

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SOUČASNÝ STAV A BUDOUCNOST NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU V PODMÍNKÁCH PRŮMYSLU ČESKÉ REPUBLIKY

STATUS QUO AND FUTURE OF UNCONVENTIONAL TECHNOLOGY WATER JET IN
CONDITIONS OF INDUSTRY CZECH REPUBLIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN STEINER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA

BRNO 2008

NETISKNOUT!
Zadaní

List 2

NETISKNOUT!
Licenční smlouva – oboustranně

List 3

ABSTRAKT

Popis základního principu nekonvenční metody vodního paprsku. Popis a charakteristika obrábění vodním paprskem. Rozbor technologických možností a provozní náročnosti. Současný stav a budoucnost v podmínkách průmyslu České republiky. Porovnání vodního paprsku s ostatními paprskovými metodami.

Klíčová slova

Vodní paprsek, technologické možnosti, provozní náročnost, současný stav, budoucnost, paprskové metody.

ABSTRACT

Description of basic principle of water jet unconventional method. Description and characteristics of water jet machining. Analysis of technological potential and operation severity. Status quo and future in the Czech Republic industry condition. Comparison of water jet to other jet methods.

Key words

Water jet, technological potential, operation severity, status quo, future, jet methods.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STEINER, Martin. *Současný stav a budoucnost nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 85 s., příloh 0. Vedoucí práce Ing. Karel Osička.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Současný stav a budoucnost nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Martin Steiner

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu Ing. Karlu Osičkovi a panu Petru Kretíkovi z firmy PTV, spol. s r.o. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále pak děkuji panu doc. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. a panu doc. Ing. Antonu Humárovi, CSc. za cenné rady a poskytnutí literárních pramenů a panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za ochotnou pomoc při měření.

OBSAH

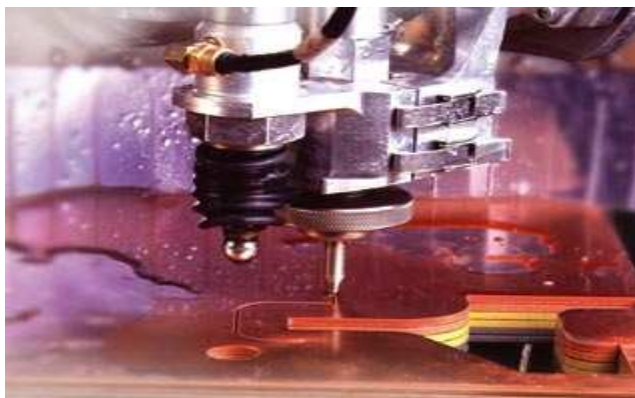
Abstrakt.....	5
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ.....	10
1.1 Nekonvenční metody obrábění.....	10
1.2 Třídění nekonvenčních metod obrábění.....	10
1.3 Charakteristiky nekonvenčních metod obrábění.....	11
1.4 Úvod do nekonvenční technologie vodního paprsku.....	11
2 POPIS A CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE.....	13
2.1 Základní princip metody vodního paprsku.....	13
2.2 Charakteristika WJM a AWJ.....	15
2.3 Zařízení pro WJM a AWJ.....	16
2.3.1 Vysokotlaká vodní pumpa.....	17
2.3.2 Multiplikátor.....	18
2.3.3 Filtry.....	21
2.3.4 Lapač vody.....	21
2.3.5 Řezací hlava.....	22
2.3.6 Dopravní systém vysokotlakých trubek.....	24
2.3.7 Souřadnicový stůl.....	25
3 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI A METODY VODNÍHO PAPRSKU.....	27
3.1 Možnosti obrábění.....	27
3.2 Druhy používaných paprsků.....	28
3.3 Druhy obráběných materiálů.....	29
3.4 Pozitiva a negativa technologie.....	31
3.5 Kvalita řezu a dosahované hloubky řezaného materiálu.....	34
4. PROVOZNÍ NÁROČNOST.....	40
4.1 Abrazivo.....	40
4.1.1 Druhy a význam abraziva.....	40

4.1.2 Velikost, tvar a hmotnostní tok abraziva.....	42
4.1.3 Provozní náklady abraziva.....	43
4.1.4 Recyklace abraziva.....	44
4.2 Voda – úprava a přísady.....	45
4.3 Provozní doba a životnost trysek.....	46
4.4 Koroze po obrobení.....	48
5. SOUČASNÝ STAV VODNÍHO PAPRSKU.....	50
5.1 Oblast využití v průmyslu.....	50
5.2 Současný stav.....	51
5.2.1 Systém ProgressJet.....	54
5.2.2 Výškový senzor.....	58
5.2.3 Odkalovací zařízení.....	59
5.2.4 Dávkovač abraziva.....	60
5.2.5 3D řezací hlavy.....	61
5.2.6 Diamantová řezací hlava.....	62
5.2.7 Ostatní komponenty.....	62
6. TRENDY BUDOUCÍHO VÝVOJE V ČESKÉ REPUBLICE.....	64
6.1 Budoucnost technologie.....	64
6.2 Možný vývoj technologie a komponentů.....	65
6.3 Budoucí trendy hybridních a příbuzných systémů využívající nekonvenční technologii vodního paprsku.....	68
6.4 Uplatnění na českém trhu.....	68
7 PAPRSKOVÉ METODY A JEJICH POROVNÁNÍ.....	70
7.1 Základní princip obrábění paprskem laseru.....	70
7.2 Základní princip obrábění paprskem plasmu.....	71
7.3 Laser MicroJet.....	73
7.4 Porovnání paprskových metod.....	75
Závěr.....	79
Seznam použitých zdrojů.....	80
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	85

ÚVOD

Voda, chemická sloučenina skládající se z jednoho atomu kyslíku a dvou atomů vodíku. Tato sloučenina v kombinaci se zemskou atmosférou tvoří základ života na Zemi. Je to nenahraditelná surovina, rozpouštědlo, ve kterém probíhají veškeré životní procesy. Nachází se nejen na Zemi, ale také ve vesmíru v podobě molekulárních mračen v mezihvězdném prostoru, ze kterých vzniklo Slunce a celá sluneční soustava.

Člověk se ji naučil ve velké míře využívat v průmyslu, energetice, zemědělství, potravinářství či dopravě. Využití našla i v nekonvenční technologii vodního paprsku (obr. 1).



Obr. 1 Nekonvenční technologie vodního paprsku (12)

Roku 1936 se tato metoda využívala v Rusku při těžbě černého uhlí a řezání kamene. Metoda se nadále vyvíjela a v roce 1961 USA patentovala řezání oceli, niklu a titanu vysokotlakým paprskem oleje. Avšak nejvýrazněji vývoj této nekonvenční technologie ovlivnil požadavek amerického letectva a NASA vyřešit problematiku řezání keramických obkladů pro raketoplány.

V roce 1987 se technologie vodního paprsku dostala do tehdejšího Československa. Na základě úspěšných zkoušek, které proběhly v podniku Menet, se instalovala další vysokotlaká zařízení pro řezání vodním paprskem. Od této doby se technologie rok od roku zlepšuje a získala si přívlastek technologie budoucnosti. Je uplatňována v podmínkách průmyslu České republiky a rychle se rozšiřuje. (24)

1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Tato kapitola se zabývá rozdělením nekonvenčních metod obrábění, jejich charakterem a přiblížením nekonvenční technologie obrábění vodním paprskem, které jsou věnovány další kapitoly.

1.1 Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody, netradiční, které při obrábění materiálu nevyužívají klasických nástrojů. Využívají se v oblasti obrábění materiálů s vysokou pevností, tvrdostí a odolností proti opotřebení, kde rostou nároky na tvarovou složitost střížných a tvárných nástrojů, řezných nástrojů z rychlořezných ocelí, výrobu miniaturních součástek apod., kde se běžnými metodami obrábění sice obrábět může, ale celý proces by byl příliš zdlouhavý a neefektivní. Ba dokonce v některých případech, kdy materiál jde velmi těžce obrobit nebo zpracovat vůbec nejde, mají uplatnění nekonvenční metody. Tyto nekonvenční způsoby obrábění se zakládají na chemických, fyzikálních a elektrických jevech, kdy k odebrání materiálu dochází většinou chemickým, elektrickým, tepelným či mechanickým působením. Tyto metody využívají CNC řídicí systémy, které jsou řízeny ve třech až šesti osách. (22, 24, 27, 30)

1.2 Třídění nekonvenčních metod obrábění

Metody se třídí podle toho, jakým způsobem dochází k oddělování materiálu. U některých metod obrábění dochází k tepelnému či chemickému ovlivnění v místě řezu. (22)

a) Oddělování materiálu tepelným účinkem

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

b) Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem

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

c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM).

1.3 Charakteristiky nekonvenčních metod obrábění

- rychlost obrábění je vysoká,
- výkonnost tolik nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu,
- plná mechanizace a automatizace,
- snížení pracnosti,
- snížení neshodnosti výrobků při automatizovaném provozu při správném seřízení stroje,
- materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný materiál, tak jako je tomu u standardního obrábění (soustružení, frézování, broušení apod.),
- obrábění tvarově složitých ploch, děr, dutin, nástrojů apod.,
- obrábění miniaturních dílců. (22, 27)

1.4 Úvod do nekonvenční technologie vodního paprsku

Ve své podstatě je tato technologie výjimečná mezi ostatními technologiemi. Obrábí se jakýkoliv materiál bez tepelného ovlivnění v místě řezu. Nevzniká tepelně ovlivněná oblast na rozdíl od jiných paprskových metod (obrábění paprskem laseru a paprskem plazmy). Technologie je bezprašná a tím také velmi ekologická. Při technologii vodního paprsku je úběr materiálu způsoben dopadem úzkého vodního paprsku při velmi vysoké rychlosti a vysoké kinetické energii. Postupně však paprsek ztrácí svoji kinetickou energii a je vychylován ze svého původního směru, což má

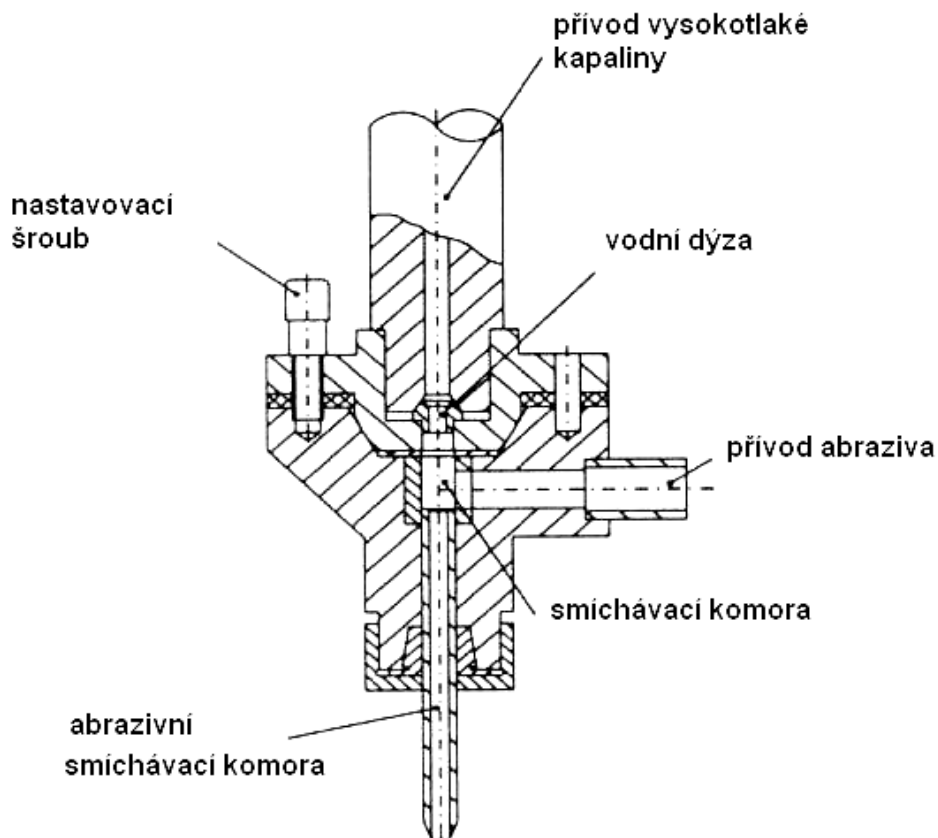
za následek zhoršení kvality povrchu. Voda je hnána vysokotlakou vodní pumpou do řezací hlavy zakončené tryskou, kterou je paprsek usměrňován a zesílen. Pronikáním vody do materiálu, voda postupně ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Obrábí se čistým vodním paprskem WJM a nebo abrazivním vodním paprskem AWJ. Tyto dvě metody jsou nejčastěji v praxi využívány. Rozdíl mezi těmito metodami je v přidávání abrazivního materiálu do vody ještě před samotným řezem. K úběru materiálu tak dochází vysokorychlostním erozivním procesem. Jako řezný nástroj se tedy považuje paprsek vody. (1, 7, 17, 22, 24, 27, 30)

2 POPIS A CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE

Kapitola se zabývá základním principem technologie WJM a AWJ, rozbořem celého zařízení, popisem komponentů a systémem řízení.

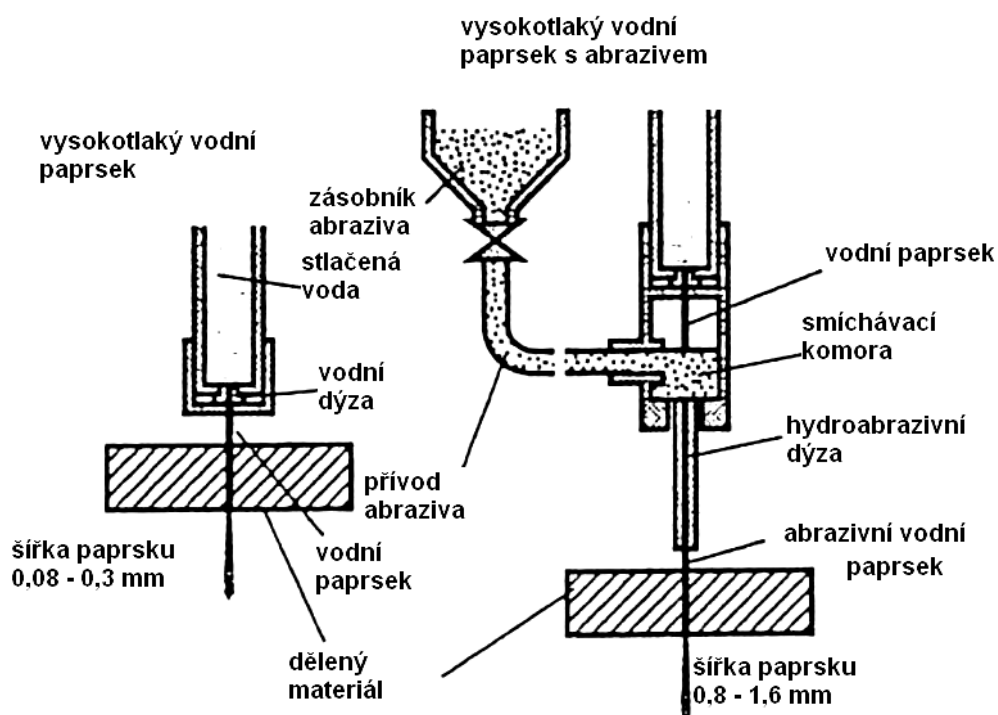
2.1 Základní princip metody vodního paprsku

Voda je hnána pod vysokým tlakem hydraulickou jednotkou a multiplikátorem či triplexovým plunžrem pro zvýšení tlaku. Proudí dopravním systémem vysokotlakých trubek skrz vysokotlaký ventil až do řezací hlavy. Tam nejprve směřuje do vodní trysky, ve které se vytvoří úzký paprsek. Průměr paprsku je závislý na průměru vodní trysky. Pohybuje se v rozmezí (0,15 až 0,30) mm (19). Paprsek vody z primární vodní trysky proudí do směšovací komůrky. V tomto prostoru se přidává k toku vody abrazivo, které je nasáváno do komůrky pod tlakem vody. Abrazivo je dodáváno do řezací hlavičky (obr. 2.1). (1, 27, 66)



Obr. 2.1 Abrazivní řezací hlavičky (24)

Jako abrazivo se nejvíce používá mletý zelený olivín a granát. Paprsek vody, jenž je obalen abrazivním materiálem, proniká do sekundární trysky a vzniká „řezný nástroj“, kterým se obrábí materiál. Po řezu je voda s abrazivem zachycována v lapači vody, umístěném pod řezaným materiálem. Lapač může být vana s vodou a ocelovými kuličkami, které tlumí náraz vody se zbytkovou rychlostí a tlakem a zachytává třísku. V tomto případě se jedná o metodu abrazivního vodního paprsku – AWJ. Tímto způsobem se řezou materiály o tloušťce do (400-600) mm (51). Dosahované tloušťky se liší druhem řezaného materiálu. Pokud se jedná o metodu vodního paprsku bez přidání abraziva – WJM, tak v celém systému odpadá princip sekundární trysky a směšovací komůrky. Rozdíl mezi WJM a AWJ schematicky zobrazuje obr. 2.2. Pokud se obrábí materiál bez přidání abraziva, je tento případ v praxi řešen uzavřením přívodu abraziva. (1, 27, 64, 66)



Obr. 2.2 Rozdíl mezi WJM a AWJ (27)

2.2 Charakteristika WJM a AWJ

Pracovní tlak vody se pohybuje od (300 do 400) MPa a její rychlost se pohybuje v rozmezí (600 až 900) m.s⁻¹. Spotřeba vody závisí na parametrech zařízení. Udává se spotřeba 26 l.h⁻¹ při průměru trysky 0,127 mm. Šířka řezu u tenkých materiálů je zhruba o 0,3 mm větší než je průměr trysky. Vzdálenost trysky a obrobku je v rozmezí od (2,5 do 6,35) mm nebo (10 až 25) mm. (27)

Úběr materiálu a kvalita opracovaného povrchu je ovlivňována mnoha faktory. Tlak vody, průměr trysky a rychlost proudění vodního paprsku ovlivňuje rychlost řezného procesu. Vzdáleností mezi obrobkem a tryskou, druhem brusiva a jeho velikostí je naopak ovlivněn povrch opracované plochy.

Rychlost proudění a tlak kapaliny je určený Bernoulliho rovnicí pro nestlačitelnou kapalinu (1.1).

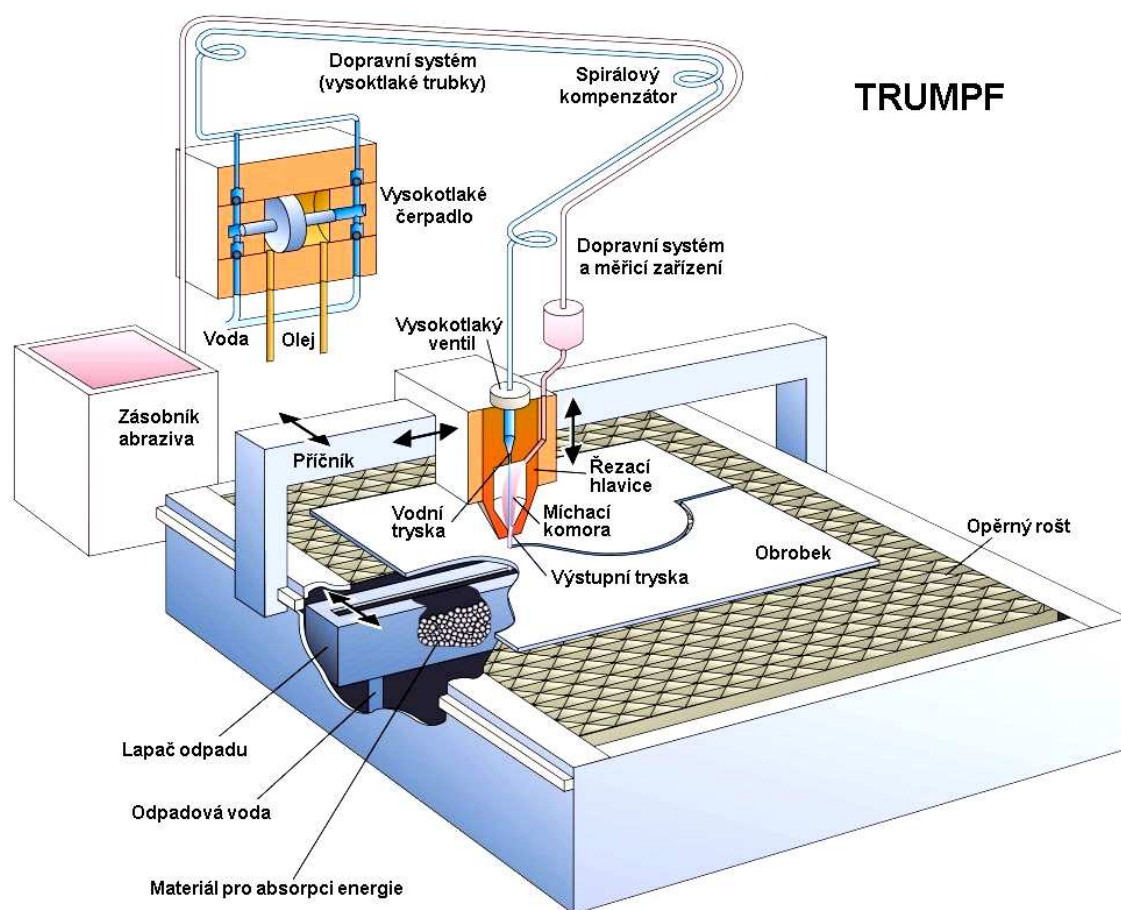
Bernoulliho rovnice pro nestlačitelnou kapalinu (27):

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (1.1)$$

Rychlost proudění paprsku z trysky má výrazný vliv na strukturu řezu. Zvýšením tlaku vody se zvýší výtoková rychlost vodního paprsku, čím i kinetická energie alepší se tak kvalita řezu při zachování konstantního posuvu. Kdyby se zvýšila rychlost posuvu, strojní časy by se výrazným způsobem zkrátily, ale kvalita řezné plochy by se zhoršila. Rychlost posuvu však není libovolná. Při řezání musí dojít k celému průřezu materiálu. (27)

2.3 Zařízení pro WJM a AWJ

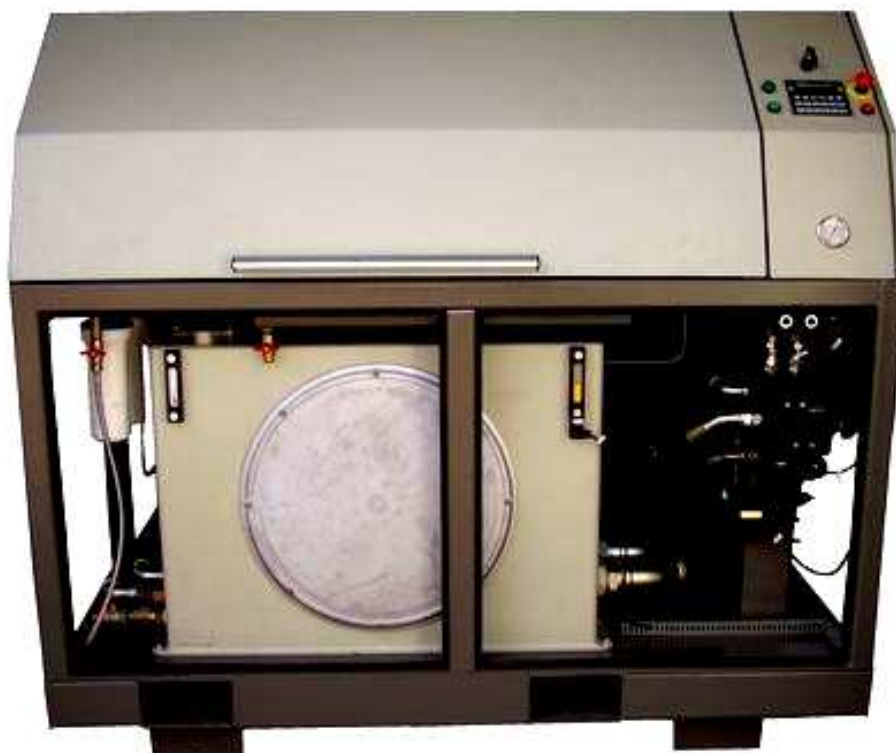
Obě dvě zařízení se od sebe vzájemně odlišují. Hlavním a podstatným rozdílem je přítomnost zařízení pro přívod abraziva při řezání AWJ. Hlavními prvky celé řezací sestavy (obr. 2.3) je vysokotlaká vodní pumpa, multiplikátor, dopravní systém vysokotlakých trubek, akumulátor tlaku, filtry, dvoucestný přepouštěcí ventil, řezací hlavice a zařízení pro její pohyb v jednotlivých směrech, nádoba na zachytávání vody a nečistot (lapač nečistot), opěrný rošt, systém úpravy vody a souřadnicový stůl. (17, 27, 64)



Obr. 2.3 Řezací sestava (17)

2.3.1 Vysokotlaká vodní pumpa

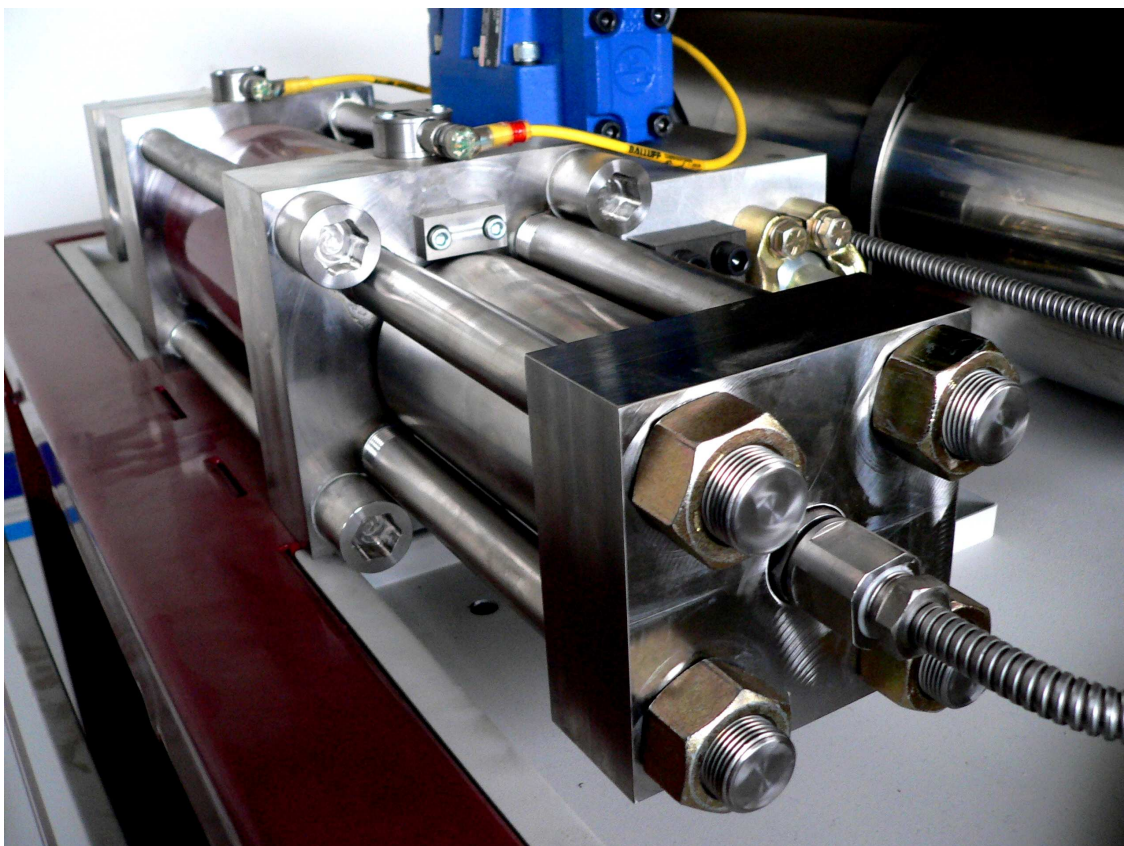
Systém vysokotlaké vodní pumpy slouží k vývinu vysokého tlaku vody. Sestává se z několika částí. Hydraulického a vodního čerpadla, multiplikátoru nebo triplexového plunžru, elektromotoru a akumulátoru. Rozdílnost těchto pump nastává v použití multiplikátoru, který dodává americká společnost Flow systém. A nebo triplexový plunžr dodávaný japonskou společností Sugino Machina(24). Vodní pumpa se z důvodu bezpečnosti umísťuje mimo pracoviště, nejčastěji do oddělené místnosti, aby v případě havárie neohrozila lidské životy. Vysokotlaká vodní pumpa (obr. 2.4) se sestává ze dvou okruhů. Nízkotlakého a vysokotlakého. Vysokotlaký okruh, ve kterém koluje vodní paprsek je řízen nízkotlakým okruhem, jenž je řízen řídicí kapalinou. Řídicí kapalinou je tlakový olej, který je pod tlakem zhruba 20 MPa. Vysokotlaká vodní pumpa činí velkou část nákladů pro řezání vodním paprskem.



Obr. 2.4 Vysokotlaká vodní pumpa PTV – 60 Compact (38)

2.3.2 Multiplikátor

Multiplikátor slouží ke zvýšení tlaku oleje z primárního okruhu do sekundárního okruhu vody a je součástí vysokotlaké vodní pumpy. Mnoho zařízení ve světě využívá především vysokotlaký hydraulický multiplikátor (obr. 2.5). (24, 27)



Obr. 2.5 Multiplikátor

Hydraulické čerpadlo, které je poháněno elektromotorem, dopravuje tlakový olej do multiplikátoru pod nízkým tlakem. Tam se tento nízký tlak oleje generuje na vysoký tlak vody vlivem poměru pracovních ploch pevně spojených oboustranných pístů. Jedná se tedy o dvojčinný multiplikátor. Tato transformace se řídí Pascalovým zákonem. (20, 30)

Pascalův zákon (24):

$$p_1 \cdot S_1 = p_2 \cdot S_2 \quad (2.1)$$

Z hlediska navrhování multiplikátoru jako nejdůležitější parametr považujeme koeficient zvýšení tlaku i .

Koeficient zvýšení tlaku (24):

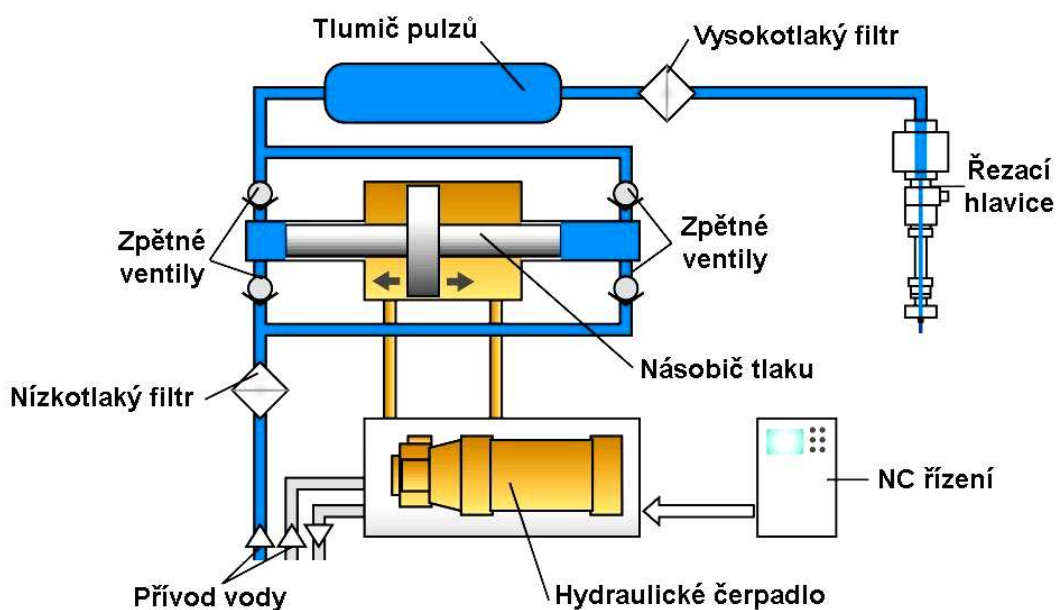
$$i = \frac{p_2}{p_1} = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \quad (2.2)$$

Při činnosti dochází ke ztrátám vlivem ztráty třením v netěsnostech. Proto výstupní tlak p_2 je nižší.

Výpočet tlaku p_2 na výstupu multiplikátoru (24):

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \cdot \eta_m \quad (2.3)$$

Z výše uvedených údajů vyplývá, že výstupní tlak je závislý na poměru ploch pístů a také na nastavení vstupního tlaku. Proto regulace výstupního tlaku se reguluje tlakem vstupním. Na obr. 2.6 je schéma zařízení vysokotlaké vodní pumpy s multiplikátorem.



Obr. 2.6 Schéma zařízení vysokotlaké vodní pumpy s multiplikátorem (17)

Vlivem pracovní změny pístu dochází na výstupu multiplikátoru k pulsujícím tlakům. Proto se do obvodu za multiplikátor umísťuje akumulátor. Vysokotlaká nádoba, která má za úkol tlumit rázy a udržovat rovnoměrný tlak a rychlost vody.

Dalšími částmi tohoto zařízení je vysokotlaké těsnění (obr. 2.7), sloužící k utěsnění vysokotlaké komory a vysokotlakého válce.



Obr. 2.7 Sada těsnění (39)

1 – těsnící kroužek B-1465-1

2 – VT kroužek 04406-1

3 – páskový kroužek 004407-1

4 – O-kroužek B-8075-119

Těsnění musí zaručovat minimální tření, nízké přesaky a hlavně dlouhou životnost. Materiál těsnění se neustále vyvíjí s rostoucími požadavky. Patří mezi ně eleastomery, kůže, tkaniny, kovy, plasty a jiné. (24) Tyto materiály musí být odolné proti korozi a stárnutí. Musí být odolné vůči pracovní kapalině a jejímu nárůstu teploty. Těsnění se rozlišuje (24, 31):

- těsnění s přirozeným utěsňováním
- labyrintové těsnění
- těsnění s mezikružím
- těsnění kombinované

2.3.3 Filtry

Filtrují – čistí kapalinu, odplavují nečistoty do velikosti (1,2 až 0,5) μm a chrání štěrbinu v trysce před možným poškozením nebo ucpáním. (24, 27)

Mezi filtry (obr. 2.8) patří hluboký filtr se čtyřmi vrstvami. Jednotlivé vrstvy jsou od sebe rozdílné. Při prostupu vody první vrstvou filtru jsou zachycovány nečistoty největších rozměrů. V druhé vrstvě se zachytávají středně velké částice a až v poslední čtvrté vrstvě se zachytávají částice nejmenší. (24, 27)



Obr. 2.8 Vodní filtry (40)

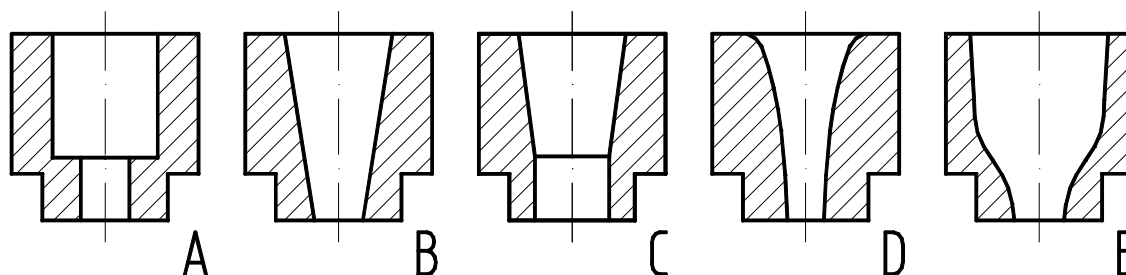
2.3.4 Lapač vody

Nádoba, která je umístěna pod řezaným materiálem. Po řezu materiálu je voda společně s třískou a abrazivem zachycena v tomto lapači vody. Má za úkol tlumit nárazy vody se zbytkovou rychlostí a tlakem. Hladina hluku při procesu řezání abrazivním vodním paprskem je vysoká a může dosahovat hodnot i přes 105 dB. Požadovaná hloubka nádoby je (300 až 600) mm, ale pokud se klade nárok na nižší výšku, lze použít vanu s ocelovými kuličkami. Požívají se také lapače tvořené trubkou dlouhé 300 mm. (27)

2.3.5 Řezací hlava

Jedna z nejdůležitějších částí celého systému, ve které dochází k finálnímu tvaru vodního paprsku, který ovlivňuje kvalitu řezu. Součástí těchto hlavice jsou trysky. Rozlišují se vodní a abrazivní trysky.

Vodní trysky jsou vždy součástí řezacích hlavice pro řezání vodním paprskem i řezání abrazivním vodním paprskem. Jedním z nejdůležitějších faktorů je geometrický tvar, přesnost a životnost. Vstupní průměr trysky je určen technickými parametry vysokotlakého čerpadla. Vyrábí se ve velmi malých rozměrech a je velmi důležité dodržet její souosost a vnitřní průměrnou aritmetickou úchylku profilu. Do trysky proudí vodní paprsek vysokou rychlostí okolo $(300 \text{ až } 1400) \text{ m.s}^{-1}$ o vnitřním výtakovém průměru $(0,05 \text{ až } 0,5) \text{ mm}$. Kvalita výstupního vodního paprsku je výrazně ovlivněna geometrickým tvarem trysky (obr. 2.9), vnitřní drsností povrchu R_a a druhem materiálu. (24)



A – válcová, B – kuželová, C – kombinovaná (kuželová s přechodem do válcové), D – kónická, E – složená – bikubická

Obr. 2.9 Tvary vyráběných a používaných trysek (24)

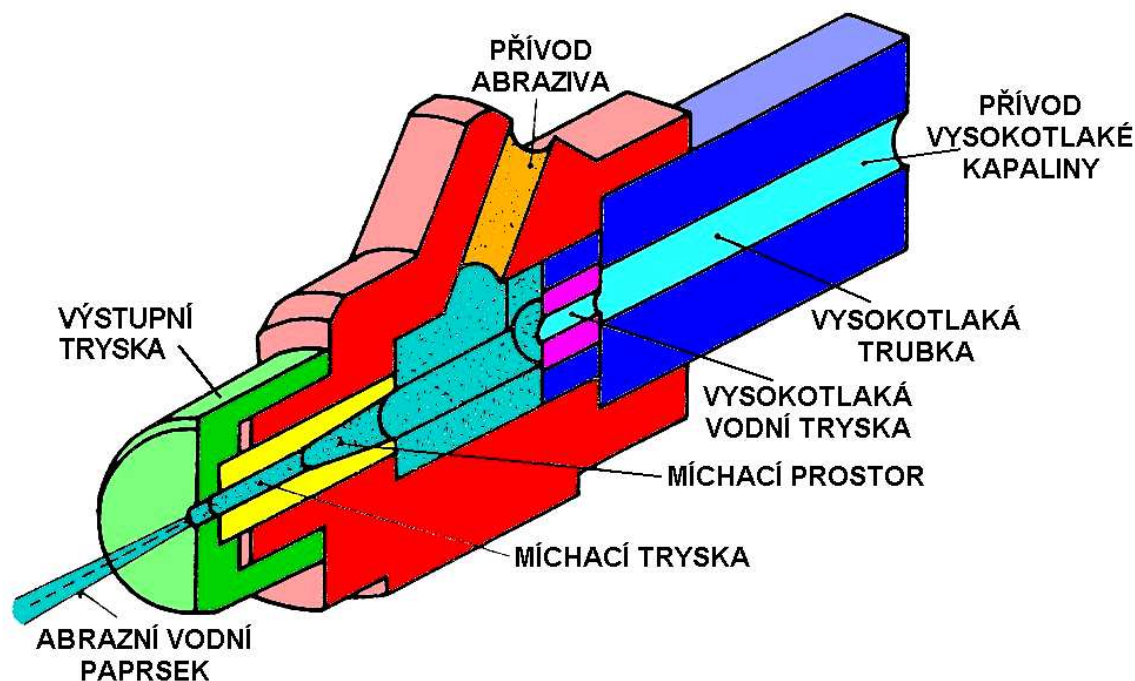
Trysky pro nízké a velmi nízké tlaky se vyrábí z tvrdého kovu. Používají se především materiály safír, rubín a syntetický diamant. Používají se také slinuté karbidy, korozivzdorné oceli, karbidy wolframu a nitridy bóru. Životnost jakéhokoliv druhu a typu materiálu trysky je ovlivněna druhem a kvalitou vody. Proto se voda různě upravuje a filtruje před vstupem do řezací hlavice (kap. 4.3). Při proudění dochází ke ztrátám vlivem tření. Tyto ztráty mají za následek zvýšení pracovní teploty kapaliny (Tab. 1.1) a možnou nestabilitu odpařováním kapaliny. Proto je důležitý vhodný tvar trysky.

Tab. 1.1 Oteplení vody procházející tryskou (24)

Tlak kapalinového paprsku (Mpa)	50	100	150	200	250	300	350	400
Oteplení paprsku v trysce (°C)	32	41	50	58	69	77	82	86

Abrazivní řezací hlavice (obr. 2.10) ve své konstrukci obsahuje nejen vodní trysku, ale také míchací komůrku, do které je přisouváno abrazivo ke zvýšení řezací schopnosti. Abrazivo se dodává ve formě písku, granulí, zrníček apod., které je popsáno v kap. 4.2.

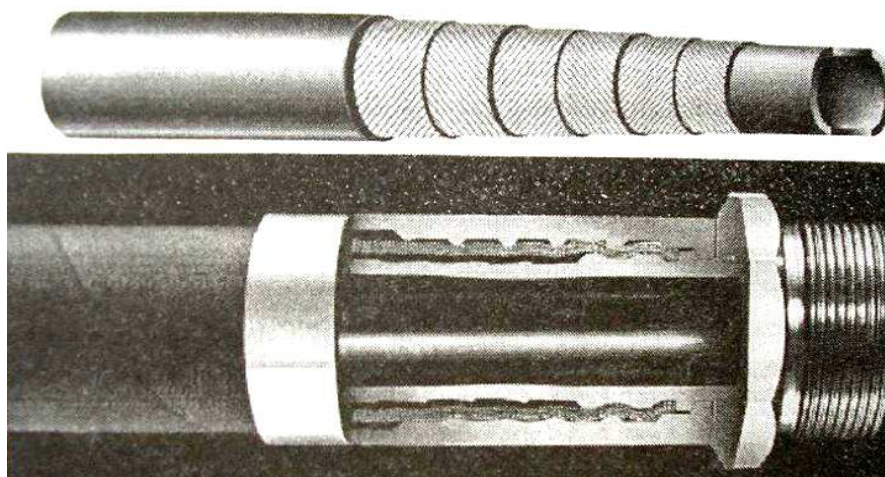
Voda prochází systémem vysokotlakých trubek do abrazivní řezací hlavice a postupuje do vodní trysky. Tam se vzhledem k měnící geometrii mění laminární proudění na turbulentní a vzniká podtlak, přisává ze zásobníku abrazivo, které je ve míchací komůrce přivedené do paprsku. Tam mu voda předává část své kinetické energie a strhává ho k místu řezu. Abrazivo může být také dodávané pod určitým tlakem do smíchávací hlavice abrazivní trysky (24). Řezací hlavice je řízena CNC řídícím systémem nebo může být upevněna na ruku robota. (50)



Obr. 2.10 Řezací hlavice (17)

2.3.6 Dopravní systém vysokotlakých trubek

Dopravní systém se skládá z vysokotlakých trubek a spojujících elementů, které zaručují odolnost proti korozi, flexibilitu a především bezpečnost. Těchto trubek a elementů je celá řada a jejich výběr je závislý na maximálním hydraulickém tlaku v systému potrubí, na dynamickém zatížení systému, flexibilitě, druhu přepravovaného média a náročnosti na údržbu. Používají se pružné tlakové hadice (obr. 2.11) a pevné potrubí na vysoký tlak. Tlakové hadice se vyrábí vícevrstvé. Počet jednotlivých ovinutí a materiál ovinutí závisí na pracovním tlaku. (24)



Obr. 2.11 Vícevrstvá vysokotlaká hadice (24)

Spojovací prvky jsou normalizované, aby byly zcela zaměnitelné. Z hlediska velikosti tlaků se rozlišují spojovací elementy a trubky pro nízký a vysoký tlak. Pro nízký tlak do 50 MPa (24) se využívají nákrůžky. Pro vysoké tlaky je však jejich použití nemožné, a proto se používají závitové armatury, hadicové spojky apod. Na vysokotlaké potrubí je kladen velký důraz a musí splňovat některá kritéria:

- odolnost proti vysokým tlakům a dynamickým rázům,
- těsnost jednotlivých spojů a odolnost proti korozi,
- bezpečnost, spolehlivost a přijatelná cena.

Jejich životnost je ovlivněna mechanickým a tepelným napětím, velikostí tlaku kapaliny, tlakovými špičkami, materiálem i montáží dělníka. (24, 31)

2.3.7 Souřadnicový stůl

Technologie vodního paprsku je ideální technologií pro plně automatizovaný provoz. Zvyšuje se tak produktivita práce. Pohyb řezací hlavičky je celý řízen počítačem, ve kterém je předem vyhotoven řídicí program. K řízení se používají CAD/CAM systémy, ve kterých je možná simulace celého procesu. Jednotlivé tvary součástí se do počítače dávají prostřednictvím CAD formátů (*.dwg, *.dxf). Pro řezání součástí ve 3D, se musí programovat minimálně 5 stupňů volnosti. Stoly jsou pevné a zpravidla vyrobené z korozi-vzdorného materiálu. Volí se právě korozi-vzdorný materiál, protože voda je velice agresivní při kontaktu s ocelí a má tendenci s ní reagovat. Výsledkem následného procesu je koroze. Pracovní plocha je vybavena roštem (obr. 2.12) nebo kuličkovým povrchem.

Na ploše jsou odtokové kanálky, které odvádí znečištěnou vodu do lapačů vody. Nad touto plochou se pohybuje souřadnicový portál, který zajišťuje posuv. (1, 19, 24, 26, 34, 41)



Obr. 2.12 Opěrný rošt

Souřadnicové stoly (obr. 2.13) jsou rozměrné, a proto se dají zpracovávat velkoplošné materiály jako koberce či velké reklamní tabule.



Obr. 2.13 X-Y CNC stůl WJxxyy-nZ-D (41)

Parametry CNC stolu WJxxyy-nZ-D firmy PTV s.r.o (41)

- nejčastěji prodáváný 2D CNC stůl s vysokou tuhostí nosné konstrukce,
- vedení tvořeno kuličkovým lineárním vedením krytým kompaktním měchem a robustním nerezovým plechem,
- vhodný pro všechny 2D aplikace,
- limitní pracovní rozměry,
- šířka, osa X – 4500 mm,
- délka, osa Y – 10000 mm,
- zdvih, osa Z – -200 mm,
- přesnost polohování $\pm 0,05$ mm / 300 mm (garantovaná, dosahovaná je vyšší),
- opakovatelná přesnost najetí $\pm 0,05$ mm,
- maximální pracovní rychlost $12000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,
- jeden nebo dva Z-ové suporty (s jednou nebo dvěma řezacími hlavami),
- standardní řídicí systém PTV 886,
- doplňky stolu,
- výškový senzor,
- proporcionální dávkovač abraziva,
- 2D CAM program Wrykrys,
- interface pro komunikaci s VT čerpadlem JETS3.8-60-Standard, COMPACT.

3 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI A METODY VODNÍHO PAPRSKU

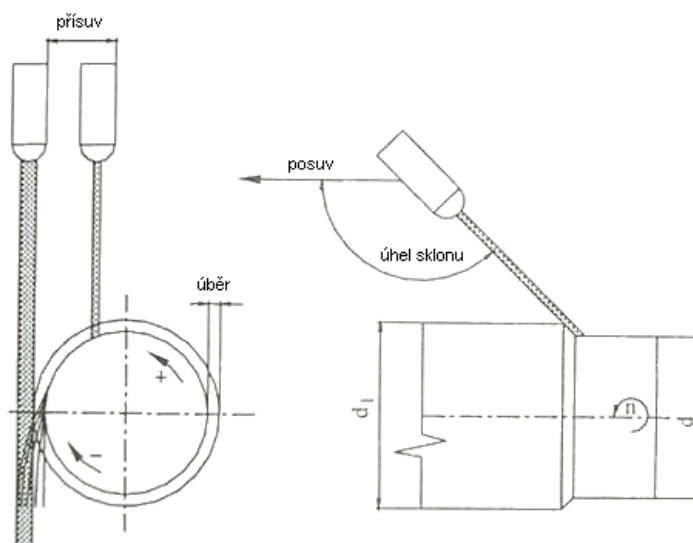
Kapitola se zabývá technologickými možnostmi obrábění WJM a AWJ, vhodnými materiály k řezání, pozitivy, negativy a druhy paprsků. Konec kapitoly se věnuje dosahované kvalitě řezu.

3.1 Možnosti obrábění

Nekonvenční metodou vodního a abrazivního vodního paprsku se dělí nejen materiály ploché, ale využití se nachází i v běžných způsobech obrábění, jako je soustružení, frézování, vrtání, odstraňování otřepů apod. Obrábí se tedy nejen ploché, ale i rotační plochy. (10, 24)

Soustružení

Zařízení k soustružení se sestává z vysokotlakého čerpadla, posuvného zařízení, zařízení pro podávání abraziva, pokud se jím řeže a krytováním stroje. Při soustružení (obr. 3.1) je řezací hlavice držena průmyslovým robotem se 6 stupni volnosti a posouvá se. Obrobek je upnut ve sklíčidle a rotuje. Soustružení probíhá přísuvem řezací hlavice nad obrobek. Celé zařízení je z důvodu bezpečnosti zakrytované.



Obr. 3.1 Soustružení vysokotlakým vodním paprskem (24)

Jakost obrobené plochy je závislá na rychlosti posuvu, typu použitého abraziva, jeho tvaru a velikosti, tlaku paprsku, velikosti otáček a hloubce řezu. Soustruží se s přídavkem abraziva, protože soustružení samotným vodním paprskem je zdoluhavé.

Vrtání

Využití se naskytá především u těžce obrobitelných materiálů. Vrtat se může hned několika způsoby. Stacionárním paprskem a obrobkem, rotujícím paprskem nebo vyřezáváním středu otvoru paprskem.

Frézování

Využití pro tvarově složité obrobky. Nejedná se o oddělení materiálu. Abrazivní vodní paprsek několikrát přechází po obrobené ploše a dává obrobku konečnou podobu. Vhodná aplikace při výrobě tvarových nástrojů.

Pro ekonomickou a efektivní vhodnou volbu těchto metod obrábění se musí určit hydraulické a abrazivní parametry, průměry trubic, posuv a počet přechodů paprsku, rychlost rotace při soustružení, objemový úběr materiálu, jakost povrchu a rychlosti proudění. Rychlost proudění vody se pohybuje v rozmezí (300 až 600) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a přísun abraziva kolem $10 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. (24, 27)

3.2 Druhy používaných paprsků

Druhy paprsků se mohou dělit podle pracovního tlaku: (24)

- velmi nízký (do 20 MPa),
- nízký (do 40 MPa),
- střední (do 140 MPa),
- vysoký (do 420 MPa),
- ultrazvukový (nad 420 MPa).

Používají se nejčastěji tři druhy paprsků podle druhu zařízení a požadavků na použití. (27, 50)

- Systém pulzujícího paprsku, který používá krátkodobé trvání impulsu. Vznikají tlakové špičky, které mají za následek urychlování řezné mezery. Použití vhodné při vrtání a řezání.
- Systém kontinuálního souvislého paprsku, který využívá stálé energie vodního paprsku při procesu řezání. Toto je nejrozšířenější metoda při řezání všech materiálů.
- Systém kavitačního paprsku, který pracuje na principu lokálního porušení materiálu destrukční silou. Částice materiálu jsou vytrhávány z povrchu pomocí kavitačních bublin. Tento paprsek je kontinuální s obsahem kavitačních bublinek.

Kavitace vzniká při vypařování kapaliny. Vodou začnou procházet bubliny vzduchu, které při zániku vyvolávají rázy. Vlivem těchto rázů dochází k rozrušování povrchu materiálu. (21)

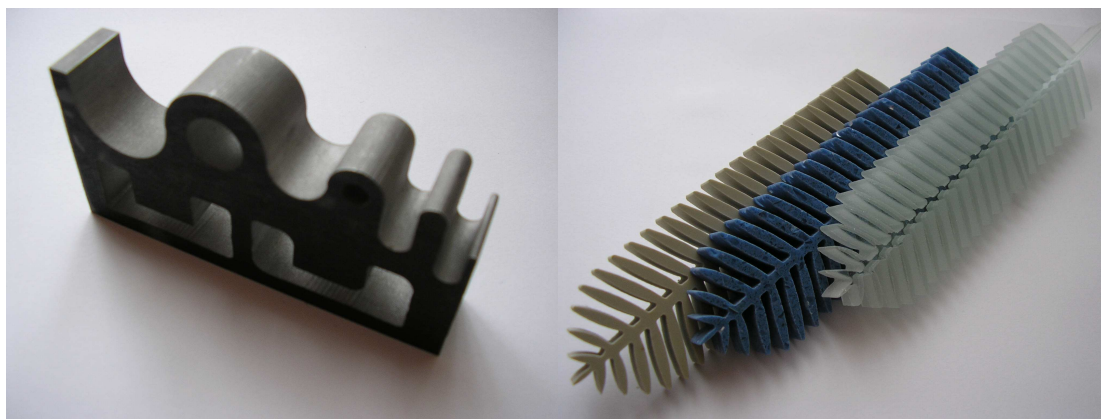
3.3 Druhy obráběných materiálů

Vysokotlakým vodním paprskem se můžou řezat téměř jakékoliv materiály, které nejsou samotnou vodou znehodnocovány. Při dělení měkkých materiálů se využívá metoda řezání čistým vodním paprskem. Měkkými materiály jsou lepenka, papír, laminát, gumotextil apod. Rychlost řezání se pohybuje od (5 až 400) m.min⁻¹.

Při dělení tvrdých materiálů se využívá metody řezání vodním paprsek s přidáváním abrazivního materiálu ke zvýšení kinetické energie a zvýšení účinnosti řezání. Tvrdými materiály jsou slinuté karbidy, kobalt, sklo, titan, hliník a kompozity. Velikost rychlosti řezání se pohybuje v rozmezí (10 až 2500) mm.min⁻¹. Proto při dělení měkkých nekovových materiálů se využívá WJM a naopak při dělení kovových materiálů se využívá AWJ. (1, 5, 6, 13, 18, 22, 24, 28, 49, 63, 64)

Příklady řezaných materiálů:

- astenická chrom niklová ocel, ocel konstrukční, ocel tepelně zpracovaná,
- beton, kámen, umělý kámen,
- mosaz a bronz,
- plast a laminát,
- slitiny hliníku, titanu, mědi, niklu apod.,
- mramor, žula, pískovec,



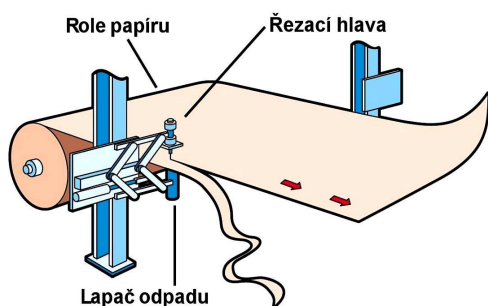
Obr. 3.2 Řezaná ocel, plast a sklo

- tepelně izolační kompozity,
- sklo čiré a barevné, plexisklo, zrcadlo,
- těsnící materiál, podlahové krytiny,
- izolační materiál, dřevo, balza,
- koberec, linoleum,
- dlažba, kachličky (obr. 3.3),

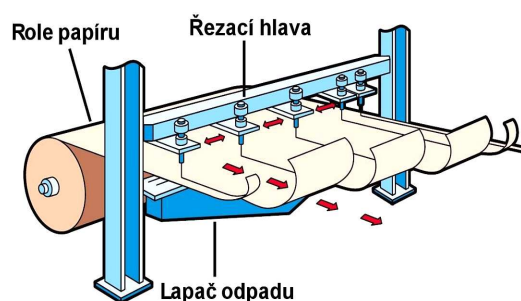


Obr. 3.3 Řezání kachliček

- pryž, korek, těsnění, polystyren,
- technické a reklamní plasty,
- super tvrdé materiály jako safír a rubín,
- kompozity,
- sklolaminát,
- keramika, porcelán,
- kůže,
- slinuté karbidy,
- lepenka, role papíru (obr. 3.4) (obr. 3.5),



Obr. 3.4 Řezání papíru jednou řezací hlavou (17)



Obr. 3.5 Řezání papíru několika řezacími hlavami (17)

Vodním paprskem lze tedy v podstatě dělit jakýkoliv plošný materiál, ať už je přírodní nebo uměle vytvořený.

3.4 Pozitiva a negativa technologie

Každá technologie dělení materiálu, stejně tak jako dělení materiálu vysokotlakým vodním paprskem má své určité výhody a nevýhody. Tyto aspekty jsou ovlivněny mnoha faktory. (1, 3, 6, 19, 22, 24, 49, 51, 56)

Pozitiva

- možnost obrábění téměř všech materiálů,
- studený řez,
- nevzniká žádná tepelně ovlivněná oblast,
- nedochází ke změně struktury materiálu,

- energetická účinnost cca 80% (8x více než u laseru),
- dělený materiál není silově namáhán,
- řezné hrany bez otřepů a deformace,
- celý proces je bezprašný,
- nevznikají škodlivé plyny a páry,
- snížená cena za nástroj,
- provedení tvarově složitých tvarů jednou operací, včetně průchozích děr, aniž by se musely předvrtávat,
- začlenění do automatizovaného systému,
- žádné chemické ovlivnění na povrchu materiálu,
- jednoduchá obsluha,
- snížená cena za nástroj,
- možnost řezání hned několika tryskami napájenými z jednoho vysokotlakého čerpadla (obr. 3.6),



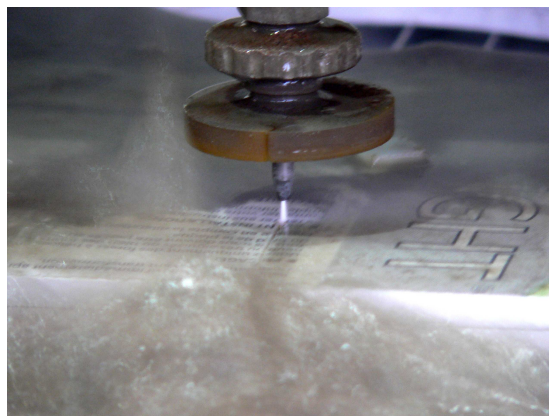
Obr. 3.6 Řezání 6 tryskami najednou (17)

- vysoké využití polotovaru v důsledku úzkého řezu,
- možnost recyklace odpadu (kap. 4.3),
- možnost řezání pod hladinou,
- obrobky není třeba upínat. Obrobky drží na opěrném roštu svojí hmotností,

- nevznikají žádná zbytková napětí ani mikrotrhliny,
- vodním paprskem možnost leštění a čištění,
- řezání probíhá bez dotyku nástroje a obrobku,
- použití i jiných médií,
- vrtání a řezání jedním nástrojem,
- řezání vlnitých materiálů s použitím výškového senzoru,
- řezání ve všech směrech,
- možnost vedení společného řezu pro dva díly najednou,
- řezání několika materiálů najednou (obr. 3.7) (obr. 3.8).



Obr. 3.7 Řezání několika vrstev materiálu před nájezdem trysky



Obr. 3.8 Průběh řezání několika vrstev stejného materiálu

Negativa

- náchylnost materiálu ke korozi,
- poměrně nízká životnost trysek,
- zařízení pro strojní účely není mobilní,
- hlučný a mokrý provoz,
- vysokotlaké čerpadlo bývá umístěno mimo pracoviště z důvodu bezpečnosti,
- nižší rychlost u těžkoobrobitelných materiálů,
- u nasáklých materiálů delší časový interval na vysušení,
- tvarové omezení řezu omezeno kruhovým průřezem vodního paprsku,
- nemožnost kolmého řezu u velkých tloušťek materiálů.

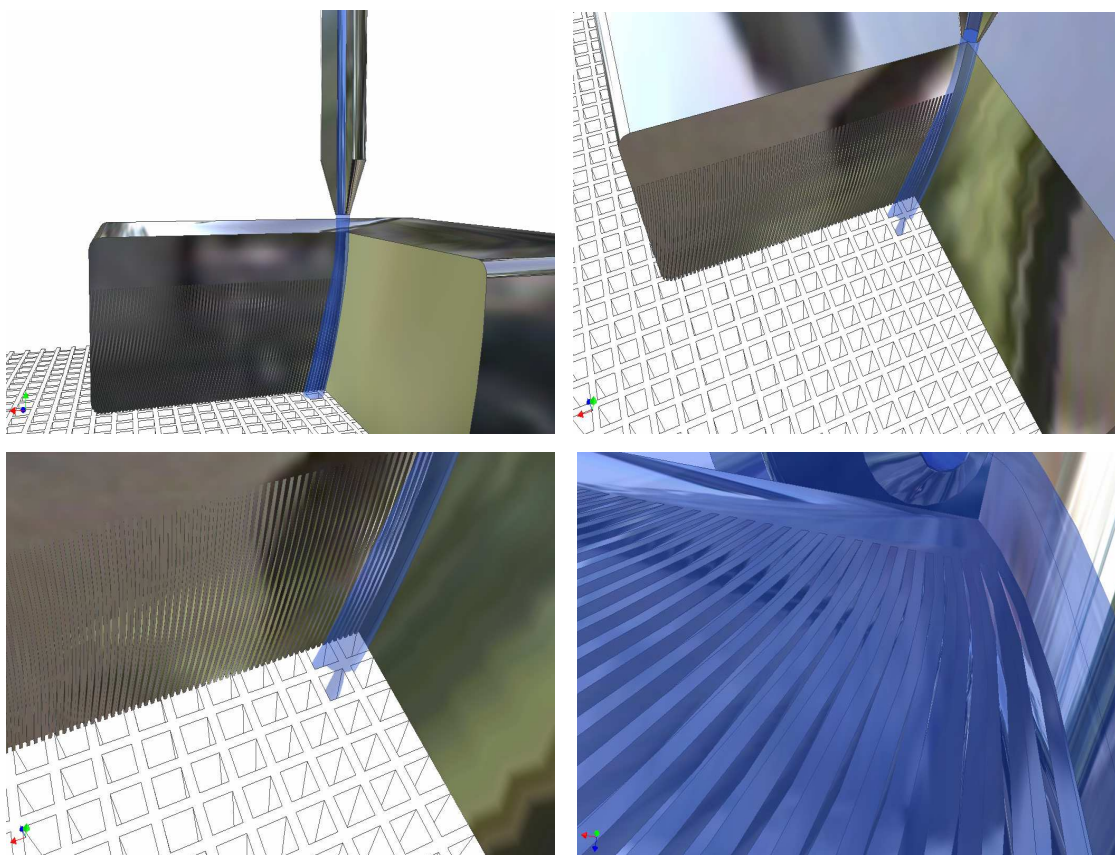
Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra* v horní kontuře	Drsnost Ra* ve spodní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* v horní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hluboký řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

(*) Hodnoty jsou pouze orientační a dle typu materiálu se mohou lišit

Vzdálenost trysky od povrchu je dalším důležitým faktorem kvality opracovaného povrchu. Tato vzdálenost musí být ideální. Když je tryska příliš blízko povrchu, může hrozit uražení trysky, pokud se řeže vlnitý materiál a nepoužívá se výškový senzor. Pokud je ale tryska naopak příliš vysoko, dochází k rozptylu paprsku s abrazivem a tím následně k znehodnocení povrchu hran řezaných částí. (51)

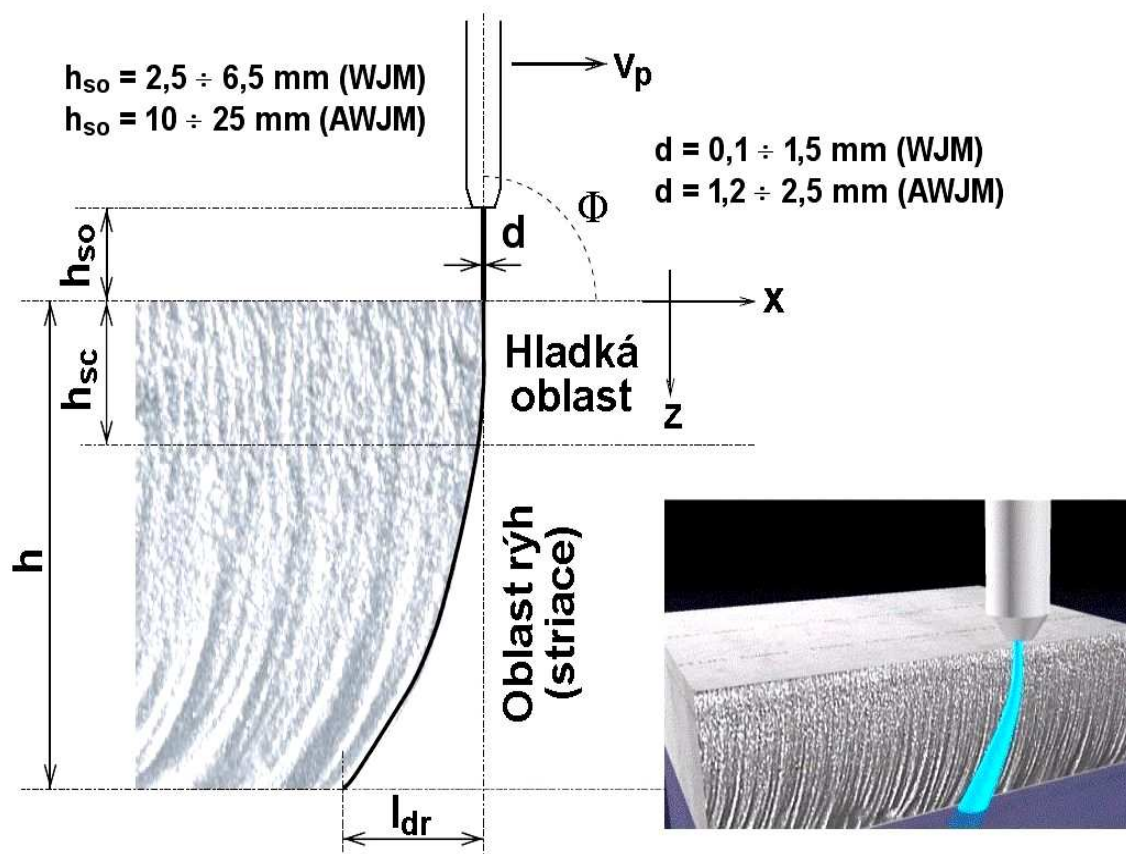
Vzdálenost mezi obrobkem a tryskou při WJM se pohybuje v rozmezí (2 až 70) mm. Při řezání AWJ je tato vzdálenost menší a pohybuje se v rozmezí od (2 až 10) mm (50). Standardní přesnost je $\pm 0,2 \text{ mm.m}^{-1}$.

Řezaná část není tepelně ovlivněná. Proces je bezprašný. Neuvolňují se při něm jedovaté a prašné látky jako při klasickém řezání azbestu či skla. Nevznikají tepelné změny ve struktuře a řez je bez mikrotrhlin. AWJ i WJM nechává povrch řezu rýhovaný (obr. 3.8). (24)



Obr. 3.8 Rýhovaný povrch

Přesněji vznikají dvě zóny. Hladká a rýhovaná. Rýhovaná od toho, jak paprsek v materiálu ztrácí svoji kinetickou energii a vychyluje se. Tato zóna začíná v určité hloubce od povrchu (obr. 3.9).

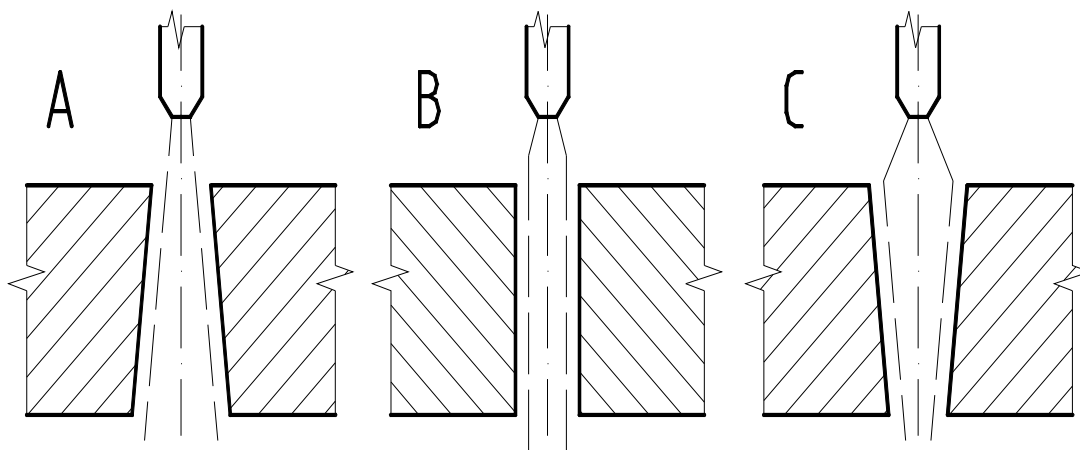


Obr. 3.9 Vznik rýhované části vychylováním paprsku (17)

Snížením posuvové rychlosti trysky se může docílit zlepšení kvality řezu. Vyrůstají tak ale náklady na celý proces řezání. Naopak zvýšením posuvové rychlosti řezací hlavičky se celý proces urychlí. Sníží se tak celkové náklady na výrobu, avšak na úkor kvality řezu. Potom už záleží na odběrateli, jak vysokou kvalitu povrchu chce mít.

Při procesu se dají pozorovat při samotném řezání jiskry a odpařování vody v zóně řezání. V této zóně je zvýšená teplota vody. Tento jev může být kritický pro materiály měkké a tepelně citlivé jako je sklo nebo plast, kde se může změnit struktura. (24, 27)

Při řezání vzniká mírný úkos pohybující se okolo 1° až $1,5^\circ$ (obr. 3.10), který je ovlivněn posuvovou rychlostí řezací hlavy a množstvím přiváděného abrazivního materiálu. (19)



Obr. 3.10 Vznik úkosů (19)

Řezané hloubky, tloušťky materiálu dosahují (400 až 600) mm (51). Výrobci udávají hodnoty řezání oceli do 100 mm. Velmi závisí na druhu řezaného materiálu. Tloušťku však ovlivňují však i jiní činitelé.

Při řezání čistým vodním paprskem, závisí maximální tloušťka řezaného materiálu nejen na materiálu, ale i na tlaku, rychlosti proudění vody a průměru řezací trysky.

Při řezání abrazivním vodním paprskem záleží kromě materiálu, tlaku, rychlosti vody a průměru trysky, také na přidávaném abrazivním materiálu, na jeho množství dodávaného do řezné hlavice, jeho druhu a velikosti.

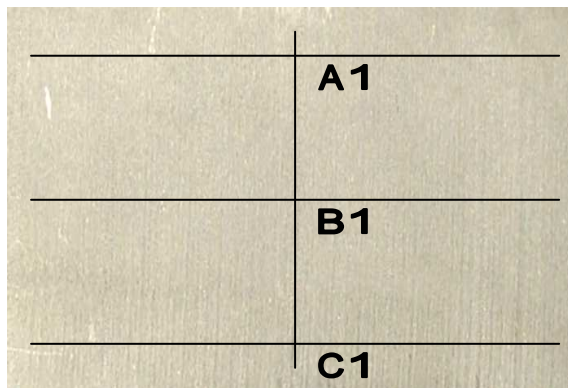
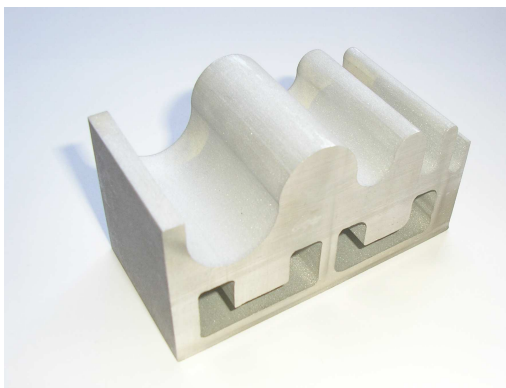
Šířka řezu u metody čistého vodního paprsku je (0,1 až 0,3) mm a u metody abrazivního vodního paprsku je (1,1 až 2,5) mm. Vznikají tak při řezání nízké odpady a vyšší využití materiálu, což se velmi vyplácí u drahých materiálů. Drsnost povrchu R_a , kterou uvádějí výrobci, se pohybuje v oblasti $3,2 \mu\text{m}$. (19, 24, 27)

Experiment pro ověření vzniku úkosu a změny drsnosti povrchu R_a s rostoucí hloubkou řezu.

Technologické parametry řezání:

- Čerpadlo 37 kW.
- Materiál AL 40 mm.
- Řezací tlak na výstupu trysky 380 MPa.
- Velikost vodní a abrazivní trysky 0,013" a 0,035".
- Množství abraziva 400 g.min⁻¹.
- Maximální dosažená rychlost 64 mm.min⁻¹.
- Průstřel kruhový, čas průstřelu 15 s.

Měření vzorku pro zjištění průměrné aritmetické úchyly profilu bylo provedeno na středu součásti ve třech pásmech A1, B1, C1 (obr. 3.11) zařízením Form Talysurf Intra 50. Pásmo A1, horní část řezaného povrchu, a pásmo C1 bylo vzdáleno 10 mm od okraje a pásmo B1 bylo v jejím středu. V jednotlivých pásmech byla provedena měření, která byla zaznamenána do tabulky 3.2.



Obr. 3.11 Hliníkový vzorek

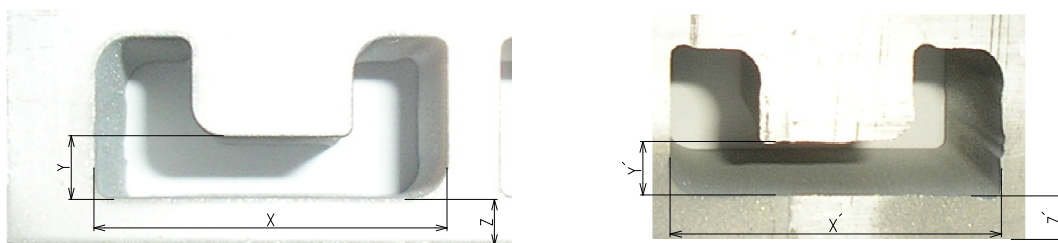
Tab. 3.2 Naměřené průměrné aritmetické úchyly profilu

Počet měření n [-]	oblast A1 R_a [μm]	oblast B1 R_a [μm]	oblast C1 R_a [μm]
1	4,39	4,97	6,62
2	4,90	5,56	7,01
3	4,76	5,01	6,83
$\overline{Ra}$	4,683	5,180	6,820

Výpočet průměrné aritmetické úchylky profilu (24)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Měření vzorku pro zjištění nekolmosti řezných hran bylo prováděno digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo, a to proměřením horní a dolní části vzorku vybraných délek. Hodnoty X, Y, Z jsou měřeny na povrchu vzorku, kde vodní paprsek začíná dělit materiál. Hodnoty X', Y', Z' jsou měřeny ve spodní části.



Obr. 3.11 Pohled na horní a dolní strukturu řezu

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty v horní a dolní části vzorku

Počet měření n [-]	vzdálenost X [mm]	vzdálenost X' [mm]	vzdálenost Y [mm]	vzdálenost Y' [mm]	vzdálenost Z [mm]	vzdálenost Z' [mm]
1	30,74	30,93	5,16	5,11	4,44	4,49
2	30,72	30,99	5,17	5,12	4,42	4,46
3	30,73	30,95	5,16	5,12	4,41	4,57
$\bar{x}$	30,730	30,957	5,163	5,117	4,423	4,507

Maximální úkos: $\alpha = \arctan \frac{\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}}{2.H} = \frac{30,957 - 30,730}{2.40} = 0,16^\circ$

Výsledek experimentu

Dle naměřených hodnot se průměrná aritmetická úchylka profilu Ra s rostoucí hloubkou materiálu zvyšovala, resp. se zhoršovala jakost povrchu řezané plochy v důsledku snižování kinetické energie.

Z naměřených hodnot z horní a dolní části vyplývá, že dochází k úkosům řezaných hran, které se blíží k hodnotě 0,2°. V detailu podle obr. 3.11 je patrné, jak ve spodní části vzorku paprsek vody špatně řezal a nepřesně dořezával části oblouku.

4 PROVOZNÍ NÁROČNOST

Kapitola se zabývá abrazivem a jeho velikostí, tvarem, náklady a recyklací, úpravou vody, typem používaných trysek a možností vzniku koroze.

4.1 Abrazivo

Abrazivní materiál se používá při řezání abrazivním vodním paprskem. Tyto malé částičky jsou přiváděny do řezací hlavice, kde jsou ve směšovací komoře strhávány proudem vody. Tato směs vody a brusiva pak dopadá na materiál a řeže ho (obr. 4.1).



Obr. 4.1 Průnik abrazivního zrna do materiálu (15)

4.1.1 Druhy a význam abraziva

Voda dodává abrazivu část své kinetické energie a zvyšuje tak účinnosti celého procesu. Proto se AWJ využívá především při dělení tvrdých materiálů. Abrazivo má vliv na výkon řezání a jakost obrobené plochy. To je určené velikostí a tvarem zrna, chemickým složením a hmotnostním tokem. Výběr abraziva je určen též tvrdostí řezaného materiálu. Je však ovlivněn také velmi významným činitelem a tím je cena. (1, 17, 24)

Druhy abraziv (1, 17, 24):

➤ Granát Barton $\{\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\}$.

Velmi používané abrazivo, které má vyšší účinnost při řezání, ale s tím spojené vyšší pořizovací náklady. Více opotřebovává abrazivní trysku a nedá se moc dobře recyklovat.

chemické složení:	- oxid křemičitý (SiO_2)	41,34 %,
	- oxid železnatý (FeO)	9,72 %,
	- oxid železitý (Fe_2O_3)	12,55 %,
	- oxid hlinitý (Al_2O_3)	20,36 %,
	- oxid vápenatý (CaO)	2,97 %,
	- oxid hořečnatý (MgO)	12,35 %,
	- oxid manganatý (MnO)	0,85 %.

➤ Oxid hlinitý, korund (Al_2O_3).

➤ Olivín 24 (Mg_2SiO_4).

chemické složení:	- oxid hořečnatý (MgO)	(47 až 48) %,
	- oxid křemičitý (SiO_2)	(42 až 43) %,
	- oxid železnatý a oxid železitý ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	do 8 %,
	- oxid hlinitý (Al_2O_3)	do 1 %,
	- oxid vápenatý (CaO)	do 0,5 %,
	- ostatní látky	do 1 %.

➤ Křemičitý písek.

➤ Menší opotřebení abrazivní trysky oproti granátu. Má nižší pořizovací náklady, ale s tím spojenou nižší účinnost. Křemičitý písek také není vhodný pro proces recyklace.

➤ Ocelová drť.

➤ Minerální písek.

➤ Broky.

4.1.2 Velikost, tvar a hmotnostní tok abraziva

Velikost abrazivního zrna ovlivňuje charakter vstupu do vodního paprsku a následně jeho výstup do materiálu. Tato velikost se udává v jednotkách MESH, která je charakterizována jako počet ok použitého síta na délku jednoho palce. Jak se tedy zjišťuje velikost částic? Brusný materiál je přesíván přes síto s předem definovanou velikostí ok, kterým je přiřazena hodnota MESH. Brusné částčky, které se přes toto síto propustí, mají přiřazenou hodnotu MESH (tab. 4.1).

Tab. 4.1 Velikost abrazivních částic (24)

Velikost abrazivních částic granátu	
MESH	velikost otvoru síta [mm]
16	1,000
36	0,417
60	0,250
80	0,188
100	0,150
150	0,106
200	0,063

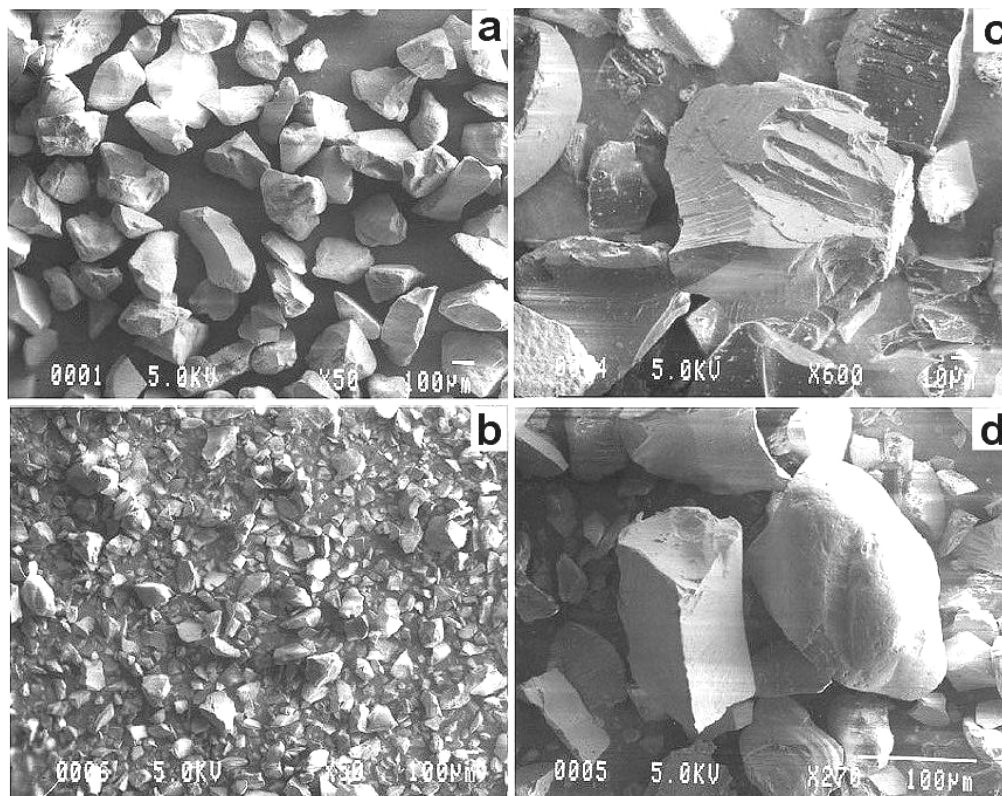
Otvory takových sít jsou dělány do tvaru kruhů nebo šestihranů. Z výše uvedeného vyplývá, že čím je hodnota MESH vyšší, tím je brusivo jemnější, resp. velikost zrna je menší. Brusiva s vyšší hodnotou MESH, tedy brusivo jemné, má i nižší hmotnost. V důsledku nižší hmotnosti, taková zrna ztrácejí mnohem rychleji rychlost a kinetickou energii než zrna těžší. Při řezání materiálu s brusivem větších zrn je ale povrch rýhován (obr. 4.2).

Při řezání ocelí je neoptimálnější střední velikost zrna, pohybující se okolo MESH 60. Je o mnoho účinnější než jemná zrnitost 100 a 150 nebo (16 a 36) MESH. (24)



Obr. 4.2 Rýhovaný povrch v dolní části

Tvar zrna je definován svojí kulatostí a kruhovitostí. Kulatost částic je naměřena jako největší vzdálenost skutečné koule od koule obalové. Kruhovitost je naměřena jako největší vzdálenost skutečné kružnice od kružnice obalové. Proto nejlepší tvar, který částice brusiva mohou mít je malá kruhovitost a velká kulatost (24). Zvyšuje-li se hmotnostní tok abraziva, který se udává v (g.s^{-1}), zvyšuje se i dosahovaná hloubka materiálu. Platí to však jen do určité hranice, do určitého kritického hmotnostního toku. Pak se dosahovaná hloubka řezu snižuje z důvodu vzájemného narážení částic do sebe. Při řezání se struktura brusných zrn mění (obr. 4.3).



b) úlomky zrn, c) zrna porušené křehkým lomem
d) opotřeбенé zrna

AWJM řezání slinutého SiC, tvrdost 1700 HV, abrazivo granát ($5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$), 135 g/min, tlak vody 330 MPa, a) - abrazivo před použitím, b) až d) - použité abrazivo.

Obr. 4.3 Změna struktury zrn granátového abraziva (17)

4.1.3 Provozní náklady abraziva

Při porovnání ceny abrazivních materiálů s nízkou a vysokou účinností, mají nižší cenu abraziva s nízkou účinností. Při porovnání cen křemičitého písku s granátem je cena o 20 až 40% nižší než cena granátu. To je už patrné z toho, že granát má lepší účinnost při řezání. Avšak při řezání hliníkové desky

nebo tabule skla je celý proces zpomalený o 20 až 40% při použití křemičitého písku vůči granátu. Písek je v tomto případě ekonomičtější. (24) Jak řekl pan Ing. Oto Koutný z firmy AQUAdem, s.r.o.: „cena granátového abraziva se kolem roku 1996 pohybovala okolo 12,60 Kč.kg⁻¹, donedávna se pohybovala okolo 5,90 Kč.kg⁻¹ a nyní se ustavila na 8,30 Kč.kg⁻¹“.

V porovnání s jinými zdroji se však tato skutečnost mírně liší. Lze tedy konstatovat, že rozdílnosti v cenách jsou způsobeny tím, že firmy kupují abrazivo od různých výrobců a využívají služeb rozdílných dodavatelů.

4.1.4 Recyklace abraziva

Výběr brusného materiálu má velký vliv na životní prostředí a s tím spojený následný proces recyklace. Brusiva granátová a křemičité písky pro proces recyklace nejsou vhodné (24). Při dělení zůstává použité abrazivo společně se zakalenou vodou a odpadem materiálu v pracovním stole. Nastává otázka, co s použitým abrazivem, které ve svém stavu bylo již dále nepoužitelné. Muselo se tedy likvidovat jako odpad.



Obr. 4.4 AQUArec PRO pro recyklaci použitého abraziva (4)

Firma AQUAdem se sídlem v Brně vyvinula zařízení AQUArec PRO (obr. 4.4), jež bylo schopno recyklovat abrazivo. Proto se mohlo použité brusivo, které prošlo celým procesem řezání, opět po použití vrátit zpětně do procesu. Bylo zjištěno, že brusivo procházející recyklací, neztrácí svoje schopnosti, tedy neotupuje se. Znečištěná voda a brusivo je z řezacího stolu odsávané pneumatickým čerpadlem. Je přiváděna do rotačního separátoru, kde dochází k odlučování vody a abraziva. Zakalená voda se vrací zpět do řezacího stolu, kde rozvodňuje usazené abrazivo, aby bylo lépe odsávané. Odloučené abrazivo padá do pece, kde je vysokou teplotou naprosto vysušeno. Separátorem se pak brusivo vytřídí a v čistém stavu poté padá zpět do zásobníku. Recyklační jednotkou je možné odebírat směs vody, kalu a abraziva hned ze dvou stolů. (4)

4.2 Voda – úprava a přísady

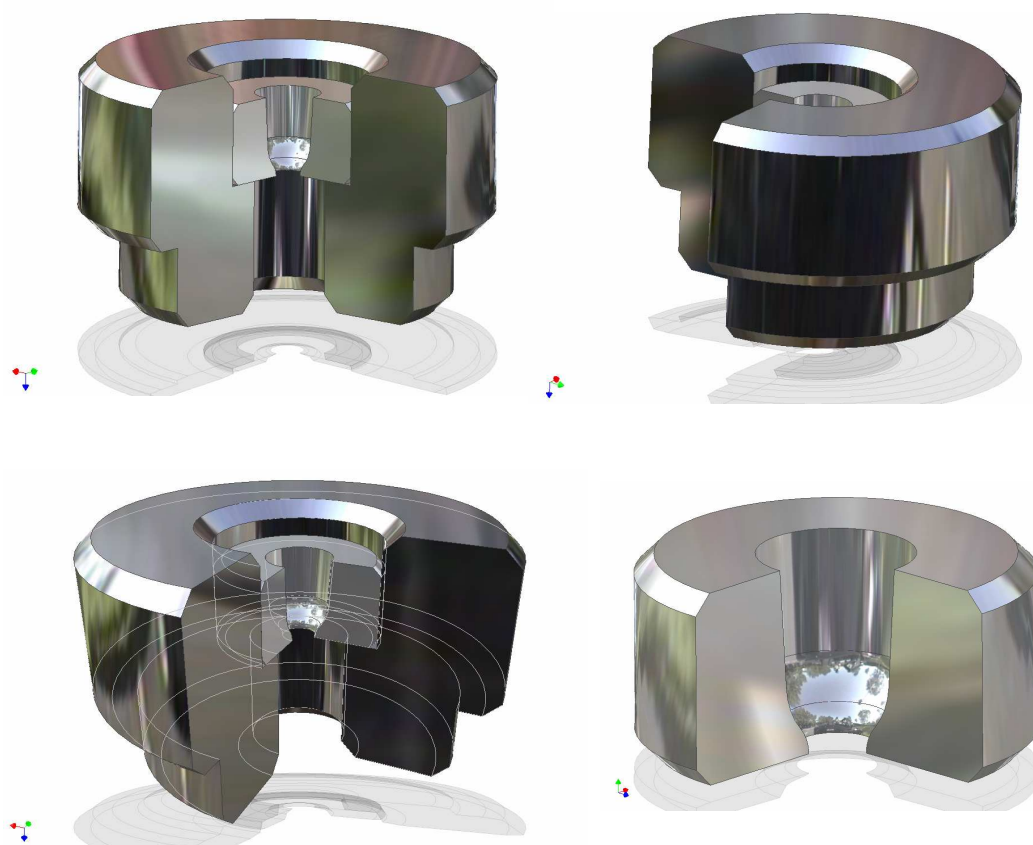
Úprava vody je důležitá z hlediska optimální životnosti jednotlivých částí systému. Proto se filtruje, změkčuje, deionizuje a přidávají se do ní přísady s účelem stabilizování vodního paprsku. Pokud není kvalitně upravena, dochází k zanášení otvorů trysek, k jejím poškozením a následnému špatnému řezání v důsledku špatné geometrie. Následně pak musí proběhnout předčasná výměna trysky, která je doprovázena zvýšenými náklady. Filtrace chrání trysku před možným poškozením nečistotami. Dalším způsobem je změkčování vody a deionizace, která je založena na výměně iontů. Kvalita vody – pracovního média je závislá na jednotlivých výrobcích. Firmy vyžadují tuto kvalitu, protože kvalita vody velice ovlivňuje nejen životnost trysek, ale i dalších důležitých částí řezacího stroje. Snižuje životnost trysky, ventilů, těsnění a pístů multiplikátoru. Úprava ovlivňuje rychlost řezného procesu, kvalitu opracované plochy a s tím i spojené celkové náklady. (17, 24, 27)

Jako přísady jsou do vody přidávány různé polymery s lineárními molekulami. Ty zabraňují příliš vysoké turbulenci a vytvářejí lepší paprsek. Paprsek je při řezání potom souvislý a účinnější. Voda se upravuje třemi

způsoby. Mechanicky, kdy se využívají čisticí filtry, které odstraňují pevné částice, nečistoty různě velkých rozměrů. Mezi další úpravy vody patří biologická a fyzikálně-chemická úprava sloužící k zabezpečení kvality vody určené do kanalizace. Voda by měla mít nízkou viskozitu, která zaručuje nízké ztráty výkonu při toku kapaliny potrubím, nízkou cenu, maximální produktivitu a zdravotní nezávadnost k okolí. (17, 24, 27)

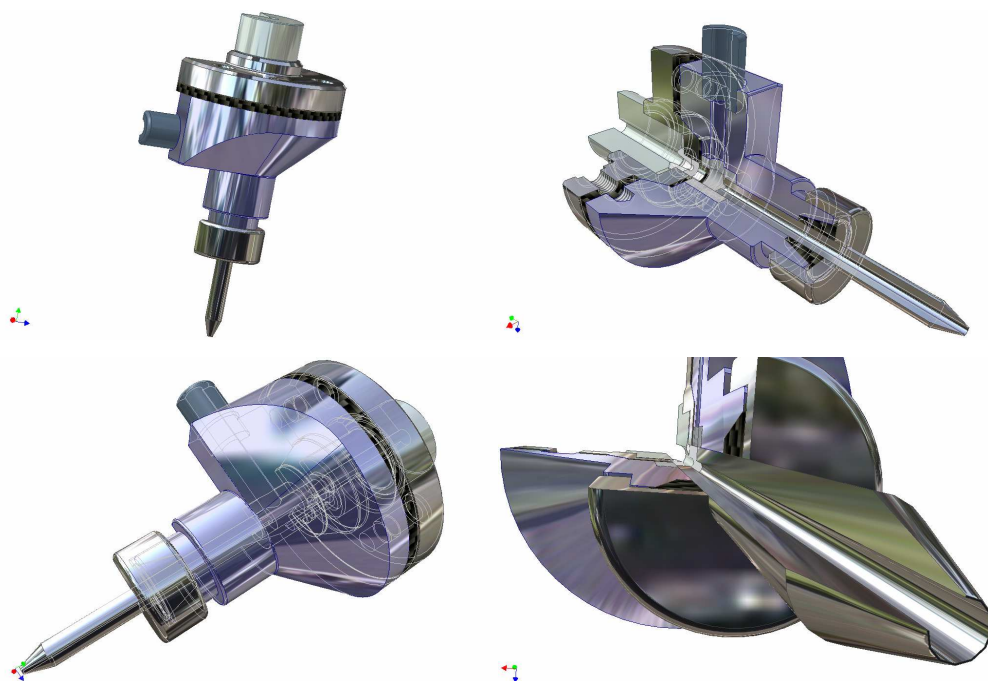
4.3 Provozní doba a životnost trysek

Prozní doba trysek je závislá hned na několika faktorech, jenž ovlivňují jejich životnost. U vodní trysky (obr. 4.5) je to především materiál, dále vstupní úprava a kvalita vody a rychlost vody.



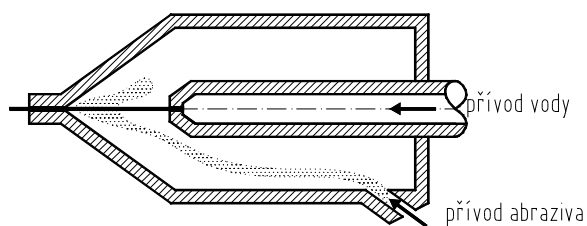
Obr. 4.5 Řez vodní tryskou

U abrazivní vodní trysky (obr. 4.6) záleží také na materiálu, ze kterého je tryska vyrobena. Dále je životnost ovlivněna kvalitou vody, rychlostí proudění a druhem použitého abraziva. Respektive jeho druhem, tvarem a velikostí.

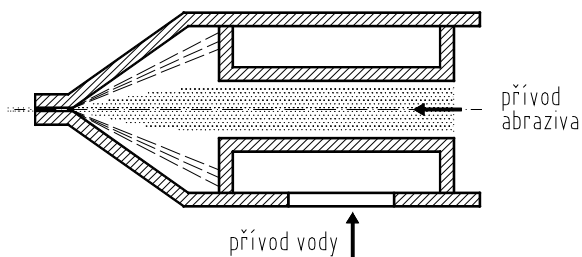


Obr. 4.6 Řezy abrazivní vodní tryskou

Na opotřebení abrazivní trysky má nemalý podíl vstup abrazivního materiálu do trysky. Konstrukce trysky dle obr. 4.7 je lehce vyrobitelná. Naopak konstrukce podle obr. 4.8 dochází k nižšímu opotřebení trysky v jejím obvodu a lepšímu promíchání vody s brusivem. Opotřebení trysky je nižší, když se použije měkké brusivo s nižší účinností, jako je například křemičitý písek než použití granátu, který je tvrdší a dražší. (27)

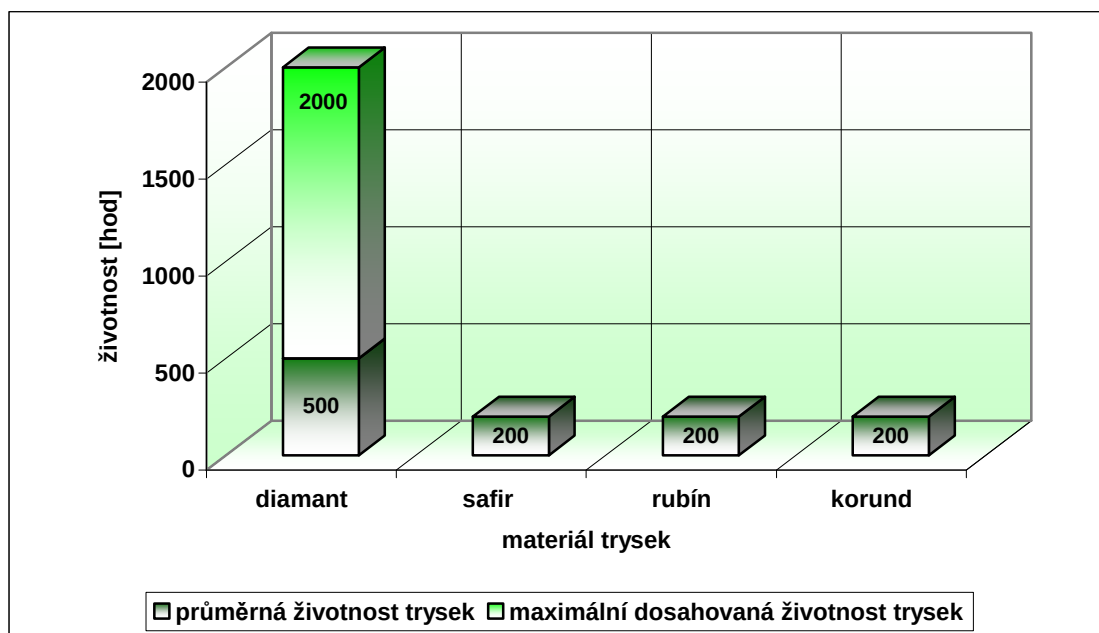


Obr. 4.7 Tryska s vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva (27)



Obr. 4.8 Tryska s vodním paprskem a axiálním přívodem brusiva (27)

Pracovní doba a životnost (obr. 4.9) trysky ze safíru se pohybuje kolem 200 hodin (27) a poté se výtoková štěrbinu zanesou nečistotami. Proto se nahrazují syntetickým diamantem, který má pracovní životnost (5 až 10)x větší (24, 27). Je však až 10x dražší než safírová či korundová (24, 27). Po znečištění se však může přeleštit a bude fungovat jako na počátku. (27)



Obr. 4.9 Závislost životnosti na materiálu trysek

Provozní náklady činnosti stroje se pohybují mezi (350 až 400) Kč.hod⁻¹, ale bez mzdy zaměstnanců. Do těchto nákladů se počítá spotřeba vody, vzduchu, energie, použití trysek a abrazivo.

4.4 Koroze po obrobení

Kovové materiály, které jsou vystaveny působení abrazivního vodního paprsku při obrábění a bezprostředně potom, jsou náchylné ke korozi. Řezaný povrch obsahuje četné výstupky, které přispívají k vyšší náchylnosti ke korozi. Agresivita vody z hlediska působení koroze je závislá na své tvrdosti. Proto se voda různě upravuje (kap. 4.2). Je tedy nutné tyto materiály vhodně chránit po účinku vodním paprskem. Účinným prostředkem je rychlé osušení obrobku proudem stlačeného čistého vzduchu a případná konzervace. Vhodné jsou

minerální oleje nebo tuky, pokud se s obrobkem už dál nebude pracovat a nebude v kontaktu s částmi řetězců, ve kterých by mohlo dojít k ohrožení ekologie. Povrch by se neměl vystavovat mastnotě, která se nachází na lidské pokožce. Koroze může nastat nejen v místě řezu, ale i mimo něj (obr. 4.10).



Obr. 4.10 Koroze obrobku vystaveného působení vodního paprsku

Problém nastává v okamžiku, kdy je obrobek vystavován delšímu časovému intervalu. Abrazivo s vodou se při styku s obrobkem aktivuje a vytváří slabé kyseliny, které povrch aktivují. Proto se musí zpracovaný materiál chránit před korozí, aby nedocházelo k jeho znehodnocení. Voda také aktivně působí na různé části stroje. Proto například rozvodná potrubí a armatury se vyrábí z korozi-vzdorné oceli. (14, 16)

5 SOUČASNÝ STAV VODNÍHO PAPRSKU

Kapitola se věnuje nejnovějším trendům vývoje v průmyslu České republiky, jejich principu v činnosti a oblasti využití nekonvenční technologie WJM a WJC v průmyslu.

5.1 Oblast využití v průmyslu

- strojírenský – dělení těžkoobrobitelných materiálů (slinuté karbidy, superslitiny na bázi niklu, titan, wolfram), tvarové řezání, široké uplatnění v kosmickém a leteckém odvětví,
- elektrotechnický a elektronický průmysl – řezání skla, keramiky,
- chemický – dělení výbušných látek (dynamit),
- potravinářský – dělení potravin nacházející se v surovém a zmrazeném stavu,
- stavební – dělení betonu, keramiky, dlaždic, čištění omítek, odstraňování nátěrů, architektura (obr. 5.1),
- gumárenský – řezání gumy, plastů a vláken,
- papírenský – řezání papíru a fólií,
- obuvnický – řezání kůže,
- sklářský – tvarové řezání skla a jeho vrtání,
- jaderná energetika – odstraňování ochranných železobetonových vrstev,
- automobilový – těsnění, příruby, uživatelské kostry motocyklů, kotouče,
- filmový – stylizované zbraně, dráhy kolejnic pro kamery,
- lékařský – chirurgické nástroje,
- hudební – kryty, uživatelské tvarové návrhy. (11, 23, 24, 27)



Obr. 5.1 Využití WJM v architektuře (33)

5.2 Současný stav

Technologie vodního paprsku prochází již několik let v České republice rychlým vývojem a širokou využitelností v různých oblastech průmyslu. Tato progresivní technologie se rok od roku zlepšuje a umožňuje tak široké možnosti využití ve výrobním procesu.

Cena této technologie se kolem roku 1991 pohybovala v rozmezí (10 až 12) miliónu korun. V dnešním roce 2008 se pohybuje do 3,5 miliónu korun, a to s vysokou vybaveností celého zařízení i se zaškolením pracovníků. Tedy za posledních sedmnáct let klesla cena téměř čtyřnásobně. Co stojí za příčinou tohoto velkého snížení cen?

V minulých letech do České republiky dodávala veškeré komponenty převážně společnost FLOW Int., a to za značnou sumu peněz. V posledních několika letech však tuto společnost zastínila firma PTV, spol. s r.o., která sama vyrábí komponenty k technologii řezání vodním paprskem, vyvíjí nové stroje a příslušenství, a zaujala tak významné místo na trhu. Do roku 2007 dodala více než 200 systémů pracujících s VKP a expanduje je do celého světa. Z toho 60% bylo dodáno do východní Evropy, především do Ruska a (10 až 15) % do České republiky. PTV, spol. s r.o. dodává CNC stoly, čerpadla, tlakové dopravní systémy, recyklační jednotky, odkalovací zařízení, výškové senzory, dávkovače abraziva a různé náhradní díly jako abrazivní trysky, diamantové řezací hlavy, filtry, těsnění, písty apod. (61)

Vzhledem k vysoké poptávce řezání kovových materiálů s vysokou tloušťkou nad 25 mm, nekovových či vrstvených materiálů, plastů a keramiky, vzrůstá produkce systémů pro řezání vodním paprskem. A je to nejen díky velkému spektru dělitelných materiálů, dobré dosahované struktuře řezu a přesnosti, oblasti využití (řezání, soustružení, frézování, vrtání, gravírování, otryskávání, leštění, čištění, odstraňování různých povlaků, otřepů apod.), ale také nízké nákladovosti a možnosti zařazení sestavy do výrobní linky. Pořizovací náklady zařízení pro řezání vodním paprskem jsou více jak 4,5x nižší oproti zařízení řezajícím laserovým paprskem, kde se pořizovací cena takového zařízení pohybuje kolem (13 až 17) miliónů korun. Nižší náklady vznikají hlavně díky české výrobě různých částí na jednotlivé

komponenty, které se potom nemusí dovážet za vyšší sumu ze zahraničí.

Dříve se pohybovala čerpadla o tlaku do 350 MPa. Dnes se běžně využívají tlaky pohybující se kolem 415 MPa, a to za nižší cenu. Dá se dosáhnout i vyšších tlaků použitím dvou multiplikátorů. Tlak potom může být až dvojnásobný. Má to své klady, avšak i zápory, které jsou dost zásadní. Za klady se dá rozhodně považovat skutečnost, že jestliže selže jeden z multiplikátorů, nemusí se zastavit výroba a přicházet tak o výtěžky. Může se řezat dál s jedním multiplikátorem s nižším tlakem. Mezi zápory rozhodně patří náročnost materiálu, který při vysokých tlacích musí snést dynamické rázy.

Velké využití mají v současnosti diamantové řezací hlavice. Sice některé firmy stále ještě užívají rubínových nebo safírových trysek, diamantová má však perspektivní využití. Diamantová tryska se dá po zanesení štěrbiny přeleštit ultrazvukem. Má garantovanou provozní činnost resp. životnost 500 hodin, ale dá se dosáhnout i 2000 provozních hodin i bez přeleštění v některých případech.

Řeznými médii v současné době můžou být kromě vody také v potravinářském průmyslu mléko, alkohol či olej.

V České republice firmy využívají především granátových abraziv nebo olivínů. Mezi dodávaná granátová abraziva patří australské (obr. 5.2), indické, ruské a čínské. Australské abrazivo je mezi nejlepšími a také nejdražšími. Tato abraziva tvoří 50% z celkových nákladů na hodinu provozu stroje. Nejčastěji se používá MESH 80. Australský granát obsahuje nejméně prachových částic narozdíl od olivínu a má vysokou řezací účinnost.



Obr. 5.2 Australské granátové abrazivo

Současný trend je takový, aby zařízení pro WJM a WJC dokázalo obejít standardní konvenční stroj, aby se při zpracování obrobku nemuselo použít konvenčního stroje a přesto se došlo k finálnímu výrobku. Proto v některých případech je vhodné třeba k řezací hlavě připevnit vzduchovou vrtačku, pokud děláme otvory do sendvičových materiálů. Zrychlí se tak celá výroba a sníží riziko špatného řezu. Při řezání vodním paprskem existuje možnost, že by voda nějakou štěrbinou pronikla mezi materiály a paprsek by směřoval zcela jiným směrem a znehodnotil by celý řez.

Velká poptávka na trhu je momentálně po zařízení Free Beam 1010, který vyrábí firma PTV, spol. s.r.o. (obr. 5.3). Společnost tento stroj předváděla na 49. Mezinárodním Strojírenském veletrhu v Brně a toto zařízení sklízí velký úspěch. Odpověď na otázku, proč si získalo toto zařízení velký úspěch a pozornost, je celkem jednoduchá. Dané zařízení se pohybuje v cenové relaci okolo 2,5 miliónů korun a je tedy vhodné pro malé začínající firmy. Oproti jiným stolům je tento rozměrově malý a nepotřebuje tak velké pracovní prostory a nachází tak využití na pracovištích s malou plochou i nízkým stropem, protože při otevření horního krytu se celková výška pohybuje do 2800 mm. Lze také k němu připojit jakékoliv čerpadlo jiného typu, než je standardně s tímto zařízením dodáváno. (36)



Obr. 5.3 Free Beam 1010 (36)

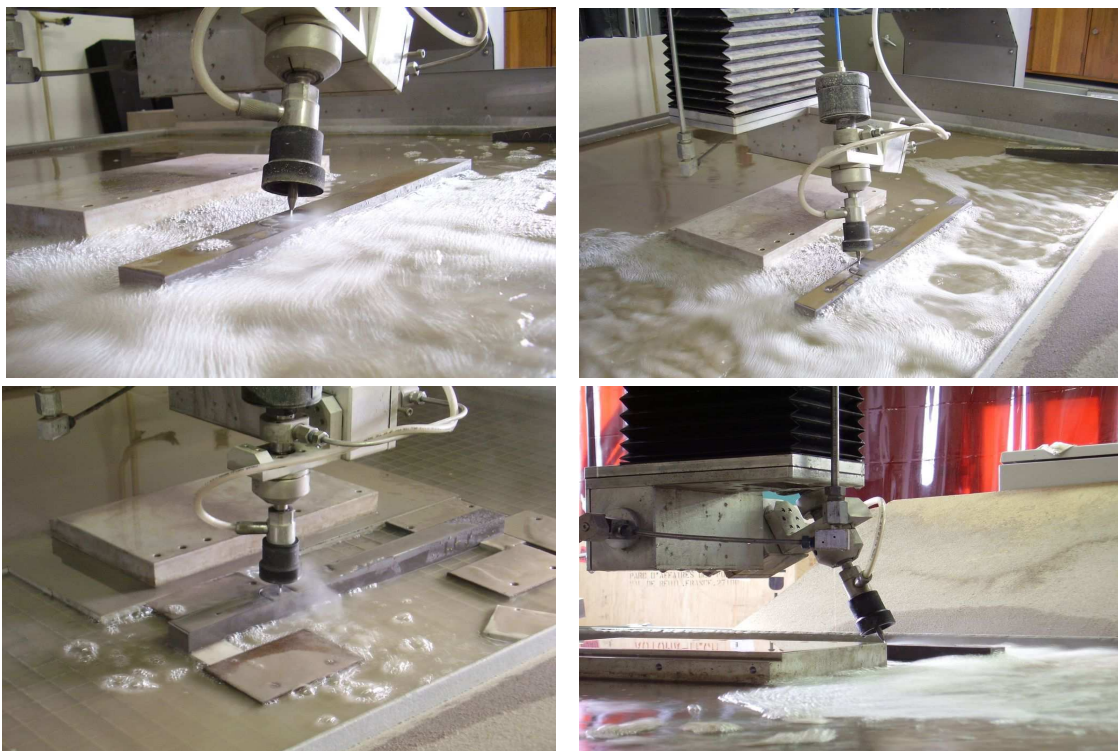
Jak je vidět již z obrázku, pracovní prostor je plně zakrytován. Tím je snížena hlučnost a zamezena prašnost či průnik vody. Jak již bylo zmíněno, toto zařízení je plošně malé. Standardní velikost je (2 x 1) m. Průhledný kryt

umožňuje sledovat celý řezný proces. Vysoká přesnost polohování hlavy $\pm 0,05$ mm a vysoká rychlost pohybu řezné hlavy až $16 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je dalším kladným prvkem celé sestavy. Doplnkovým zařízením je výškový senzor a čerpadlo s vyšším výkonem 37 kW. Ve standardním vybavení je čerpadlo s nižším výkonem 22 kW. (36)

V současnosti se celé zařízení sestává z komponentů, jenž jsou popsány v kap. 2. Jsou to běžné prvky, které jsou součástí každé sestavy. V současnosti se však používají komponenty, zlepšující celý výrobní proces a přesnost. Jsou jimi výškový senzor, odkalovací zařízení, diamantová řezací hlava, ProgressJET, 3D řezací hlavy nebo softwarově řízený dávkovač abraziva. Tyto komponenty jsou rozebrány v dalších kapitolách.

5.2.1 Systém ProgressJet

Řezná hrana se při procesu řezání zužuje z důvodu ztráty kinetické energie paprsku. Nedochází tak ani k ostrosti rohů. Proto se používá systém ProgressJET (obr. 5.4), který eliminuje řeznou nekolmost řezné hrany. Při vyšší řezné rychlosti se zužuje řezná spára na výstupu obrobku.



Obr. 5.4 Systém ProgressJET (44)

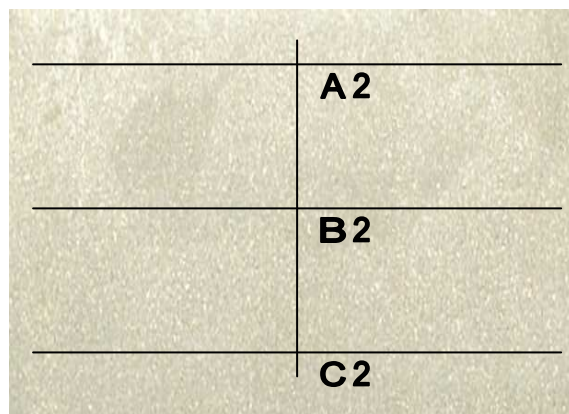
Další nepřesnosti vznikají při náhlé změně pohybu. To vzniká při ostré změně pohybu, např. u rohu. Nebo při malém radiusu, kdy horní část oblouku má větší poloměr zaoblení než poloměr dolní části. Eliminovat tento vliv je možné zakloněním paprsku resp. hlavy a následným zakloněním pohybu nebo snížením posuvné rychlosti. Systém se sestává ze dvou neoddělitelných částí. První část, mechanika systému, umožňuje naklápění celé řezací hlavy ve dvou rotačních směrech a umožňuje všechny pohyby v jednotlivých osách X, Y a Z. Druhá část, řídicí systém, řídí pohyb ve všech pěti osách a hlídá optimální řeznou rychlost. (42, 54)

Experiment pro zjištění drsnosti povrchu Ra s rostoucí hloubkou řezu a vzniku úkosu použitím systému ProgressJet a porovnání s řezáním vodním paprskem bez použití systému ProgressJet.

Technologické parametry řezání:

- Čerpadlo 37 kW.
- Materiál AL 40 mm.
- Řezací tlak na výstupu trysky 380 MPa.
- Velikost vodní trysky 0,013“.
- Velikost abrazivní trysky 0,035“.
- Množství abraziva 400 g.min⁻¹.
- Maximální dosažená rychlost 64 mm.min⁻¹.
- Průstřel kruhový, čas průstřelu 15 s.

Měřený vzorek byl řezán systémem ProgressJet. Měření pro zjištění průměrné aritmetické úchyly profilu bylo provedeno na středu součásti ve třech pásmech A2, B2, C2 (obr. 5.5) zařízením Form Talysurf Intra 50. Pásmo A2, horní část řezaného povrchu, a pásmo C2, dolní část povrchu, bylo vzdáleno 10 mm od okraje a pásmo B2 bylo v jejím středu. V jednotlivých pásmech byla provedena měření, která byla zaznamenána do tabulky 5.1. Při výpočtech bylo použito vzorce 3.1

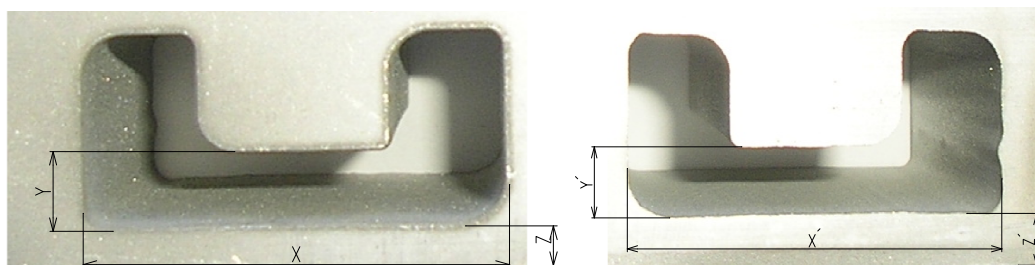


Obr. 5.5 Hliníkový vzorek řezaný systémem ProgressJet

Tab. 5.1 Naměřené průměrné aritmetické úchylny profilu

Počet	oblast A2	oblast B2	oblast C2
měření n [-]	Ra [μm]	Ra [μm]	Ra [μm]
1	6,30	5,40	7,39
2	5,61	5,78	7,68
3	5,33	5,57	7,46
$\overline{Ra}$	5,747	5,583	7,510

Měření vzorku pro zjištění nekolmosti řezných hran bylo prováděno digitálním posuvným měřítkem Mitutoyo, a to proměřením horní a dolní části vzorku vybraných délek. Hodnoty X, Y, Z jsou měřeny na povrchu vzorku, kde vodní paprsek začíná dělit materiál. Hodnoty X', Y', Z' jsou měřeny ve spodní části.

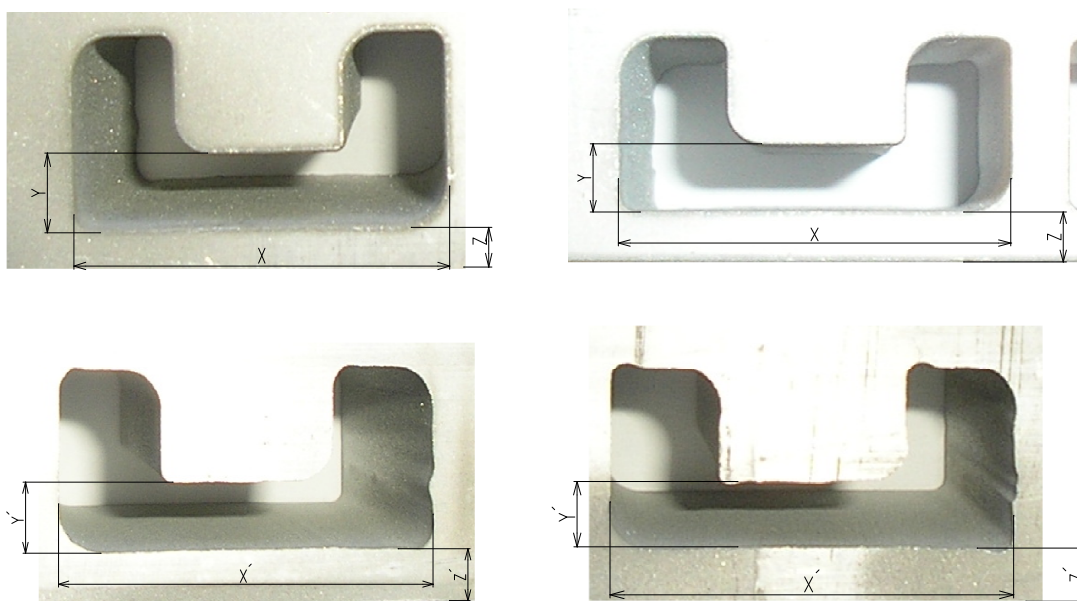


Obr. 5.6 Pohled na horní a dolní strukturu řezu

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty v horní a dolní části vzorku

Počet měření n [-]	vzdálenost X [mm]	vzdálenost X' [mm]	vzdálenost Y [mm]	vzdálenost Y' [mm]	vzdálenost Z [mm]	vzdálenost Z' [mm]
1	30,79	30,81	5,15	5,18	4,45	4,38
2	30,77	30,80	5,16	5,20	4,42	4,4
3	30,80	30,87	5,17	5,18	4,46	4,42
$\bar{x}$	30,787	30,827	5,160	5,187	4,443	4,400

Maximální úkos:
$$\alpha = \arctan \frac{\bar{Z}_{\max} - \bar{Z}_{\min}}{2.H} = \frac{4,443 - 4,400}{2.40} = 0,03^\circ$$



Obr. 5.7 Porovnání geometrie tvaru: levý sloupec ProgressJet, pravý standardní řez

Výsledek experimentu

Dle naměřených hodnot se průměrná aritmetická úchylka profilu Ra s rostoucí hloubkou materiálu nejprve zlepšovala do střední oblasti a poté zhoršovala s využitím zařízení ProgressJet.

V porovnání s řezáním vodním paprskem bez využití tohoto zařízení se docílilo lepší kvality povrchu v řádech 0,7 μm . Avšak stopa po abrazivních zrnech je do mírného soudečkovitého tvaru, zatímco s použitím přídatného zařízení je abrazivní stopa kolmá k ploše ustavení. To je zapříčiněno nakláněním paprsku vody.

Z naměřených hodnot z horní a dolní části vyplývá, že dochází k minimálním úkosům řezaných hran, které se blíží k hodnotě $0,03^\circ$. Tedy při srovnání s běžnou metodou řezání paprskem vody, kdy úkos se blíží k hodnotě $0,16^\circ$, je hodnota s použitím ProgressJet minimální a může se konstatovat, že toto zařízení eliminuje úkosy řezných hran.

V detailu podle obr. 5.6 jsou patrné mírné rozdíly geometrické rozdílnosti mezi horní a dolní částí plochy. Ne však nijak výrazné. Avšak při srovnání geometrických tvarů vzorků oběma metodami je geometrický tvar výrazněji odlišný a nedodržení tvaru bez použití ProgressJet je větší. Avšak při použití toho zařízení se zvyšují strojní časy a celkové náklady.

5.2.2 Výškový senzor

Výškový senzor (obr. 5.8) monitoruje po celou dobu řezání vzdálenost trysky od materiálu. Využití nachází při řezání nerovnoměrných materiálů různě vlnitých. Hlídá nejen rozdíl vzdálenosti trysky a řezaného materiálu, ale také zabraňuje bočnímu nárazu do řezací trysky. Výškový senzor se připevňuje k desce, která nese řezací hlavu. Ve spodní části je mechanismus vlastního senzoru, obepínající celou řezací trysku. Tento senzor je připojen k řídicímu systému jediným kabelem a k jejímu ovládání je potřeba přívod tlakového vzduchu.



Obr. 5.8 Výškový senzor Vs1 (45)

Výškový senzor pracuje hned v několika možných variantách. Může být v kontaktu s materiálem neustále. Celou dobu se ho bude dotýkat a monitorovat. Nebo pouze intervalově. V programu předem zvolených intervalech se senzor dotkne materiálu. Třetí možností je, že výškový senzor bude vyhodnocovat distanci mezi materiálem a tryskou při průstřelu. (42,62)

5.2.3 Odkalovací zařízení

Tento odkalovací systém (obr. 5.9) slouží k odstranění mechanických částí z vody. Mechanickými částmi se myslí použité abrazivo a řezný odpad do velikosti 3 mm. V řezací vaně jsou umístěné sací hlavy, které pomocí vzduchového čerpadla odvádí systémem tlustostěnných hadic vodu s abrazivem a odpadem do hydrocyklonu. V tomto místě se voda odděluje od pevných částic a vrací se zpět do systému. Ale ne zpět do řezacího systému, nýbrž opět zpět do vany, před vanu pomocnou. Z té je právě přečerpávána do vany na vyrovnání hladiny vody. Abrazivo se odvádí z hydrocyklonu do big-bagu (v překladu do velké tašky), kde se shromažďuje a po zaplnění vyměňuje za prázdný.



Obr. 5.9 Odkalovací zařízení (37)



Obr. 5.10 Recyklační jednotka (43)

Parametry odkalovacího zařízení (37):

- Délka: 1600 mm,
- Šířka: 1370 mm,
- Výška: 2800 mm,
- Provozní napětí: 230 V / 50 Hz,
- Provozní napětí výstupních obvodů: 24 V AC,
- Elektrický příkon: asi 3 kW.h⁻¹,
- Krytí: IP 65,
- Rozsah provozních teplot: +5 °C až +40 °C,
- Provozní tlak vzduchu: (0,4 až 0,5) MPa,
- Hmotnost: cca 600 kg,
- Odkalovací výkon: max. 350 kg.hod⁻¹.

Pokud řezací stůl nemá odkalovací systém, je nutné každý měsíc ručně vybrat celou vanu a vyčistit ji. To ovšem neznamená, že pokud systém obsahuje odkalovací zařízení, že se vana nemusí vybírat. Oddálí se to zhruba o půl roku. Poté přijde na řadu čištění, ale i tak se zkrátí vedlejší časy.

Takovou menší obdobou separátoru vody od abraziva a řezných odpadových třísek je recyklační jednotka (obr. 5.10). Celý proces tohoto zařízení je popsán v kap. 4.1.4 Recyklace abraziva. Nutné je však zvážit, že recyklační zařízení spotřebuje hodně energie na teplo a vzduch. A také výrobce musí uvážit, zda se mu tato recyklace vyplatí oproti koupi nového abraziva. Pan Kretík z firmy PTV, spol. s.r.o. uvádí, že pokud firma nemá spotřebu více jak 100 t.rok⁻¹, nevyplatí se jim zařízení na recyklaci pořizovat. (37, 42)

5.2.4 Dávkovač abraziva

Softwarově řízený dávkovač abraziva (obr. 5.11) je určen pro plynulou změnu průtoku toku abraziva do řezací hlavy. Výhodou je, že není nutné zastavit řezací proces. Optimální regulací při různých režimech provozu se určí správné dávkovací množství a tím se sníží spotřeba abraziva. Tuto regulaci lze provádět buď manuálně nebo výhodněji, automaticky přímo v řezacím programu. Tento dávkovač snižuje možnost ucpání trysky při

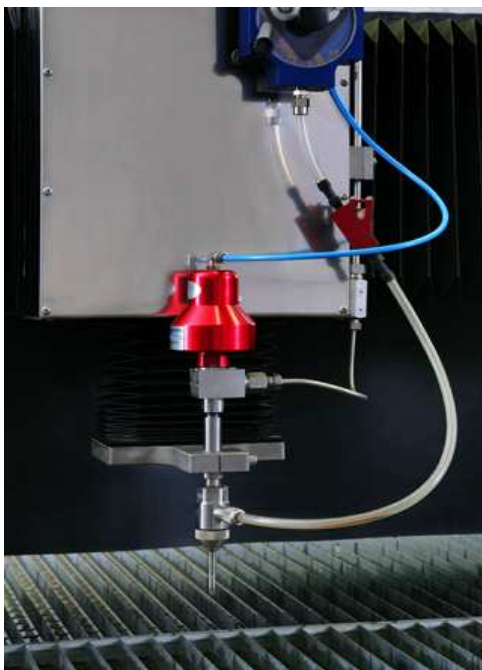
propalování materiálu, snižuje spotřebu tlakového vzduchu a provozní náklady. Naopak zvyšuje kvalitu řezu. Podavač abraziva je nejlépe umístit co nejblíže k řezací hlavě do 0,5 m. (35, 42)



Obr. 5.11 ATD IV softwarově řízený dávkovač abraziva (35)

5.2.53D řezací hlavy

3D řezací hlavy (obr. 5.12) jsou určeny k řezání materiálu ve všech třech osách. Tato hlava může být montována na 2D řezací stoly a rozšiřuje tak jejich působnost a možnosti při řezání. Velké využití má tato hlava ve vojenském průmyslu.



Obr. 5.12 3D řezací hlavy (32, 48)

5.2.6 Diamantová řezací hlava

Tato řezací hlava (obr. 5.13) má již vestavěnou vodní trysku, která je již z výroby velmi dobře vystředěná. Proto má také delší usměrněný paprsek v porovnání s jinými tryskami ze saříru, rubínu nebo korundu. Tryska má velmi vysokou životnost. Garance je 500 hodin, ale v provozu dokáže vydržet až 2000 hodin a to někdy i bez přeleštění ultrazvukem. Hlavou proteče více abraziva, což je doprovázeno zvýšenou řeznou rychlostí zhruba o 25 % než u jiných trysek. Životnost trysky lze zvýšit přesným umístěním vodní trysky v hlavě. Tato hlavice ušetří vedlejší ztrátové časy při výměnách vodních trysek za jiné a sníží tak hodinové náklady.



Obr. 5.13 Diamantová řezací hlava

5.2.7 Ostatní komponenty

Lapač, který je vybaven rychlou změnou hladiny vody. Tento způsob je určen ke snížení hlučnosti při řezání. Vzhledem k tomu, že při řezání je voda ve vzdušném rozhraní velmi hlučná, zvedá se hladina vody nad opěrný rošt, na kterém je posazen materiál, i nad něj samotný. Hladina vody je v takové úrovni, aby spodní část trysky byla pod hladinou vody a vodní paprsek nepřišel do kontaktu se vzduchem.

Bezpečnostní prvky. Ty jsou u zařízení, kde se dbá zvýšené opatrnosti a lepšího působení na okolí. Těmito prvky jsou například krytování stroje, ať už z bezpečnostních důvodů nebo ke snížení hlučnosti stroje, nebo světelná bariéra. Ta funguje tak, že při překročení této bariéry se strojní zařízení ihned celé vypne.

Vakuový systém. Ten se používá při průstřelu do materiálu, který může být rozštěpen nebo jakkoliv poškozen. Při normálním spouštění stroje nejprve tryskou začne proudit voda a v zápětí se začne přisouvat abrazivo. Jinak by to ani nešlo. Kdyby se to pustilo obráceně, tryska by se ucpala. Avšak u vakuového systému to je naopak. Abrazivo se pouští jako první, ale je ihned odsáváno z trysky druhou stranou. Tím se tvoří abrazivní clona, přes kterou potom projde vodní paprsek. Materiál tak nepraská.

Tlaková doprava abraziva (obr. 5.14) je řešena zásobníkem o objemu 10 litrů. Nádoba se plní jen několik sekund horní násypkou a pak dodává abrazivo několik minut. Vše je ovlivněno zrnitostí abraziva, velikostí trysky nebo tlaku vzduchu. (57)



Obr. 5.14 Tlaková doprava abraziva (46, 57)

6 TRENDY BUDOUCÍHO VÝVOJE V ČESKÉ REPUBLICE

Kapitola se zabývá možným vývojem nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky. Dále možným vývojem různých komponentů, vylepšením stávající technologie a jejím ovlivnění působením jiných technologických metod, ať už konvenčních, nekonvenčních nebo hybridů systémů.

6.1 Budoucnost technologie

Před několika lety se tato technologie nazývala technologií budoucnosti. Tento termín však již několik let neplatí. Technologie vodního paprsku se během posledních let stala běžnou metodou řezání materiálu v českém průmyslu. Neustále se vyvíjí, zdokonaluje a konkuruje tak ostatním nekonvenčním metodám jako jsou laserové či plasmové.

Nastává však otázka, zda nekonvenční technologie vodního paprsku bude mít i nadále uplatnění v podmínkách průmyslu České republiky, jako tomu bylo doposud. Nebo se tato technologie postupem času přesune do ústraní či dokonce ztratí své využití vlivem jiné technologie? Technologie nově vzniklé nebo některé stávající, které by dokázaly vodní paprsek v plné míře nejen zastoupit, ale zcela předčít.

V současnosti se stále zvyšuje poptávka po této technologii a zdůrazňuje se podmínka finálního zhotovení výrobku bez nutnosti dalšího opracování. Vznikají nové firmy, které investují peníze do zařízení a systémů pro obrábění vodním paprskem. Tyto firmy se na trhu dobře uplatňují, protože výrobní všestrannost vodního paprsku je vysoká. Mohou se obrábět téměř jakékoliv materiály složitého tvaru, což jinými metodami není možné. Firmy pohybující se už delší dobu na trhu, budou zvyšovat dvousměnné provozy na třísměnné a určitě časem i rozšíří svá pracoviště a zvýší počty strojů a zaměstnanců.

Tato technologie je poměrně levná ve srovnání s minulými léty a v budoucnu by mohla být ještě o něco levnější. Hodně záleží i na tom, jak moc je kupující náročný. Cena technologie by se mohla dostat i k pořizovací ceně pod 2,5 mil.korun.

6.2 Možný vývoj technologie a komponentů

Změna stávajícího principu technologie, vývin nových a lepších komponentů nebo vytvoření nového materiálu určitě změní a popožene vývoj technologie směrem kupředu.

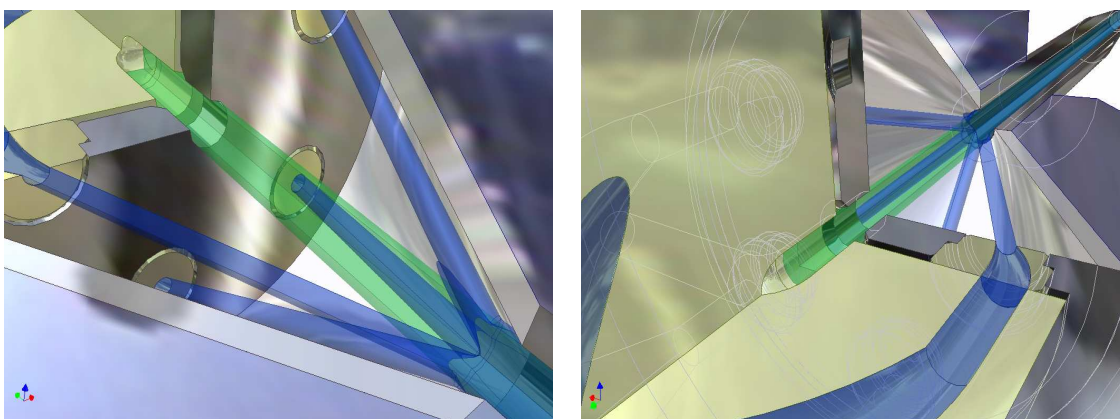
Rozhodně se v budoucnu bude zvyšovat pracovní tlak vodních pump. V současnosti se nachází v oblasti kolem 415 MPa, ale není problém dosáhnout 700 MPa nebo dokonce i 1000 MPa. Takto vysokého tlaku není problém v hydraulickém systému dosáhnout. Problém však nastává v reakci jiných komponentů celé sestavy jako je těsnění multiplikátoru, výdrži vysokotlakého potrubí vůči dynamickým rázům kapaliny nebo v životnosti trysek. Problém u těchto komponentů je v ceně materiálu. V současnosti je materiál drahý, a proto se tlaky nijak výrazně nezvyšují. Pokud však cena materiálu klesne, budou se určitě vyrábět pumpy a komponenty pro vyšší tlak. Zvýší se tak rychlost řezání i kvalita opracované plochy.

Mohl by se změnit systém přidávání abrazivního materiálu do hlavice nebo dokonce materiál trysky. Běžně ve světě se využívá radiální přísun abraziva do řezací hlavy. Ale axiální přísun (popsán v kap. 4.3 Provozní doba trysek) je mnohem lepší z hlediska nízkého obvodového opotřebení trysky. Podle informací ze společnosti PTV, spol. s r.o., jedna zahraniční společnost na takové řezací hlavě, kde by abrazivní materiál vstupoval axiálním směrem do trysky a voda by byla přiváděna několika vodními tryskami po obvodu řezací hlavy, pracuje a vyvíjí ji. Avšak nikdo ani z vyšších představitelů společnosti neví, jak by tento systém mohl pracovat a vypadat, protože si tato zahraniční společnost vše pečlivě tají, aby se nic nedostalo ke konkurenci. Teoreticky by to potom mohlo vypadat tak, že vodní paprsek, který by procházel skrz pět vodních trysek, by se opět střetával v jednom místě již s abrazivem (obr. 6.1). Avšak tento výklad a schéma obrázku je pouze teoretické, protože hlava se nepoužívá a je ve stádiu vývoje a zkoušek.

Záměrem by bylo ,aby abrazivo bylo dobře smícháno s vodním prostředím a neobalovalo pouze vodní paprsek, jak tomu bylo v případě přísuvu abraziva radiálním směrem. Tímto způsobem by se měla několikanásobně zvýšit řezací schopnost paprsku, kvalita opracované plochy a zároveň snížit opotřebení

trysky. Otazník zůstává v problematice nesprávné funkčnosti vodních trysek, střetávání vodního paprsku a podtlaku.

Když by jedna z vodních trysek ztratila svůj geometrický tvar a tím i správnou činnost. Paprsek vody, který by procházel přes tuto primární trysku, by nedodržel správný směr a ztratil svoji soudržnost. V samotném místě střetu s ostatními paprsky z trysek, by nedocházelo ke správnému sloučení i přes správnou funkci ostatních trysek. Výsledný paprsek by nebyl soudržný a pro celý proces řezání by byl také nepoužitelný. Také střetávání paprsku by bylo do určité míry problematické. Pět paprsků by se střetávalo v jednom místě a mohlo by dojít ke vzniku nepříznivého proudění a tedy i k nestálosti paprsku. Vše se tedy musí prakticky vyzkoušet, protože tato problematika je náročná a ani zkušení pracovníci s dlouholetou zkušeností si nedokáží představit, jak by tato hlava mohlo správně pracovat.



Obr. 6.1 Hlava s 5 vodními tryskami a axiálním přísuvem abraziva

Proto zaleží, kolik by řezací hlava s několika vodními tryskami po obvodě stála z finančního hlediska. Pokud by se daly jednotlivé vodní trysky vyměnit nebo přeleštit jako u diamantové hlavy, tak by to mohla být dobrá investice. Pokud by však trysky vyměnit nešly, nemusela by se vždy taková hlava finančně vyplatit.

Dalším budoucím trendem by mohl být vývin nového materiálu, který by měl vyšší životnost a odolnost proti opotřebení ještě větší než má diamant, který je využit při výrobě diamantových hlav. Takový materiál vyvinuli američtí výzkumníci v Kalifornii.

V principu postačilo, aby se dva chemické prvky – rhenium a bor, zahřívali ve formě práškové směsi v retortě z křemíkového skla ve vakuu při teplotě 1000 °C po dobu několik dnů. Vznikly krystalky chemické sloučeniny rheniumdiborid, která je tvrdší než diamant. Tvrdý a velmi odolný materiál proti opotřebení se podle výzkumníků uplatní zejména při výrobě brusných kotoučů a při strojním obrábění kovů. Postup výroby rheniumdiboridu v laboratoři, popsany Hsiu-ving Chungem a jeho kolegy v časopise Science, lze bez problémů uskutečnit v průmyslovém měřítku. (47)

Použitím takového materiálu by se snížily vedlejší časy na výměnu trysek za nové. Dalším faktorem by však byla pořizovací cena tohoto materiálu.

Větší kvality řezu by se dosáhlo, pokud by abrazivní materiál procházel skrz vysokotlaké potrubí již od začátku s vodním paprskem. Promíchání vody a abraziva by bylo obdobné jako při axiálním přísuvu abraziva. Tento způsob však v praxi využíván není, protože by multiplikátor nemohl pracovat správně.

V příštích letech by se nemusela vstupní voda příliš upravovat. Už v současnosti se tolik neupravuje jako v minulých letech, kdy někteří zákazníci dokonce požadovali rozbor vody, zda je dostatečně měkká, s nízkým obsahem vápníku a železa. V současnosti o takové rozborů zájem klesá a dá se očekávat, že kvalita vody by v nastávajících letech nemusela být předmětem významných úprav, protože kvalita materiálů a jejich možný výběr, který je odolný proti vysokému tlaku vody, stále vzrůstá.

Průměr výstupní trysky má vliv na velikost odpadového materiálu a tedy i celkovou využitelnost. Pokud by se průměr trysky zmenšil, daly by se lépe umisťovat výřezy na základní polotovary a ještě by se více zvýšila celková využitelnost celého polotovaru.

Vytvořením nového softwarového programu se opět zlepšil komfort zpracování dat a tím i zrychlí zpracování objednávky zákazníka, vizuální pracovní prostředí a tím i samotná technologie. S vývinem každého nového programu přichází mnoho vylepšení, která zlepšují nejen práci v systému, ale i celkovou přehlednost, různé nové a lepší simulace a lepší optimalizaci výřezu. Tedy aby práce ve 3D byla více přehlednější a umístění jednotlivých vyřezávaných částí na tabuli plechu optimálnější.

6.3 Budoucí trendy hybridních a příbuzných systémů využívající nekonvenční technologii vodního paprsku

Nabízí se otázka, zda nejrůznější hybridní a příbuzné systémy nemůžou v budoucnu odsunout standardní technologii vodního paprsku do pozadí a zvítězit nad ní na trhu. Hybridním systémem je technologie, která se skládá ze dvou a více základních systémů, ať už konvenčních nebo nekonvenčních zařazených do jedné sestavy. Například systém Hybrid Wire-cut EDM, využívající technologii elektroeroze a vysokotlakého vodního paprsku, kde se v zařízení vyměňují hlavy. Nebo nehybridní systém Laser MicroJet – nekonvenční laserová technologie využívající schopnosti vodního paprsku.

Až se tyto technologie dostanou ze zahraničí do České republiky, mohou ovlivnit český trh a snížit tak podíl ostatních nekonvenčních technologií na trhu. Některá společnost může zvážit, zda se jim nevyplatí některý hybridní systém, v němž by vodním paprskem zadaný tvar hrubovali a jiným systémem konečný tvar dodělali. Nebo zvážili nákup technologie Laser MicroJet, která má jisté výhody oproti standardním technologiím vodního a laserového paprsku. V tomto případě se ale nedá očekávat snížení produkce strojů využívající technologii vysokého tlaku vody. Pravděpodobnější je pokles strojů pro řezání elektroerozí a laserovým paprskem.

I přesto, že voda je agresivní sloučenina, reaguje s okolím a působí na něj negativně ať už vlhkostí nebo korozním chováním, může se očekávat nárůst sestav, kdy technologie vodního paprsku bude dávana dohromady s jinými technologiemi. Ať jako hlavní zdroj řezání nebo jen jako přídatné zařízení. I přesto má a vždycky mít bude vodní paprsek své místo v českém průmyslu.

6.4 Uplatnění na českém trhu

Počet firem provozujících technologii vodního paprsku rok od roku roste. Mohlo by se tedy stát a dá se i očekávat, že český trh bude jednou přesycen těmito firmami a ne každá firma se na trhu udrží. Určitě bude záležet, jak velké pole působnosti si dokáže udělat za svojí existenci a s jakou spolehlivostí bude vyrábět a dodávat výrobky. Firma tak bude muset ještě více zkvalitnit

svoji výrobu, přesnost a jakost za nižší cenu. Bude muset udržovat dobré vztahy jak s dodavateli, tak s odběrateli, dodávat materiál nepoškozený a v časném termínu, rychle zpracovávat zakázku a pomocí reklamy, webových stránek či veletrhů si udělat dobré zázemí a jméno v českém průmyslu, aby si převedlo zákazníky na svoji stranu.

Dnes některé firmy nebo soukromé osoby pracují se stroji a systémy, které jsou složeny hned z několika komponentů od různých výrobců a nejsou tak zcela sladěné. Dochází tak ke snižování životnosti systému, a to někdy může způsobit častější poruchovost stroje a občasné zdržení zakázky.

Každý uživatel této technologie se snaží ve stroji najít co největší životnost a účelnost. Proto společnost, která se chce udržet i v budoucích letech na trhu, by měla hledět i na sladění stroje a na jeho životnosti. Především to jsou firmy starší. Nově začínající firmy již kupují celou technologii, jenž je co nejvíce složena z komponentů od stejného výrobce jako je např. ze zahraničí společnost FLOW Int. nebo česká PTV spol., s r.o. Firma, která se bude chtít udržet na trhu by měla získat své stálé zákazníky. Ti jsou důležitým faktorem pro získávání zakázek. Pokud se zákazníkovi nedodává zpracovaný materiál včas nebo ve špatném stavu, nedá se očekávat, že si takové zákazníky udrží. Oslabí tak své pole působnosti a dá šanci konkurujícím firmám.

V České republice se v současné době využívají stroje především pro 2D řezání. 3D řezání ojediněle, spíše ne. V současnosti není po 3D řezání na českém trhu příliš velká poptávka. Dá se však očekávat, že zhruba za 10 až 15 let vzroste poptávka po 3D řezání v České republice a společnosti, které nebudou na tento způsob řezání vybaveni, budou přicházet o část zákazníků a tedy i výdělků.

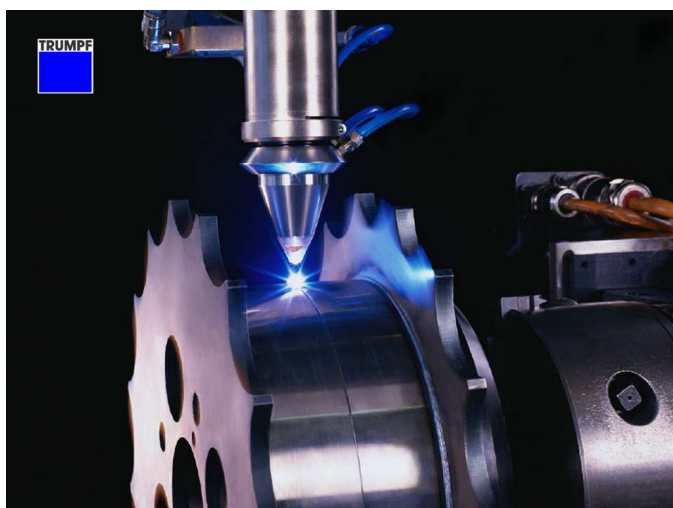
Co se dá ovšem očekávat je nárůst ceny abraziva dovážený se do České republiky ze zahraničí. Respektive z Austrálie a Indie převážně. Takové zboží se přepravuje lodmi z těchto zemí na přepraviště, tam se hromadně pytluje a přiváží do Čech. Proto významnou roli v pořizovacích nákladech hraje aktuální cena ropy. Z dlouhodobého trendu se nedá očekávat pokles ceny ropy, spíše její nárůst, a proto doprava a s tím i spojené náklady na abrazivo budou narůstat a výsledná cena pro odběratele mírně vzroste.

7 PAPRSKOVÉ METODY A JEJICH POROVNÁNÍ

Tato kapitola vysvětluje základní princip obrábění paprskovou metodou laseru a plasmy a porovnává je s nekonvenční technologií vodního paprsku.

7.1 Základní princip obrábění paprskem laseru

LASER – složenina slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, která v překladu znamenají zesílené světlo s využitím stimulované energie. Využívá energii světelných částic, fotonů a vyzařuje vlnění stejného kmitočtu. Přiváděním energie, jsou elektrony obíhající kolem jádra atomu po drahách s určitou energetickou úrovní, z klidového stavu převedeny do vyšší energetické úrovně. Při jejich návratu do nižší úrovně, se uvolní energie ve formě záření. Paprsek je veden systémem zrcadel přímo až k řezací hlavě, kde je zaostřen čočkou. Vystupující paprsek má průměr (0,02 až 0,25) mm (15). K úběru materiálu tedy dochází tepelným účinkem soustředného laserového záření (obr. 7.1). (8, 19, 24, 25, 29, 50, 51, 55).

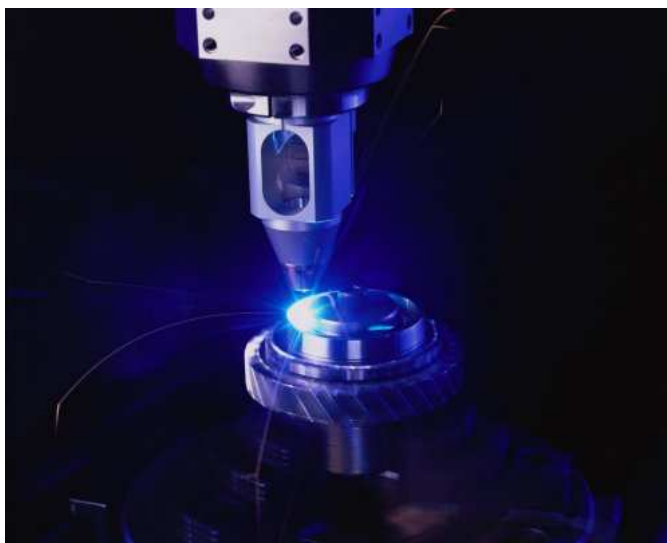


Obr. 7.1 Řezání laserovým paprskem (59)

Probíhá přeměna energie záření na energii tepelnou při teplotě 10000 °C a dochází k roztavení a posléze odpaření materiálu. Rozsah vlnových délek se pohybuje v rozmezí 100 nm až 1200 nm. Konstrukce laseru se sestává z laserové hlavice s médiem a rezonátorem, budícím zařízením a chlazením.

Základní druhy laseru jsou:

- Pevné lasery*
- YAG laser (na bázi Yttrito-hlinitého granátu)
 - rubínový laser
- Plynové lasery*
- Helium-neonové lasery
 - Argonový laser (Ar laser)
 - CO₂ laser



Obr. 7.2 CO₂ laser (60)

Polovodičové lasery

Kapalinové lasery

7.2 Základní princip obrábění paprskem plasmy

Obrábění plasmou (obr. 7.3) spočívá v tavení materiálu extrémně vysokým teplotním účinkem, více než 15000°C. Tato teplota vzniká rozkladem molekul plynu průchodem elektrickým obloukem mezi elektrodou a řezaným materiálem. Elektrodu tvoří katoda a řezaný materiál naopak anoda. Proto řezaný materiál je elektricky vodivý.

Materiál je taven vysokou teplotou a vytlačován z místa řezu. Jako plasmové plyny můžou být použity argon, kyslík, vodík nebo dusík.



Obr. 7.3 Obrábění plasmou (2)

Při plasmovém obrábění dochází na pracovišti k vysoké hlučnosti, prašnosti a vzniku spalin. Proto se v dnešní době využívají plasmové hořáky s přívodem vody. Tento systém nazýváme hydroterm. Voda je z řezací hlavice přímo vstřikovávána do plasmového paprsku. Zvyšuje se tak životnost řezacího hořáku, protože u otvoru trysky je účinné vodní chlazení. Celý proces je tak možno provádět pod hladinou vody (obr. 7.4).

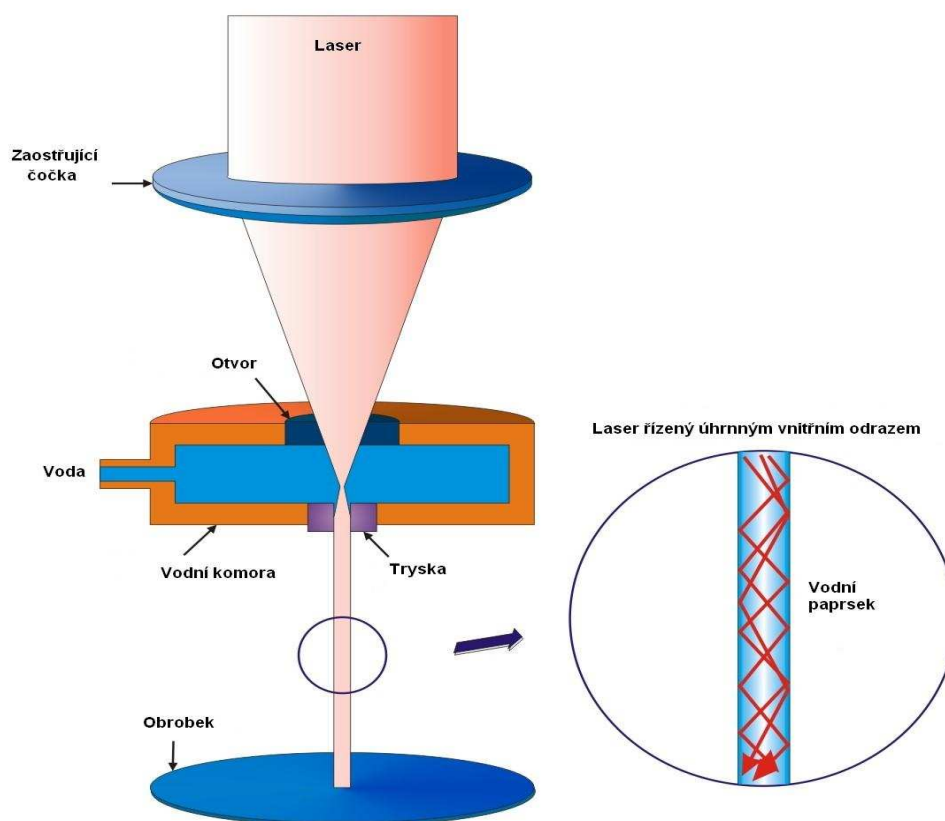


Obr. 7.4 (51)

Tímto způsobem se sníží hluk při řezném procesu. Při řezání plasmou se využívají automatizované systémy. Plasma nachází využití i v předehřevu materiálu před obráběním jiným nástrojem. Nahřáním plasmou se sníží pevnost a tvrdost materiálu a obrábění tak probíhá snadněji. (24, 51, 65)

7.3 Laser MicroJet

Tato metoda představuje revoluci v nekonvenční technologii. Laser MicroJet vznikla jako vůbec první metoda sloučením dvou nekonvenčních metod, a to zcela odlišného charakteru. Je to řezání vodním paprskem a laserovým paprskem. Laserový paprsek prochází přes vodní komoru do trysky, kde prostupuje dál přes vodní paprsek až k obrobku. Laserový paprsek se odráží ve vzduchovodním rozhraní (obr. 7.5). Tato metoda předčí řezání laserovým paprskem.

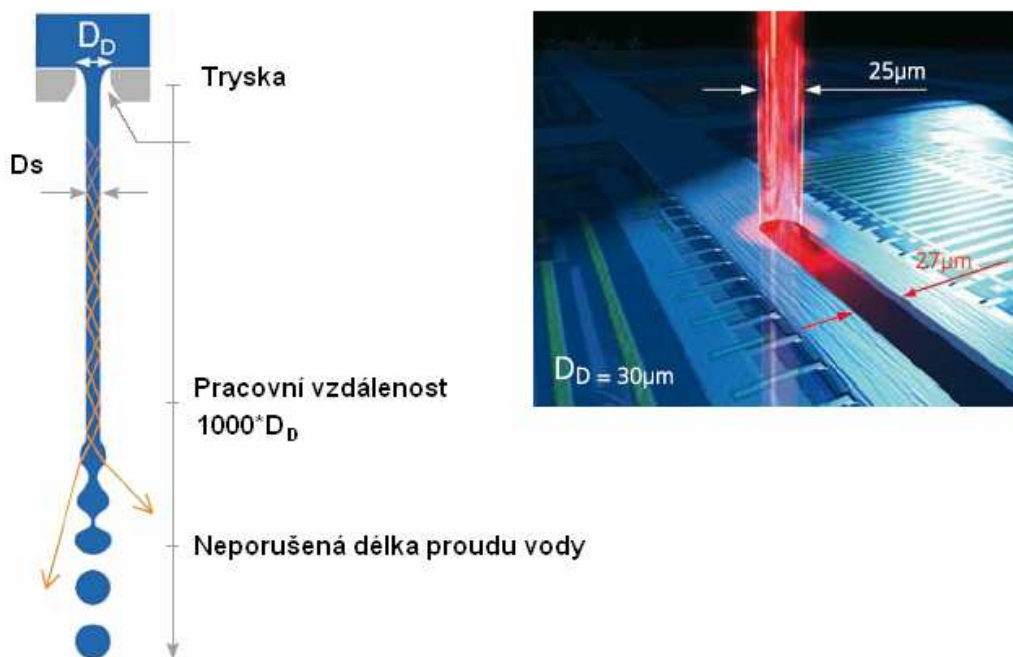


Obr. 7.5 Schéma principu Laser MicroJet

Paprsek vody z vodní komory teče pod nízkým tlakem z vodní trysky a vytváří tenké optické vlákno proměnné délky pro vedení laserového paprsku. Voda během řezání také chladí a myje materiál a zároveň odvádí odtavený materiál ihned z místa řezu. Proto se může mluvit o studeném řezání laserem, kdy vzniká optimální struktura a redukuje se tepelné poškození materiálu. Vzhledem k tomu, že síla vyvozená nízkým tlakem vodního paprsku je malá,

nedochází k silovému účinku na materiál a tak nedochází k mechanickému poškození. Čistá voda musí být deionizovaná a filtrovaná.

Voda velice usnadňuje přesný řez pórovitých či vrstvených materiálů. Spotřeba vody je nízká vzhledem k tenkému průměru paprsku, který se pohybuje v řádech mikrometrů (obr. 7.6). Proto i řezná spára je velice malá a dochází k velkému využití materiálu. (52, 53)



Obr. 7.6 Velikost řezné spáry

Průměr trysky se pohybuje v rozmezí (25 až 100) μm a pracovní tlak vodní pumpy v rozsahu od (2 až 50) MPa. Je vyráběna ze stejných materiálů jako při řezání vodním nebo abrazivním vodním paprskem, a to ze safíru nebo diamantu. Mezi výhody této metody patří zcela určitě vysoká rychlost řezání, rovný, hladký a úzký řez, žádné zdeformované hrany a znečištění, chlazení materiálu, nízké provozní náklady a vysoká produktivita a šetrnost k životnímu prostředí.

K provozu slouží stroj LCS 300 firmy Synova s pracovní oblastí (300 x 300) mm a přesností $\pm 3\mu\text{m}$.

Touto metodou se může řezat ocel, keramika, polykrystalický diamant PKD či kubický nitrid bóru CNB. Tedy velmi tvrdé materiály, které jsou vhodné pro nástroje. (52, 53)

7.4 Porovnání paprskových metod

Paprskové metody se od sebe vzájemně liší mnoha faktory. Sestavou zařízení, principem úběru materiálu, působením na materiál apod. Proto ne každou metodou se může obrábět stejný materiál (tab. 7.1).

Tab. 7.1 Vhodnost metody pro různé typy materiálů (27)

Materiál obrobku	Paprsek vody	Paprsek laseru	Paprsek plasmu
Kovové materiály			
Hliník	2	2	1
Hořčík	2	2	1
Vysokolegovaná ocel	1	2	1
Titan	1	2	2
Žárupevná ocel	1	3	3
Nekovové materiály			
Keramika	1	1	4
Plasty	2	2	3
Kompozitní materiály	1	2	4

Hodnocení použití: 1 - optimální 2 - vhodné
3 - méně vhodné 4 - nevhodné

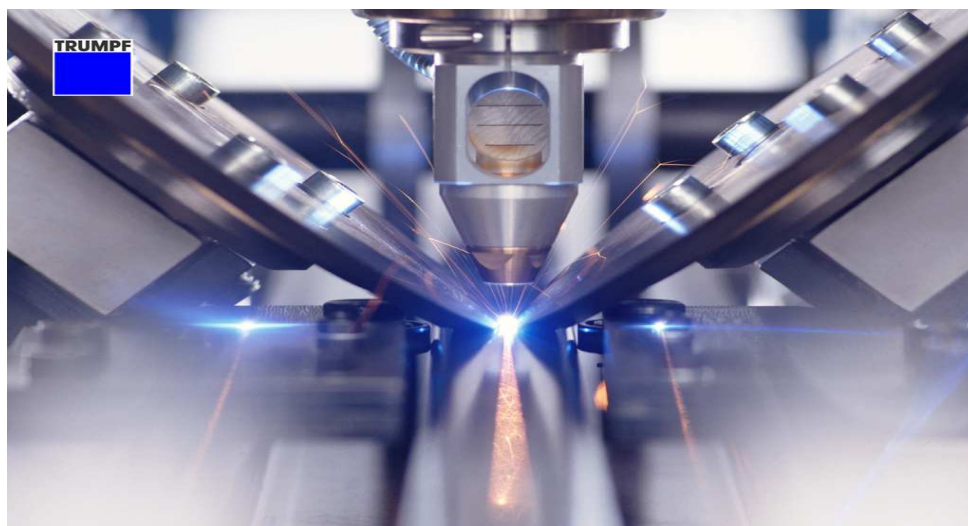
Významný rozdíl mezi řezáním vodním paprskem a laserovým či plasmovým paprskem, je působení na materiál. Zatímco voda nepůsobí nijak tepelně na materiál a vytváří studený řez, tak laser a plasma vytváří u řezaného materiálu tepelně ovlivněnou oblast. Dosahované hloubky řezání materiálů se liší nejen druhem materiálu, ale také použitou metodou. U vodního paprsku se může dosáhnout hloubky i 600 mm. U ocelových materiálů to je kolem 120 mm. U laseru a plasmu jsou tyto hodnoty nižší. Pohybují se kolem (20 až 25) mm. Proto LBM a PBM je vhodné spíše pro menší tloušťky materiálů narozdíl od AWM. Proto lze také s velkou výhodou využít řezání vrstvených materiálů vodním paprskem. Při řezání laserem a plasmou toto není možné, protože by mohlo dojít ke svaření materiálů.

Procesy jsou plně automatizovány a řízeny počítačem. Drsnost a přesnost řezu, šířka řezné mezery či ovlivnění povrchu jsou dalším rozdílným faktorem. Jednotlivé charakteristiky jsou významně ovlivněny provozními a technologickými podmínkami jednotlivých metod. Porovnání těchto metod je zobrazeno v tab. 7.2.

Tab. 7.2 Porovnání paprskových metod – WJM, LBM, PBM (17, 22, 24, 30)

Technologické parametry	Znak	Jednotky	Obrábění vodním paprskem	Obrábění laserovým paprskem	Obrábění plasmovým paprskem
Drsnost	Ra	[μm]	1 ÷ 8	0,8 ÷ 6,3	6,3
Stupeň přesnosti	IT	[μm]	+/- 0,2	+/- 0,1	+/- 0,5
Hloubka tepelného ovlivnění	h	[mm]	žádné	0,3 ÷ 0,5	1 ÷ 2
Šířka řezu	š	[mm]	0,5 ÷ 2	0,5 ÷ 0,8	2 ÷ 3
Rychlost řezání	v	[m.min ⁻¹]	0,05	3 ÷ 8	5
Příkon stroje	P _{př}	[kW]	5 ÷ 20	5 ÷ 40	50 ÷ 150
Měrná práce	Aj	[J.m ³]	15 ÷ 100	8 ÷ 150	500 ÷ 1000
Úběr	Q _t	[mm ³ .s ⁻¹]	80 ÷ 600	30 ÷ 500	1500
Teplota řezu	-	[-]	studený řez	teplý řez	horký řez
Vliv teploty	-	[-]	žádný	malý	velký
Kolmost řezu	-	[-]	mírný sklon	mírný sklon	silný sklon
Výronek na řezné spáře	-	[-]	bez výronku	bez nebo vyjíměčně	mírný výronek
Tvrdost materiálu	-	[-]	nemá vliv	nemá vliv	nemá vliv
Řezání plastu	-	[-]	lze	vyjíměčně	nelze
Reliéfní obrábění	-	[-]	ano	ano	ne
Napětí	U	[V]	220	4500	100
Proud	I	[A]	-	-	500
Výkon	P	[kW]	2 ÷ 10	2	50
Prostředí	-	[-]	směs vody a brusiva	vzduch	směs argonu a vodíku
Teplota	T	[°C]	30	10000	30000
Nutná vlastnost materiálu	-	[-]	žádná	žádná	vodivost

Za další rozdílnost těchto metod se může považovat jejich zpracování materiálu (tab. 7.3). Ne každou metodou se může všeho dosáhnout. Všemi třemi metodami se nejběžnějším způsobem dělí materiál. Laser se také využívá při vrtání, gravírování, svařování (obr. 7.7), vytváření drážek nebo mikroobrábění. Využití nachází i ve spojovací a měřicí technice.



Obr. 7.7 Svařování laserovou technologií (58)

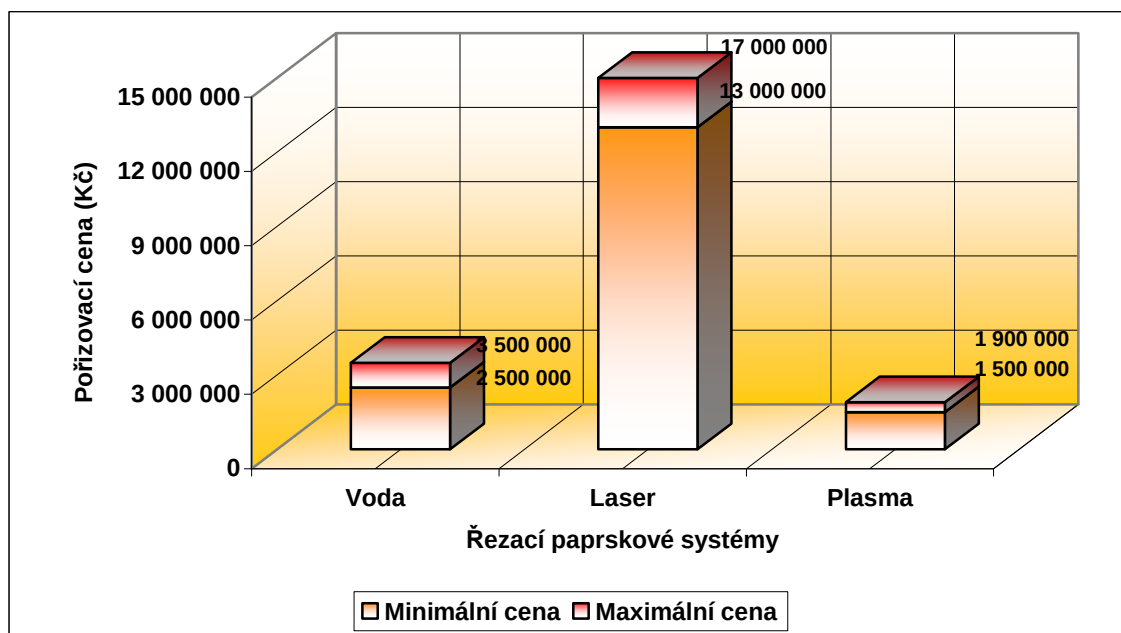
Tab. 7.3 Využívané metody zpracování materiálu paprskovými metodami (27)

Princip	Vodní paprsek	Abrázivní vodní paprsek	Laserový paprsek	Plasmový paprsek
Řezání	A	A	A	A
Spojování	N	N	A	A
Tváření	N	N	A	A
Změna stavu povrchu	N	N	A	A
Fyzikálně chemické působení	N	N	A	?
Tepelné zpracování	N	N	A	A
A - užívaný proces , N - omezené využití , ? - nepoužívané nebo nevhodné				

Paprskem plazmatu se hloubí otvory a dutiny libovolných tvarů a předežhřívá materiál, který se následně obrábí jinou metodou.

Vodním paprskem se mimo jiné také brousí, leští, vyrábí drážky a zápichy, soustruží, frézuje, vrtá i gravíruje. Výhodou řezání vodním paprskem je rozhodně schopnost řezat téměř všechny druhy materiálů. Ať už

jsou kovové nebo plastové či keramické. Paprskem plasmy se mohou řezat pouze materiály vodivé, aby došlo ke vzniku oblouku. To je značná nevýhoda v oblasti využití plasmy. Z pohledu nákladovosti jsou stroje pro vodní paprsek levnější než stroje pro laserové řezání. Za další výraznou výhodu se považuje řezání materiálů o značné tloušťce, kterou LBM a PBM řezat nelze. (9, 10)



Obr. 7.8 Cenové porovnání systémů pro řezání paprsek vody, laseru a plasmy

Co se týká zastoupení na trhu těchto paprskových metod, tak jak řekl pan Kretík: „nejvíce je na trhu zastoupena plasma, poté laser a na třetím místě figuruje vodní paprsek“. Zároveň uvedl odhad cen technologií a dodal, že je to jeho osobní odhad. Je to celkem jednoduché, proč tomu tak je. Plasma, ač přesto, že z těchto metod řeže s nejmenší přesností, je její rychlost řezání velmi vysoká a pořizovací náklady jsou nejnižší ze všech. Proč je na druhém místě laser i přes jeho značně vysokou pořizovací cenu? Je velice přesný a mnohonásobně rychlejší než vodní paprsek a vysoce produktivní při řezání materiálů do 15 mm. Kdy se tedy rozhodnou firmy vybrat a koupit právě zařízení pro řezání vodním paprskem? Přesně v okamžiku, kdy společnost ví, že bude řezat materiály jako sklo, keramika, plasty, vrstvené materiály a materiály o vysoké tloušťce. Tam má uplatnění právě technologie vodního paprsku. (1, 17, 27, 55)

ZÁVĚR

Nekonvenční technologie vysokotlakého vodního paprsku se již několik desítek let neustále vyvíjí, zlepšuje, zdokonaluje a dostává na vysokou úroveň. Dalo by se říci, že termín technologie budoucnosti už pomalu ztrácí na svém významu, neboť se proměňuje na zcela běžnou a ve velké míře využívanou technologii v různých odvětvích průmyslu.

Z dlouhodobého trendu se dá očekávat nárůst společností, které se budou touto technologií zabývat a provozovat ji. Tato skutečnost platí v celosvětovém průmyslu, tedy i v průmyslu České republiky, protože WJM a AWJ pronikla do průmyslové oblasti, kde prokázala nejen své velké přednosti, ale i nenahraditelnou pozici. Proto dokáže konkurovat ostatním technologiím. V České republice se především materiály dělí. Postupně se tato technologie zařazuje do výrobních linek a technologických postupů.

V současnosti je jeden z nejhlavnějších trendů České republiky schopnost vlastní výroby komponentů, aniž by se musely dodávat ze zahraničí za vysokou pořizovací cenu. To se již částečně podařilo především při sestavování vysokotlakých čerpadel a souřadnicových stolů. Avšak stále některé komponenty, jako jsou například multiplikátory, se musí i nadále dovážet ze zahraničních států.

Tato práce se zabývá kromě charakteristiky a principu i technologickými možnostmi a provozní náročností vodního paprsku. Pozornost je zde zaměřena na současné vývojové trendy a teoreticky možný budoucí vývoj této progresivní technologie.

Na základě zpracování této práce lze doporučit i nadále vývoj a využití nekonvenční technologie vysokotlakého vodního paprsku v České republice. A to nejen v oblasti jejího využití, ale také ve výrobě vlastních komponentů české produkce zaměřené na vývoj multiplikátoru s využitím nových prvků nebo materiálů v sestavě, které by prodloužily životnost, výkonnost a přesnost technologie.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AB JET. *Vodní paprsek*. [online]. c2005-2007, [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.abjet.cz/>>.
2. AB JET. *Img_0002*. [online]. c2005-2007, [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <http://www.abjet.cz/photogallery/plasma_arc/cz/slides/img_0002.html>.
3. AQUA-dekor. *Vodní paprsek-průmyslová gravírka-laser*. [online]. [citováno 2. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.aqua-dekor.com/>>.
4. AQUAdem. *AQUArec PRO*. [online]. [citováno 2. března 2008]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/download/rec_cz.pdf>.
5. AQUAdem. *Technický list*. [online]. [citováno 2. března 2008]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/download/tech_list.pdf>.
6. AWAC spol. s r.o. *Řezání vodním paprskem, plasma, laser, obrábění, vodní paprsek*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=2&m2=1&m3=0&m4=0>>.
7. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1989. 122 s. 6523.
8. BENKO, B., FODREK, P., KOSEČEK, M., BIELAK, R. *Laserové technologie*, 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej Technickej Univerzity, 2000. 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
9. *Compare Waterjet cutting Machina with EDM laser plasma cutting*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://watercut.prohosting.com>>.
10. DVOŘÁKOVÁ, J., DVOŘÁK, J. *Trendy / Obrábění. MM – průmyslové spektrum*, MM 2007/4. s. 56. ISSN 1212-2472.
11. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. *Aplikace a výrobky*. [online]. [citováno 6. dubna 2008]. Dostupné z: <http://www.flowgmbh.com/pdf/prospekt_ap/Prospekt_A&P_CZ.pdf>.
12. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. *Waterjet Cutting, Abrasivejet Machining & Industrial Clearing*. [online]. [citováno 1. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.flowcorp.com/>>.
13. GRES s.r.o. *Řezání keramiky vodním paprskem*. [online]. c2006-2007, [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.gres.cz/rezani-keramiky-vodnim-paprskem.html>>.

14. HLAVÁČ, L., MÁDR, V., VALÍČEK, J. *Koroze kovů po povrchovém čištění kapalinovým paprskem*. VŠB-TU Ostrava, Institut fyziky. [online]. [citováno 28. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.vscht.cz/met/aki/konferen/2002/prispevky/hlavac.pdf>>.
15. HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, R. *Strojírenská technologie 2 – 1.díl*. Praha: Scientia spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7183-117-4.
16. HLUCHÝ, M., HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2 – 2.díl*. Praha: Scientia spol. s.r.o., pedagogické nakladatelství, 1999. ISBN 80-7183-245-6.
17. HUMÁR, A. *Technologie I – Technologie obrábění – 3.část*. [online]. [citováno 4.října 2007]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2005. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory/zakl_met_obr/C/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>.
18. HYDROCUT WATEJET. *Material Types*. [online]. [citováno 6. dubna 2008]. Dostupné z: <<http://www.hydrocutwaterjet.com/material.htm>>.
19. CHPS s.r.o. *Řezání vodním paprskem a laserem* [online]. [citováno 29. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.chps.cz/>>.
20. KARAFIÁTOVÁ, S., LANGER, I. *Nekonvenční technologie*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998. ISBN 80-7200-296-1.
21. *Kavitace*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <http://209.85.135.104/search?q=cache:8fFw3CzQpTEJ:khzs.fme.vutbr.cz/~sob/skripta-vodni_turbiny/VT_kap8.pdf+definice+kavitace&hl=cs&ct=clnk&cd=2&gl=cz>.
22. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Nekonvenční metody obrábění*. In *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0. Kapitola 11, s. 205-220.
23. KRAJNÝ, Zdenko. *Použití technologie vodného lúča v stavebníctve*. [online] [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.asb.sk/portal/2007/10/25/staviteľstvo/technologie/pouzitie-technologie-vodneho-luca-v-stavebnictve.html>>.
24. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi – WJM*. Bratislava: 1998. ISBN 80-8057-091-4.

25. *Laserové technologie*. MediCom a.s. 6 s.
26. LICOM. *Laser, Plasma a Vodní paprsek*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.licom.cz/produkty/alphacam-metal/laser-plasma-a-vodni-paprsek.html>>.
27. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. Košice: Technická univerzita Košice, Strojnícká fakulta. Edícia vedeckej a odborném literatúry. Viena, vydavateľstvo a tlačiarne, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
28. MÁDL, J., BUMBÁLEK, B., JERSÁK, J., HOLEŠOVSKÝ, F. Teorie a technologie obrábění. In *Terminologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Universita J.E. Turkyňe, ÚTŘV. 2004. 208 s. ISBN 80-7044-616-1.
29. MEDICOM a.s. *Průmyslové lasery*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove>>.
30. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
31. Oberg E., Jones F.D., Horton H.L., Ryffel H.H. *Machinery's hand-book*. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. ISBN 0-8311-2595-0.
32. OMAX. *Accessories*. [online]. [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.omax.com/images/102img.jpg>>.
33. OMAX. *Typoval users*. [online]. [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.omax.com/users.php>>.
34. PEPS CAD/CAM SYSTÉM. *Řezání laserem a vodním paprskem*. [online]. c2006, [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <http://peps.cz/rezani_laserem_a_vodnim_paprskem/>.
35. PTV. *Dávkovač abraziva*. [online]. c2006, [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/Davkovac_abraziva/index.html>.
36. PTV. *Free beam*. [online]. c2006, [citováno 21. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/xyc_stoly/WJxyy_1Z_EKO/-content-ptv-cz-produkty-xyc_stoly-Free_Beam_folder1-section_Content.html>.
37. PTV. *Odkalovací zařízení*. [online]. c2006, [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/odkalovani/index.html>>.
38. PTV. *Produkty: Čerpadla*. [online]. c2006, [citováno 1. března 2008].

- Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/cerpadla/PTV_75_60_Compact/index.html>.
39. PTV. *Produkty: Náhradní díly – Sada VT těsnění*. [online]. c2006, [citováno 1. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/nahradni_dily/Sada_VT_tesneni/index.html>.
40. PTV. *Produkty: Náhradní díly – Vodní filtry*. [online]. c2006, [citováno 1. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/nahradni_dily/Vodni_filtry/index.html>.
41. PTV. *Produkty: X-Y CNC stoly*. [online]. c2006, [citováno 3. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/xyc_stoly/WJxyy_nZ_D/index.html>.
42. PTV. *Promo*. [CD-ROM]. [citováno 5. dubna 2008].
43. PTV. *Recyklační jednotka*. [online]. c2006, [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/recyklacni_jednotka/index.html>.
44. PTV. *Systém progressJET*. [online]. c2006, [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/reference/index.html>>.
45. PTV. *Výškový senzor Vs1*. [online]. c2006, [citováno 20. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/Vyskovy_senzor/index.html>.
46. PTV. *Tlaková doprava abrasiva*. [online]. c2006, [20. března 2008]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/tlakovy_dopravni_system/index.html>.
47. Rheniumdiborid tvrdší než diamant. *Technický týdeník*. 30.4.2008. TT č.9/2007. Praha: Business Media CZ, 2007. ISSN 0040-1064.
48. RYCHLÝ TOM. *Řezací hlava (detail)*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://www.rychlytom.cz/img/galeriecn/5.jpg>>.
49. RYCHLÝ TOM. *Řezání vodním paprskem*. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <http://rychlytom.cz/vodni_paprsek.html>.
50. ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 2.díl*. 1. vyd. Praha: Scientia spol. s.r.o., 2001. ISBN 80-7183-227-8.
51. SPR. [online]. [citováno 14. února 2008]. Dostupné z: <<http://konstrukce.webz.cz/sups/7too1.html>>.

52. SYNOVA. *Cutting Injection nozzles with SYNOVA laser MicroJet*. [online]. [citováno 13. března 2008]. Dostupné z: <http://www.synova.ch/pdf/125_injection_nozzle.pdf>.
53. SYNOVA. *Laser MicroJet technology brochure*. [online]. [citováno 13. března 2008]. Dostupné z: <http://www.synova.ch/english/laser-cutting-machine/documents/Laser_microJet_technology_brochure.pdf>.
54. *Systém progressJET*. Praha: PTV, spol. s r.o. 1 s.
55. ŠESTÁK, J., STRNAD, Z., TŘÍSKA, A., kolektiv. *Speciální technologie a materiály*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0148-4.
56. TALPA-RPF. *Řezání vodním paprskem*. [online]. c2005, [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.talparpf.cz/rezani/>>.
57. *Tlaková doprava abrasiva*. PTV, spol. s r.o. 1 s.
58. TRUMPF. *TRUMPF_02_1024x768.jpg*. [online]. c2008, [citováno 13. března 2008]. Dostupné z: <http://www.trumpf.com/1.img-cust/TRUMPF_02_1024x768.jpg>.
59. TRUMPF. *TRUMPF_03_1024x768.jpg*. [online]. c2008, [citováno 13. března 2008]. Dostupné z: <http://www.trumpf.com/1.img-cust/TRUMPF_03_1024x768.jpg>.
60. TRUMPF. *TRUMPF_2_1_big.jpg*. [online]. c2008, [citováno 13. února 2008]. Dostupné z: http://www.cz.trumpf.com/167.img-cust/2_1_big.jpg
61. *Vysokotlaký vodní paprsek*. PTV, spol. r.o. 6 s.
62. *Výškový senzor Vs1*. Praha: PTV, spol. s r.o. 1 s.
63. WALDEMAR, Stýblo. *Vysokotlaký vodní paprsek – technologie dělení materiálů i pro stavebnictví*. [online]. c2007, [citováno 3. března 2008]. Dostupné z: <<http://si.vega.cz/clanky/vysokotlaky-vodni-paprsek-technologie-deleni-mate/>>.
64. *Water jet cutting*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <http://www.spszr.cz/projekty/italie2000/projekty/water_jet_cutting_CZEN.html>.
65. *Water Jet Cutter and Abrasive Waterjet Machine Manufacturer -- waterjet cutting machine and water*. [online]. [citováno 6. března 2008]. Dostupné z: <<http://www.iwmwaterjet.com/more-about-water-jet.html>>.
66. WINGFIELD ENGINEERING COMPANY. *Introduction to waterjet machining*. [online]. [citováno 6. dubna 2008]. Dostupné z: <<http://www.wingfield.net/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

zkratka	jednotka	popis zkratky
$A_{1,2}$	[-]	Měřicí místa
Al_2O_3	[-]	Oxid hlinitý (korund)
AWJ	[-]	Obrábění abrazivním vodním paprskem
$B_{1,2}$	[-]	Měřicí místa
$C_{1,2}$	[-]	Měřicí místa
CaO	[-]	Oxid vápenatý
CM	[-]	Chemické obrábění
CNC	[-]	Číslicově řízený systém
EBM	[-]	Obrábění paprskem elektronů
ECM	[-]	Elektrochemické obrábění
EDM	[-]	Elektroerozivní obrábění
FeO	[-]	Oxid železnatý
Fe_2O_3	[-]	Oxid železitý
$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	[-]	Granát Barton
KNB	[-]	Kubický nitrid bóru
LBM	[-]	Obrábění paprskem laseru
Mg_2SiO_4	[-]	Olivín 24
MnO	[-]	Oxid manganatý
MgO	[-]	Oxid hořečnatý
PBM	[-]	Obrábění paprskem plazmy
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka
S_1	[mm^2]	Plocha vystavená působení tlakem p_1
S_2	[mm^2]	Plocha vystavená působení tlakem p_2
SiO_2	[-]	Oxid křemičitý
SK	[-]	Slinutý karbid
USM	[-]	Ultrazvukové obrábění
VKP	[-]	Vysokotlaký kapalinový paprsek
WJM	[-]	Obrábění paprskem vody
X	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
X'	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
Y	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
Y'	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
Z	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
Z'	[mm]	Měřená vzdálenost vzorku
d	[mm]	Malý průměr hřídele
d_1	[mm]	Velký průměr hřídele
i	[-]	Koeficient zvýšení tlaku
p	[MPa]	Tlak
p_1	[MPa]	Vstupní tlak
p_2	[MPa]	Výstupní tlak
v	[$m.s^{-1}$]	Rychlost
η_m	[-]	Mechanická účinnost
ρ	[$kg.m^{-3}$]	Hustota kapaliny