

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva

**Ekonomické zhodnocení technologie dělení vodním
paprskem**

Bakalářská práce

Autor: Michal Vališ

Vedoucí práce: Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Vališ

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Ekonomické zhodnocení technologie dělení vodním paprskem

Název anglicky

Economic evaluation of water-jet cutting technology

Cíle práce

Cílem práce je představit a charakterizovat nekonvenční metodu obrábění vodním paprskem a její typové rozdělení.

Metodika

Teoretický rozbor metody obrábění vodním paprskem. Výhody, nevýhody a ekonomické zhodnocení provozu při obrábění vodním paprskem.

Doporučený rozsah práce

35 – 45 stran

Klíčová slova

čistý a abrazivní vodní paprsek, hmotnostní tok abraziva, tryska, obrobek

Doporučené zdroje informací

- BARCÍK, Š. et. al. Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem. 2012. 240 s., ISBN 978-80-87415-60-3.
- BERNARD, K. E. Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl. Printed in Germany. 1993. s. 3-93. ISBN 3-8169-0748-2.
- FABIAN, S., HLOCH, S. Abrasive waterjet process factors influence on stainless steel AISI 304 Macrogeometrical cutting duality. Scientific bulletin, Volume XIX, North University of Baia Mare, Romania. 2005. s. 261- 266. ISSN 1224-3264.
- HAVLÍK, B. Kvantifikácia technologických parametrov pre obrábania vodným lúčom – WJM. Bratislava: KVT SJF STU. 1995. 69 s., ISBN 80-8094-046-0.
- KRAJNÝ, Z. Nekonenčné technológie a bezpečnosť pri práci. Bezpečná práca 4/1991. 1991. s. 152 – 156.
- KRNER, D., WIEDERMEIER, J., LOUIS, H. Safety aspects of jet cutting. Symy. On Jet Cutting Technology. 1982. Bedford.
- LISIČAN, J. et. al. Teória a technika spracovanie dreva. Prvé vydanie. Zvolen: Matcentrum Zvolen. 1996. 626 s., ISBN 80-967315-6-4.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 3. 5. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Ekonomické zhodnocení technologie dělení vodním paprskem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Moniky Sarvašové Kvietkové, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách, v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 18. 4. 2017

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Monice Sarvašové Kvietkové, PhD. za připomínky, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnovala.

Abstrakt

Předložená práce se zabývá nekonvenční technologií dělení materiálů vodním paprskem a ekonomickým zhodnocením náročnosti jejího provozu.

V úvodu práce je představen stručný historický vývoj této technologie s jejími klíčovými událostmi. V následujících částech je popsán princip technologie a její klíčové prvky, kterými jsou řezná kapalina a abrazivum, a hlavní faktory, které přímo ovlivňují řezný proces technologie vodního paprsku.

V další části práce jsou představeny veškeré druhy vodního paprsku, se kterými se lze setkat, průmyslová aplikace, bezpečnostní zásady při práci s vodním paprskem a výhody a nevýhody této technologie.

Poslední část práce se pokouší na základě reálných dat podat ucelený přehled o nákladech na provoz zařízení pro vodní paprsek.

Práce je koncipována zejména jako deskriptivní analýza, která vychází především z odborných monografických titulů, a to jak domácích, tak zahraničních autorů. Za účelem přínosu pro praktické využití byla v práci dále prezentována reálná data ekonomického subjektu distribuujícího zařízení pro vodní paprsek, čímž bylo dosaženo mnou stanoveného ekonomického zhodnocení provozu zařízení pro technologii dělení vodním paprskem.

Klíčová slova

čistý a abrazivní vodní paprsek, hmotnostní tok abraziva, tryska, obrobek

Abstract

My bachelor thesis deals with unconventional technology of water-jet cutting of materials and economic evaluation of its working in company.

In the introduction of this thesis it is briefly presented historical evolution of this technology with its key events. In the next parts of this thesis it is described how does the technology work, how do the water and abrasives work, and also main factors which directly affect the water-jet cutting process.

In the next part of this thesis there are presented all the types of water-jet we can have, industrial application, safety aspects and advantages and disadvantages of this technology.

The last part of this thesis tries to make a general summary of water-jet machining expenses with real provided data.

The thesis is designed primarily as a descriptive analysis, which is based mainly on expert monographics of both inland and foreign authors. There are also presented real data obtained from economic subject using water-jet machining in order to express the practical utility. Thus I achieved economic evaluation of water-jet machining I had defined beforehand.

Key words

pure and abrasive water-jet, abrasive mass flow, nozzle, workpiece

Obsah

1	Úvod.....	13
2	Cíl práce.....	14
3	Historický vývoj.....	15
4	Princip technologie.....	16
4.1	Multiplikátor.....	17
4.2	Akumulátor.....	20
4.3	Vysokotlaké potrubí.....	20
4.4	Zpětný ventil.....	20
4.5	Výstupní tryska.....	20
4.5.1	Vodní tryska.....	20
4.5.2	Abrazivní tryska.....	21
4.6	Lapač vodního paprsku.....	22
4.7	Manipulační systém.....	23
4.8	Filtr.....	24
5	Řezný nástroj.....	24
5.1	Filtrace.....	25
5.2	Změkčování.....	25
5.3	Deionizace.....	26
5.4	Zpětná osmóza.....	26
5.5	Fyzikální úprava vody.....	26
5.6	Biologická úprava vody.....	27
5.7	Doporučovaná specifikace vody.....	27
6	Abrazivum.....	28
7	Řezný proces.....	30
7.1	Tlak pracovní kapaliny.....	32
7.2	Průměr vodní trysky.....	33
7.3	Parametry abraziva.....	34
7.3.1	Druh materiálu abraziva.....	34
7.3.2	Tvar a velikost abraziva.....	35
7.4	Hmotnostní tok abraziva.....	35
7.5	Parametry směšování.....	36
7.6	Posuvná rychlost.....	36

7.7	Vzdálenost trysky od obrobku	38
7.8	Počet přechodů paprsku.....	40
7.9	Úhel dopadu paprsku.....	40
7.10	Materiál obrobku.....	40
8	Rozdělení vodních paprsků	41
8.1	Kontinuální paprsek	41
8.1.1	Čistý vodní paprsek WJM	41
8.1.2	Abrazivní vodní paprsek.....	42
8.1.2.1	Abrazivní vodní paprsek AWJ	43
8.1.2.2	Paprsek abrazivní suspenze ASJ.....	44
8.1.3	Kryogenní paprsek	44
8.1.4	Kavitační paprsek.....	45
8.1.5	Ultra-vysokotlaký vodní paprsek.....	45
8.2	Diskontinuální vodní paprsek.....	45
8.2.1	Pulzní nízkofrekvenční paprsek.....	45
8.2.2	Pulzní přerušovaný paprsek.....	46
8.2.3	Modulovaný vodní paprsek	47
9	Průmyslová aplikace technologie vodního paprsku.....	48
10	Bezpečnost při práci s kapalinovými paprsky	49
10.1	Nízkotlaký okruh oleje v multiplikátoru	49
10.2	Vysokotlaký okruh vody	50
10.3	Okruh filtrace technologické kapaliny	50
10.4	Řídící a manipulační jednotka	50
11	Výhody a nevýhody technologie obrábění vodním paprskem	51
11.1	Výhody	51
11.2	Nevýhody.....	53
12	Ekonomické zhodnocení provozu.....	54
13	Závěr.....	61
14	Seznam použité literatury a zdrojů.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 1 Stupně tvrdosti vody	25
Tabulka 2 Porovnání výhod deionizace a zpětné osmózy	26
Tabulka 3 Doporučovaná specifikace vody.....	27
Tabulka 4 Chemické složení abraziva – granát	29
Tabulka 5 Chemické složení abraziva – olivín	29
Tabulka 6 Velikost abrazivních částic.....	35
Tabulka 7 Pořizovací náklady na zařízení pro vodní paprsek	56
Tabulka 8 Kalkulace pravidelného servisu po 800 h vysokotlakého těsnění, filtrů a ventilů	57
Tabulka 9 Kalkulace pravidelného servisu 1x ročně - výměna oleje a nízkotlakého těsnění.....	58
Tabulka 10 Ceny dílů vyměnitelných svépomocí.....	59
Tabulka 11 Výpočet spotřeby abraziva	59
Tabulka 12 Výpočet spotřeby energií a vody	60
Tabulka 13 Souhrn ročních nákladů na provoz	60

Seznam obrázků

Obrázek 1 Multiplikátor	18
Obrázek 2 Schematické znázornění dvojčinného multiplikátoru	19
Obrázek 3 Vodní trysky - základní tvary.....	21
Obrázek 4 Konstrukce řezací hlavice s abrazivní tryskou.....	22
Obrázek 5 Lapače vodního paprsku	23
Obrázek 6 Typické tvary abrazivních částic – granát	30
Obrázek 7 Znázornění měření kruhovitosti	30
Obrázek 8 Průběh dráhy vodního paprsku.....	31
Obrázek 9 Zóny vzniklé řezáním abrazivním vodním paprskem	32
Obrázek 10 Reliéf řezné plochy	37
Obrázek 11 Geometrie řezné spáry	39
Obrázek 12 Rozdělení vodních paprsků.	41
Obrázek 13 Znázornění trysky pro čistý vodní paprsek.....	42
Obrázek 14 Znázornění abrazivního vodního paprsku.....	43
Obrázek 15 Paprsky tekutého dusíku za různých teplot.....	44
Obrázek 16 Působení tlaku kontinuální vs. pulzní paprsek.....	46
Obrázek 17 Působení tlaku - pulzní přerušovaný paprsek	47
Obrázek 18 Působení tlaku - modulovaný paprsek.....	48
Obrázek 19 Ilustrace tvarového omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech vlivem kruhového průřezu paprsku	53

Seznam zkratek

p	tlak
S	plocha
I	multiplikační konstanta
η_m	mechanická účinnost multiplikátoru
v_v	rychlost proudu kapaliny
μ_v	koeficient rychlosti
ρ	hustota
E_a	energie abrazivních částic
m_a	hmotnostní tok abraziva
v_a	rychlost abraziva
v_f	rychlost posuvu
PDD	množství částic potřebných na generování drážky
EDD	množství energie připadající na jednotku délky generované drážky
l	vzdálenost paprsku od ústí trysky
l_c	vzdálenost paprsku od ústí trysky při daném tlaku
l_{max}	maximální možná vzdálenost trysky od obrobku, kde již nedochází k řezání
σ_c	mez pevnosti v tlaku řezaného materiálu
WJM	Water-jet machining (obrábění vodním paprskem)
AWJ	Abrasiv water-jet (abrazivní vodní paprsek)
ASJ	Abrasiv suspension jet (paprsek abrazivní suspenze)

1 Úvod

Vzhledem k tomu, že jsou v současné době kladeny vysoké požadavky na kvalitu, výkonnost, ekonomiku a především ekologii průmyslové výroby, jsou neustále vyvíjeny a zaváděny nové, moderní a nekonvenční technologie zohledňující nejen mechanické vlastnosti materiálů, ale právě i ekonomické a ekologické hledisko. Jednou z takových technologií je dělení materiálů vodním neboli kapalinovým paprskem. Díky svým specifickým vlastnostem se tato metoda řadí mezi nekonvenční a progresivní technologie obrábění. A jako taková má potenciál na využití v mnoha průmyslových odvětvích.

Technologii obrábění vodním paprskem mohu ve zkratce definovat jako úběr materiálu mechanickým působením proudu kapaliny na obrobek. Základem této metody obrábění je obušování materiálu tlakem vodního paprsku, tedy za použití proudu vody, který za vysokého tlaku a při vysoké rychlosti působí na materiál, čímž dochází k jeho obušování a tedy jeho úběru. Vodním paprskem je možné obrábět velké množství materiálů. Od těch měkčích, jako jsou plasty, guma nebo měkké dřeviny, na které se zpravidla používá čistý vodní paprsek, až po ty tvrdší, jako jsou kovy, kámen, sklo, aglomerované materiály na bázi dřeva a další, u kterých je třeba vodu obohatit o brusivo, resp. příměs vhodného abraziva vybíraného v závislosti na tvrdosti obráběného materiálu. Dělení této technologie na řezání čistým vodním paprskem a řezání abrazivním vodním paprskem je tím nejzákladnějším.

V práci proto nejdříve charakterizují jak princip této technologie, včetně pracovního média a rozhodujících prvků ovlivňujících samotný výsledný řez, tak veškeré typy této metody, se kterými se lze setkat. Po uvedené charakteristice jednotlivých druhů vodních paprsků se zaměřím na výhody a nevýhody využití této technologie v praxi. Následně se pokusím zhodnotit provoz zařízení pro vodní paprsek v podniku na základě údajů poskytnutých od firmy zabývající se prodejem a servisem těchto zařízení. Za tímto účelem si stanovím relevantní kritéria ekonomického zhodnocení.

Ve světě obrábění dřeva se vedle tradičních technologií dále více rozvíjejí podobné nekonvenční technologie obrábění, mezi které patří i technologie vodního paprsku. Byť je technologie obrábění materiálů vodním paprskem neboli hydrodynamické obrábění metodou používanou již několik desetiletí, není širší veřejnosti příliš známa. Tato skutečnost byla hlavním důvodem výběru tématu mé bakalářské práce, čímž bych rád tuto technologii jak sám sobě, tak čtenářům, detailněji přiblížil.

2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je seznámit čtenáře s nekonvenční technologií dělení vodním paprskem a následně představit ekonomické zhodnocení jejího provozu v podniku.

Dílčím cílem práce je podat charakteristiku principu fungování zařízení pro vodní paprsek, obeznámit se s pracovním nástrojem, který se v této technologii využívá, indikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu výsledného řezu, upozornit na bezpečnostní zásady při práci s těmito zařízeními a poukázat na výhody a nevýhody dané technologie.

3 Historický vývoj

Na tomto místě považuji za nutné nejdříve alespoň stručně představit historický vývoj v oblasti technologie dělení vodním paprskem.

Ačkoliv je samotná metoda řezání materiálu pomocí vodního paprsku (tzv. hydrodynamické obrábění) známo již několik desítek let, stabilnější a účinnější vodní paprsek se začal používat až kolem roku 1970. Postupem let se možnost jeho využití rozšiřovala až do současnosti, kdy je pomocí vodního paprsku možné opracovat nepřehledné množství druhů materiálů (Kvietková, 2015).

Vlastní technologie řezání vodním paprskem se tedy vyvíjela postupně po mnoho let. Základy této technologie se objevily už v 19. století, a to od padesátých let, kdy nejen zlatokopové začali využívat proudící vodu k těžbě zlata, resp. jiných hornin. Erozivní účinky vody na pevné látky, např. půdu, jsou známé již po velmi dlouhou dobu. V této souvislosti se zjistilo, že pokud vedeme vodu pod vlivem tlaku do otvoru (v našem případě trysky), který má menší průměr než potrubí, jímž je vedena, tak se síla proudící vody násobí. To zvyšuje její erozní účinnost při působení na materiál. Díky těmto znalostem byl zaveden v USA v padesátých letech 19. století erozní úběr hornin s použitím vodního proudu při dobývání hornin v dolech, např. zlata. Následně v roce 1870 v USA aplikovali nízkotlaké systémy proudící vody, kterými odstraňovali usazené vrstvy písků a kamení.

Největší zásluhu na vývoji této technologie měli tedy američtí a poté především sovětské důlní inženýři, kteří ve dvacátých letech 20. století získali první patent. Metodu rozvíjel Petr Tupitsyn, který v roce 1936 začal využívat vodní paprsek k řezání děr v uhelných slojích. Metoda se dále šířila i do dalších zemí.

V padesátých letech 20. století se začalo využívat vodního paprsku k těžbě uranu, když ten snižoval rizika vzniklá s jeho těžbou. Dále lesní inženýr Dr. Norman Franz se začal zabývat řezáním vodním paprskem za použití velice vysokého tlaku až 200 MPa a rovněž studoval použití plynulého proudění vodního paprsku (Kvietková, 2015).

Velkým skokem ve vývoji této oblasti představovala šedesátá léta 20. století, kdy se vodního paprsku začalo využívat mimo důlní průmysl. V roce 1961 totiž Američané objasnili a patentovali řezání oceli, niklu a titanu vysokorychlostními paprsky oleje. V témže roce započaly první pokusy dělení průmyslových materiálů vodním paprskem. K tomu byly zkonstruovány nezbytné přenašeče tlaku, a to americkými firmami Bendix a McCarty.

Po roce 1970 se u této technologie obrábění začala jako řezný nástroj používat zejména voda, když bylo v této souvislosti představeno použití dlouhého řetězce polymerů jako přísady do paprsku vody. Od roku 1972 se tak pravidelně každé dva roky konají symposia o technologii řezání paprskem kapaliny, tzv. International Symposium of Jet Cutting Technology (Barcík a kol., 2012).

Jednou z největších revolucí v technologii dělení vodním paprskem bylo v sedmdesátých letech 20. století, když Dr. Mohamed Hashish přidal do vodního paprsku abrazivum. To umožnilo rozšířit využití technologie vodního paprsku a řezat tak tvrdší materiály, než bylo doposud možné, jako ocel, sklo nebo beton (Kvietková, 2015).

Další průlom ve vývoji této technologie obrábění se odehrál v sedmdesátých letech 20. století. Americký vesmírný průmysl se totiž potýkal s problémem řezání speciálních kompozitních materiálů, které byly tradičními technologiemi obrábění jen těžko opracovatelné. Firma Flow vytvořila zesilovač tlaku (tzv. multiplikátor), díky kterému ve spolupráci s firmou Boeing začala řezat tyto kompozitní materiály pomocí vodního paprsku (Barcík a kol., 2012).

V roce 1983 firma Flow uvedla na trh svůj první stroj pro komerční použití, který řezal tloušťku materiálu až 76 mm. Využíván byl v automobilovém průmyslu pro řezání skel. Do konce 20. století tuto technologii používaly pouze dvě americké firmy, a to Flow International a Ingersoll-Rand. Do podvědomí české a slovenské veřejnosti se technologie vodního paprsku dostala poprvé v roce 1988 na mezinárodní výstavě ROBOT 98 v Brně (Kvietková, 2015).

Technologie obrábění využívající vodní paprsek je stále vyvíjena, přičemž se celosvětově šíří do všech odvětví průmyslu. Přizpůsobuje se jak nárokům ekonomickým, tak nárokům ekologickým. Je nepochybné, že tato technologie představuje velký potenciál v oblasti obrábění. I v České republice probíhají výzkumy zaměřující se na vývoj a použití technologie vodního paprsku v rámci procesu dezintegrace materiálů, a to konkrétně např. v Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě (více viz Pulsující vodní paprsek - nový chirurgický nástroj [cit. 2017-02-01]).

4 Princip technologie

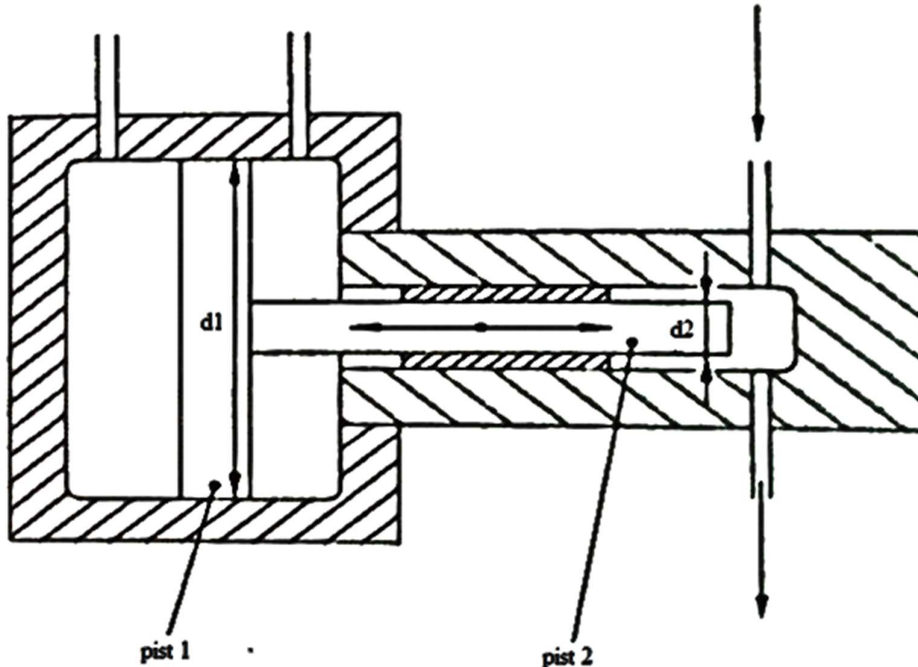
Technologie obrábění vodním paprskem se řadí do procesu tzv. beztržiskového obrábění, přesněji obrábění koncentrovanou energií, a to hydromechanickou energií, kdy tlak proudící kapaliny působí destruktivně na obráběný materiál (Lisičan, 1996).

Základem technologie řezání vodním paprskem je tedy dělení materiálu vodou za působení vysokého tlaku, která je usměrněna do trysky, z níž následně dochází ke kontaktu s materiálem a samotnému výslednému řezu. Zařízení, kterým generujeme vodní paprsek, se skládá z několika základních částí. Těmi jsou multiplikátor, akumulátor, vysokotlaké potrubí, zpětný ventil, výstupní tryska, lapač vody, filtrační zařízení a manipulační systém.

V následujícím úseku práce jednotlivé části zařízení pro dělení vodním paprskem a principy jejich fungování stručně představím.

4.1 Multiplikátor

Multiplikátor neboli násobič je nejdůležitější částí zařízení pro řezání vodním paprskem. Je to vysokotlaké čerpadlo, díky kterému získáváme dostatečnou kinetickou energii vody, s níž můžeme tedy mechanicky rozrušovat povrch materiálu. Tlak, který tento multiplikátor (viz Obrázek 1) vyvíjí, dosahuje hodnot až 650 MPa. Sestává se ze dvou částí, a to z nízkotlaké a vysokotlaké části. Toho dosáhne pomocí tzv. multiplikačního efektu. Do nízkotlaké části je přiváděn hydraulický olej o nízkém tlaku (16-45 MPa), který působí na plochu pístu o mnohanásobně větší než plocha ve vysokotlaké části. Hydraulický agregát pohání standardní elektromotory s příkony až 75 kW. Píst se tlakem uvádí do pohybu směrem k vysokotlaké části, jejíž objem je několikanásobně menší než v části nízkotlaké. To způsobuje vznik tlaku pístu ve vysokotlaké části na pracovní kapalinu několikanásobně vyšší (Barcík a kol., 2013).



Obrázek 1 Multiplikátor

(Krajný, 1998)

Například při poměru ploch pístu nízkotlaké a vysokotlaké části 20 ku 1 a tlaku hydraulického oleje v nízkotlaké části 20 MPa vyvineme tlak ve vysokotlaké části dvacetkrát vyšší, tedy 400 MPa.

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$p_2 = \frac{20}{1} \cdot 20 \quad [\text{MPa}]$$

$$p_2 = 400 \quad [\text{MPa}]$$

kde:

p_1 - tlak na píst s větší plochou [MPa],

p_2 - tlak na píst s menší plochou [MPa],

S_1 - plocha většího pístu [m²],

S_2 - plocha menšího pístu [m²].

Při vytlačení pracovní kapaliny z vysokotlaké části pístu se musí tento píst vrátit do původní polohy a nasává přitom další pracovní kapalinu pro další cyklus.

Častěji se však v praxi setkáme s dvojitým multiplikátorem (viz Obrázek 2), který zajišťuje kontinuální proud vysokotlaké kapaliny. Princip dvojitého

multiplikátoru tkví v tom, že vysokotlaké části jsou dvě a nízkotlaká jen jedna, a ta je uložena uprostřed. Pohyb pístů v nízkotlaké části, které jsou mezi sebou pevně spojeny, na jednu stranu vyvolává vždy v jedné z vysokotlakých částí vytlačení vysokotlaké kapaliny, zatímco ve druhé vysokotlaké části pracovní kapalinu nasává. Další pohyb pístů zpět vyvolává v obou vysokotlakých částech opačné reakce. Potom tedy platí:

$$p_2 = \frac{s_1 - s_2}{s_2} \cdot p_1 \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Pro vyjádření zesílení tlaku na tlak p_2 byla zavedena tzv. multiplikační konstanta i , která se vyjadřuje takto:

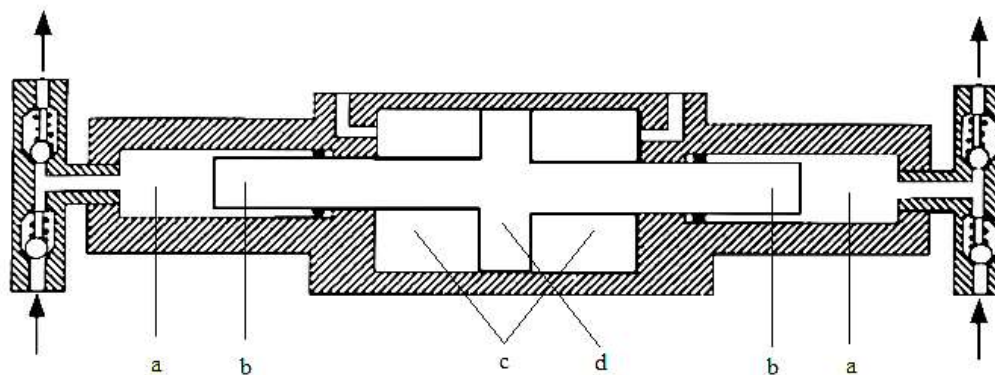
$$i = \frac{s_1 - s_2}{s_2} \quad [-] \quad (3)$$

Zohledněny jsou ve výpočtech vyvíjeného tlaku také ztráty multiplikátoru způsobené třením nebo netěsnostmi. Vyjádřeny jsou prostřednictvím mechanické účinnosti η_m :

$$p_2 = \frac{s_1 - s_2}{s_2} \cdot \eta_m \cdot p_1 \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

kde:

η_m – mechanická účinnost multiplikátoru, hodnota cca $\eta_m = 0,95$.



Obrázek 2 Schematické znázornění dvojčinného multiplikátoru

a – vysokotlaká část, pracovní prostor vysokotlakého pístu pro generování vysokých tlaků, b – vysokotlaký píst, c – nízkotlaká část, pracovní prostor nízkotlakého pístu, d – nízkotlaký píst

(Veselý, 2008)

Možnou alternativou multiplikátoru je triplexové čerpadlo. Oproti multiplikátoru nemá hydraulický agregát. Použitý elektromotor pohání klikovou hřídel se třemi písty

a ty vytvářejí vysoké tlaky. Jeho výhodou spočívá v tom, že nepotřebuje součinnost akumulátoru jako multiplikátor (Lichtarowitz, 1992). Svou konstrukcí je však omezen na generování tlaků pouze do 275 MPa, a proto ho považujeme za méně vhodný pro obrábění dřeva (Barcík, 2012).

4.2 Akumulátor

Změnami pracovní polohy pístu dochází k nerovnoměrnému dodávání množství stlačené kapaliny neboli k pulzaci. A proto se k udržení konstantní hodnoty tlaku kapaliny přiváděné do trysky využívá akumulátor. Ten kapalinu již o konstantním tlaku dodává do vysokotlakého potrubí.

4.3 Vysokotlaké potrubí

Vysokotlaké potrubí je zkonstruováno z částečně pružných trubek z nerezové oceli tak, aby bylo schopné vést vysokotlakou vodu. Dále musí být jeho konstrukce schopna se přizpůsobovat pohybu řezné hlavice, která je pohyblivě umístěna na hlavním rámu stroje, po pracovní ploše.

4.4 Zpětný ventil

Součástí vysokotlakých čerpadel je i zpětný ventil. Jeho úkolem je jednosměrně uzavírat okruh vysokotlakého potrubí. Natlakovanou vodu je nutné vést do vysokotlakého potrubí a je potřeba zabránit tomu, aby se dostala zpět do obvyčejné nízkotlaké hadice či potrubí, které přivádí vodu do čerpadla. Voda pod tlakem 400 MPa by tyto obvyčejné hadice roztrhla. K tomu právě slouží zpětný ventil. Druhý zpětný ventil slouží k tomu, aby natlakovanou vodu bezpečně vpustil do vysokotlakého okruhu potrubí (Slovník k Vodnímu Paprsku, [cit. 2017-02-10]).

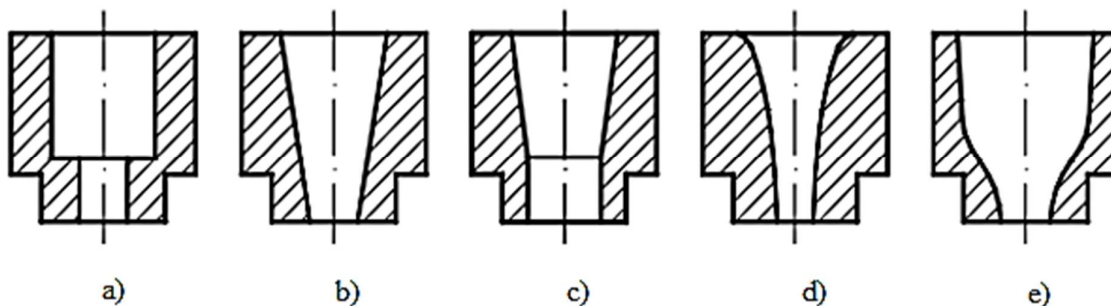
4.5 Výstupní tryska

Stěžejní částí zařízení pro technologii dělení vodním paprskem je jednoznačně tryska formující výsledný vodní paprsek. Dle druhu vodního paprsku je použita v řezném procesu jedna nebo dvě trysky. U zařízení pro čistý vodní paprsek se využívá tryska vodní a u zařízení pro abrazivní vodní paprsek tryska vodní a abrazivní (Kvietková, 2015).

4.5.1 Vodní tryska

Vodní tryska přímo ovlivňuje nejen výsledný vodní paprsek, ale i kvalitu řezu. Vodní tryska čistého vodního paprsku přímo přeměňuje tlakovou energii na energii kinetickou. V závislosti na požadavcích na pracovní tlaky a druhu použité řezné kapaliny

se vyrábí několik základních druhů trysek rozdílných svým tvarem. Tvary trysek můžeme vidět na Obrázku 3.



Obrázek 3 Vodní trysky - základní tvary

a) válcová, b) kuželová, c) kombinovaná (kuželová s přechodem do válcové), d) kónická, e) složená - bikubická

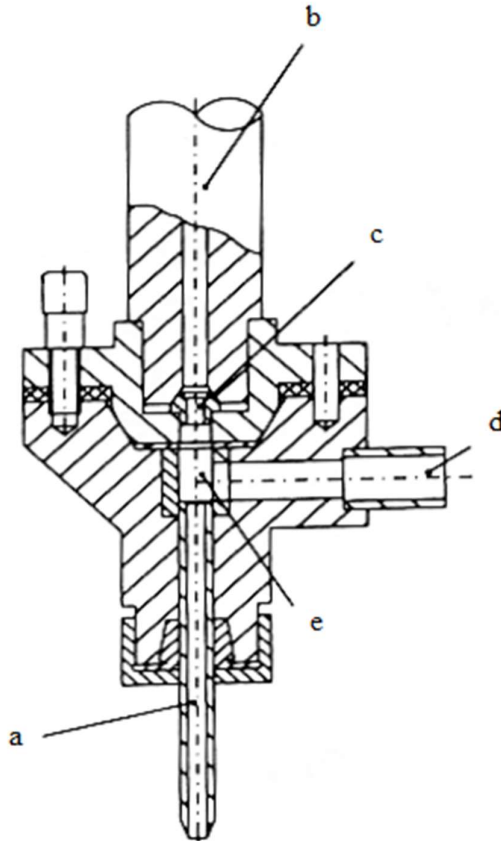
(Krajný, 1998)

Průměr trysky v místě, kde voda z trysky vystupuje a tvoří vodní paprsek, se pohybuje v rozpětí 0,07 až 0,4 mm. Vnějšími rozměry trysky jsou vnější průměr 2mm a výška 1,5 mm.

Na výrobu trysek se používají různé materiály. Nejčastějšími materiály jsou safír, rubín a syntetický diamant. Druh materiálu má vliv především na životnost trysky. Zde platí přímá úměra čím delší životnost, tím vyšší cena za materiál. Nejdražší trysky, a zároveň s nejdelší životností, jsou trysky diamantové. Ty mají asi pětikrát až desítkrát delší životnost než rubínové či safírové trysky. Jejich cena je ovšem až desetinásobná (Barcík a kol., 2012).

4.5.2 Abrazivní tryska

Pro zvýšení efektivity vodního paprsku při úběru materiálu se přidává do vody abrazivum. Jak již bylo výše vysvětleno, vodní paprsek se formuje ve vodní trysce. Ovšem u zařízení abrazivního vodního paprsku v této fázi ještě vodní paprsek neopouští řezací hlavici. Z vodní trysky putuje vodní paprsek do směšovací komory, kde vlivem působení podtlaku nasává abrazivum, které je sem dopraveno ze zásobníku abraziva. Paprsek se následně s abrazivem mísí a prochází dále abrazivní tryskou, která formuje nově vzniklý abrazivní vodní paprsek (Krajný, 1998). Konstrukci řezací hlavice s abrazivní tryskou zobrazuje Obrázek 4.



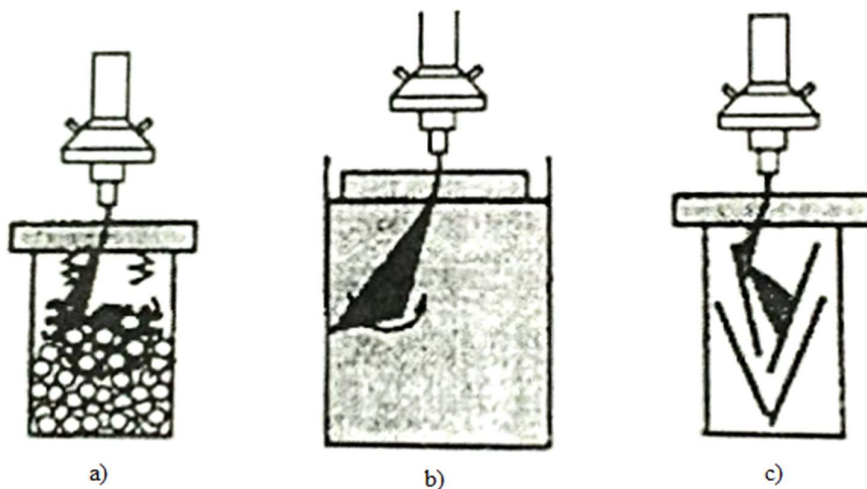
Obrázek 4 Konstrukce řezací hlavy s abrazivní tryskou

a - abrazivní tryska, b - přívod vysokotlaké kapaliny, c - vodní tryska, d - přívod abraziva, e - směšovací komora

(Krajný, 1998)

4.6 Lapač vodního paprsku

Další součástí zařízení pro technologii dělení vodním paprskem je tzv. lapač vody, jehož účelem je zachytávání vody po průniku materiálem, která v tomto momentě může mít ještě až 75% původní kinetické energie. Rozlišují se dva druhy lapačů vodního paprsku, stabilní a mobilní. Stabilní lapač je zkonstruován jako jednoduchá vana naplněná vodou, jenž je umístěna pod roštem, který nese obráběný materiál. Jako absorbent energie je zde využívána voda. Mobilní lapač je zařízení, které se používá převážně s průmyslovými roboty a dovoluje zachytávat paprsek až v šesti osách. Má podobu kontejneru, který může být naplněný ocelovými kuličkami nebo šikmo uloženými destičkami (viz Obrázek 5). Obojí má za úkol pohlcovat energii vodního paprsku (Kulekci, 2002).



Obrázek 5 Lapače vodního paprsku

a) s ocelovými kuličkami, b) vodní vana, c) s šikmo uloženými destičkami

(Kulekci, 2002)

Dalším úkolem lapače vodního paprsku je zachytávání odebíraného materiálu. Stejně tak zamezuje nadměrnému hluku, až do 105 dB (Barcík a kol., 2013).

4.7 Manipulační systém

Funkcí manipulačního systému je zjednodušeně řečeno zajištění upevnění obrobku a pohybu řezné hlavičky vodního paprsku. Tvoří jej v podstatě dvě navzájem provázané části, a to řídicí jednotka a výkonná jednotka.

Řídicí jednotku představuje hardware a software, které přetváří výkres výrobku v elektronické formě na řídicí impulsy v podobě souřadnic pohybu pro výkonnou jednotku. Zároveň tato jednotka řídí i chod jednotky na generování vodního paprsku. Výkonnou jednotkou se rozumí hardware neboli vedení a servomotory, který na základě řídicích impulsů z řídicí jednotky provádí pohyb řezné hlavičky (Barcík a kol., 2012).

Obráběcí prostor jako součást manipulačního systému tvoří pracovní stůl s lapačem vody a opěrným roštem pro právě obráběný materiál. Maximální velikost obráběného materiálu se odvíjí právě od velikosti pracovního souřadnicového stolu. Ten může mít rozměry až přibližně 14 x 4 m.

4.8 Filtr

V neposlední řadě je nutné zmínit filtrační zařízení, které slouží k zachycení nečistot, čímž chrání nejen trysku, ale i ostatní části obráběcího zařízení, před poškozením.

5 Řezný nástroj

Technologie obrábění vodním nebo kapalinovým paprskem využívá jako řezný nástroj vodu, resp. kapalinu, nebo kapalinu smíchanou s abrazivem, kterému se budu blíže věnovat v další kapitole. Nejvhodnějším typem vody, který je při této technologii řezání používán, je voda demineralizovaná a deionizovaná, a to z důvodu eliminace tvorby možných usazenin vodního kamene v trysce. Kvalita vody totiž přímo ovlivňuje životnost trysky, kvalitu řezu a také rychlost řezání (Kvietková, 2015). Vzhledem k charakterovým vlastnostem vody je však nutné vodu upravovat tak, abychom předcházeli předčasnému opotřebení trysek, a tím tak prodloužili jejich životnost, a aby nedocházelo k ucpaní otvoru trysky a byl tím tak zajištěn souvislý vodní paprsek. Při používání neupravené vody nedochází pouze k poškození a zanášení trysek, ale i ke zvýšené zátěži multiplikátoru, ventilů a vysokotlakých pístů (Krajný, 1998). Problémy způsobují především rozpustné minerály, jako jsou sodík, vápník, hořčík nebo železo, které vytvářejí nežádoucí usazeniny (Barcík a kol., 2012).

Pracovní kapalina by podle Krajného (1998) měla splňovat následující vlastnosti:

- nízkou viskozitu (pro co nejnižší ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím a tryskou),
- minimální agresivnost s ohledem na kovové části zařízení,
- minimální toxicita (aby nedráždila pokožku, dýchací cesty a zrak obsluhy),
- běžnou přístupnost,
- nízkou cenu,
- schopnost naplnit hydrodynamické požadavky vysokorychlostního paprsku malého průměru,
- schopnost zabezpečovat maximální produktivitu,
- schopnost zabezpečit nejlepší kvalitu obrábění při minimálních energetických ztrátách na vytvoření paprsku.

Proto se využívá proces čištění vody, jímž se zbavuje voda mechanických, chemických a biologických nečistot. V praxi se tedy můžeme setkat se třemi základními postupy úpravy vody, a to mechanickou úpravou vody, fyzikálně-chemickou úpravou vody a biologickou úpravou vody.

5.1 Filtrace

Proces filtrace vody má za úkol zachytávat pevné částice různých velikostí z vody na filtru, které mohou poškodit ústí trysky. Nároky na filtraci vody jsou o to vyšší, pokud chceme v zařízení využívat vodu opakovaně neboli v uzavřeném cyklu. Tradičně se používá hluboký 4 vrstvý filtr. Každá vrstva filtru je jemnější než ta předchozí a každá vrstva zachytává menší částice než ta předchozí. Filtr je nutné po určitém čase vyčistit, aby znovu plnil správně svou funkci. Čistí se tzv. zpětným proplachem tak, že zachycené částice vyplaví zpět hrubšími a hrubšími vrstvami filtru ven z filtru (Krajný, 1998).

5.2 Změkčování

Změkčování vody jako takové nemá příliš velký význam, a proto se provádí jako první krok úpravy před deionizací nebo zpětnou osmózou. Využívá se klasifikace tvrdosti vody, tzn. obsah rozpuštěných minerálů (především vápník a hořčík), podle ministerstva vnitra USA, která se udává v jednotce hmotnosti grain na galon. Hodnoty jsou pro představu uvedené i v mg/l v Tabulce 1.

Tabulka 1 Stupně tvrdosti vody

Stupeň tvrdosti vody	Obsah rozpuštěných minerálů [gr/gal]	Obsah rozpuštěných minerálů [mg/l]
měkká voda	< 1	< 17,1
mírně měkká	1 - 3,5	17,1 - 59,85
tvrdá	3,5 - 7	59,85 - 119,7
velmi tvrdá	7 - 10,5	119,7 - 179,55
extrémně tvrdá	> 10,5	> 179,55

Změkčování probíhá tak, že voda protéká přes pryskyřici, tzv. pryskyřičné řečiště, která se skládá z milionů malých zrněk. Vápník a hořčík s kladnými náboji jsou přitahovány a zadrženy negativně nabitými zrnky pryskyřice. Naopak sodíkové ionty na zrnkách pryskyřice jsou uvolněny do vody. To je důvodem obsahu sodíku ve změkčené vodě. Výměna iontů probíhá v poměru 1:1 (Barčík a kol., 2012).

5.3 Deionizace

Stejně tak jako změkčování je deionizace založená na výměně iontů. Rozdíl je v tom, že při změkčování se používá pryskyřice kationtová, u deionizace se využívá včetně ní i pryskyřice aniontová. Voda tedy přechází přes dvě pryskyřice a výsledkem je čistá voda nejen bez minerálů, od nichž je zbavena kationtovou pryskyřicí, ale i bez chloridů a sulfátů, které z vody odstraní aniontová pryskyřice (Barcík a kol., 2012).

5.4 Zpětná osmóza

Zpětnou osmózou můžeme jednoduchým způsobem získat velmi kvalitní vodu pro použití v zařízení na dělení materiálů vodním paprskem. Proces zpětné osmózy je založen na stlačení vody přes polopropustnou membránu, která zachytává nečistoty a rozpuštěné částice. Tyto částice odplavuje do odtoku a odděluje tak od nich očištěnou vodu. Výrobci zařízení pro zpětnou osmózu udávají účinnost až 95 % a měl by tak tento proces být účinný u téměř všech částic, bakterií a dalších mikroorganismů (Barcík a kol., 2012).

Porovnání výhod zpětné osmózy a deionizace (viz Tabulka 2) shrnul ve své publikaci Krajný (1998).

Tabulka 2 Porovnání výhod deionizace a zpětné osmózy

Deionizace	Zpětná osmóza
100 % odstranění zcela rozpuštěných částic	nižší operační náklady
z každého litru vody se vyprodukuje litr upravené vody	výkonnost při odstraňování organických částic a mikroorganismů
životnost minerálního řečiště je delší než životnost membrány	voda je méně agresivnější než voda deionizovaná
	voda má ustálenější pH a konzistentní kvalitu
prostorově méně náročná než zpětná osmóza	nepoužívá nebezpečné chemikálie

5.5 Fyzikální úprava vody

Jádrem fyzikální úpravy vody je transfer volných elektrických nábojů na molekuly vody, které se následkem toho zpolarizují (jednotně orientují). Důsledkem tohoto procesu rozpustné látky ve vodě změní tvar a velikost tak, že již nedokáží vytvářet

krystalickou mřížku vody, a tak vytvářet tvrdý kámen. Vytváří se tak pouze kal (Barcík a kol., 2012).

5.6 Biologická úprava vody

Do procesu biologické úpravy vody vstupuje voda po mechanickém čištění, které ovšem nebylo dostatečně účinné. Podstatou tohoto stupně úpravy vody je využití aerobních bakterií, které z vody odstraňují až 99 % nečistot organického charakteru. Mezi procesy biologické úpravy vody patří mineralizace, amonifikace, nitrifikace, imobilizace a detoxikace. Principem všech těchto procesů je rozklad organických látek. Výsledkem těchto dějů je vzniklá čistá voda (Barcík a kol., 2012).

5.7 Doporučovaná specifikace vody

Někteří výrobci zařízení na dělení materiálů vodním paprskem shrnuli pro své zákazníky specifikace maximálního obsahu látek ve vodě pro její nejlepší kvalitu. Tyto hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 3.

Tabulka 3 Doporučovaná specifikace vody

	[mg/l]	
celkové množství rozpuštěných pevných látek	< 500	
celková tvrdost (ve formě CaCO ₃)	< 25	
obsah látek		
	železo (Fe)	< 0,2
	mangan (Mn)	< 0,1
	chloridu (Cl)	< 100
	volný chlór (Cl ₂)	< 1,0
	zákal	< 5 NTU*
kyselost (pH)	6,5 - 8,5	

*NTU - nefelometrická jednotka kalnosti

Dodržování maximálních uvedených hodnot obsahu látek ve vodě by mělo vést k optimální životnosti prvků zařízení jako je tryska, těsnění, ventily a písty (Krajný, 1998).

V některých oblastech průmyslu je však použití vody jako řezného nástroje nevhodné. Jedná se zejména o průmysl lékařský a potravinářský. Proto existují i další kapaliny, které vodě alternují. V oblasti lékařského průmyslu se využívá zejména líh

a alkohol, uplatňující se např. při řezání léků nebo při specifických lékařských zákrocích. V oblasti potravinářského průmyslu je možné se setkat s pracovními kapalinami, jako jsou např. rostlinné oleje, mléko, máslo či glycerin. Využití nachází typicky při řezání čokolády, zákusků, ale i ryb a jatečního dobytka (Krajný, 1998).

6 Abrazivum

Na dělení tvrdších materiálů, a to takových, na které by byl potřeba čistý vodní paprsek o tlaku 500 až 1000 MPa, pouhý čistý vodní paprsek nestačí. Proto se do vody přidává jemné brusivo neboli abrazivum, jež zesiluje destruktivní mechanický účinek vodního paprsku na obrobek. Mechanismus úběru obráběného materiálu je tak podobný jako při broušení (Kminiak, Kvietková, Barcík, 2011). Tak jako voda pro vodní paprsek musí splňovat některé vlastnosti, tak i abrazivum musí podléhat určitým kritériím, a to:

- malá toxicita (abrazivum nesmí dráždit pokožku, dýchací cesty a zrak obsluhujících pracovníků),
- možnost ekologické likvidace,
- běžná přístupnost,
- nízká cena,
- schopnost zajistit nejvyšší kvalitu obrábění při co nejmenším opotřebení zařízení (trysek) (Barcík a kol., 2012).

Kvalita abrazivního materiálu má značný vliv na životnost používaných trysek. Jeho hrubost se označuje zrnitostí, podobně jako u brusného papíru. Čím vyšší číslo označení, tím větší zrnitost. Zrnitost je regulována normou ČSN 224012 *Brousící materiály pro pojená tělesa. Rozbor velikosti zrn. Zrnitostní složení zrn F 4 až F 220. Stanovení, označování.*

Určující vlastnosti abraziva jsou tyto:

- tvrdost (vyšší účinnosti dosáhneme vyšší tvrdostí, dochází ovšem k rychlejšímu opotřebení trysky),
- velikost zrn (menší zrna poskytují lepší kvalitu řezu, jeho drsnosti povrchu, prodlužují však čas řezu),
- tvar zrn (rozlišuje se kulatost a kruhovitost, kulatější poskytují lepší drsnost řezu, ale také nižší hloubku řezu),

- hmotnostní tok (zvyšující se hmotnostní tok zvyšuje kinetickou energii paprsku a tak zvyšuje i hloubku řezu, překročení kritického hmotností toku má za následek snížení hloubky řezu) (Kvietková, 2015).

Nejčastějšími používanými abrazivními materiály jsou v dnešní době granát, olivín, silikátová struska. Dále se také používají křemičitý písek, korundový prášek či ocelová drť (Barcík a kol., 2012). V potravinářském průmyslu se používá kakao, sůl a ledová tříšť (Kvietková, 2015).

Chemická složení nejpoužívanějších abrazivních materiálů jsou popsána v následující Tabulce 4 a Tabulce 5.

Tabulka 4 Chemické složení abraziva – granát

(Krajný, 1998)

Granát Barton*	Fe₃Al₂(SiO₄)³	
dioxid křemíku	SiO ₂	41%
oxid železa	FeO	10%
kysličník železa	Fe ₂ O ₃	13%
kysličník hlinitý	Al ₂ O ₃	20%
oxid vápníku	CaO	3%
oxid hořčíku	MgO	12%
oxid manganu	MnO	1%

*tvrdost 8 - 9 dle Mohsovy stupnice

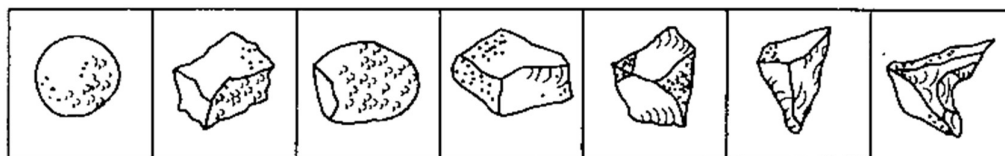
Tabulka 5 Chemické složení abraziva – olivín

(Krajný, 1998)

Olivín 24*	Mg₂SiO₄	
oxid hořčíku	MgO	47 - 48%
dioxid křemíku	SiO ₂	42 - 43%
oxidy železa	FeO + Fe ₂ O ₃	do 8%
kysličník hlinitý	Al ₂ O ₃	do 1%
oxid vápníku	CaO	do 0,5%
ostatní látky		do 1%

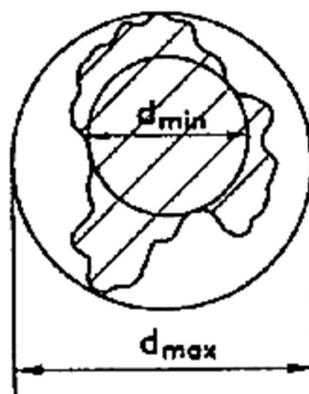
*tvrdost 7 - 8 dle Mohsovy stupnice

Tyto abrazivní materiály jsou dodávány v mnoha variantách tvarů (typické tvary australského granátu zobrazuje Obrázek 6), které se vyjadřují kulatostí a kruhovitostí, a v mnoha velikostech, které se vyjadřují granulometrickým složením. Kruhovitost se definuje jako největší naměřená vzdálenost vnitřní (vepsané) kružnice od obalové (opsané) kružnice (viz Obrázek 7). Kulatost je analogicky největší naměřená vzdálenost vnitřní koule od obalové koule (Momber, Kovacevic, 1998).



Obrázek 6 Typické tvary abrazivních částic – granát

(Momber, Kovacevic, 1998)



Obrázek 7 Znárodnění měření kruhovitosti

d_{max} – průměr obalové kružnice, d_{min} – průměr vnitřní kružnice

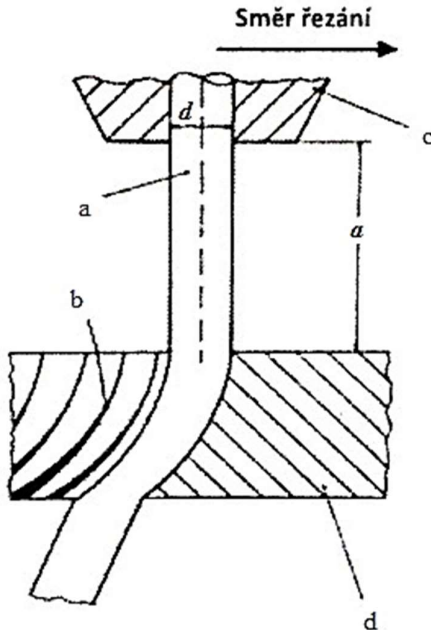
(Momber, Kovacevic, 1998)

Vzhledem k tomu, že volba použitého abraziva zásadně ovlivňuje kvalitu řezného procesu a zároveň životnost abrazivní trysky, je důležité vybrat správnou variantu jeho parametrů.

7 Řezný proces

Řezným procesem rozumíme proces úběru materiálu obrobku vlivem mechanického působení vodního, resp. kapalinového paprsku. Průběh procesu dělení

materiálů vodním paprskem je příznačný tím, že v protisměru řezání se paprsek postupně odklání. Toto odklonění (znázorněno na Obrázku 8) je způsobeno ztrátou kinetické energie vodního paprsku, která se spotřebovává na samotný úběr materiálu (Bernard, 1993).



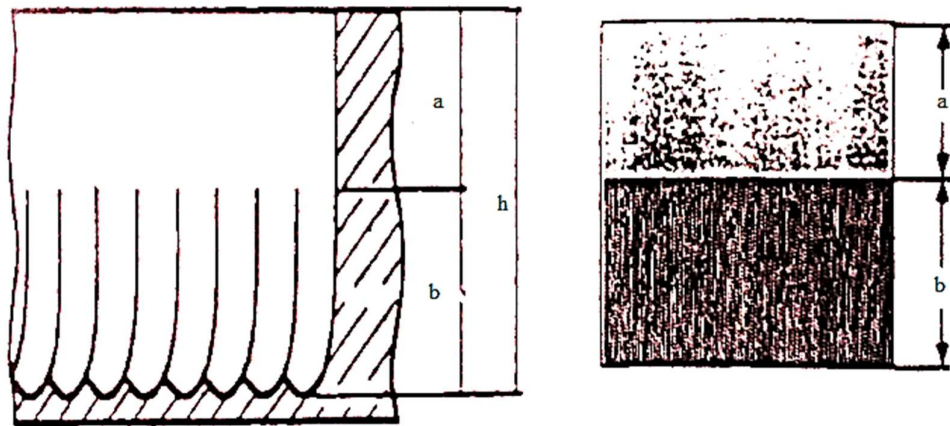
Obrázek 8 Průběh dráhy vodního paprsku

a - paprsek, b - vychýlení, c - tryska, d - obrobek, a – vzdálenost trysky od obrobku, d – průměr paprsku

(Bernard, 1993)

Kvalita řezného procesu je podmíněná tvarovou přesností, rozměrovou přesností a povrchovou přesností (mírou drsnosti obrobeneho povrchu) (Lisičan, 1996). Tvarovou přesnost a rozměrovou přesnost určuje přesnost celého obráběcího zařízení a řezný nástroj ve formě kapalinového paprsku. Při menších a středních tloušťkách materiálů je dosahovaná přesnost jmenovitých rozměrů řádově v desetinách mm, při větších tloušťkách je to řádově v mm. Drsnost obrobeneho povrchu je charakteristická tím, že se drsnost postupně zhoršuje od místa vstupu paprsku do místa jeho výstupu. Právě u abrazivního vodního paprsku je tento aspekt řezného procesu složitější než u klasických technologií obrábění. A to proto, že řezným nástrojem je zde kapalina obohacená o brusný materiál (Barcík a kol., 2012).

Abrazivní vodní paprsek totiž zanechává na obrobené ploše patrné rýhy. Tyto rýhy nepříznivě ovlivňují nejen kvalitu opracovaných ploch, ale i tvarovou přesnost obrobku. Jelikož rýhy se nezačínají tvořit ihned po vstupu paprsku do obrobku, ale až v určité hloubce, kde se postupně prohlubují, vznikají tím na obrobené ploše dvě zóny, hladká zóna a rýhovaná zóna (Maňková, 2000). Zóny zobrazuje Obrázek 9.



Obrázek 9 Zóny vzniklé řezáním abrazivním vodním paprskem

a – hladká zóna, b – rýhovaná zóna, h – hloubka řezu

(Maňková, 2000)

V následujících podkapitolách charakterizují parametry, které ovlivňují výslednou kvalitu řezu.

7.1 Tlak pracovní kapaliny

Nejdůležitějším z technologických parametrů, jež mají vliv na kvalitu řezu, je právě tlak pracovní kapaliny. Experimentální série řezání různých materiálů abrazivním paprskem potvrdila předpoklad, že zvyšováním tlaku pracovní kapaliny poroste hloubka řezu. Stejně tak zvyšování tlaku pracovní kapaliny umožňuje zvyšování posuvné rychlosti a snižování spotřeby abraziva, při vyšším tlaku tedy objem potřebného abraziva klesá (Krajný, 1998).

Při oněch experimentech byla zjištěna hodnota, která se označuje jako kritický tlak kapaliny. Kritický tlak kapaliny vyjadřuje tlak, při kterém nedochází k proříznutí materiálu. Ten je samozřejmě rozdílný v závislosti na obráběném materiálu a jeho fyzikálně-mechanických vlastnostech. Ovlivňovat kritický tlak kapaliny můžeme také změnou dalších parametrů, např. průměrem vodní trysky (zmenšením průměru vodní

trysky zmenšíme kontaktní plochu paprsku, tím zvýšíme její kinetickou energii na jednotku plochy, čímž se sníží hodnota kritického tlaku kapaliny), hmotnostním tokem abraziva (zvyšování hmotnostního toku abraziva zvyšuje kinetickou energii vodního paprsku, čímž se snižuje hodnota kritického tlaku kapaliny) nebo řeznou rychlostí (její snížení způsobí zvýšení kinetické energie paprsku a tím dojde ke snížení hodnoty kritického tlaku kapaliny) (Barcík a kol., 2012).

V důsledku technickoekonomických vlivů se v praxi používají tlaky 400 až 500 MPa, i když by bylo možné používat tlaky až 900 MPa. Důvody, proč se tyto nepoužívají, shrnul Krajný (1998) do následujících bodů:

- více paralelně zařazenými multiplikátory by se dal dosáhnout teoreticky neomezený tlak, ale nedala by se zabezpečit těsnost pracovních komor multiplikátoru,
- akumulátor zabezpečující rovnoměrnost dodávaného množství kapaliny a snížení kolísání tlaku by musel být rozměrově velký,
- přívodní potrubí by muselo vyhovovat z pevnostního hlediska,
- při vysokých tlacích je velmi vysoká stlačitelnost kapaliny a kavitace, která by nastávala ve vnitřku kapaliny ještě před řeznou hlavicí, by snižovala účinnost řezání,
- docházelo by ke zvýšenému opotřebenímí vodní a abrazivní trysky vlivem nedokonalosti současných materiálů, ze kterých jsou vyráběny.

Dále je potřeba vzít v úvahu, že v důsledku stlačitelnosti vody se zvyšováním tlaku pracovní kapaliny snižuje její hydromechanická účinnost a dochází k rozšiřování vodního paprsku (Barcík a kol., 2012).

7.2 Průměr vodní trysky

Průtok pracovní kapaliny můžeme ovlivňovat jak změnou tlaku pracovní kapaliny, tak změnou vnitřního průměru vodní trysky. Při změně vnitřního průměru vodní trysky měníme tedy průtok pracovní kapaliny a tím i její kinetickou energii nezbytnou na rozrušení obráběného materiálu. Tuto energii zvýšíme právě zvětšením vnitřního průměru trysky. Průtok pracovní kapaliny q_v můžeme vypočítat ze vztahu:

$$q_v = S \cdot V_v \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

kde:

S – plocha otvoru trysky [m^2],

v_v – rychlost proudu kapaliny [m/s], pro kterou platí následující vztah:

$$v_v = \mu_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

kde:

μ_v – koeficient rychlosti ($\mu_v = 0,95 - 0,97$),

ρ – hustota kapaliny (pro vodu $\rho = 998 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

p – tlak kapaliny.

V souvislosti s tímto byla objevena existence kritického průměru vodní trysky pro jednotlivé technologické parametry obrábění. Pro trysky, s menším průměrem než je kritický průměr, je hloubka řezu nulová nebo velmi malá, a tedy neefektivní. Praktickými zkouškami pak byl zjištěn optimální vnitřní průměr trysky, jenž je 2 -3 násobek průměru kritického.

Zvyšování průměru vodní trysky nad tuto hranici už by bylo kontraproduktivní. Bylo by pak nutné zvýšení průměru i trysky abrazivní a koncentrace energie abrazivních částic by při stejném hmotnostním toku abraziva klesala a rychlost abrazivních částic už by výrazněji nestoupala. Také by docházelo k vyšším tlakovým ztrátám v přívodním systému, rozšiřování paprsku, tříštění abrazivních částic a k vyššímu opotřebenosti abrazivní trysky (Krajný, 1998).

7.3 Parametry abraziva

7.3.1 Druh materiálu abraziva

Do úvahy se při výběru abraziva berou tři nejdůležitější materiálové vlastnosti, a to hustota, tvrdost a pevnost.

Vliv hustoty je takový, že při stejném hmotnostním toku je proud abraziva vstupující do trysky více rovnoměrný (tedy žádoucí stav) u materiálů s vyšší hustotou, např. granát $\rho = 4 \text{ g/cm}^3$, než u materiálů s hustotou nižší, např. křemičitý písek $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$. Hustota abraziva ovlivňuje i hybnost abrazivních částic po opuštění abrazivní trysky, kdy u těžších materiálů je tato hybnost vyšší (Vajdová, Mičietová, [cit. 2017-04-05]).

Vyšší tvrdost abrazivního materiálu na jednu stranu zvyšuje řeznou rychlost, na druhou pak zvyšuje opotřebenosti abrazivní trysky. Právě vzhledem k opotřebování abrazivní trysky se považuje za optimální poměr tvrdosti abrazivních částic k tvrdosti obráběného materiálu 0,8 – 1,5.

Pevnost abraziva ovlivňuje jeho fragmentaci. Při tříštění abrazivních částic vzájemnými nárazy dochází ke ztrátě jejich hybnosti a tedy schopnosti pronikat

do obráběného materiálu. Tato ztráta hybnosti je částečně vyvažována vznikem dalších řezných hran po rozpadu částice na více fragmentů (Barcík a kol., 2012).

7.3.2 Tvar a velikost abraziva

Velikost abrazivních částic výrazněji ovlivňuje hloubku řezu a drsnost povrchu obroběného materiálu, ale už nemá větší vliv na nejvyšší možnou rychlost posuvu. Jednotkou, ve které se uvádí velikost abraziva, je MESH a znamená to počet ok síta na délku jednoho palce. Velikost abraziva se tedy zjišťuje prosíváním přes síta s přesně definovanou velikostí ok, kterým je přiřazena určitá hodnota MESH (Krajný, 1998). Příklad velikostí abrazivních částic je zobrazen v Tabulce 6.

Tabulka 6 Velikost abrazivních částic

(Krajný, 1998)

Velikost částic abraziva - granát	
MESH	velikost otvorů síta [mm]
16	1,000
32	0,417
60	0,250
80	0,188
100	0,150
150	0,106
250	0,063

Co se týče tvaru abrazivních částic, ideální tvar poskytují abrazivní částice s vysokou kulatostí a malou kruhovitostí (Havlík, 1995).

7.4 Hmotnostní tok abraziva

Při zvyšování dodávaného množství abraziva do toku čistého kapalinového paprsku neboli zvyšování hmotnostního toku abraziva roste kinetická energie abrazivních částic a zvyšuje se tak hloubka řezu, které můžeme dosáhnout. Kinetickou energii abrazivních částic E_a definuje vztah:

$$E_a = \frac{1}{2} m_a \cdot v_a^2 \quad [\text{J}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (7)$$

kde:

m_a – hmotnostní tok abraziva [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],

v_a – rychlost abraziva vycházejícího z hlavice [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Zvyšování hmotnostního toku abraziva také pozitivně ovlivňuje kvalitu opracovaného povrchu obráběného materiálu. Hmotnostní tok je ovšem omezen tzv. kritickým hmotnostním tokem, kdy po jeho překročení řezná hloubka již neroste, ale naopak klesá. Kinetická energie abrazivních částic se po překročení kritické hodnoty hmotnostního toku totiž vyčerpává na vzájemné narážení částic mezi sebou (Barcík a kol., 2012).

7.5 Parametry směšování

Na směšování abraziva a kapalinového paprsku mají velký vliv rozměry a tvar směšovací komory a abrazivní trysky. Směšovací komora spolu s tlakem kapalinového paprsku určují maximální hmotnostní tok abraziva a abrazivní tryska zajišťuje promíchání kapaliny s abrazivem a zaostření abrazivního paprsku.

Průměr abrazivní trysky ovlivňuje účinnost řezání a kvalitu řezné plochy. Její délka zase ovlivňuje výstupní rychlost abrazivního paprsku a jeho soudržnost (Krajný, 1998). Zde platí, že se zvětšováním délky abrazivní trysky stoupá hloubka řezu a klesá šířka řezné spáry. Zároveň tento jev platí pouze do délky abrazivní trysky 50 – 70 násobku průměru abrazivní trysky, při větších délkách se tento jev převrací (Barcík a kol., 2012).

7.6 Posuvná rychlost

Snížením nebo zvýšením posuvné rychlosti ovlivňujeme hloubku řezu a kvalitu povrchu obrobené plochy. Při menší rychlosti posuvu dopadá na obráběný materiál více abrazivních částic a můžeme tedy obrobít silnější materiál nebo dosáhnout lepší kvality řezné plochy. Při těchto nižších rychlostech, kde se soustřeďuje více abrazivních částic a roste tak energie potřebná k destrukci materiálu, se rozdělení hustoty energie abrazivních částic neboli množství částic potřebných na generování drážky s jednotkovou délkou při daných parametrech označuje *PDD*.

$$PDD = \frac{m_a}{v_f} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}] \quad (8)$$

kde:

PDD - rozdělení hustoty energie abrazivních částic neboli množství částic potřebných na generování drážky s jednotkovou délkou při daných parametrech,

m_a – hmotnostní tok abraziva [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$],

v_f – posuvná rychlost vodní paprsku vůči obrobku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Kinetická energie tohoto množství abrazivních částic je definována takto:

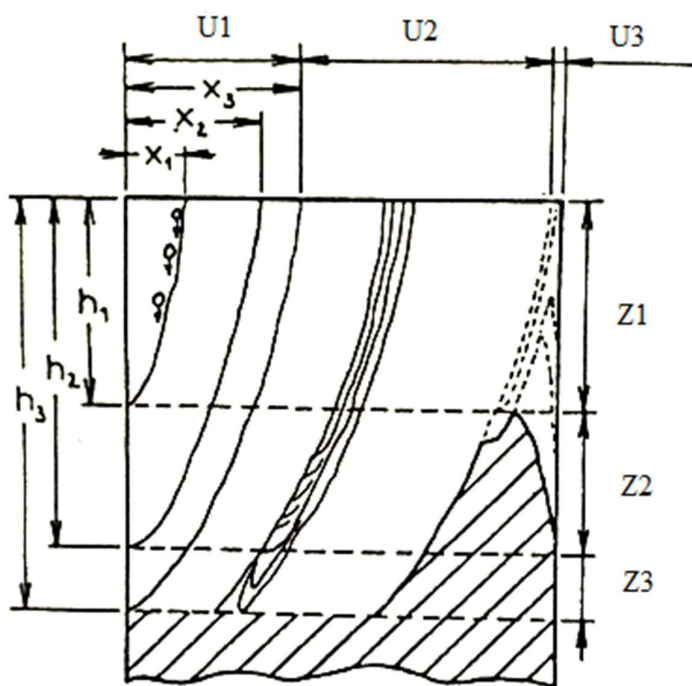
$$EDD = \frac{1}{2} \cdot PDD \cdot v_a^2 \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (9)$$

kde:

EDD – rozdělení hustoty energie abrazivních částic neboli množství energie připadající na jednotku délky generované drážky $[\text{J} \cdot \text{m}^{-1}]$,

v_a – rychlost abraziva vycházejícího z hlavice $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ (Hashish, 1991).

Změny rychlosti posuvu ovlivňuje i reliéf obrobené plochy a to vytváří na povrchu obráběného materiálu tři úseky a tři zóny (viz Obrázek 10).



Obrázek 10 Reliéf řezné plochy

U1 – úsek 1, U2 – úsek 2, U3 – úsek 3, Z1 – zóna 1, Z2 – zóna 2, Z3 – zóna 3

(Krajný, 1998)

Úsek 1 od okraje materiálu je úsek začátku tvorby řezné drážky. Ve vzdálenosti x_1 je dosažena hloubka řezu h_1 a k rozrušení materiálu dochází při malých úhlech působením abrazivních částic na materiál (zóna 1). Průnik paprsku z hloubky h_1 do hloubky h_2 ve vzdálenosti x_1 až x_2 se vyznačuje vyšším úhlem působení abrazivních částic (zóna 2). V rozmezí hloubek x_2 až x_3 (zóna 3) je rozrušování materiálu pod velmi velkým úhlem působení abrazivních částic spojené s odrazem paprsku od dna drážky a s jeho odklonem nahoru.

Úsek 2 je úsek s cyklickým řezným procesem, který pokračuje, dokud paprsek nedosáhne koncový okraj materiálu. V tomto úseku je dosaženo plné hloubky řezu dané technologickými parametry.

V úseku 3 končí řezný proces a je charakteristický tím, že materiál je přeřezaný pouze do hloubky h_1 . Nastal zde velký odklon paprsku od původního směru vlivem ztráty energie a odporu materiálu, a proto nebyl materiál proříznut do celkové hloubky h_3 (Krajný, 1998).

Zóna řezného opotřebení materiálu (zóna 1) je oblast, ve které nastává rozrušování materiálu pod velmi malým úhlem působení abrazivního paprsku. Zóna je charakteristická přijatelnou kvalitou řezu.

V zóně deformačního opotřebení materiálu (zóna 2) dochází k řezání materiálu pod vysokým úhlem působení abrazivního paprsku a řezání se realizuje přerušovaným odebráním materiálu. Zóna je charakteristická zhoršenou kvalitou řezu, vysokou vlnitostí plochy a zářezy.

Zóna nedořezání materiálu (zóna 3) vzniká pouze tehdy, nedojde-li při daných technologických parametrech k přeřezání materiálu. Tvoří přechod mezi vytvořenou řeznou plochou a nedořezaným materiálem.

Snižováním řezné rychlosti nastává pokles velikosti úseku 1 a 3, zároveň se zvětšuje velikost zóny 1. V závislosti na tloušťce materiálu dochází ke snížení velikosti zóny deformačního opotřebení (zóna 2) a zóna 3 se tak na řezné ploše nemusí vyskytovat (Krajný, 1998).

7.7 Vzdálenost trysky od obrobku

Nežádoucím jevem, který je přítomen u vodního paprsku, je ten, že proud vodního paprsku se po opuštění trysky rozšiřuje. To má za následek pokles tlaku a rychlosti kapaliny (Vlastník, 1983).

Tento jev se vysvětluje jako tzv. provzdušňování vody, kdy dochází k postupnému nasycení paprsku od jeho povrchu směrem k jeho jádru vzduchem. Uvnitř paprsku se zachovává celistvé jádro proudu kapaliny s konstantní rychlostí, která zůstává stejná jako rychlost při opuštění trysky. Tento průměr jádra paprsku se s rostoucí vzdáleností od ústí trysky blíží k nule. Úsek paprsku s celistvým jádrem je označován jako pracovní. Průměrný dynamický tlak p_{av} ve vzdálenosti l od ústí trysky se vyjádří vztahem:

$$p_{av} = 0,257 \cdot p \cdot \left(\frac{l_c}{l}\right) \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

kde:

p – tlak kapaliny v ústí trysky [Pa],

l_c – vzdálenost paprsku od ústí trysky, ve kterém je tlak ještě rovný tlaku p [m],

l – vzdálenost paprsku od ústí trysky [m].

Maximální možná vzdálenost trysky od obrobku l_{max} , kde již nedochází k řezání, se vypočte takto:

$$l_{max} = \frac{2p}{\sigma_c} \cdot l_c \quad [\text{m}] \quad (11)$$

kde:

p – tlak kapaliny v ústí trysky [Pa],

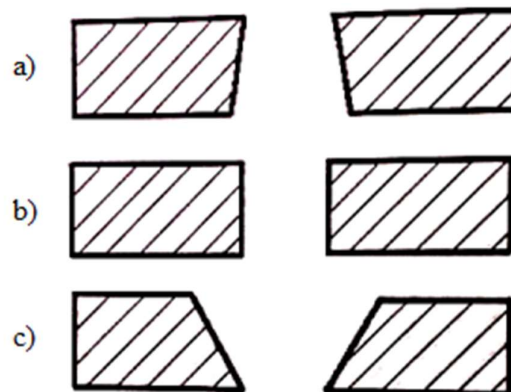
σ_c – mez pevnosti v tlaku řezaného materiálu [Pa],

l_c – vzdálenost paprsku od ústí trysky, ve kterém je tlak ještě rovný tlaku p [m].

Pokud bude paprsek kapaliny vycházet z trysky ze vzdálenosti od obrobku větší než je l_{max} , může způsobovat maximálně plastickou deformaci materiálu nebo vyvolat únavové poškození materiálu způsobené opakovaným narážením kapek vody.

V této závislosti vzdálenosti trysky od obrobku vznikají tři typy řezné spáry zobrazené na Obrázku 11, a to:

- řezná spára rozšířená k výstupní straně vodního paprsku z materiálu (vzniká při velmi malé vzdálenosti trysky od obrobku),
- řezná spára rovnoměrná po celé výšce (vzniká při ideální vzdálenosti trysky od obrobku),
- řezná spára zúžená k výstupní straně vodního paprsku z materiálu (vzniká při velké vzdálenosti trysky od obrobku) (Krajný, 1998).



Obrázek 11 Geometrie řezné spáry

(Krajný, 1998)

7.8 Počet přechodů paprsku

Jeden z možných způsobů, jak dosáhnout vyšší hloubky řezu, je zvýšení počtu přechodů paprsků po stejné dráze řezu při nezměněných ostatních technologických parametrech (Hashish, 1991). Ovšem jak ukázaly zkušební řезы, při každém dalším přechodu paprsku po stejné dráze řezu je přírůstek hloubky nižší. Příčinou toho je odpor stěny řezné drážky, která zabraňuje odchodu již použité kapaliny a abraziva z řezu v dané hloubce. Stejně tak je snižené odplavování částic rozrušeného materiálu, které zabírají také určitý objem. Společně tak vytvářejí překážku pro další průnik vodního paprsku a tlumí tak jeho účinek. Paprsek tedy musí spotřebovat část své kinetické energie na překonání této vzniklé překážky a jeho řezací schopnost klesá. Důsledkem toho je snížení hloubky průniku paprsku při každém dalším přechodu po stejné dráze řezu (Krajný, 1998).

7.9 Úhel dopadu paprsku

Při dělení materiálů technologií vodního paprsku se nejčastěji používá úhel dopadu paprsku na materiál 90° , tzn. osa paprsku je kolmá na povrch obráběného materiálu. Řezání pod tímto úhlem je také nejúčinnější (Wang, 2003). Při změně úhlu dopadu paprsku se mění nejen hloubka řezu, ale i jeho kvalita. Má se za to, že je to důsledek změny mechanismu rozrušování materiálu, protože kinetická energie paprsku působí vertikálním i horizontálním směrem (Madera, 1990).

7.10 Materiál obrobku

Zajisté není zapotřebí rozsáhle vysvětlovat či dokazovat, jaký vliv má na obráběcí proces (nejen vodního paprsku) druh obráběného materiálu. Každý jistě vnímáme rozdíl v tom, jestli je obráběným materiálem ocel, dřevo, pryž či salát. Změnou materiálu dochází ke změně řezných výsledků, jako jsou hloubka řezu či kvalita řezné plochy (při nezměněných ostatních technologických parametrech). I proto jsou pro řezný proces důležité vlastnosti právě obráběného materiálu.

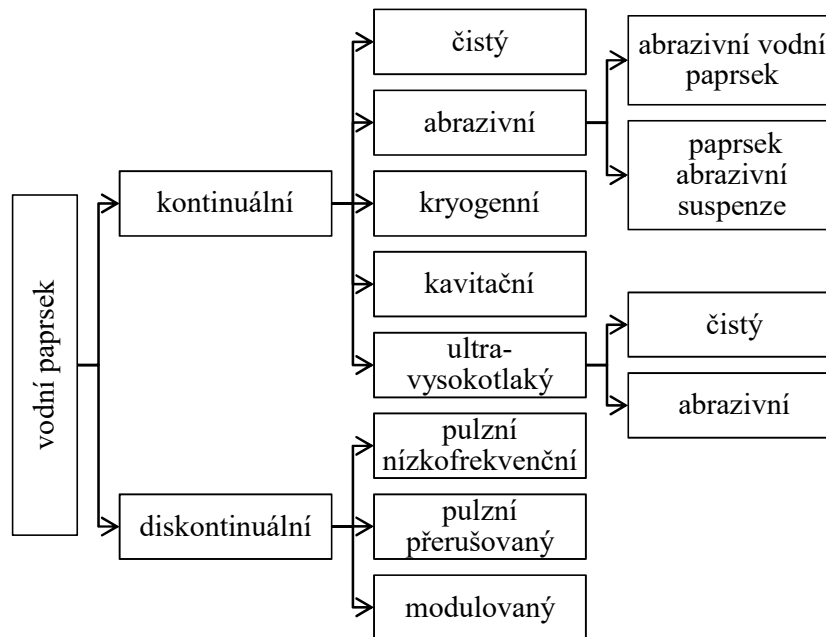
V tomto ohledu je dřevo specifický materiál. Kvalita jeho opracování vodním paprskem je přitom závislá právě na druhu opracovávané dřeviny a jejích odlišných vlastnostech (smrk, dub, buk, každá dřevina má jinou anatomickou stavbu).

Kvalita opracování vodním paprskem dále závisí na směru, ve kterém je dřevní materiál opracovávaný. Dřevo je totiž anizotropní materiál. Má tedy rozdílné vlastnosti v závislosti na směru (příčný, radiální a tangenciální) (Kvietková, 2015). Vzhledem právě

k jeho anatomické stavbě a pórovité struktuře není možné u něj při opracování vodním paprskem dosáhnout hladkého povrchu (Barcík a kol., 2012).

8 Rozdělení vodních paprsků

Existuje několik druhů kapalinových paprsků. Ty lze rozdělit podle hladiny energie v paprsku po dobu trvání procesu řezání, a to buď na vodní paprsek se stálou hladinou energie, tzv. kontinuální, nebo na vodní paprsek s proměnlivou hladinou energie, tzv. diskontinuální. Dále se tyto dělí na další podtypy, viz následující schéma.



Obrázek 12 Rozdělení vodních paprsků.

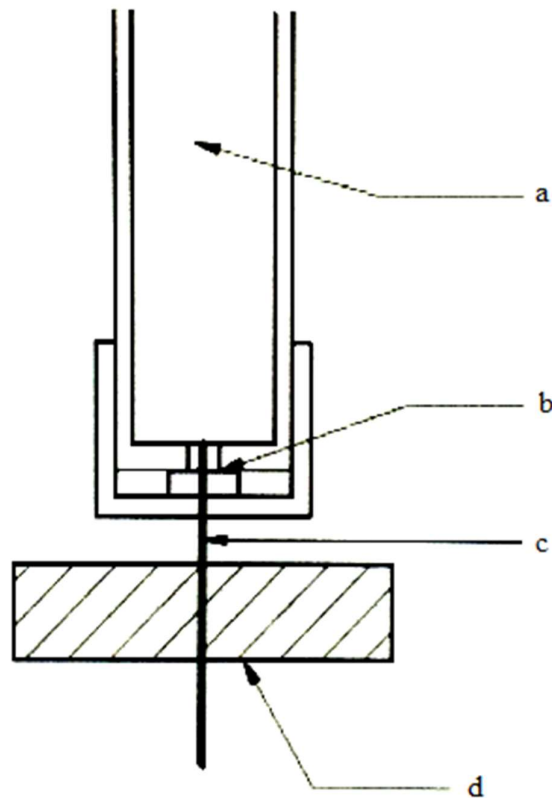
8.1 Kontinuální paprsek

Základním znakem kontinuálního vodního paprsku je tedy stálá hladina energie v průběhu obrábění.

8.1.1 Čistý vodní paprsek WJM

Čistý vodní paprsek je prvním typem kapalinových řezných paprsků. Jako kapalina je používána čistá voda. Stlačená voda vystupující z vodní trysky jako paprsek je nositelem kinetické energie a z hlediska jeho účinku ho můžeme považovat za pevné těleso. Dochází tedy k rozrušování děleného materiálu tlakem paprsku čisté vody. Průměr výstupní trysky bývá v rozmezí 0,08-0,3 mm, nejčastěji však 0,3 mm (Barcík a kol., 2013).

Vhodnými materiály pro řezání čistým vodním paprskem jsou pryž, lepenka, plasty, měkké nebo tenké dřevo a další. Princip technologie zobrazuje Obrázek 13.



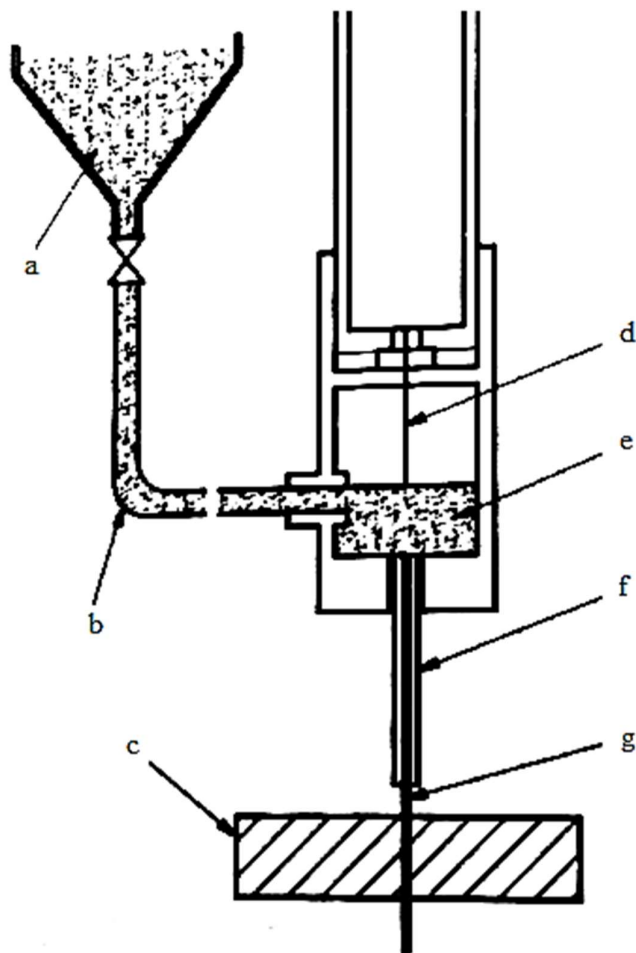
Obrázek 13 Znárodnění trysky pro čistý vodní paprsek.

a – stlačená voda, b – vodní tryska, c – vodní paprsek, d – obrobek

(Kvietková, 2015)

8.1.2 Abrazivní vodní paprsek

Abrazivní vodní paprsek představuje metodu řezání vodou obohacenou o abrazivum neboli jemné brusivo, které zvyšuje účinek proudu vody. Abrazivum jako jemná brusná zrna se mísí s vodou a vytváří tak abrazivní vodní paprsek. Řezný proud je tak účinnější a dokáže řezat tvrdší materiály, např. nerezovou ocel, slitiny titanu, hliník, karbon, keramiku, sklo, tvrdé dřevo a další. Průměr výstupní trysky bývá 0,5 - 1,5 mm. Princip technologie zobrazuje Obrázek 14 (Maňková, 2000).



Obrázek 14 Znázornění abrazivního vodního paprsku

a – zásobník abraziva, b – přívod abraziva, c – obrobek, d – vodní paprsek, e – směšovací komora, f – abrazivní tryska, g – abrazivní vodní paprsek

(Maňková, 2000)

V rámci abrazivních vodních paprsků ještě můžeme rozlišovat abrazivní vodní paprsek (zkratka AWJ) a paprsek abrazivní suspenze (zkratka ASJ).

8.1.2.1 Abrazivní vodní paprsek AWJ

U abrazivního vodního paprsku se abrazivní částice smíchají s vodou ve směšovací komoře až za vodní tryskou, kde jsou tyto částice do vody nasáty podtlakem, a následně vstupují společně do zaostřovací abrazivní trysky, kde jsou usměrněny. Pracovní tlak dosahuje běžně hodnot až 420 MPa. Dodávané množství abrazivních částic může být 0,5 až 20 kg.min⁻¹. Nevýhodou této metody je nižší životnost

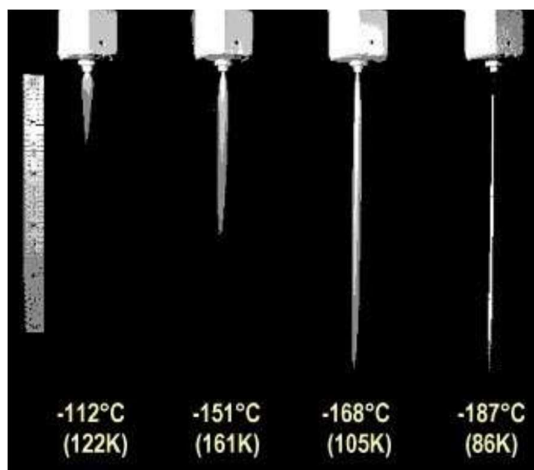
trysky vlivem namáhání abrazivními částicemi. Kvůli zvýšení odolnosti se trysky vyrábějí z vysoce tvrdých materiálů. Jejich životnost při běžném používání dosahuje přes 100 hodin (Kvietková, 2015).

8.1.2.2 Paprsek abrazivní suspenze ASJ

U paprsku abrazivní suspenze se abrazivní částice smíchají s vodou v tlakové nádobě ještě před tryskou. Následně je suspenze vedena do speciálně zkonstruované trysky, kde vznikne abrazivní paprsek. Množství dodávaného abraziva může překročit u tohoto způsobu podávání i $20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$, pro přesné řezání se však běžně používá okolo 1 až $3 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$. Tato technologie generuje pracovní tlak běžně pouze do 100 MPa (Kvietková, 2015).

8.1.3 Kryogenní paprsek

Tato metoda nevyužívá k dělení materiálu vodu, ale je zkonstruována na využití jako pracovního média tekutého dusíku. Všechny součásti mechanismu tak musejí být zkonstruovány na provoz ve velmi nízkých teplotách až do -190°C . Při teplotě vyšší než -151°C se dusík začne odpařovat příliš brzy a nemá tedy dostatečný řezný výkon. Při -190°C má paprsek stejný výkon jako klasický vodní paprsek. Účinnost tekutého dusíku za různých teplot je znázorněn na Obrázku 15. Tedy čím je teplota dusíku nižší, tím účinněji řeze. Díky následnému odpařování dusíku dochází k eliminaci odpadu a je tak tato metoda šetrná k životnímu prostředí. Kryogenní paprsek využijeme při řezání chemicky reaktivních materiálů, materiálů nesnášejících vodu nebo v kontaminovaných prostředích (Kvietková, 2015).



Obrázek 15 Paprsky tekutého dusíku za různých teplot

(Jáchym, 2009)

8.1.4 Kavitační paprsek

Kavitace je složitý jev, při němž dochází ke vzniku a zániku dutin (bublin) v proudící kapalíně. Vlivem tlaku proudící kapaliny je u těchto dutin vyvolána imploze. Zhroucení těchto dutin vyvolává rázové vlny s destruktivními účinky na okolní materiál. Kavitační dutiny vznikají v paprsku nepravidelně (Jurečka, 2010). I přesto se kavitační paprsky generované při nízkých tlacích do 100 MPa používají v případech, kdy je vyžadována značná přesnost finálního řezu. Ačkoliv kavitační paprsky vykazují lepší vlastnosti než klasický vodní paprsek, je jeho využití v praxi malé také kvůli velké složitosti konstrukce trysky tvořící kavitaci nebo velmi krátké pracovní vzdálenosti (Kvietková, 2015).

8.1.5 Ultra-vysokotlaký vodní paprsek

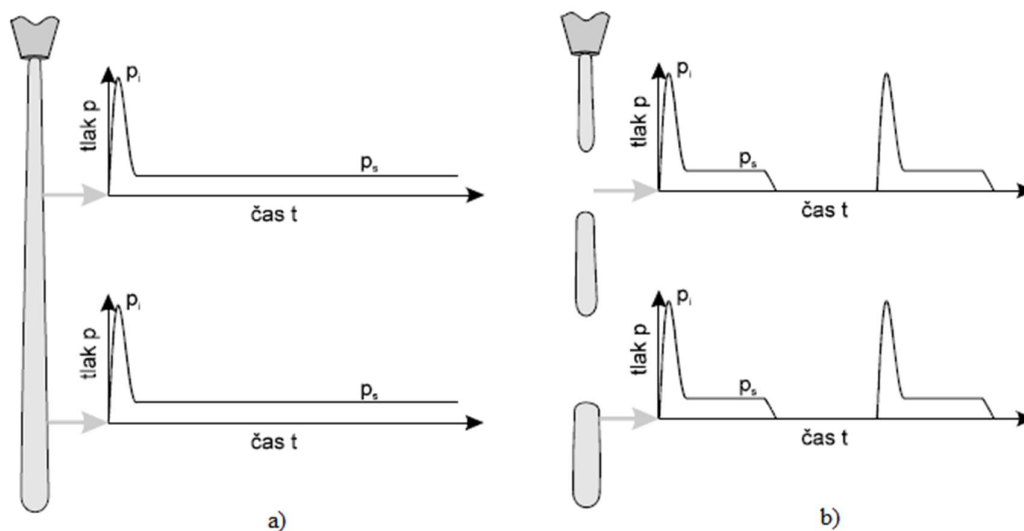
Ultra-vysokotlaký vodní paprsek využívá efektu fyzikálních zákonů, kdy za použití vyššího tlaku a sníženého průměru vodního paprsku se zvyšuje kinetická energie řezného nástroje, tedy vody, a tím jeho efektivita. Cílem této metody je nejen zvýšení kvality řezání, ale i snížení doby řezání a nákladů spojených s použitím abraziva. Metoda využívá pracovního tlaku 600 MPa a je tak až o 50 % vyšší než u předchozích metod. Tím pádem je možné řezat tvrdší materiály s nižším či nulovým obsahem abraziva. Současně je i snížena spotřeba vody. Nevýhodou je ovšem snížená životnost použitých vysokotlakých čerpadel a rozvodného systému (Slovník k Vodnímu Paprsku, [cit. 2017-02-10]).

8.2 Diskontinuální vodní paprsek

Diskontinuální vodní paprsek je charakterizován proměnnou hladinou energie paprsku po dobu trvání řezného procesu. Je tvořen jednotlivými pulsy vodního paprsku a obráběný materiál je tak zatěžován cyklicky nárazovými tlaky. Metoda má tedy za cíl zvětšení účinnosti vodního paprsku zavedením přídavné energie do paprsku.

8.2.1 Pulzní nízkofrekvenční paprsek

Pulzní paprsek je generován jednotlivými sloupci (pulzy) vody, které vytvářejí při nárazu na povrch obráběného materiálu rázový tlak, tzv. impaktní, který je několikanásobně vyšší než tlak stagnační, který se vytváří u paprsku kontinuálního. Působení tlaku v čase v porovnání s kontinuálním paprskem zobrazuje Obrázek 16.



Obrázek 16 Působení tlaku kontinuální vs. pulzní paprsek

a) kontinuální paprsek, b) pulzní paprsek

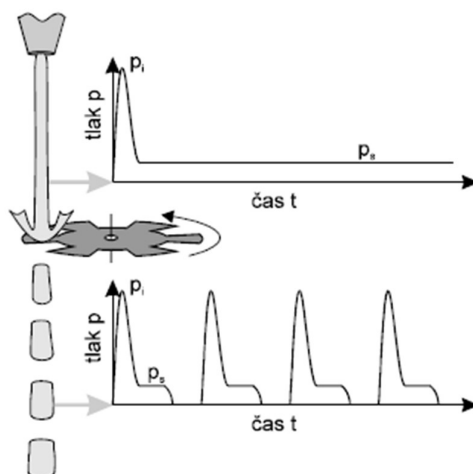
(Krajný, 1998)

8.2.2 Pulzní přerušovaný paprsek

Pulzní přerušovaný paprsek se při výstupu média z trysky chová jako paprsek kontinuální. Po výstupu z trysky je teprve přerušován, a to buď mechanicky pomocí rotujícího kotouče se zářezy, nebo zuby, případně pomocí laseru. Působení tlaku je znázorněno na Obrázku 17.

Při použití rotujících kotoučů má na vlastnosti pulzů vliv poloha a velikost otvorů v přerušovacím kotouči a jeho otáčky. Také dochází k energetickým ztrátám, protože rotující kotouč odráží část energie zpět a nemá tak podstatné využití v praxi.

V případě využití k přerušování paprsku laseru by bylo zapotřebí využívat laser o výkonu asi 2 MW. A proto ani tato metoda nemá v praxi reálné využití (Jáchym, 2009).

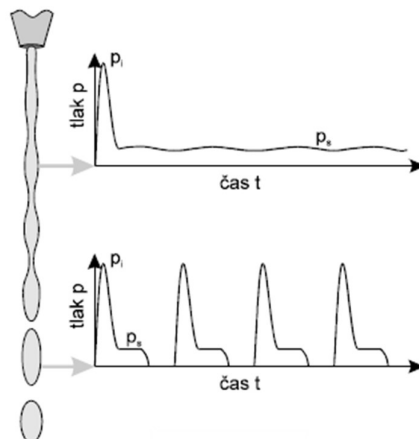


Obrázek 17 Působení tlaku - pulzní přerušovaný paprsek

(Krajný, 1998)

8.2.3 Modulovaný vodní paprsek

Na rozdíl od předchozích pulzních paprsků, které jsou tvořené za sebou jdoucími oddělenými sloupci vody, přičemž každý sloupec můžeme považovat za samostatný kontinuální paprsek, modulovaný vodní paprsek vychází z trysky jako kontinuální proud kapaliny s proměnnou axiální rychlostí (cyklicky modulovanou v čase). To má za následek, že rychlejší a pomalejší části každého cyklu mají tendenci se spojovat (Krajný, 1998). Vlivem toho dochází k rozdělení paprsku na jednotlivé pulzy až v určité vzdálenosti od trysky, v tzv. rozpadové vzdálenosti. Uvedený proces je znázorněn na Obrázku 18. Podstatnou výhodou oproti předešlým pulzním paprskům je, že nedochází ke ztrátě energie paprsku (Veselý, 2008).



Obrázek 18 Působení tlaku - modulovaný paprsek

(Barčík a kol., 2012)

9 Průmyslová aplikace technologie vodního paprsku

Technologie dělení materiálů vodním paprskem má kromě obrábění dřeva a aglomerovaných materiálů na bázi dřeva široké uplatnění. V této kapitole uvedu příklady její průmyslové aplikace:

- chemický průmysl – dělení výbušných látek, plastických hmot, těžkoobrobitelných kompozitních materiálů,
- elektrotechnický průmysl – dělení izolačních materiálů, skla, keramiky,
- papírenský průmysl – dělení buničiny, papíru a novinového papíru,
- automobilový průmysl – dělení kovů, gumy, koberců, keramiky,
- strojírenský průmysl – dělení vysoce odolných a pevných materiálů a kompozitních materiálů, skla, výroba tvarově velmi složitých součástek, obrábění rotačních součástek, čištění povrchů, soustružení a frézování (Vajdová, Mičietová, [cit. 2017-04-05]),
- jaderný průmysl – odstraňování vrstev a usazenin v zařízeních jaderných elektráren,
- stavební průmysl – dělení plastů, betonu, kamene, dlažby, keramiky.
- gumárenský průmysl – dělení plastů, gumy, kevlaru,
- potravinářský průmysl – dělení ovoce a zeleniny, masa, sýrů apod. v syrovém a zmrzlém stavu,

- sklářský průmysl – dělení a vrtání skla,
- obuvnický průmysl – dělení kůže, plastů (Kvietková, 2015).

10 Bezpečnost při práci s kapalinovými paprsky

Zařízení pro dělení materiálů čistým nebo abrazivním paprskem jsou výkonné řezné nástroje. Stejně jako je tomu u všech ostatních průmyslových strojních zařízení i tyto stroje pro kapalinové paprsky mají určitá rizika vyplývající z jejich povahy i z jejich širokého spektra využití. Všechna tato i jiná průmyslová zařízení sloužící k obrábění mají řezné nástroje a další části zařízení, které mohou pořezat či jinak poranit osoby v jejich blízkosti. Znalost těchto rizik je samozřejmě nezbytná pro bezpečný provoz takovýchto zařízení. Považuji proto za vhodné do své práce zařadit rovněž tuto kapitolu, která se bude zabývat právě bezpečnostními riziky, resp. bezpečnostními zásadami při práci se zařízeními pro dělení materiálů kapalinovým paprskem.

Oblasti pro bezpečnostní pravidla či doporučení při práci s těmito zařízeními můžeme rozdělit na 4 části, a to na nízkotlaký okruh oleje v multiplikátoru, vysokotlaký okruh vody, okruh filtrace technologické kapaliny a řídicí a manipulační jednotku. U každé z těchto částí představím několik základních a důležitých bezpečnostních zásad.

10.1 Nízkotlaký okruh oleje v multiplikátoru

V této části zařízení se, jak již bylo uvedeno, nachází hydraulická kapalina, tedy olej, který pohání písty v multiplikátoru. Tyto hydraulické systémy vyrábějí renomovaní výrobci a jsou tedy bezpečné a ověřené. Ovšem i tak může dojít k poruše vlivem chyby nebo únavy materiálu, která by mohla ohrozit bezpečnost pracovníka, jako např. vytékající olej (vlivem netěsnosti nebo stárnutím hadic) nebo poškození jednotlivých částí zařízení, které jsou zatíženy tlakem kapaliny, které mohou mít za následek uklouznutí a pád obsluhy, může poškodit podlahu nebo může proniknout do okolí (Krajný, 1991). Je tedy potřeba dodržovat jisté zásady při používání hydraulického systému:

- hydraulické prvky nesmějí být přetěžovány tlaky, než na jaké byly konstruované,
- pokud je to možné, doporučuje se umístit multiplikátor do samostatné místnosti,

- tuto místnost je nutné udržovat v čistotě (při úniku oleje ho ihned odstranit, stejně tak najít příčinu jeho úniku),
- elektrické prvky zařízení musejí být chráněny před přímým působením oleje,
- při každém zásahu do systému musí být agregát vypnut,
- hydraulické prvky, tlakové hadice a potrubí musejí být chráněny před vnějším mechanickým poškozením,
- stejně tak musejí být chráněny proti přetížení tlakovým pojistným ventilem,
- údržbu a opravy musí provádět pouze způsobilý pracovník (Krajný, 1991; Kmec, 2013).

10.2 Vysokotlaký okruh vody

Vysokotlaký okruh vody je sestaven z vysokotlakých trubek a dalších pomocných prvků, na které jsou už ve výrobě kladeny vysoké požadavky na kvalitu, spolehlivost a bezpečnost. Kvalita je daná již výběrem materiálu a vhodnou konstrukcí samotných vysokotlakých obvodů. Platí zde principiálně stejné zásady jako v nízkotlakém okruhu v předchozí kapitole (Krajný, 1991).

10.3 Okruh filtrace technologické kapaliny

Okruh filtrace zabezpečuje požadovanou čistotu kapaliny, kterou je možné odvádět do odpadní kanalizace, resp. v uzavřeném hydraulickém okruhu se jedná o recyklaci zužitkované technologické kapaliny a její opakované použití v zařízení. Touto úpravou jsou z vody odstraňovány drobné částice z obrobeného materiálu, eventuálně i abrazivní částice v případě použití abrazivního paprsku. Tento okruh neobsahuje zvláště nebezpečné prvky a komponenty ohrožující bezpečnost obsluhujících pracovníků (Krajný, 1991).

10.4 Řídící a manipulační jednotka

Organizaci a bezpečnost při práci významně ovlivňuje zavádění automatizovaných zařízení do výroby. Mění se přitom i struktura rizik, charakter činnosti lidí a jejich zapojení do výroby. Tím dochází i ke změně úrovně bezpečnosti jak samotných výrobních systémů, tak i pracovišť. Hlavní druhy rizik při zavádění automatizovaných zařízení jako nosičů řezné hlavice s vodním paprskem jsou tyto:

- riziko kolize člověka s pohyblivou částí průmyslového robota,
- riziko přitlačení člověka mezi pohyblivou část robota a pevnou překážku,
- riziko selhání elektronického bezpečnostního signalizačního systému,
- tradiční zdroje rizik poškození zdraví (např. elektrickým proudem, pracovní kapalinou vytékající vysokou rychlostí apod.) (Krajný, 1991).

Řezání vodním nebo abrazivním paprskem je i přes vyřčená rizika jednou z bezpečnějších technologií obrábění, ale i přesto je třeba provádět preventivní opatření či se držet stanovených pravidel, abychom minimalizovali pravděpodobnost možného zranění. Mezi těmito pravidly jsou:

- nedávat ruce do nádrže ani do pracovního prostoru zatímco je paprsek v provozu (tryska, z níž proudí vysokou rychlostí nejen voda, ale i abrazivum, je výkonný řezný nástroj, který snadno může přivodit člověku nepříjemná zranění),
- nosit ochranné brýle (při použití abraziva mohou odlétávat částice abraziva),
- používat ochranu sluchu (během řezání paprskem, kdy obrobek není ponořen do vody),
- dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s materiálem nebo používat zvedací zařízení (podpěrný rošt bývá ostrý a rozřezaný od paprsku a má tak spoustu ostrých hran) (Olsen, [cit. 2017-04-06]),
- pravidelně kontrolovat všechna tlačítka nouzového zastavení, která musejí být při běžném provozu vytažena,
- vždy používat originální náhradní díly od výrobce,
- provádět preventivní údržbu (to snižuje čas pro případné opravy, poskytuje větší životnost dílů a zvyšuje bezpečnost práce) (Kmec, 2013).

11 Výhody a nevýhody technologie obrábění vodním paprskem

Z toho, co jsem zjistil a výše uvedl, mohu vyjádřit v následujících kapitolách, v čem je možné spatřovat výhody a nevýhody této technologie.

11.1 Výhody

Existuje mnoho důvodů, proč je technologie řezání vodním paprskem technologií preferovanou. Velmi důležitou a rozhodující skutečností je to, že se při využití

technologie řezání vodním paprskem jedná o tzv. studený řez (maximální ohřev je 40 - 50°C). Materiál tudíž nepodléhá mechanické ani tepelné zátěži a nevykazuje tak chemické, fyzikální ani mechanické změny. Při samotném řezu nedojde ani k porušení případné povrchové úpravy.

Rychlost řezu je v případě využití této technologie 3x vyšší než řez klasickou pilou. Stejně tak je tato technologie specifická svou vysokou přesností, která se pohybuje v rozmezí $\pm 0,1\text{mm}$.

Výhodou technologie je určitě i široké využití aplikace kapalinového paprsku. Dělení plošných materiálů je tím základním, ale další využití najde v soustružení, frézování či vrtání.

V opracovaném povrchu nevznikají žádná zbytková napětí nebo trhliny.

Vodním paprskem lze dělit i těžko opracovatelné materiály, jako pěnové plasty, sklo, keramiku nebo kámen. Stejně tak může opracovávat vícesložkové (sendvičové) a kompozitní materiály (Vajdová, Mičietová, [cit. 2017-04-05]).

Vzhledem k malému průměru trysky dochází k tomu, že výsledná spára po řezu je velice slabá, z čehož logicky plyne minimální úbytek materiálu (Miller, 1991).

Další výhodou je možnost řezání složitých obloukových tvarů, protože paprsek je stroj řízený počítačem. Je tedy možné provést i ten tvarově nejnáročnější řez během jedné operace.

Technologie dělení materiálů na bázi vodního paprsku nám dává možnost začít řez kdekoliv uvnitř plochy obrobku, tedy řez se nemusí začínat na hraně, jako je tomu v případě řezu např. pilou. Proto je možné vyřezávat složitější tvary a využívat komplikovanější řezné detaily, a to precizněji.

Výškový senzor umožňuje řezat nejen rovinné, ale i tvarové složité (zvlněné) plochy. Současně je možné u této technologie řezat materiál pod různými úhly bez ztráty řezné síly paprsku pomocí 3D řezací hlavičky.

Je vhodné také uvést, že u většiny obrobitelných materiálů vodním paprskem vznikne kvalitní řezná plocha bez potřeby dalšího opracování, ke spouštění a zastavení vodního paprsku dochází ve velmi krátkém čase (30 μs), energetická účinnost paprsku je přibližně 85% (8x více než u laseru) nebo že je možné zapojit více trysek na jeden zdroj vysokotlaké vody.

Jedním z dalších pozitiv využívání této technologie je skutečnost, že při řezu nevznikají žádné ekologicky nevhodné zplodiny ani látky. Jako abrazivum se používají

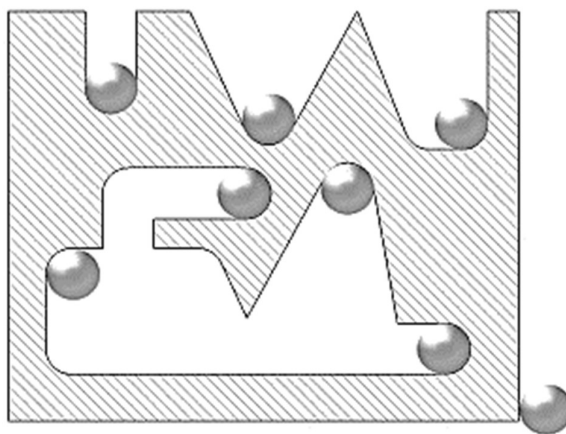
netoxické látky, které mohou být recyklovány pro opakované použití. Rovněž spotřeba vody je velmi malá, a to asi $0,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Řezání vodním paprskem lze tedy považovat za technologii příznivou k životnímu prostředí, což je v současné době výrazným kladem.

V neposlední řadě je vhodné zmínit nikoliv nevýznamný klad využití této technologie, a to ve směru provozních podmínek, kde také odpadá potřeba ostření nástrojů a tedy i použití ostřících nástrojů. Řezání vodním paprskem lze také snadno automatizovat. Samotné obrábění je řízeno počítačem, na základě předem sestaveného programu. To se odráží i ve vztahu k bezpečnosti práce a k minimálním požadavkům na kvalifikaci obsluhujícího pracovníka (Reisner, 2004).

11.2 Nevýhody

Nevýhodou využití technologie řezání vodním paprskem je přímý kontakt s vodou a abrazivním materiálem, kdy bez okamžitého vhodného ošetření může nastoupit povrchová koroze u kovů, v případě dřeva jako nasákavého materiálu následné vysoušení. K tomuto kontaktu s vodou dochází na bočních hranách materiálu při samotném řezu, na vrchní ploše vlivem rozstříkujícího se paprsku a na spodní straně plochy vodou z pohlcující nádrže.

Za další nevýhodu můžeme považovat tvarová omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech, což je důsledkem kruhového průřezu vodního paprsku (znázorněno na Obrázku 19).



Obrázek 19 Ilustrace tvarového omezení řezu v ostrých vnitřních úhlech vlivem kruhového průřezu paprsku

(CHPS s.r.o. - řezání vodním paprskem, řezání laserem, zpracování kovů [cit. 2017-03-19].)

Zmínit lze i možnost získat pouze rovnou plochu na řezné hraně.

Při řezání materiálu o větší tloušťce může být jistou nevýhodou deformace spodní hrany v místě výstupu vodního paprsku.

Nezanedbatelným aspektem jsou samozřejmě i vysoké vstupní náklady při pořizování obráběcího zařízení. Jedná se o vcelku finančně náročnou počáteční investici. Proto je velmi důležité nejdříve takovou investici promyslet, a to ve všech možných souvislostech. Je nutné zjistit, kolik stojí nejen samotné zařízení technologie vodního paprsku, ale i vědět, kolik stojí jednotlivé součásti zařízení či jaká je jejich životnost neboli jak často bude potřeba je dokupovat a provádět jejich výměnu. Takovéto zásahy do zařízení také nemůže provádět každý, ale pouze školený pracovník většinou přímo od výrobce těchto zařízení, jehož čas má také nějakou cenu.

12 Ekonomické zhodnocení provozu

Vzhledem k tomu, že jsem samotnou počáteční investici na nákup obráběcího zařízení, kterou považuji za velmi finančně náročnou, zařadil do nevýhod diskutované technologie, předpokládám, že rovněž i související provoz tohoto zařízení bude ekonomicky nezanedbatelný. Jelikož je ekonomická stránka využívání technologie dělení vodním paprskem velmi důležitým, až klíčovým faktorem, pokusím se nad všemi těmito ekonomickými aspekty zamyslet a vyhodnotit je v následující části práce.

Abych mohl hodnotit, musím mít stanovená kritéria, která budou pro zhodnocení rozhodující. Pro účely této práce si tedy stanovím vlastní parametry ekonomického zhodnocení provozu zařízení pro dělení materiálů vodním paprskem. Budou jimi pořizovací náklady na zařízení, včetně nákladů na zaškolení personálu, náklady na provoz zařízení, náklady na údržbu a servisní práce, které budou zahrnovat náklady na náhradní díly a úkony servisních pracovníků.

Jako nejvhodnější považuji pro účely ekonomického zhodnocení pracovat s reálnými informacemi a čísly. Proto jsem oslovil několik firem zabývajících se technologií vodního paprsku se žádostí o spolupráci, poskytnutí informací, případně cenných rad a zkušeností z praxe. Obdržel jsem spíše odmítavé reakce, pokud nějaké. Vstříc mně vyšla pouze jedna firma, a to firma AWAC spol. s r.o. s provozovnou v Praze. Dokonce mi nabídli osobní setkání se zástupcem prodeje strojů, které jsem velmi rád využil. Při osobní schůzce jsem vedle informací o firmě, která se zabývá prodejem a servisem těchto zařízení, obdržel požadovaná data, která zahrnovala cenovou nabídku strojů a kalkulace náhradních dílů, včetně servisních prací.

Z výše uvedených důvodů budu dále pracovat s daty pouze jedné firmy, která budou představovat jakýsi reprezentativní vzorek nákladů fiktivního subjektu využívajícího technologii vodního paprsku, resp. příslušné zařízení. Vytvořím modelovou situaci pořízení zařízení pro vodní paprsek do podniku, fiktivního subjektu, a to za pomoci poskytnutých dat. K tomu budu uvažovat ideální podmínky provozu.

Uvažované zařízení, jehož provoz budu v následující části práce hodnotit, je od firmy MicroStep spol. s r. o. Nese označení AQUACUT 3001.15 W a má tyto technické parametry:

- řezací stůl s pracovní plochou 3000 x 1500 mm, včetně řídicího systému, s lapačem zbytkové energie vodního paprsku z konstrukční oceli, včetně přípravy na odsávání kalů,
- USB port na řídicím systému + síťové připojení řídicího systému pro přenos dat mezi programátorem a strojem,
- intranet v řídicím systému (umožňující sledování výroby, ekonomické výstupy, servisní moduly atd.),
- dálková diagnostika stroje,
- vysokotlaké čerpadlo s příkonem 37 kW a maximálním řezacím tlakem 4140 Bar, včetně příslušenství,
- sada spotřebních a náhradních dílů pro opravu a údržbu multiplikátoru,
- integrované ovládání vysokotlakého čerpadla z řídicího systému,
- vysokotlaké potrubí pro připojení stroje,
- 1 řezací hlava Allfi pro řezání čistou vodou i pro abrazivní řezání s diamantovou vodní tryskou,
- dávkovač abraziva s plynulou regulací množství abraziva ovládaný z řídicího systému stroje,
- tlaková doprava abraziva se zásobníkem na 1000 kg abraziva.

Pořizovací cena zahrnuje i instalaci elektrorozvaděče s revizí, dopravu stroje a techniků, montáž stroje, zaškolení obsluhy a předání zařízení zákazníkovi v Praze.

Vyčíslení pořizovacích nákladů zařízení i s některou příplatkovou výbavou bude tedy vypadat takto:

Tabulka 7 Pořizovací náklady na zařízení pro vodní paprsek

Pořizovací náklady	
Základní nabídka	cena bez DPH
cena kompletní dodávky zařízení AQUACUT 3001.15 W*	3 299 613 Kč
Příplatková nabídka	
software na automatické ukládání dílů na polotovary	48 525 Kč
stanice na úpravu vody (změkčování)	40 125 Kč
sada nářadí a přípravků pro opravu a údržbu multiplikátoru	44 432 Kč
system na odsávání kalů, včetně 2 pneumatických kalových čerpadel	84 263 Kč
periodický snímací výškový senzor	41 088 Kč
přípravek pro manuální naklopení řezací hlavy do 50°v jedné ose	17 388 Kč
Celková cena (bez DPH)	3 575 432 Kč

* cena zahrnuje kompletní instalaci zařízení, dopravy i zaškolení pracovníků

Servisní prohlídky a výměny náhradních dílů ovlivňuje především vytížení daného zařízení ve smyslu počtu pracovních hodin. Proto si musím stanovit, jak intenzivnímu provozu bude hodnocené zařízení vystaveno. Stanovím si proto jednosměnný provoz, 1 směna to je 8 pracovních hodin (480 minut). Při výpočtech s vodním paprskem budu na doporučení uvažovat jednu pracovní hodinu 50 minut, kde zbylých 10 minut je uvažováno na manipulaci a nastavení zařízení. Takže při odečtení 10 minut na každou hodinu zbyde 400 minut. Dále musím odečíst čas obecně nutných přestávek (zaokrouhlím na 30 minut) a ztráty času vyšší moci (10%), zbyde 322 minut, neboli po zaokrouhlení 5,37 pracovních hodin. V současném kalendářním roce máme 250 pracovních dní, tedy počet pracovních hodin v tomto roce činí 1342,5. Z tohoto čísla tedy budu vycházet při výpočtech servisních intervalů.

V několika pravidelných intervalech je potřeba v zařízení pro vodní paprsek provádět servis a údržbu určitých skupin dílů. Tabulka 8 zobrazuje díly, jejich četnost v zařízení a jednotkové ceny, které podléhají pravidelnému servisu a výměně po 800 odpracovaných hodinách. Udávaných 800 hodin je minimální životnost dílů, kterou deklaruje výrobce. Těmito díly jsou části vysokotlakého okruhu v zařízení, a to těsnění,

filtry a ventily. Dále je třeba připočítat cenu práce servisních pracovníků, kdy se tyto servisní práce provádějí v počtu dvou pracovníků a doba potřebná k provedení servisních prací činí 6 hodin. Cena za hodinu jejich práce je 800 Kč při plánovaném servisu. Při expresním servisu bez objednání na daný termín na domluvený čas tato cena může být až 1400 Kč/hod. Dále je připočteno cestovné těchto pracovníků, které má firma AWAC spol. s r.o. stanovena na 11 Kč/km, vzdálenost je stanovena na 60 km a čas pracovníků strávený na cestě na 480 Kč. Kalkulace nákladů těchto pravidelných servisů je povětšinou paušální, takže cenu ovlivňuje spíše vzdálenost zákazníka od servisní firmy. Všechny uváděné ceny jsou bez DPH.

Tabulka 8 Kalkulace pravidelného servisu po 800 h vysokotlakého těsnění, filtrů a ventilů

Položka	Počet m.j.	Měrná jednotka	Cena m. j.	Celkem
HP seal kit	1	sada	3 687,00 Kč	3 687,00 Kč
HP poppet	2	ks	735,00 Kč	1 470,00 Kč
HP seat	2	ks	442,00 Kč	884,00 Kč
Svíc. Filtr PP-000,5-O 250mm	1	ks	128,00 Kč	128,00 Kč
Svíc. Filtr PP-003-O/L 250mm	1	ks	108,00 Kč	108,00 Kč
Svíc. Filtr PP-010-O/L 250 mm	1	ks	108,00 Kč	108,00 Kč
Mazivo	1	ks	64,00 Kč	64,00 Kč
Čistič BOOSTER AGENT	1	ks	171,00 Kč	171,00 Kč
Čistění včetně materiálu	1	sada	140,00 Kč	140,00 Kč
Sada těsnění On/Off	2	sada	2 499,00 Kč	4 998,00 Kč
Sedlo ventilu On/Off	2	ks	2 166,00 Kč	4 332,00 Kč
Pružina On/Off	8	ks	41,00 Kč	328,00 Kč
O-ring ø77,47x2,62	2	ks	84,92 Kč	169,84 Kč
O-ring ø7,94x1,78	2	ks	58,00 Kč	116,00 Kč
Celkem materiál				16 703,84 Kč
Práce	12	hod	800,00 Kč	9 600,00 Kč
Čas na cestě	2	hod	480,00 Kč	960,00 Kč
Jízdné	60	km	11,00 Kč	660,00 Kč
Celkem práce a cestovné				11 220,00 Kč
Celkem práce, cestovné a materiál				27 923,84 Kč

V Tabulce 9 jsou dále uvedeny díly, které jsou servisovány jednou ročně, nepříliš závisle na pracovním vytížení, např. výměna oleje v hydraulické části zařízení. I zde je potřeba započítat náklady na práci a cestovné servisních pracovníků, které se shoduje s parametry předchozí tabulky v části věnované ceně za práci a cestovné.

Tabulka 9 Kalkulace pravidelného servisu 1x ročně - výměna oleje a nízkotlakého těsnění

Položka	Počet m.j.	Měrná jednotka	Cena m. j.	Celkem
Bearing, plunger	2	ks	2 675,00 Kč	5 350,00 Kč
Piston seal	1	ks	1 540,00 Kč	1 540,00 Kč
Wear ring	2	ks	138,00 Kč	276,00 Kč
T-Seal	2	ks	323,00 Kč	646,00 Kč
-244 O-ring, 70 Duro Buna	2	ks	30,00 Kč	60,00 Kč
-244 Back Up-ring, 70 Duro Buna	2	ks	30,00 Kč	60,00 Kč
Oil filter	1	ks	710,00 Kč	710,00 Kč
Čistič	1	ks	97,00 Kč	97,00 Kč
Čištění, včetně materiálů	1	sada	50,00 Kč	50,00 Kč
Olej TELLUS 46	140	litr	86,00 Kč	12 040,00 Kč
Expanzní nádoba-Refix 8/10	1	ks	1 241,00 Kč	1 241,00 Kč
Celkem materiál				22 070,00 Kč
Práce	12	hod	800,00 Kč	9 600,00 Kč
Čas na cestě	2	hod	480,00 Kč	960,00 Kč
Jízdné	60	km	11,00 Kč	660,00 Kč
Celkem práce a cestovné				11 220,00 Kč
Celkem práce, cestovné a materiál				33 290,00 Kč

Další uvažovanou položkou nutných nákladů je výměna dílů, které mohou zaškolení pracovníci provádět svépomocí, kdy není potřeba zásah servisních pracovníků výrobce. Výrobce vždy udává minimální životnost dílů, dle zkušeností firmy AWAC spol. s r.o. často tyto díly vydrží déle. V práci ovšem budu uvažovat výměnu těchto dílů vždy po dosažení jejich udávané minimální životnosti. V Tabulce 10 je tedy jejich součet v uvažovaných podmínkách.

Tabulka 10 Ceny dílů vyměnitelných svépomocí

Název dílu	Cena v Kč:	Počet ks v zařízení	Průměrná životnost dílu v hod.	Počet výměn při vytížení 1342,5 h/rok	Celková cena za díly
10" Water Filter; .45 Micron	935,00 Kč	3	400	3	8 415,00 Kč
10" Water Filter; .1 Micron	129,00 Kč	3	400	3	1 161,00 Kč
10" Water Filter; .10 Micron	122,00 Kč	3	400	3	1 098,00 Kč
High cycle On/Off Valve Repair Kit Allfi head V	3 764,00 Kč	5	1000	1	18 820,00 Kč
LP Poppet basket	1 253,00 Kč	1	1000	1	1 253,00 Kč
LP Poppet	1 135,00 Kč	1	1000	1	1 135,00 Kč
AS BleedDown Valve II Kit	2 359,00 Kč	2	1000	1	4 718,00 Kč
Allfi diamond orifice	10 425,00 Kč	1	500	2	20 850,00 Kč
Tube L 76,2 OD 6,35 ID 1,02 mm	1 943,00 Kč	1	100	13	25 259,00 Kč
Celkem					82 709,00 Kč

V Tabulce 11 je uveden výpočet spotřeby abraziva, které je uvažováno 330 g/min po celých 1342,5 hodin (hodnota jinak závisí na parametrech řezu konkrétního materiálu a může se tak lišit). Cena abraziva je uvedena dle poskytnutých údajů a může se lišit v závislosti na změně jeho nákupní ceny. Ta byla v době psaní práce následující.

Tabulka 11 Výpočet spotřeby abraziva

Vstupní data	Hodnota	Jednotky
Cena abraziva	9,99	Kč/kg
Velikost balení	1000	kg
Cena balení	9990	Kč
Spotřeba abraziva	330	g/min
Spotřeba abraziva (1342,5 h)	26 582	kg
Celkem za rok	265 549	Kč

Opomenout nesmím také náklady na energie, které zahrnují náklady na elektřinu, na vodu a náklady na čištění vody a jejich výpočet je uveden v Tabulce 12. Ceny elektřiny a vody jsou vzaty z veřejných nabídek lokálních dodavatelů.

Tabulka 12 Výpočet spotřeby energií a vody

Vstupní data	Hodnota	Jednotky
Cena elektřiny	4,83	Kč / kWh
Příkon čerpadla	36,56	kW
Příkon chlazení	0,90	kW
Příkon CNC stolu	4,50	kW
Příkon za směnu celkem	41,96	kW
Spotřeba elektřiny za rok	56 331,30	kWh
Cena elektřiny za rok	272 080,18	Kč
Cena vody	85,42	Kč / m ³
Spotřeba vody	3,33	l / min
Spotřeba vody za rok	2 682,32	m ³
Cena vody za rok	229 123,35	Kč
Náklady na úpravu vody*	1,50	Kč / h
Náklady na úpravu vody za rok	2 013,75	Kč
Celkem za rok	503 217	Kč

*Dlouhodobě sledovaná hodnota firmou AWAC spol. s r.o.

Po sečtení nákladů na servisní prohlídky, náhradní díly a energie v Tabulce 13 dostaneme celkovou částku ročních nákladů na provoz takového zařízení pro vodní paprsek.

Tabulka 13 Souhrn ročních nákladů na provoz

Nákladová položka	Cena bez DPH
Servisní prohlídka po 800 h	27 924 Kč
Servisní prohlídka 1x ročně	33 290 Kč
Další díly	82 709 Kč
Abrazivum	265 549 Kč
Provoz	503 217 Kč
Celkem	912 689 Kč

13 Závěr

Vývoj nekonvenčních technologií jde stále kupředu a je díky nim možné obrábět materiály, které tradičními metodami tak snadno obrábět nešlo. V práci jsem představil technologii řezání dřeva vodním paprskem, jenž považuji za technologii moderní, nekonvenční, s komerčním potenciálem. Zjistil jsem, na jakém principu zařízení pracuje, jaký řezný nástroj se v této technologii využívá a které faktory mají vliv na kvalitu provedeného řezu.

V další části práce se mi podařilo podat ucelenější přehled o jednotlivých typech kapalinových paprsků, průmyslové aplikaci a zásadách bezpečnosti během práce s těmito zařízeními. Dále jsem se zaměřil na významné výhody a nevýhody této nekonvenční technologie.

V poslední části práce jsem zhodnotil finanční náročnost této technologie dělení materiálů vodním paprskem, v jejímž rámci jsem musel pracovat s daty pouze jednoho subjektu na trhu, jelikož nikdo další se ke spolupráci nepřipojil. Nehledě na to jsem zanalyzoval poskytnutá data a vytvořil si představu o tom, jak finančně náročný provoz zařízení na dělení vodním paprskem je. Když pominu pořizovací náklady na zařízení, které jsou značné, velmi významnou nákladovou položku tvoří zejména abrazivum, kdy by se vyplatilo při takovéto spotřebě pořídit recyklační jednotku pro použité abrazivum (50-70% recyklovaného abraziva lze znovu použít) a výměna náhradních dílů, která je závislá především na intenzitě provozu daného zařízení, jelikož životnost těchto náhradních dílů je dána počtem odpracovaných hodin.

I přes náročnou investici do zařízení pro dělení vodním paprskem a finanční náročnost jeho provozu hodnotím tuto technologii jako velice přínosnou pro průmyslové obrábění nejen dřeva. Za největší výhody považuji nízkou teplotu řezu, a s tím spojenou minimální zátěž na opracováváný materiál, a dále její šetrnost k životnímu prostředí, odpadnutí dodatečného broušení či jiné údržby řezného nástroje a možnost vyřezávání velmi složitých a členitých tvarů. Věřím, že se tato technologie bude i nadále rozvíjet a i přes značné pořizovací a provozní náklady neujde pozornosti v příslušných průmyslových odvětvích.

14 Seznam použité literatury a zdrojů

Literatura

- BARCÍK, Š. a kol. *Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem: monografie*. Praha: Powerprint, 2012, 240 s. ISBN 9788087415603.
- BARCÍK, Š. a kol. *Dřevoobráběcí nástroje - údržba a provozování: vysokoškolská učebnice*. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2013, 355 s. ISBN 9788087415801.
- BERNARD K. E. *Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl: Anwendung, Erfahrungen, Ausblick*. Ehningen bei Böblingen: Expert-Verl, 1993, s 3-93. ISBN 3816907482.
- ČSN 224012 *Brousící materiály pro pojená tělesa. Rozbor velikosti zrn. Zrnitostní složení zrn F 4 až F 220. Stanovení, označování*.
- HASHISH, M. *Optimalization Factors in Abrasive Waterjet Machining*. Journal of engineering for industry. 1991, vol. 113, no 1/1991, s 29-37. ISSN 00220817.
- JÁCHYM, J. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- JUREČKA, M. *Erozivní účinky kavitace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 43 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. František Pochylý, CSc.
- KMEC, J. *Safe Working Conditions for the Water Jet Technology*. ACTA TECHNICA CORVINIENSIS – BULLETIN of ENGINEERING. 2013, (Fascicule 2 [April-June]), s. 113-116. ISSN 2067-3809.
- KMINIAK, R., KVIETKOVÁ, M., BARCÍK, Š. *Vplyv materiálových vlastností rastlého dreva na šírku reznej škáry pri rezaní abrazívnym vodným lúčom: ACTA FACULTATIS XYLOLOGIAE*. Zvolen: Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, 2011, 53 (2): 43-51. ISSN 1336-3824.
- KRAJNÝ, Z. *Nekonvenčné technológie a bezpečnosť pri práci*. Bezpečná práca 4/1991. 1991. s. 152 – 156.

- KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: Epos, 1998, 384 s. ISBN 8080570914.
- KULEKCI, M. K. *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications*. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002, vol 42, no 12, p. 1297-1306. ISSN 08906955.
- KVIETKOVÁ, M. *Obrábění dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2015, 295 s. ISBN 9788021326040.
- LICHTAROWICZ, A. *Jet Cutting Technology*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, B. V., 2012, 633s. ISBN 9789401051859.
- LISIČAN, J. *Teória a technika spracovania dreva*. Zvolen: MATCENTRUM, 1996, 625 s. ISBN 80-967-3156-4.
- MADERA, J. *Fyzikálny princíp delenia materiálov vodným lúčom*. Bratislava: KVT SJF STU, 1990, 72 s. ISBN 9781113814401.
- MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienaľa, 2000, s. 63-90. ISBN 80-709-9430-4.
- MILLER, R. K. *Waterjet cutting: technology and industrial applications*. Lilburn, GA: Fairmont Press, c1991, 152 s. ISBN 0881730688.
- MOMBER, A. W., KOVACEVIC, R. *Principles of abrasive water jet machining*. New York: Springer, c1998, 394 s. ISBN 3540762396.
- REISNER, J. *Současnost v obrábění vodním paprskem a laserem v dřevoprumyslu v ČR*. In: Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2004, s. 201-204. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2004, ISBN 80-228-1385-0.
- VESELÝ, R. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- VLASTNÍK, J. *Dělení materiálu paprskem kapaliny*. Praha: Výzkumný a vývojový ústav dřeva, 1983. ISBN 9781113814401.
- WANG, Jun. *Abrasive waterjet machining of engineering materials*. Enfield, N. H.: Trans Tech Publications, 2003, 106 s. ISBN 0878499180.

Internetové zdroje

Geometrie řezu. In: *CHPS s.r.o. - řezání vodním paprskem, řezání laserem, zpracování kovů* [online]. Chomutov, 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://chps.cz/vodni-paprsek/geometrie-rezu>.

OLSEN, J. H. Safety in jet cutting. In: *The Fabricator - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More* [online]. Elgin, 2017 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/safety-in-jet-cutting.aspx>.

Pulsující vodní paprsek - nový chirurgický nástroj. In: *Ústav geoniky AV ČR* [online]. c2000-2017 [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://ugn.cas.cz/?l=cz&a=&v=&p=research/project/MSK-3417/index.php>.

Slovník k Vodnímu Papsku. In: *Stroje pro řezání vodním paprskem - Flow Waterjet* [online]. 2017 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek>.

VAJDOVÁ, A., MIČIETOVÁ, A. Obrábanie vodným lúčom a jeho aplikácie. *Prvý strojársky server - Strojárstvo / Strojírrenství* [online]. Žilina, 2017 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/clanky2/stroje-a-technologie/1296-obrabanie-vodnym-luom-a-jeho-aplikacie>.