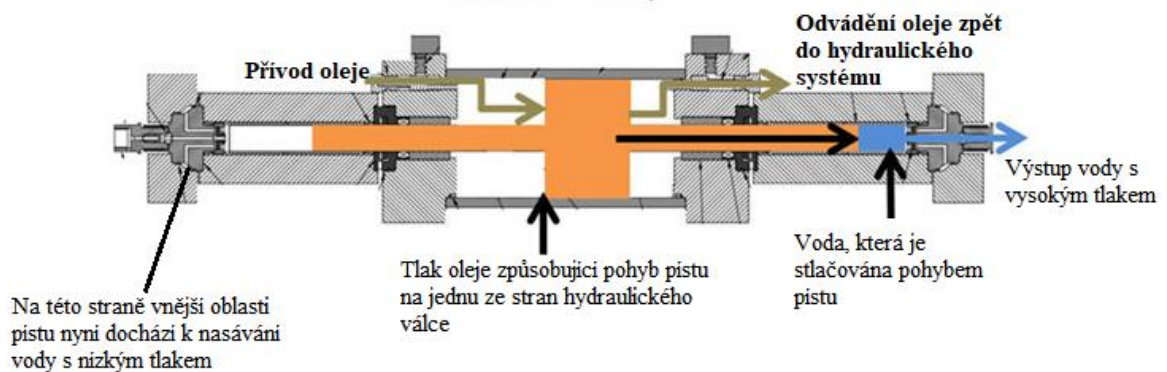
Generátor vysokotlaké vody slouží pro stlačení vody a její nepřetržité pumpování do řezací hlavy. Používané generátory můžeme rozdělit na dva základní typy: multiplikátorová lineární čerpadla a rotační čerpadla s přímým pohonem, někdy označovaná jako čerpadla triplexová. Čerpadla multiplikátorová se v zařízeních vodního paprsku využívají nejčastěji a jsou schopna generovat vodu pod tlakem 275-650 MPa, kdy pracují na principu tzv. multiplikačního efektu. Čerpadla triplexová generují vysoký tlak vody pomocí tří pístů na klikové hřídeli, kterou otáčí elektromotor. Triplexová čerpadla zvládnou generovat vodu pod tlakem až 415 MPa. [4, 13]

6.2 Multiplikátor

Multiplikátor je součástí systému, která se stará o generování vysokotlaké vody. Míra tohoto zvýšení pak závisí na poměru dvou pracovních ploch vzájemně propojených pístů. Princip multiplikátoru spočívá v převedení tlaku hydraulické kapaliny na vysoký tlak vody. [4, 13]

Multiplikátor pracuje se dvěma okruhy, kdy první je nízkotlaký a zde se olej přivádí na plochy vnitřní strany pístu. Druhý okruh obsahuje vodu a přivádí jí na plochy vnější strany pístu. Olej je rozváděcím systémem přiváděn na jednu z ploch ve vnitřní oblasti pístu, píst se tedy posouvá jedním směrem, dokud nesepe nekoncový spínač, který se nachází na obou koncích hydraulického válce. Sepnutý spínač dá signál rozváděcímu systému, aby začal pumpovat olej na druhou plochu vnitřního pístu a píst se tedy začne posouvat opačným směrem, dokud opět nesepe nekoncový spínač. Při pohybu pístu jedním směrem, druhý okruh na jedné straně nasává vodu a na druhé ji vytlačuje (obr. 5). [13, 20]

Při vytlačování kapaliny do systému hraje velkou roli stlačitelnost vody. Stlačitelnost má za následek rázové vlny, které způsobují nestabilní dodávání vody do oběhu. Z tohoto důvodu se za multiplikátor běžně umísťuje akumulátor, který má za úkol kolísání tlaku vody vyrovnat. [21]



Obrázek 5 – Schéma multiplikátoru při pohybu pístu zleva doprava [21]

6.3 Akumulátor

Slouží pro udržení stálého toku vody o vysokém tlaku a rychlosti. Úkolem součásti je vyrovnání kolísajícího tlaku, který způsobuje pohyb pístu v multiplikátoru. Akumulátor má podobu válce, který je vyplněn natlakovanou vodou z multiplikátoru. Když v multiplikátoru nastane změna směru pohybu pístu a voda ještě není pumpována do systému kvůli její stlačitelnosti, nastává pokles tlaku v celém systému. Pokles tak musí vyrovnat voda nacházející se v akumulátoru a zajistit tak kontinuální tok bez skokového poklesu tlaku. V systému je umístěn přímo za multiplikátorem, což je zobrazeno na obr. 4. [4, 20, 21]

6.4 Vysokotlaké potrubí

Vysokotlaké potrubí se stará o přívod vysokotlaké vody do řezné hlavy. Celý systém potrubí se skládá z různých druhů armatur z nerezové oceli s průměry 6–14 mm. Potrubí musí být zároveň přizpůsobeno variabilním pohybům řezné hlavy. [20, 21]

6.5 Uzavírací ventil

Umožňuje zastavit přísun vody do řezací hlavy.

6.6 Řezací hlava

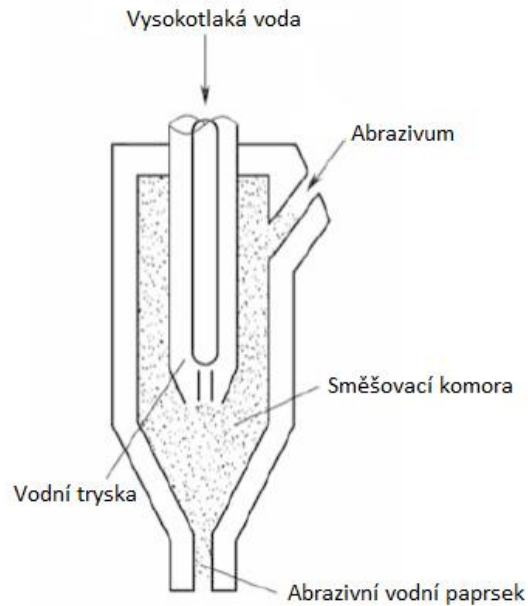
Řezací hlava je nejdůležitější komponenta zařízení sloužícího pro řezání vodním paprskem. Její hlavní funkcí je transformování vysokotlaké kapaliny na řezný nástroj v podobě úzkého vodního paprsku. Řezací hlavy zároveň určují výsledný typ vodního paprsku a mají největší vliv na kvalitu a přesnost výsledného řezu. [22]

Existuje mnoho typů řezacích hlav pro abrazivní vodní paprsky. Podle počtu vodních paprsků, vstupujících do mísicího procesu, můžeme řezací hlavy rozdělit na jednopaprskové nebo vícepaprskové. Podle směru vstupu abraziva můžeme řezací hlavy dělit na hlavy s bočním vstupem, vstupem středním nebo tangenciálním vstupem. [22]

6.6.1 Jednopaprskové řezací hlavy

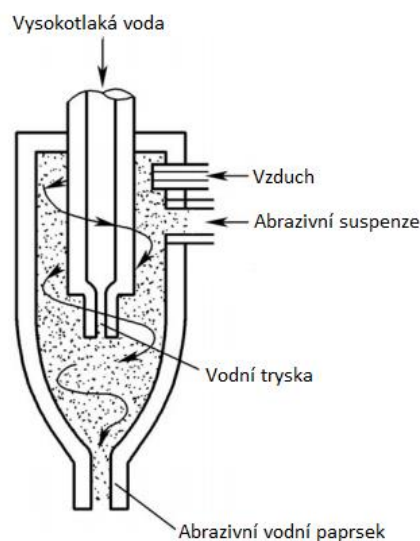
Jednopaprskový typ řezacích hlav je nejčastěji vyráběn s bočním (obr. 6) či tangenciálním vstupem (obr. 7). [22]

Řezací hlava s bočním vstupem abraziva je nejběžnější a nejčastěji používaná hlava u abrazivního vodního paprsku. Voda pod vysokým tlakem prochází vodní tryskou a mění se na vysokorychlostní vodní paprsek. Tento paprsek poté prochází směšovací komorou a vytváří v ní podtlak, který nasává abrazivo do směšovací komory, odkud je abrazivo strháváno a urychlováno vodním paprskem. Pracovní tlak vody se při použití řezací hlavy s bočním vstupem pohybuje mezi 300-500 MPa s hmotnostním tokem abraziva kolem 1 kg/min. K hlavním výhodám této řezací hlavy patří její jednoduchost a nízká výrobní cena. Nevýhodou je její nízká účinnost při vměšování abraziva do vodního paprsku. Řezací hlavu s bočním vstupem abraziva lze použít i pro WJM obrábění při uzavření přívodu abraziva. [4, 22]



Obrázek 6 – Řezací hlava s bočním přísunem abraziva [22]

Jednoprúdová řezací hlava s tangenciálním přívodem abraziva má tvar vřetene, kde vstup abraziva je umístěn podél tangenciálního směru směšovací komory spolu s paralelním přístupem vzduchu. Abrazivní suspenze je vpravována pomocí čerpadla a spolu se vzduchem současně vstupují do směšovací komory podél tangenciálního směru komory. Po vstupu do komory složky rotují podél směšovací komory a míří směrem dolu podél vodního paprsku. Během této rotace dochází ke vmísení abrazivní suspenze do paprsku. Tento způsob vměšování abraziva do vodního paprsku nabízí vyšší účinnost mísení, než tomu bylo u bočního vstupu abraziva. [22]



Obrázek 7 – Řezací hlava s tangenciálním přísunem abraziva [22]

6.6.2 Vícepaprskové řezací hlavy

Podkapitola se zaměřuje na dva nejčastěji využívané typy vícepaprskových hlav.

Vícepaprskové řezací hlavy s bočním vstupem dělíme na paralelní a konvergentní, podle uspořádání vodních trysek. U paralelní řezací hlavy jsou vodní trysky uspořádány paralelně v kruhu v horní části řezací hlavy. Konvergentní uspořádání oproti tomu má vodní trysky umístěné blíže středu řezací hlavy což umožňuje generování užšího abrazivního paprsku. [22]

Vícepaprsková řezací hlava se vstupem abraziva středem směšovací komory, využívá konvergovaných vodních paprsků po stranách řezací hlavy pro strhávání a mísení s abrazivem. Tento typ řezací hlavy dosahuje lepší mísící efektivity a zároveň nižšího opotřebení směšovací komory. [4, 22]

6.6.3 Vodní tryska

Nejdůležitější částí samotné řezací hlavy je tryska nacházející se přímo v řezací hlavě. Tryska se stará o převod vysokotlaké kapaliny, přiváděné potrubím do řezné hlavy, na úzký vodní paprsek. Paprsek je tvořen při průchodu vysokotlaké kapaliny skrz výtokový otvor v trysce, jehož průměr se pohybuje od 0,075 mm. [20, 21]

Trysky se nejčastěji vyrábí z korozi-vzdorné oceli, keramiky, slinutého karbidu nebo safíru či syntetického diamantu. Poslední dva materiály slouží pro výrobu trysek určených pro vysoké tlaky. Safírové trysky dosahují průměrné životnosti 200 řezacích hodin a v současné době jsou pomalu nahrazovány tryskami diamantovými, které mají pracovní životnost až 10krát vyšší. Tryska je za svůj životní cyklus několikrát pročištěna, hlavně od usazujících se nečistot a minerálních částic obsažených ve vodě. Počet čistících cyklů je ovlivněn hlavně tvrdostí materiálu, kdy trysky z měkčích materiálů mohou po pročištění produkovat nekoherentní vodní paprsek. [20, 23]

6.7 Lapač vody

Jedná se o nádobu sloužící pro sběr odebraného materiálu a jiných částic unášených vodním paprskem po průchodu obrobkem. Lapač slouží také pro tlumení hluku paprsku, jehož pracovní hladina se pohybuje okolo 120 dB. Konstrukčně se jedná o nádobu hlubokou přibližně 600 mm,

příčemž hloubka lapače musí být taková, aby došlo ke zlomení paprsku ještě před tím, než dopadne na dno. [20, 24]

6.8 Úprava vody

Kvalita používané vody přímo ovlivňuje životnost všech podstatných součástí systému vodního paprsku, nejvíce pak trysku, řezací hlavu a hydraulické čerpadlo. Systém pracuje s vysokým tlakem vody, díky čemuž jsou součásti náchylné na účinky sloučenin ve vodě, které mohou vyvolat předčasnou korozi vedoucí až k poničení dané součásti. Nežádoucí příměsi a minerály obsažené ve vodě mohou také zanášet výtokový otvor u samotné trysky, následkem toho dochází ke zhoršení kvality řezného nástroje či nutnosti trysku vyčistit. Pro odstranění nežádoucích složek z vody slouží procesy filtrace, deionizace, vodního změkčení a reverzní osmózy. [4, 25]

6.8.1 Filtrace

Filtrace probíhá pomocí filtračních jednotek, které slouží pro oddělení pevných částic do velikosti 1,2 až 0,5 μm . Filtry dělíme podle pracovního tlaku používané vody. Pro nízkotlaké filtrace slouží filtry ze syntetických vláken, zatímco pro filtrace vysokotlaké používáme filtry kovové. [25, 26]

6.8.2 Deionizace

Deionizace neboli iontová výměna je proces, při kterém jsou odstraňovány ionty z vody za pomoci syntetických pryskyřic neboli iontoměničů. Iontoměniče dělíme podle typu iontů, které odstraňují na katexy (odstraňují kationty) a anexy (odstraňují anionty). Voda prochází postupně dvěma nádrži, kdy každá z nich obsahuje jeden ze zmíněných iontoměničů. [24, 27, 28]

6.8.3 Změkčování vody

Tvrdość vody je vlastnost vyjadřující množství rozpuštěných nerostů ve vodě. Postup odstranění těchto nežádoucích solí je podobný jako u procesu deionizace. Voda prochází přes iontoměnič typu katex v sodném cyklu, který odstraní nežádoucí kationty vápníku a hořčíku. Pokud by byl proces změkčování vody vynechán, hrozil by vznik vodního kamene, který by mohl nenávratně poškodit zařízení vodního paprsku. [25, 27]

6.8.4 Reverzní osmóza

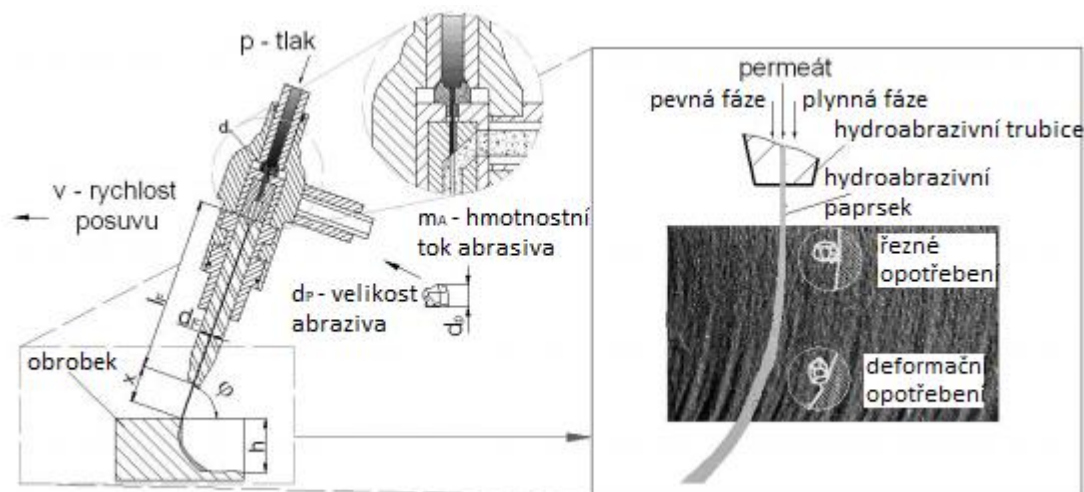
Úprava vody procesem reverzní osmózy patří mezi nejpoužívanější a nejúčinnější. Jedná se o fyzikální úpravu vody bez použití chemikálií. Tento proces vychází z přírodního jevu osmózy využívajícího polopropustnou membránu pro filtraci vody. Samotný proces je velmi složitý a pro jeho funkčnost je potřeba provést předúpravy filtrované vody, mezi které patří filtrace od mechanických částic a procesy pro změkčení vody. [25, 27, 28]

7 Vlivy hlavních faktorů na výsledný řez

Při dělení materiálu vodním abrazivním paprskem vzniká na stěnách obrobku reliéf se dvěma dobře rozeznatelnými oblastmi. V oblasti horní převládá opotřebení řezné, zatím co v oblasti spodní opotřebení deformační. Oblast horní (hladkou oblast) můžeme charakterizovat jako oblast homogenní s mírně izotropní strukturou a s náhodným profilem. Oblasti se od sebe liší hlavně v drsnosti jejich povrchu. Drsnost řezné plochy charakterizujeme dvěma hlavními parametry [29, 30]:

- Průměrnou aritmetickou hodnotou drsnosti R_a – aritmetická střední hodnota všech hodnot profilu drsnosti
- Průměrnou kvadratickou hodnotou drsnosti R_q – kvadratická střední hodnota všech hodnot profilu drsnosti

Parametry R_a a R_q se u horní hladké oblasti vyznačují jen slabou závislostí na řezné rychlosti a hloubce řezu. U spodní (rýhované) oblasti však tyto parametry rychle rostou s narůstající hloubkou řezu a řeznou rychlostí. Poměr oblastí je dán faktory, které vstupují do procesu dělení materiálu, faktory jsou blíže zobrazeny na obr. 8. [4, 29]



Obrázek 8 – AWJ faktory ovlivňující kvalitu povrchu děleného materiálu [29]

Vstupující faktory ovšem neovlivňují pouze výslednou kvalitu řezné plochy, ale i efektivitu s jakou je během procesu dělení, materiál odebírán. Podle ovlivněného aspektu dělíme vstupující faktory na přímé a nepřímé. Jednotlivé AWJ faktory během procesu dělení nepůsobí

samostatně, ale společně ve vzájemné interakci. Účinky AWJ faktorů navíc nejsou konstantní, ale mění se v závislosti na hloubce řezu a změnách ostatních parametrů. [29]

Obr. 9 zachycuje povrch řezné plochy se zřetelným rozdílem mezi jednotlivými oblastmi. Paprsek má při průchodu horní oblastí velké množství kinetické energie, proto je zde povrch řezu relativně hladký. Při průchodu materiálem však paprsek energii ztrácí a vychyluje se. Ztráta energie má za následek vznik nerovností (vrásek) ve spodní oblasti řezné plochy. Vznik nerovností ve spodní oblasti nejvíce závisí na řezné rychlosti, hmotnostním toku abraziva a na tloušťce řezaného materiálu. [31]



Obrázek 9 – Kvalita řezné plochy (ocel 11 523) [31]

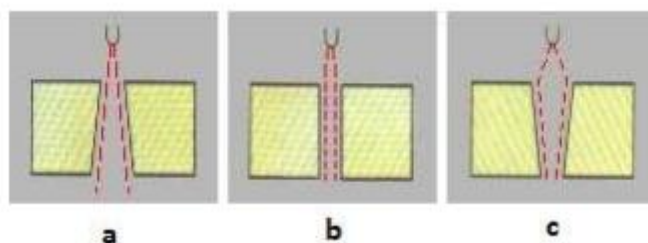
Parametry řezání: tloušťka vzorku = 50 mm, $v = 20$ mm/min, $m_a = 211,5$ g/min, použité abrazivo – granát MESH 80

7.1 Rychlost posuvu řezací hlavy

Kvalita povrchu řezné plochy je silně závislá na rychlosti řezání, tudíž při zvyšující se rychlosti posuvu řezací hlavy klesá kvalita povrchu řezné plochy. Hlavní pokles kvality pak můžeme sledovat v oblasti, kde paprsek opouští materiál (tj. výstupní oblast). Poklesem kvality je myšlen vznik rýh na řezných plochách neboli proces nazývaný striace. [4, 22, 29]

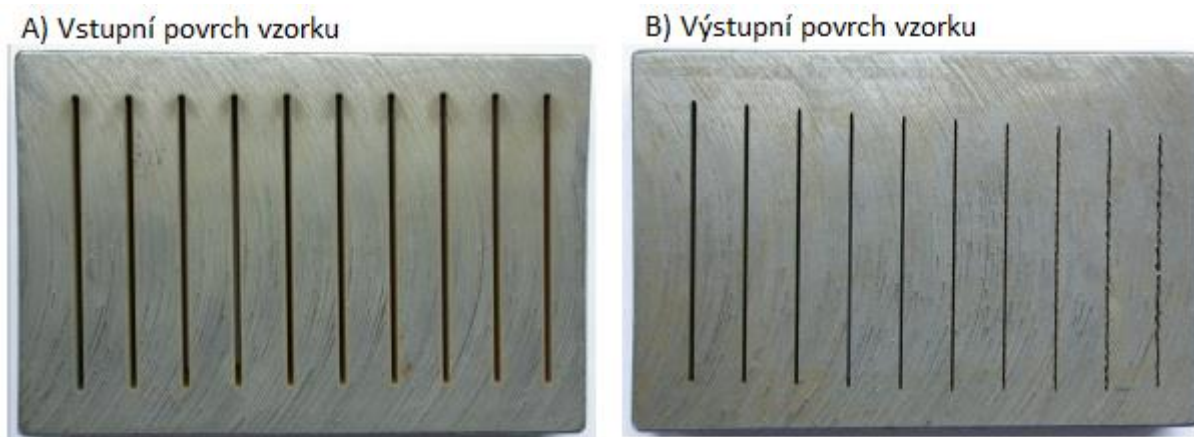
Dalším typem nepřesnosti, která vzniká v závislosti na rychlosti posuvu řezací hlavy, jsou úkosy hran obráběného materiálu. Tyto úkosy mohou vzniknout jak v oblasti horní, tak ve spodní oblasti – výstupní. Typy těchto úkosů jsou detailně zobrazeny na obr. 10. Úkos typu A vznikne, pokud je posuv řezací hlavy příliš pomalý, nebo pokud je řezaný materiál příliš měkký. Stav B nastane při zvolení vhodné rychlosti řezu spolu s vhodnou tloušťkou materiálu, jinými slovy optimální stav bez vzniku úkosu. Poslední typ vzniká v případě příliš rychlého pohybu

řezací hlavy nebo při řezání velmi odolného materiálu. Stav B je v reálném procesu řezání nedosažitelný, i když vhodným nastavením řezných parametrů je možno se k tomuto stavu přiblížit, nikdy nelze dosáhnout stavu kolmosti řezné plochy jako je tomu na obr. 10 typ b. [22, 29, 32]



Obrázek 10 – Typy vznikajících úkosů [22]

Při reálném procesu vzniká nejčastěji řez, jehož šířka se směrem k výstupní oblasti snižuje a řez tak nabývá podoby písmena „V“ (obr. 10 typ c). Obr. 11 ukazuje vzorek s 10 řezy, každý provedený s jinou rychlostí posuvu řezné hlavy. Řezná rychlost byla postupně zvyšována zleva doprava. Na vstupním povrchu jsou řezy, bez ohledu na řeznou rychlost, velmi podobné (obr. 11 A). Na výstupním povrchu se však řezy v šířce významně liší (obr. 11 B). Je zde zřejmé, že zvýšení řezné rychlosti vede ke snížení šířky řezu, které se projevuje hlavně na výstupním povrchu. [31]



Obrázek 11 – Rozdíl mezi povrchy vzorku při změně rychlosti posuvu řezací hlavy [31]

Parametry řezání: materiál vzorku – ocel 11 523, tloušťka vzorku – 5 mm, použité abrazivo – granát MESH 80, $v = 50\text{--}425 \text{ mm/min}$

7.2 Vliv abraziva

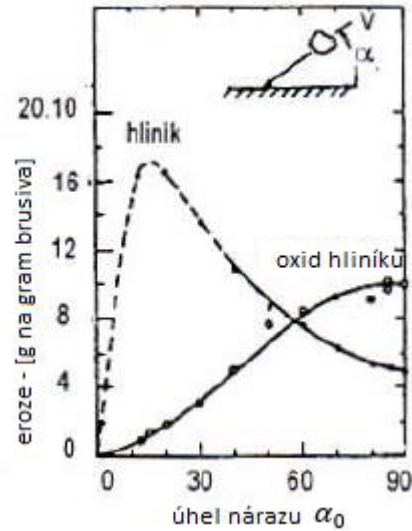
Jak již bylo v této práci několikrát zmíněno, úběr materiálu je u technologie abrazivního paprsku výsledek opotřebení vlivem eroze. Erozní procesem je zde myšleno narážení pevných částic na povrch pevného materiálu. Účinnost tohoto procesu závisí na dvou hlavních parametrech – úhlu nárazu částice na povrch materiálu α_0 a na pevnostních charakteristikách materiálu. [4]

Tab. 2 popisuje převládající mechanismus erozivního opotřebení pro tvárné a křehké materiály vlivem dopadu abrazivních částic při kritických úhlech. Obr. 12 ukazuje vliv různých hodnot úhlu nárazu abrazivní částice na povrch materiálu tvárného (hliník) a materiálu křehkého (oxid hliníku – keramika). [4]

Materiál	Úhel nárazu α		
	$< 20^\circ$	45°	90°
Tvárný	Maximální řezné opotřebení	Smišený režim	Maximální deformační opotřebení
Křehký	Velmi malá eroze	Střední eroze	Maximální eroze

Tabulka 2 – Reakce materiálů na různé úhly nárazu abraziva [4]

Podle Hashish [32] se oblast ovlivněná nárazem částic vodního paprsku pod úhlem α dělí na dvě části, podle mechanismu oddělování materiálu, který v dané oblasti převládá. Úhel nárazu α se v procesu řezání vodním paprskem definuje jako úhel sklonu mezi vektorem rychlosti vodního paprsku a normálou vektoru podélné rychlosti posuvu. Pokud je úhel nárazu částic α malý, dochází v dané oblasti k řeznému opotřebení materiálu. Abrazivní částice v oblasti řezného opotřebení naráží na materiál a vrývá do něj svou trajektorii. Když částice ztratí kinetickou energii, odrazí se a vyjde ze záběru. Aby docházelo k řeznému opotřebení materiálu, musí být úhel nárazu částic menší nebo roven kritickému úhlu α_0 . Jak vyplývá z tab. 2, k erozivnímu procesu u tvárných materiálů dochází při nárazu částic pod úhlem 20° - 30° a v případě křehkých materiálů nastává maximální eroze při nárazu částic pod úhlem 90° . [4, 32]

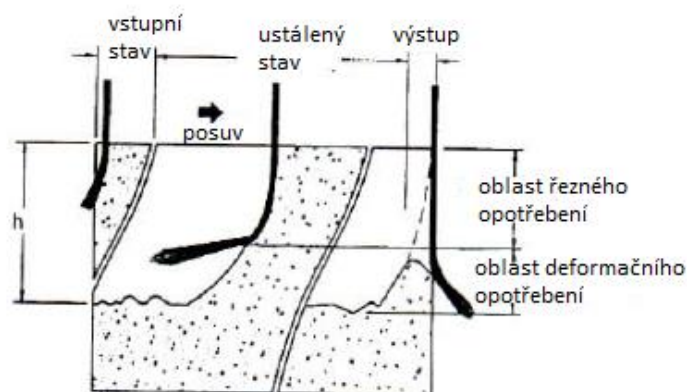


Obrázek 12 – Erozní charakteristika tvárného a křehkého materiálu [4]

Parametry řezání: $v_a = 152 \text{ m/s}$, použité abrazivo: SiC MESH 120

Opotřebení deformací nastává v případě velkého úhlu nárazu částic. Oblast, kde k tomuto jevu dochází se nazývá oblast deformačního opotřebení. Nadměrná deformace dopadajících částic způsobuje deformační zpevnění materiálu v této oblasti. V oblastech s deformačně zpevněným materiálem následně dochází k jeho vylamování vlivem nárazu dalších částic vodního paprsku. U křehkých materiálů dochází v oblasti deformačního opotřebení ke tvorbě mikrotrhlin, které se rychle šíří. Šíření trhlin způsobuje vylamování částic materiálu, které jsou následně odplaveny vodním paprskem. [4]

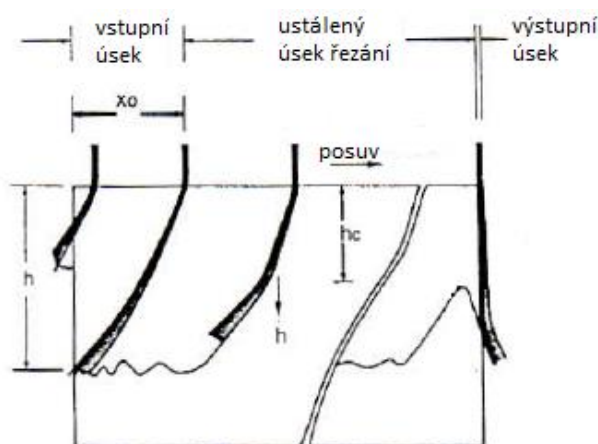
Model podle Hashish [32], který popisuje jednotlivé oblasti vznikající při řezání abrazivním vodním paprskem ukazuje obr. 13.



Obrázek 13 – Oblasti vznikající při řezání abrazivním vodním paprskem [4, 32]

7.2.1 Úseky řezání

Z Hashishova modelu na obr. 13 je zřejmé že, řezný proces můžeme rozdělit na 3 základní úseky, obr. 14. Prvním úsekem je vstupní stav x_0 probíhající do doby, než vodní paprsek dosáhne maximální hloubky řezu h . Po dosažení maximální hloubky řezu nastává v horní části řezu h_c (oblasti řezného opotřebení) ustálený proces, kde je rychlost úběru materiálu rovna rychlosti posuvu řezací hlavy. Pod hranicí h_c (oblast deformačního opotřebení) dochází k úběru materiálu nárazově, což má za následek vznik zvlnění na dně řezu. V oblasti deformačního opotřebení zároveň dochází k postupnému vychylování vodního paprsku vlivem ztráty jeho kinetické energie. Paprsek se postupně zaobljuje, čímž se mění úhel nárazu jeho částic. Poslední úsek řezného procesu nastává ve chvíli, kdy paprsek vlivem posuvu opouští řezaný materiál. Vlivem výstupu paprsku vzniká na konci řezu v oblasti deformačního opotřebení část neodřezaného materiálu trojúhelníkového tvaru. [4, 32]



Obrázek 14 – Úseky řezání vodním abrazivním paprskem [4, 32]

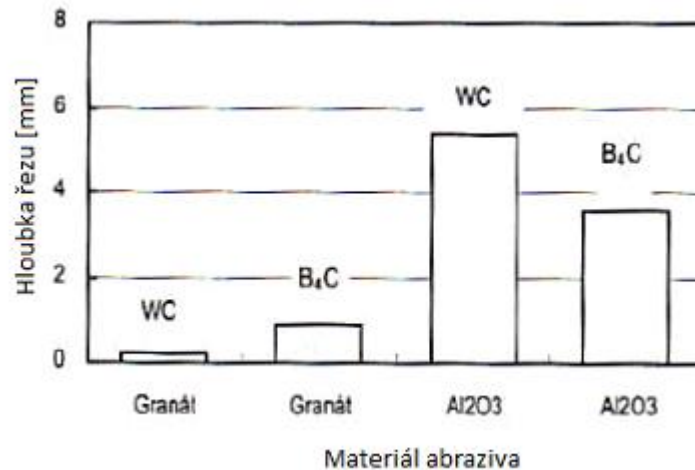
Skutečnost, že úběr materiálu probíhá ustáleně pouze do hloubky h_c , klade na řezání vodním paprskem podmínku, aby byl rozměr h_c větší než šířka řezaného materiálu. Toho se dá dosáhnout vhodným sklonem vodního paprsku. Úhel sklonu označujeme jako úhel řezání. [4]

7.3 Vlastnosti abraziva ovlivňující proces řezání

Jednotlivé druhy abraziva se od sebe liší hlavně svou tvrdostí a zrnitostí, kdy oba parametry mají přímý vliv na výslednou hloubku řezu.

Obr. 15 porovnává dosaženou hloubku řezu u dvou různě tvrdých materiálů, při použití dvou různě tvrdých abraziv. V experimentu jsou použita dvě různě tvrdá abraziva. První abrazivum

je granát zrnitosti 80, jehož tvrdost podle Mohse je přibližně 6,5 – 7 stupňů. Druhé, tvrdší abrazivum je oxid hlinitý (Al_2O_3) s tvrdostí 9 na Mohsově stupnici. Materiály obrobků jsou karbid wolframu (WC, tvrdost podle Mohse - 8,5) a karbid boru (B_4C , tvrdost podle Mohse - 9,34). [4, 32]

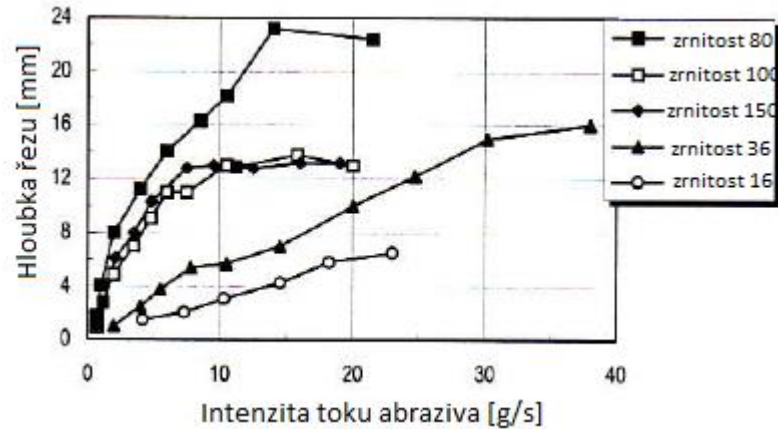


Obrázek 15 – Závislost tvrdosti použitého abraziva na dosahované hloubce řezu [4, 32]

Parametry řezání: $d_n = 0,457$ mm, $d_m = 1,14$ mm, $l_m = 50$ mm, $p = 311$ MPa, $m_a = 762$ g/min, $u = 1,693$ mm/s

Z experimentu vyplývá, že použití tvrdšího abraziva má za následek větší hloubku řezu. Experiment dále ukazuje, že při použití měkčího abraziva (granátu), dosahujeme větší hloubky řezu u tvrdšího z dvojice obrobků. Při použití oxidu hlinitého jako abraziva je tomu naopak. Tento trend ukazuje, že pokud je překročena určitá hranice poměru tvrdosti mezi materiálem obrobku a materiálem použitého abraziva, je významně ovlivněna intenzita úběru materiálu. [4, 32]

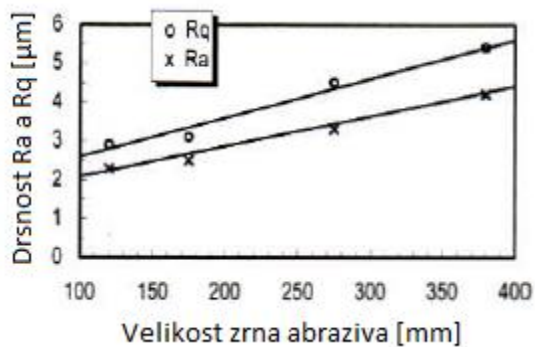
Zrnitost je považována za hlavní parametr u abraziva. Hodnota zrnitosti je udávána v americké jednotce MESH. Jednotka MESH vyjadřuje počet ok síta na ploše čtverečního palce, čím vyšší je číslo MESH, tím vyšší je výsledná jemnost síta. Nejpoužívanější hodnoty zrnitosti spadají do rozmezí MESH 80÷120 což značí, že střední velikost zrn se bude pohybovat mezi 125÷180 μ m. Zrnitost použitého brusiva je ovlivněna vlastnostmi řezaného materiálu. Vliv zrnitosti abraziva na hloubku řezu ukazuje obr. 16. Graf ukazuje, že pro dělení nerezové oceli (v experimentu použita nerezová ocel AISI 304) je nejvýhodnější použít abrazivum se střední zrnitostí. [4, 32, 33]



Obrázek 16 – Závislost hloubky řezu na zrnitosti abraziva [4, 32]

Parametry řezání: $d_n = 0,457 \text{ mm}$, $p = 221 \text{ MPa}$, $u = 3,39 \text{ mm/s}$, použité abrazivo: granát

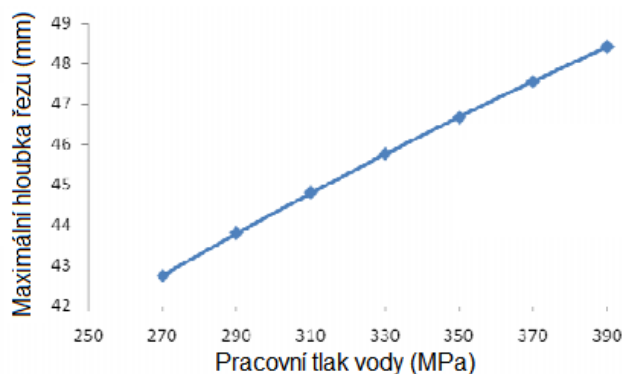
Účinek zrnitosti abraziva na drsnost řezné plochy se vyznačuje lineárním průběhem (obr. 17). Při použití jemného abraziva (MESH 150+) dosahují řezné povrchy lepších parametrů R_a a R_q , proto je jemný typ abraziva upřednostňován pro jemné opracování povrchu nebo pro jemné řezy. Nevýhodou, při použití jemných abraziv, je fakt, že výsledný paprsek nedosahuje takových hodnot kinetické energie, jako je tomu při použití abraziv s hrubším charakterem. Nižší kinetická energie paprsku zpomaluje erozivní proces a tím i snižuje rychlost řezání. [4, 32]



Obrázek 17 – Změna drsnosti řezné plochy v závislosti na změně velikosti zrn abraziva [4]

7.4 Pracovní tlak vody

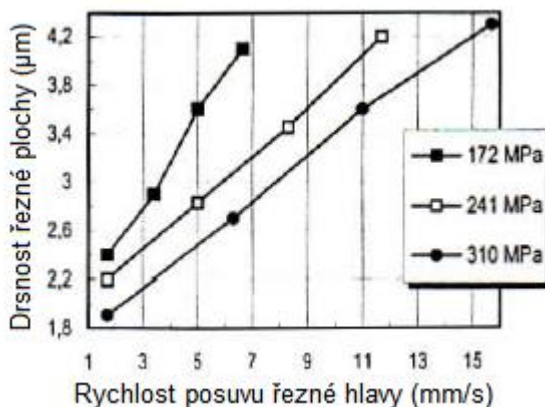
Vliv pracovního tlaku vody na maximální hloubku řezu je zobrazen na obr. 18. Graf ukazuje, že při zvyšování vodního tlaku roste i maximální hloubka řezu. Při rostoucím tlaku vody vodnímu paprsku roste kinetická energie, což vede k lepšímu průchodu skrze materiál. [34]



Obrázek 18 – Vliv pracovního tlaku vody na maximální hloubku řezu [34]

Parametry řezání: $m_a = 480 \text{ g/min}$, $u = 0,42 \text{ mm/s}$, $s = 5 \text{ mm}$

Při zvyšování tlaku vody se snižuje drsnost povrchu řezné plochy (obr. 19) a zároveň mizí i vlnitost řezné plochy, která je charakteristická pro řezání materiálu vodním paprskem. [4, 34]



Obrázek 19 – Vliv pracovního tlaku vody na drsnost řezné plochy [4]

Parametry řezání: $m_a = 270 \text{ g/min}$, $d_n = 0,229 \text{ mm}$, $d_m = 0,762 \text{ mm}$, $l_m = 51 \text{ mm}$, použité abrazivo: granát MESH 100

Vyšší tlaky vody vytváří hladší řezné povrchy a zároveň zvyšují rychlost úběru materiálu i v oblastech deformačního opotřebení. [34]

Zvyšování tlaku vody sebou nese ale i jisté nedostatky. Jedním z nedostatků je snižování životnosti jednotlivých dílů, které jsou vyšším tlakem více namáhány a dochází tak k jejich častější výměně či větší četnosti servisních zásahů přerušující práci stroje. Nejvíce namáhané součásti jsou abrazivní trysky, které musí být na zvýšené tlaky konstruovány, což navyšuje celkové provozní náklady. [26]

8 Závěr

V první části jsou nejprve shrnuty konvenční a nekonvenční technologie využívané pro dělení kovových materiálů. Práce se dále věnuje jednotlivým nekonvenčním technologiím, jelikož do této skupiny spadá i technologie vodního paprsku. Nekonenční technologie jsou rozděleny podle principu, jakým dochází k úběru materiálu. Zároveň jsou zde popsány výhody a nevýhody nekonvenčních technologií ve srovnání s konvenčními postupy dělení materiálu.

Část druhá je zaměřena na detailnější popis funkce vodního paprsku, spolu se základním rozdělením technologie. Práce se věnuje historickému vývoji vodního paprsku, na který navazuje popis principu funkce technologie. Následně jsou vodní paprsky podle procesu přidávání abraziva do vodního proudu. Tato část práce je stěžejní pro pochopení zbytku práce.

Třetí část je věnována rozboru zařízení vodního paprsku, kdy každá podkapitola popisuje jednu z hlavních částí zařízení. Hlavní důraz je zde kladen na rozdělení řezacích hlav podle odlišné konstrukce.

Poslední část práce se nejprve zaměřuje na popis řezného procesu u kovových materiálů při použití vodního abrazivního paprsku. Následně jsou v části popsány vybrané parametry, které ovlivňují celkový řezný proces. Z práce vyplývá, že parametr nejvíce ovlivňující kvalitu řezné plochy je rychlost posuvu řezné hlavy. Pokud je posuv příliš rychlý, deformační oblast řezu bude znatelně zúžena a zároveň bude dosahovat mnohonásobně vyšších parametrů drsnosti oproti oblasti řezného opotřebení.

Abrazivní vodní paprsek se stává pořád častější alternativou pro dělení kovových materiálů při přechodu z konvenčních metod hlavně pro svoji univerzálnost, možnosti dělit velmi tvrdé materiály nebo pro minimální tepelné ovlivnění řezu. Průběh řezného procesu je řízen programem v počítači, díky čemuž lze řezat tvarově složité plochy s minimálními tolerancemi. Kritické je zde nastavení hlavních řezných parametrů, které je nezbytné pro optimální vlastnosti finálního řezu.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1]. BOUSTEAD, I.: Eco-profiles of the European Plastics Industry: Polypropylene (PP). PlasticsEurope [online]. [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/petb_31116f00-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf
- [2]. History of Waterjet Cutting: Evolution of Waterjet Cutting. Hydro-lazer.com [online]. 2017 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.hydro-lazer.com/blog/history-of-waterjet-cutting/>
- [3]. NOVOTNÝ, Josef a LANGER, Zdeněk.: Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980. s. 10. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:64c4c3c9-4ef5-4ff6-0742-b53d0cabe74e>
- [4]. MAŇKOVÁ, Ildikó.: Progresívne technologie. 1.vyd. Košice: Vienaľa, 2000. s. 275. ISBN 80-7099-430-4
- [5]. MÁDL, Jan.: Technologie obrábění. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02091-6.
- [6]. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Nekonvenční metody obrábění. 07, číslo 10. Praha: Vogel Publishing, 2007. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/casopis/2007-10>
- [7]. LIESHOUT, Laurensvan.: Electrochemical machining (ECM). Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_machining
- [8]. History of water jet cutting. Onestopsealing.co.uk [online]. 2015 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.onestopsealing.co.uk/water-jet-cutting/history-water-jet-cutting>
- [9]. A Quick History of Water Jet Cutting. Tmcwaterjet.co.uk [online]. 2017 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.tmcwaterjet.co.uk/news-blog/a-quick-history-of-water-jet-cutting/>
- [10]. The History of Waterjet Technology. H2ojet.com: News [online]. 2016 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://www.h2ojet.com/news/the-history-of-waterjet-technology>
- [11]. JET NEWS: In Memoriam - Dr. Norman Charles Franz. Wjta.org [online]. 2007 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf

- [12]. HAMILTON, Terrance.: Blog: A Brief History of the Waterjet. Techmoonwj.com [online]. 2014 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://techmoonwj.com/water-jet-history/>
- [13]. FLOW [online]. Kent, Washington: Flow International Corporation [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/>
- [14]. MADADNIA, Jafar, et al.: A Study of Cavitation Induced Surface Erosion in Abrasive Waterjet Cutting Systems. Advanced Materials Research [online]. 2008 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.53-54.357.pdf>
- [15]. PATHAK, Sunil.: Advanced Manufacturing Processes (AMPs): Water Jet Machining. Ocw.ump.edu.my [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: http://ocw.ump.edu.my/pluginfile.php/9956/mod_resource/content/1/Chapter-13.pdf?fbclid=IwAR1KwUOeoc3gGOsQPobAAHBHKtAIzIeVSvCb6yO3ex2dhJuNPjjEXmEQvAw
- [16]. Co je to řezání vodním paprskem? Rezeme-vodou.cz [online]. Ostrava: talpa-rpf, 2011 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.rezemevodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
- [17]. PEREC, Andrzej.: Article: Abrasive Suspension Water Jet Cutting ... Design. Researchgate.net [online]. 2016 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/profile/Andrzej-Perec/publication/305318343/figure/fig1/AS:383837570912256@1468525416708/Schematic-diagram-of-a-Water-Jet-cutting-and-b-Abrasive-Water-Jet-cutting-cAbrasive.png>
- [18]. NAMBIATH, Pradeep.: Pressure matters in abrasive waterjet cutting. Thefabricator.com [online]. 2016 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/waterjetcutting/pressure-matters-in-abrasive-waterjet-cutting>
- [19]. JERMAN, Marko, Andrej LEBAR, Izidor SABOTIN, Pavel DRESAR a Josko VALENTINCIC.: Ice jet technology. MM Science Journal [online]. 2018 [cit. 2021-04-05]. ISSN 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_06_201772
- [20]. EL-HOFY, Hassan.: Advanced Machining Processes. US: McGraw-Hill Professional, 2005. ISBN 9780071453349.
- [21]. Pumps: High pressure waterjet cutting. Wardjet.com [online]. USA [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/pumps>

- [22]. HUANG, Zhongwei, Gensheng LI, Shouceng TIAN, Xianzhi SONG, Mao SHENG a Subhash SHAH.: Abrasive Water Jet Perforation and Multi-Stage Fracturing. Elsevier Science & Technology, 2017. ISBN 9780128128077.
- [23]. HUMÁR, Anton.: TECHNOLOGIE I TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ 3. část. Docplayer.cz [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2005 [cit. 2021-04-15]. 23
- [24]. AquaJET: How Does a Waterjet Work? [online]. UK: Aquajet Machining Systems Limited, 2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.aquajet.co.uk/waterjet/how-does-a-waterjet-work/>
- [25]. Water Filtration: Water Softeners. Performancewaterjet.com.au [online]. 2015 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.performancewaterjet.com.au/water-filtration>
- [26]. PTV: Vodní paprsek – Úvaha nad ... o rozdílném tlaku. Ptv.cz [online]. CZ, 2014 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/uvaha-nad-celkovymi-naklady-provozu-cerpadel-o-rozdilnem-tlaku/>
- [27]. Příprava čisté vody. Sisw.cz [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://sisw.cz/cz/kategorie.php?KA=5>
- [28]. Demineralizace vody, deionizace. Culligan.cz [online]. 2014 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://www.culligan.cz/index.php/technologie/deionizace-technologie>
- [29]. HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan; GOMBÁR, Miroslav.: Hodnotenie významnosti faktorov technológie abrazivného vodného prúdu. In Metal: 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů. Hradec nad Moravicí, 2007. Dostupné z: http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/180.pdf
- [30]. Parametry drsnosti povrchu [online]. Mahr, spol. s r.o. [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <http://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [31]. BROŽEK, Milan.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture 2017, 16, 75-81.
- [32]. HASHISH, Mohamed.: Material properties in Abrasive Waterjet Machining, ASME J. of Engineering for Industry, Vol 117, Nov. (1995) pp. 557-583.
- [33]. Tabulka MESH a MIKRON: MESH. Ohnostroje-zvonek.cz [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <http://www.ohnostroje-zvonek.cz/index.php/tabulka-mesh-a-mikron>

- [34]. MOHANA SUNDARA RAJU, N. a M. CHITHIRAI PON SELVAN.:
ASSESSMENT OF PROCESS PARAMETERS IN ABRASIVE WATERJET
CUTTING OF STAINLESS STEEL. International Journal of Advances in
Engineering & Technology [online]. 2011, 34-40 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z:
[https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-water-pressure-on-depth-of-
cut_fig2_267852704](https://www.researchgate.net/figure/Effect-of-water-pressure-on-depth-of-cut_fig2_267852704)

10 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Princip elektrochemického obrábění [7]	6
Obrázek 2 – Schéma WJM řezací hlavy [17]	10
Obrázek 3 – Schéma AWJ řezací hlavy s bočním přívodem abraziva [17]	12
Obrázek 4 – Schéma zobrazující zařízení vodního paprsku (WJM systém) [20]	14
Obrázek 5 – Schéma multiplikátoru při pohybu pístu zleva doprava [21]	15
Obrázek 6 – Řezací hlava s bočním přisunem abraziva [22]	17
Obrázek 7 – Řezací hlava s tangenciálním přisunem abraziva [22]	17
Obrázek 8 – AWJ faktory ovlivňující kvalitu povrchu děleného materiálu [29]	21
Obrázek 9 – Kvalita řezné plochy (ocel 11 523) [31]	22
Obrázek 10 – Typy vznikajících úkosů [22]	23
Obrázek 11 – Rozdíl mezi povrchy vzorku při změně rychlosti posuvu řezací hlavy [31]	23
Obrázek 12 – Erozní charakteristika tvárného a křehkého materiálu [4]	25
Obrázek 13 – Oblasti vznikající při řezání abrazivním vodním paprskem [4, 32]	25
Obrázek 14 – Úseky řezání vodním abrazivním paprskem [4, 32]	26
Obrázek 15 – Závislost tvrdosti použitého abraziva na dosahované hloubce řezu [4, 32]	27
Obrázek 16 – Závislost hloubky řezu na zrnitosti abraziva [4, 32]	28
Obrázek 17 – Změna drsnosti řezné plochy v závislosti na změně velikosti zrn abraziva [4]	28
Obrázek 18 – Vliv pracovního tlaku vody na maximální hloubku řezu [34]	29
Obrázek 19 – Vliv pracovního tlaku vody na drsnost řezné plochy [4]	29