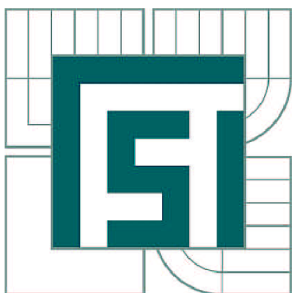


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ABRAZIVNÍ VODNÍ PAPERSEK

ABRASIVE WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LIBOR KOPEČNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Libor Kopečný

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Abrazivní vodní paprsek

v anglickém jazyce:

Abrasive Water Jet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor nekonvenční metody vodního paprsku z hlediska přesnosti obrábění, jakosti povrchu a možností jejího ovlivnění.

Cíle diplomové práce:

Úvod

Rozbor technologických možností vodního paprsku.

Rozbor možných způsobů řízení a zadávání technologických dat.

Vliv technologických parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění.

Vývojové směry koncepce technologie vodního paprsku.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Závěr

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., Delenie kovových materiálů okružnou pilou, vodním proudem a plazmovým oblúkom, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6
- 5 OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 11.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na vysvětlení problematiky nekonvenční technologie obrábění abrazivním vodním paprskem. Úvodní kapitoly pojednávají a rozebírají jednotlivé techniky a metody dělení vodním paprskem. Poté se následující text věnuje detailnímu popisu samotného stroje a to z důvodu důkladného pochopení principu této technologie. Třetí kapitola je zaměřena na kvalitu výsledného povrchu a možností jejího ovlivnění technologickými parametry. S touto částí souvisí i praktická část diplomové práce, ve které se porovnávaly dosažené povrchy různých materiálů zhotovené různými reznými parametry. Další část nastiňuje vývojové směry této technologie. Technicko-ekonomické zhodnocení je poslední část před samotným závěrem.

Klíčová slova

Hydroabrazivní dělení, vodní paprsek, nekonvenční technologie, kvalita povrchu, ekologie, ekonomika.

ABSTRACT

This dissertation thesis is focused on explaining the broad issue of the non-conventional machining by an abrasive water jet. Introductory chapters deal with various techniques and methods of water-jet cutting and analyze them. Then the following text provides us with a detailed description of the machine itself so that people can understand the way how this technology works. The third chapter is focused on the quality of the resulting surface and the possibility of affecting it by technological parameters. This part is connected with the practical part of my thesis, in which the resultant surfaces of various materials made by different cutting parameters were compared. Subsequent section outlines the development of this technology. The last chapter contains technical and economic evaluation.

Key words

Abrasive jet dividing, water jet, unconventional technology, surface quality, ecology, economy.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPEČNÝ, Libor. *Abrazivní vodní paprsek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68s., 4 přílohy. Vedoucí práce Ing. Karel Osička Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Abrasivní vodní paprsek vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2011

.....
Libor Kopečný

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Dušanu Lukšovi za kladný přístup a podporu při realizaci experimentu ve firmě AWAC spol. s.r.o. se sídlem v Brně. Děkuji panu Karlu Plevovi z firmy Flow Eastern Europe, s.r.o. za poskytnutí mnoha cenných informací. Děkuji i panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za ochotu a spolupráci při měření. Také děkuji svým rodičům za velkou podporu při celém studiu na vysoké škole.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	9
1. ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ VODNÍHO PAPRSKU	10
1.1 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění	10
1.2 Kapalínový paprsek – základní pojmy	13
1.3 Podrobný popis technologií vodního paprsku	16
1.3.1 Metoda WJM – Water Jet Machining	16
1.3.2 Metoda AWJM – Abrasive Water Jet Machining	17
1.3.3 Metoda ASJ – Abrasive Slurry Water Jet	17
1.3.4 Metoda IJM – Ice Jet Machining	18
1.3.5 Metoda DWJ – Dynamic Water Jet	19
1.4 Soustružení vodním paprskem	21
1.5 Frézování vodním paprskem	22
1.6 Gravírování	22
2. ROZBOR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH DAT	23
2.1 Vysokotlaká čerpadla	23
2.2 Řezné hlavice	26
2.3 Zásobník abraziva	29
2.4 Zařízení na úpravu vody	29
2.4.1 Filtrace	30
2.4.2 Aditiva	30
2.5 Rozvod kapaliny – vysokotlaké potrubí	30
2.6 Záchytná nádrž (tlumící)	30
2.7 Řezací stoly	30
2.8 Software pro zadávání vstupních dat	32
2.7.1 Příklady softwarů	32
3. VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA JAKOST POVRCHU A PŘESNOST OBRÁBĚNÍ	33
3.1 Kvalita a přesnost povrchu	33
3.2 Vliv abraziva na kvalitu povrchu	36
3.3 Řezání tvarových dílů	39
3.4 Vliv rychlosti řezu na výslednou kvalitu povrchu - (EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ)	40
4. VÝVOJOVÉ SMĚRY KONCEPCE TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU	52
4.1 Technologie Dynamic Waterjet	52
4.2 Technologie Dynamic Waterjet XD	53
4.3 Hyper tlak	54
4.4 3D Řezání robotickou rukou	56
4.5 Příslušenství	56
4.5.1 Řezací hlava PASER ECL Plus	57
4.5.2 Laserové pravítko	57
4.5.3 Výškové čidlo	58

4.5.4 Dynamické řízení vzdálenosti stand - off	59
4.5.5 Kolizní senzor	59
4.5.6 Vrtací pomůcka UltraPierce	59
4.5.7 Podkladové rošty	59
4.5.8 Abrazivní odkalovací systém	60
5. TECHNICKO EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ	61
ZÁVĚR	63
Seznam použitých zdrojů	64
Seznam použitých zkratk a symbolů	66
Seznam příloh	68

ÚVOD

Položme si dvě otázky: „Lze řezat vodou? Je možné zhotovit takový nástroj k řezání (ne tuhý), aby byl stále ostrý a netupil se používáním?“ Hned si odpovíme, že to reálné je a dnes i hojně používané. Kapalinový paprsek s vhodně zvolenými parametry (výstupní rychlost, tlak paprsku atd.) představuje velice progresivní nástroj, který se nikdy netupí při používání.

Sílu vody lze běžně pozorovat v potocích a řekách postupným vymíláním a vybrušováním koryt těchto toků. Písek, drobné úlomky kamenů, samotné kameny a nejrůznější pevné částice jsou posouvány a unášeny proudem vody, které následně narážejí a rozrušují statické části v tocích. V přírodě se toto počínání označuje jako EROZE a probíhá neustále již miliony let. První známé použití termínu eroze použil lékař Robert Copland v textech „The Questonary of Cyrurygens“ z roku 1541 pro označení ohnisek rozvinutých v hrdle. Mimo lékařskou vědu byl tento výraz použit od roku 1774 v knize „Natural History“ od Olivera Goldsmitha, který popisoval erozi země vodou [4]. Tento neřízený a nezastavitelný abrazivní děj probíhá v přírodě nejen ve vodním světě, ale i na souši působením síly větru spojené s drobnými volnými částicemi. Abrazivní obrušování je velmi patrné zejména v oblastech Egypta, kde nám zanechali původní obyvatelé z dávných dob starověku obrovské sochy, pyramidy a památky. I tyto mohutné stavby a památky podléhají obrovskému namáhání a postupné degradaci síly větru spojené s pískem z pouště.

Člověk nezahálel a začal této síly využívat i ve svůj prospěch. Z počátku bylo využíváno proudu vody pro dobývání nerostných surovin v těžebním průmyslu. Dále pro moderní a efektivní čištění se s oblibou používají vysokotlaké čistící zařízení známé pod označením WAP. I tyto zařízení pracují s vhodně usměrněným vodním sloupcem, ovšem s nižšími tlaky kapaliny, než které jsou používány pro dělení materiálů. V neposlední řadě následovalo uplatnění i ve zmíněném dělení materiálů. A právě tento způsob dělení materiálů vysokotlakým vodním sloupcem bude detailně popisován a rozebírán v následujícím textu.

Tak jako i v jiných průmyslových oblastech byl vývoj a pokrok metody dělení materiálu vodním paprskem nejvíce razantní s využitím vojenského a kosmického programu a to především na přelomu sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století. Tomuto oboru se věnovala zejména americká firma FLOW INTERNATIONAL, které můžeme vděčit za prvotní nejvýraznější pokroky této technologie dělení materiálů. V nynější době se tato technologie rozšířila do nejrůznějších průmyslových odvětví. V potravinářském průmyslu slouží pro dělení širokého spektra potravin, ve strojírenství pro dělení rozmanitých technických materiálů. Ve stavebnictví si tato metoda našla taktéž své opodstatněné použití.

1. ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ VODNÍHO PAPERU

Nynější požadavky na kvalitu, výkonnost, ekonomiku a především ekologii průmyslové výroby vykazují nemalé nároky. Proto je nutné a velice důležité stále zdokonalovat klasickou konvenční výrobu a také zavádět i nové moderní nekonvenční technologie.

Nové materiály, které jsou neustále vyvíjeny a zdokonalovány si o nové technologie jejich zpracování doslova říkají. Mechanické vlastnosti (např. pevnost, tvrdost, atd.) některých materiálů (např. titan, nikl, atd.) a jejich slitiny jsou na takové úrovni, že je jejich zpracování velice omezeno. Nejen proto jsou vyvíjeny nové technologie. Dalším důvodem pro zavádění tzv. nekonvenčních technologií je ekonomické hledisko. Tam, kde se u klasických konvenčních metod dosahuje malé produktivity, často nastupuje nekonvenční technologie, která tento nedostatek odstraňuje.

Technologie vodního paprsku se rovněž řadí mezi nekonvenční metody obrábění a to díky specifickým vlastnostem a možnostem této technologie.

Následující kapitola stručně uvádí základní rozdělení, popis, výhody a nevýhody některých vybraných nekonvenčních technologií obrábění. Poté se text úzce zaměřuje na nekonvenční technologii obrábění vodním paprskem.

1.1 Rozdělení nekonvenčních technologií obrábění

Nekonvenční technologie dělení materiálů jsou založeny na fyzikálním či chemickém principu obrábění materiálu. Nejzákladnější rozdělení je uvedeno v následujícím grafu:



Obr. 1.1 Schematické rozdělení nekonvenčních metod obrábění [1]

Mezi **mechanické** metody lze řadit např. - obrábění ultrazvukem (USM)
 - vodní paprsek (WJM)
 - abrazivní vodní paprsek (AWJ)

Mezi **chemické** metody spadá - např. chemické leptání

Elektro-chemické metody využívají principů elektrolýzy

Mezi **Elektro-tepelné** metody řadíme - obrábění laserem (LBM)
 - obrábění plazmou (PBM)
 - elektroerozivní obrábění (EDM)
 - obrábění elektronovým paprskem (EBM)

V tabulce 1.11 jsou shrnuty výhody a nevýhody čtyř základních nejběžnějších nekonvenčních metod dělení materiálů používaných v praxi.

Tab. 1.11 Shrnutí výhod a nevýhod vybraných způsobů dělení materiálů [1]

	<u>Výhody</u>	<u>Nevýhody</u>
Dělení plazmou PBM	<ul style="list-style-type: none"> - nízké investiční a provozní náklady - vysoká dělicí rychlost - tvrdost nemá vliv na dělicí rychlost - lze použít pro ruční řezání 	<ul style="list-style-type: none"> - lze dělit převážně elektricky vodivé materiály - tepelné ovlivnění řezu (0,25-1,25 mm) - menší jakost dělené stěny - vznik toxických výparů - vysoká akustická emise (80 - 100 dB)
Dělení laserem LBM	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká přesnost dílů u slabých a středních tloušťek materiálů - tvorba velmi malých otvorů, tvarů s ostrými úhly - tvrdost nemá vliv na dělicí rychlost - poměrně malé přivedené teplo - úzká dělicí spára (0,1 až 1 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - vysoké investiční a provozní náklady - snížení stability procesu u dělení lesknoucích se povrchů materiálu - nízká energetická účinnost (asi 10%) - vznik toxických výparů
Elektro – erozivní dělení	<ul style="list-style-type: none"> - vysoká přesnost dílů - vysoká jakost dělené stěny - úzká dělicí spára (0,5 až 1 mm) - tvrdost nemá vliv na dělicí rychlost 	<ul style="list-style-type: none"> - vysoké investiční a provozní náklady - lze dělit jen elektricky vodivé materiály - tepelné ovlivnění dělené stěny - změna struktury v povrchové vrstvě - vznik vnitřního tahového napětí - nelze vytvářet otvory
Dělení abrazivním vodním paprskem AWJ	<ul style="list-style-type: none"> - lze dělit prakticky všechny technické materiály - studený řez (nedochází k tepelnému ovlivnění děleného materiálu a tím ani ke změně struktury) - nevznikají škodlivé emise - nedochází k chemickému působení na dělený materiál - vysoká přesnost dílů - minimální silové působení paprsku na dělený materiál (nedochází ke vzniku mikrotrhlin) - lze obrábět sendvičové a kompozitní materiály s velmi odlišnými vlastnostmi - relativně vysoká energetická účinnost (cca 50%) - úzká dělicí spára je vždy bez otřepů (0,8 až 2 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> - vysoké investiční a provozní náklady - relativně nízká rychlost posuvu řezné hlavy u "tvrdých" materiálů - velmi vysoká hlučnost (více jak 100dB)

V následující tabulce (tab. 1.12) jsou u vybraných metod dělení materiálu popsány základní parametry, jaké je možné dosáhnout při použití daných metod a omezující podmínky těchto způsobů dělení materiálu.

Tab. 1.12 Srovnání vybraných parametrů při nekonvenčních způsobech řezání materiálů [2]

Metoda		Elektrojiskrové řezání	Řezání laserem	Plazmové řezání	Řezání elektronovým paprskem	Řezání vodním paprskem
Hodnotící faktor	Jednotky	EDM	LBM	PBM	EBM	WJM, AWJM
max. tloušťka materiálu	[mm]	0,02 - 400	až 50 hospodárné okolo 7	i přes 100 slitiny Al a Cu až 150	0,5 až 1 (kovy 2 až 3)	0,1 až 200 (dělicí řez)
šířka řezu	[mm]	ø drátu + 0,02 až 0,05	0,02 až 1	až 7 mm nahoře 4,5 mm dole	0,01	0,8 až 1,5 0,3 tenké mat.
šířka paprsku	[mm]	0,03 až 0,35				1,2 až 2,5 AWJM
sklon řezu	[°]	± 45°	neomezeně			
rychlost posuvu	[mm·min ⁻¹]	8 až 300 mm ² ·min ⁻¹	až 8000	50 až 6000	až 1200	15 až 1500
přesnost rozměrů	[mm]	poloha drátu ± 1°C ± 1μm		nepatří k přesným metodám		±0,1 až ±1
drsnost povrchu Ra	[μm]	běžně 0,7-1,3	3,6 až 12			2,5 až 12
tepelné ovlivnění materiálu	[mm]	0,4 až 1	0,05 až 0,2	0,25 až 1,25		není
kolmost řezu	[°]	-		3° - levá 15° - pravá		0,3° až 6,4°
poznámka		-	účinnost až 10%	nepatří k přesným metodám	omezené použití	účinnost až 80%

Každá z technologií má své pozitivum i negativum. Dle potřeb kladených na jednotlivé specifické vlastnosti je důležité dobře volit metodu provedení.

1.2 Kapalinový paprsek – základní pojmy

Princip dělení materiálu tímto způsobem spočívá v tom, že velmi úzký kapalinový paprsek je urychlen na velmi vysokou rychlost pod obrovským tlakem a tento je následně schopen odebírat materiál. Do vodního paprsku je často přiváděna speciální směs „písků“ a to z důvodu zintenzivnění abrazivní účinnosti vodního paprsku.

Variabilita a možnosti obrábění vysokorychlostním vodním paprskem je obrovská. Velice široká škála materiálů, které je možné dělit je velké pozitivum této technologie. Pro příklad lze dělit: papír, dřevo, nejrůznější plasty, sklo (nekalené), kompozity, kovy, nekovy, slitiny, tvrdokovy a nejen tyto. Univerzálnost, ekonomičnost a v neposlední řadě i ekologičnost jsou pozitiva, kterými vodní paprsek rozhodně disponuje. Pro dělení se využívá síla přírodní kapaliny (vody) a proto je tato technologie z ekologického hlediska mimořádně šetrná k životnímu prostředí.

Nemalou výhodou jsou také poměrně nízké hodnoty řezných sil. V procesu řezání se pohybují pod hranicí 500 N, což je ve srovnání s klasickými metodami dělení materiálů zanedbatelná hodnota.[29]

Na obr. 1.20 je schematicky znázorněno rozdělení kapalinových paprsků a tučně vyznačena cesta nejvíce používané metody.



Obr. 1.20 Rozdělení kapalinových paprsků [1]

V zásadě se používají dva základní typy vodních paprsků a to buď bez abrazivních částic (WJM), nebo s abrazivem (AWJ). Pro řezání měkkých materiálů se upřednostňuje metoda bez abraziva s pracovním tlakem vody až do 700 MPa. Pro tvrdší materiály se do vodního paprsku přivádí abrazivo a pracovní tlak vody se standardně pohybuje v rozmezí od 60 do 400 MPa dle materiálu a tloušťky materiálu. Jako abrazivum se nejčastěji používá mletý granát, oxid hlinitý, olivín nebo křemičitý písek. Rychlost proudění kapaliny se

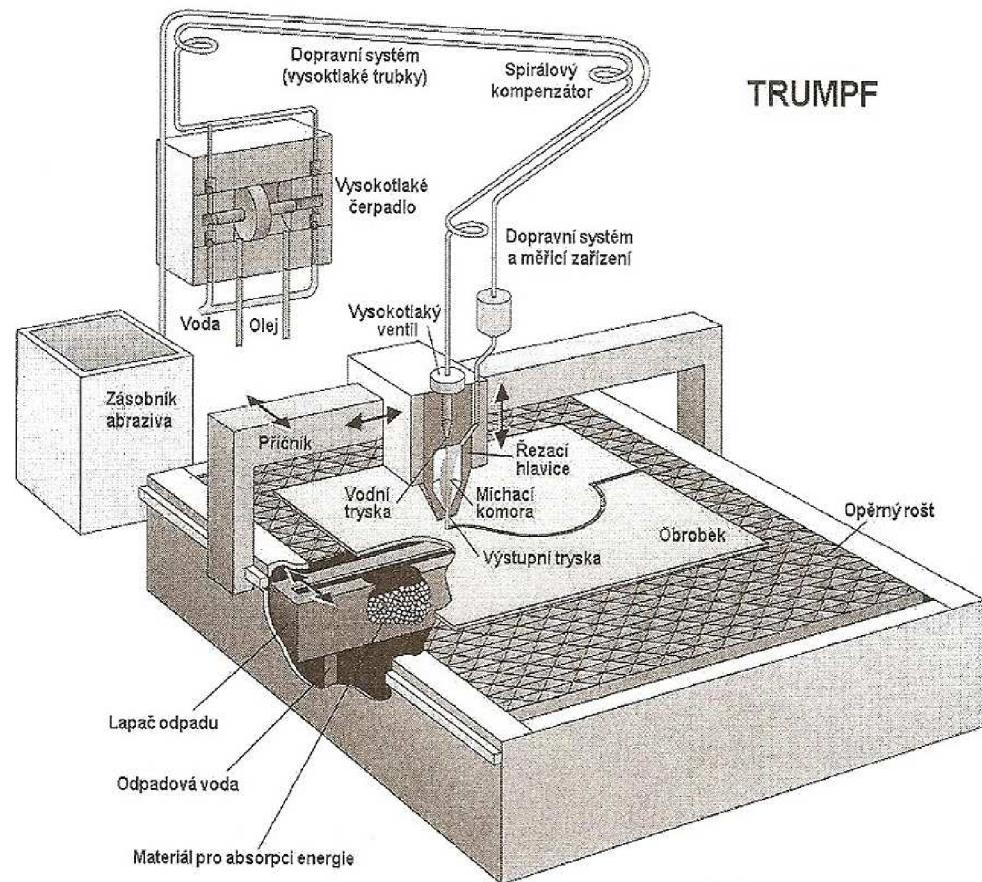
pohybuje v rozmezí od 600 do 900 m/s (dle nastavených parametrů). Energetická účinnost u těchto metod se pohybuje okolo 80%, což je velmi vysoká hodnota oproti např. laseru, u kterého se účinnost pohybuje pouze okolo 10%. Standardní přesnost výsledného řezu je u tenkých obrobků (tj. do tloušťky asi 10 mm) $\pm 0,1$ mm. U větších hodnot tloušťek materiálů se přesnost pohybuje okolo $\pm 0,2$ mm na metr řezu a v rádiusových přechodech až ± 1 mm (dle vyspělosti technologie). Kvalita řezu je ovlivněna především těmito parametry: [1, 2]

- výtokovým průměrem trysky,
- tlakem vody,
- rychlostí pohybu paprsku,
- rychlostí proudění,
- vzdáleností ústí trysky od povrchu obrobku,
- úhlem sklonu paprsku θ ,
- druhem abraziva. [2]

Zařízení, na kterém se realizuje řezání vodním paprskem, je poměrně složité a obsahuje několik základních částí. Mezi tyto spadají zejména vysokotlaká čerpadla – multiplikátory („násobiče“). Jsou to vysoce výkonná speciální zařízení pro vytváření tlaku pohybujícího se v rozmezí 300 - 700 MPa. Z těchto čerpadel poté putuje voda vysokotlakým vedením až k řezací hlavici, kde je následně formován výsledný vodní paprsek. Utváření výsledného rezného „nástroje“ se děje pomocí systému trysek. Trysky jsou jedny z nejdůležitějších součástí systému a to kvůli tomu, že paprsek vzniklý v trysce podstatně ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu obrobku. Vystupující vodní paprsek nejčastěji nabývá hodnot $\varnothing d = 0,1-0,15$ mm a to u metody bez přidaného abraziva (WJM). S abrazivem se potom průměr paprsku zvyšuje na hodnoty $\varnothing d = 1,2-2,5$ mm. Míchání abraziva s vodním paprskem probíhá v míchací komoře, jak je naznačeno na obr. 1.21. Řezná hlavice je pohyblivě umístěna na hlavním rámu stroje. Obráběný materiál je uložen na opěrném roštu, pod kterým se nachází lapač odpadu a prostor pro odvod vody. Lapač odpadu se pohybuje lineárně s příčnickem, aby byl zajištěn správný odvod odpadu. Provedení těchto řezacích strojů se v dnešní počítačové době provádí výhradně s využitím NC, nebo CNC technologie a řízení je zprostředkováno pomocí speciálního softwaru (viz dále).

Samotný stroj, na kterém je realizován proces dělení materiálů se nachází na odlišném místě, než jsou umístěny vysokotlaká čerpadla (multiplikátory), které jsou samotným srdcem technologie. Toto rozdílné umístění je zavedeno především z toho důvodu, že při případné nehodě vysokotlakých zařízení by mohlo dojít ke zranění obsluhy zařízení.

Reálný řezací stroj od firmy Flow je zobrazen na obr. 1.22.



Obr. 1.21 Schéma řezacího zařízení [2]



Obr. 1.22 Ukázka reálného řezacího stroje [5]

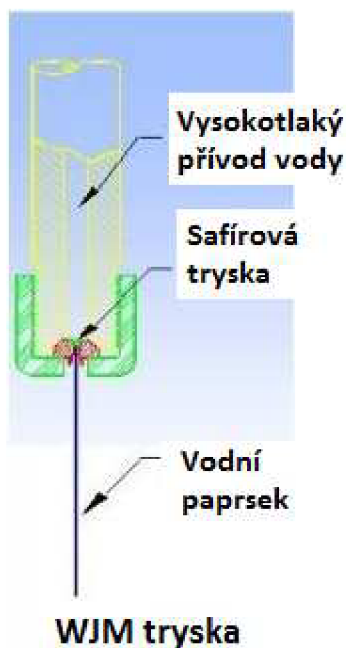
1.3 Podrobný popis technologií vodního paprsku

Možnosti vodního paprsku jsou nemalé a uplatnění této technologie je nejen pro dělení materiálů, ale implementuje se i do soustružení, frézování, řezání závitů nebo vrtání. Frézování vodním paprskem se zaměřuje hlavně na výrobu nástrojů pro tváření.[8]

I přesto, že je vodního paprsku využito i v jiných technologiích, než je dělení materiálů, budou následující kapitoly nejprve rozebírat jednotlivé metody dělení materiálů a to z důvodu nejvýraznějšího použití této technologie právě pro tyto účely. Další technologie budou popsány následně.

1.3.1 Metoda WJM – Water Jet Machining

Jedná se o základní metodu řezání vodním paprskem. Do vodního paprsku se nepřivádí žádné abrazivum. Pracovní tlak vody nabývá hodnot až do 700 MPa a rychlost proudění se pohybuje v rozmezí od 600 - 900 m · s⁻¹. Tryska má průměr od 0,1 do 0,25 mm. Šířka samotného paprsku nabývá hodnot okolo 0,1 – 1,5 mm. Vzdálenost mezi tryskou a děleným materiálem se pohybuje od 2,5 až do 6,35 mm. Tento paprsek je schopný dělit nejrůznější méně tvrdé materiály jako jsou například dřevo, plasty, různé pěnové materiály, gumy, nebo i potraviny. Tloušťka dělených materiálů může být až do 100 mm. Obr. 1.31 ukazuje postupný průchod kapaliny tryskou. Za zmínku stojí vodní safírová tryska, která formuje konečný tvar vystupujícího paprsku. Tento materiál je použit z toho důvodu, aby tryska co nejlépe odolávala opotřebení vodním paprskem a tím i zaručila co největší životnost. Další materiály používané pro výrobu trysek jsou tvrdokovy, diamant nebo KNB (kubický nitrid boru) aj.[2]



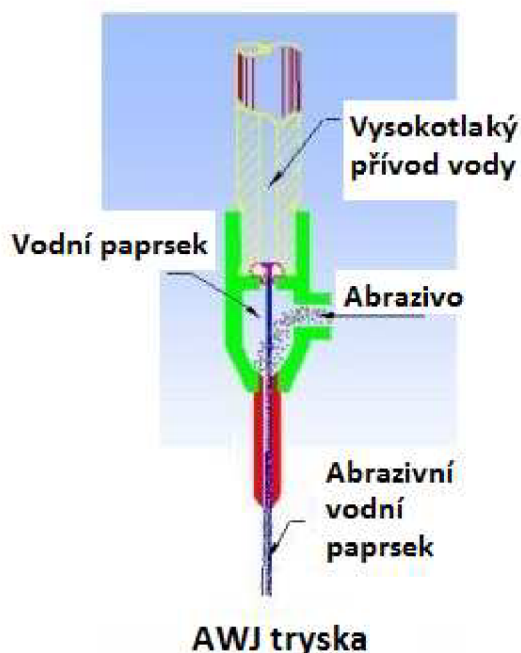
Obr. 1.31 WJM tryska [6]

1.3.2 Metoda AWJM – Abrasive Water Jet Machining

U této metody je přiváděno do vodního paprsku pomocné abrazivum, které má za úkol zajistit větší a efektivnější rozrušování a úběr materiálu obrobku. Brusivo je umístěno v zásobníku, ze kterého se dále přivádí přesně dávkované množství do směšovací komory, kde dochází vlivem vysoké rychlosti vodního paprsku ke strhávání přivedeného abraziva, jak je názorně naznačeno na obr. 1.32. Jako brusivo se používá například granát, oxid hlinitý, olivín, křemičitý písek aj.

Průměr trysky je oproti WJM technologii větší. Nejčastěji jsou používány průměry trysek od 0,8 do 2 mm. I zde je použita safírová vodní tryska, která dobře odolává opotřebení vodním paprskem. Šířka paprsku se pohybuje od 1,2 do 2 mm. Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem nabývá hodnot od 10 do 25 mm. Rychlost proudění kapaliny je obdobná jako u předchozí metody 600 až 900 m·s⁻¹. [2]

Oproti metodě řezání bez abraziva je obrovskou předností tohoto způsobu dělit především tvrdé materiály jako jsou například kovy, keramika, nejrůznější kompozity aj. a to od tenkých materiálů až po velmi široké materiály do tloušťky až 250 mm u standardních strojů. [5]



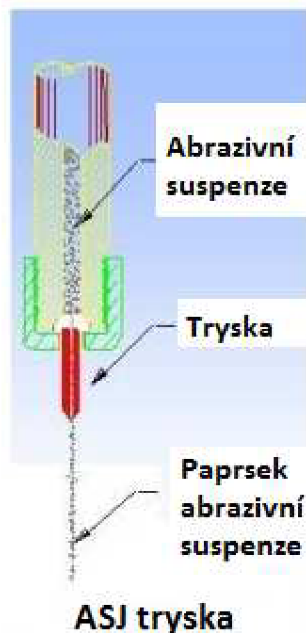
Obr. 1.32 AWJ tryska [6]

1.3.3 Metoda ASJ – Abrasive Slurry Water Jet

Jedná se o systém s přímým vstřikováním brusiva. Čili abrazivo je součástí suspenze již před přívodem do trysky. V tlakové nádobě se nachází stlačená suspenze, která je smíšená s vodou. Z této nádoby odchází směs pod tlakem do 100 MPa přímo do dýzy. Průtok suspenze činí okolo 20 kg·min⁻¹. U přesného řezání se průtok snižuje na 1 až 3 kg·min⁻¹. [8]

Vyšší proudová hustota narážejících částic na povrch děleného materiálu než u metody AWJ zaručuje vyšší účinnost řezného procesu. Metoda ASJ umožňuje použít užšího paprsku a dýzu menší konstrukce.[8]

Obrázek 1.33 názorně popisuje průběh abrazivní suspenze tryskou.



Obr. 1.33 ASJ tryska [6]

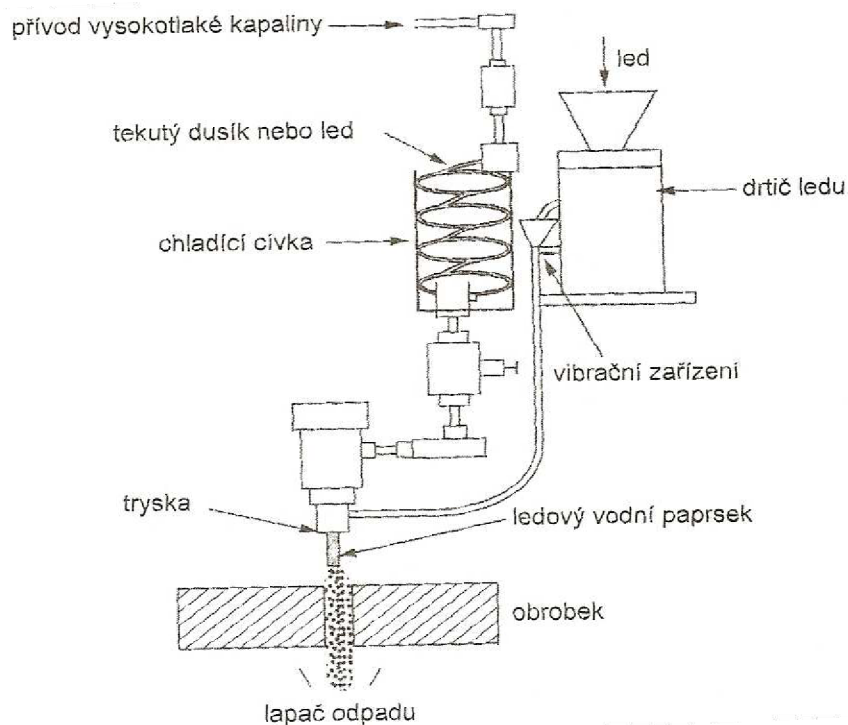
1.3.4 Metoda IJM – Ice Jet Machining

Jedná se o metodu pracující s abrazivem ve formě ledových krystalů. Tato technologie byla vyvinuta v Institute of Technology New Jersey v USA. Účinnost samotného procesu je oproti AWJ nižší a to kvůli menší tvrdosti ledových krystalů než je tvrdost klasické abrazivní směsi používané u AWJ. Tento nedostatek je ovšem vykompenzován jinými pozitivy, do kterých se řadí například [8]:

- snížení nákladů na brusivo,
- velice vysoké ekologické hledisko (nevzniká žádný odpad),
- atd.[8]

Díky těmto přednostem je technologie IJM předurčena pro použití především pro potravinářský průmysl.[8]

Na obr. 1.34 je znázorněn schematický popis technologie obrábění ledovým vodním paprskem.

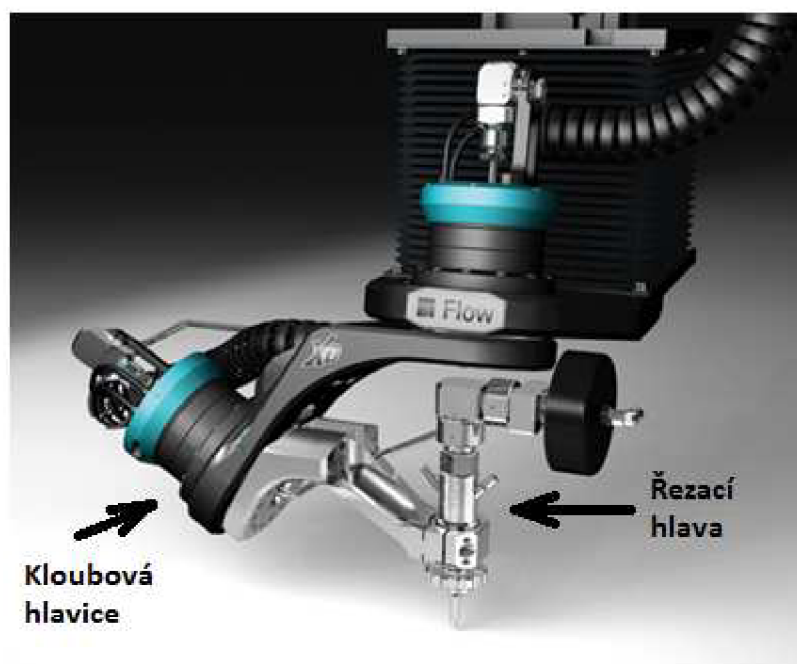


Obr 1.34 Schéma ledového vodního paprsku

1.3.5 Metoda DWJ – Dynamic Water Jet

DWJ způsob dělení materiálů se řadí mezi technologicky vyspělejší metody oproti doposud zmiňovaným technologiím. Dosahovaná přesnost i rychlost a s tím spojená i produktivita při dělení materiálů touto metodou je na vyšší úrovni než u předchozích.

O řízení pohybu řezací hlavičky se stará speciální matematický model, jehož úkolem je zaručit co nejpřesnější požadovaný rozměr. Samotná řezací hlavička se nachází na kloubové hlavičce (viz obr 1.35). Kloub zaručuje pohyb (náklon) řezné hlavy ve všech možných směrech. Možnost naklánění řezné hlavičky napomáhá ke zkvalitnění výsledné geometrie a také přispívá ke zlepšení dosaženého povrchu při opracování obrobku.

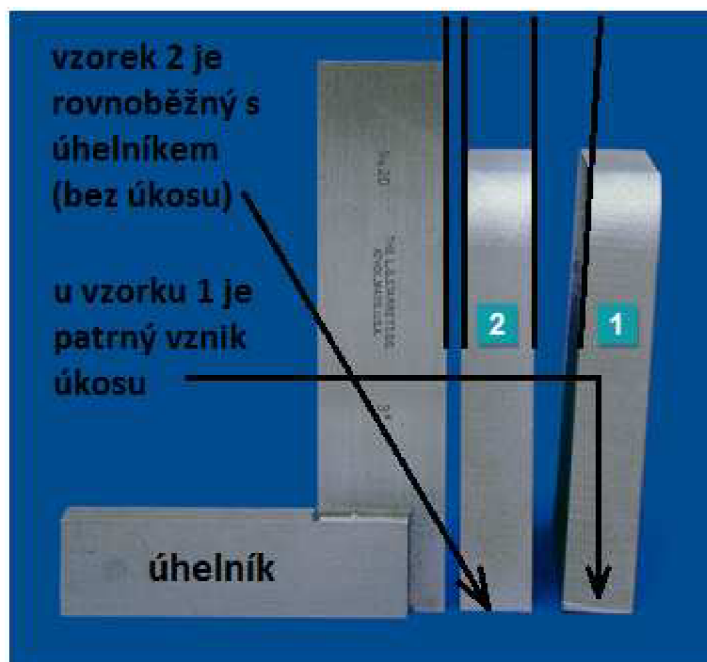


Obr. 1.35 DWJ Řezná hlavice XD

Při posouvání řezné hlavice se paprsek ohýbá, což je přirozený, ale nežádoucí jev. U klasických metod paprskového vodního dělení se tento jev odstraňuje snížením posuvové rychlosti řezné hlavice na minimum. U metody DWJ toto omezení úplně odpadá díky vyspělé technologii řízení. Další obrovské plus spočívá v zabránění tvorbě úkosů, které opět vznikají při klasických metodách řezání vodním paprskem. Na obr. 1.36 jsou porovnány dva obrobky. Obrobek označený číslem 1 je zhotoven klasickou metodou (WJM) a druhý vzorek pod označením číslem 2 je vyroben vyspělejší metodou DWJ. Na první pohled jsou patrné rozdíly dosažené geometrické přesnosti.[5]

Ultra vysokotlaký vodní paprsek napomáhá ke zvýšení kvality řezu a umožňuje řezat materiály s daleko vyšší rychlostí, než konvenční metody o stejné přesnosti. Rychlost řezání metodou DWJ je o cca 25 až 400 % vyšší oproti doposud zmiňovaným technologiím vodního paprsku (dle stroje a materiálu). Skutečné náklady na zhotovení jednoho kusu je díky této technice možné snížit až o 75%. [5]

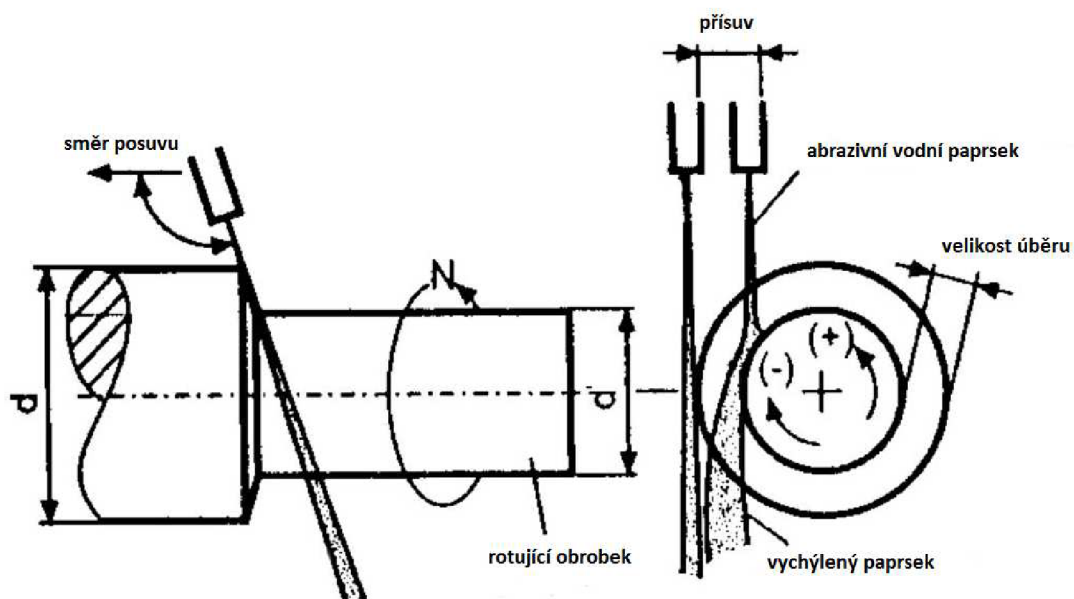
Rychlost vodního paprsku při tlaku 4100 barů nabývá hodnot až trojnásobku rychlosti zvuku. Při tlaku 6000 barů je potom hodnota rychlosti paprsku vyšší než 3500 km/h. Při použití vyšších tlaků je spotřeba abrazivních písků až o 50 % nižší.[30]



Obr. 1.36 Srovnání přesnosti metod WJM a DWJ [5]

1.4 Soustružení vodním paprskem

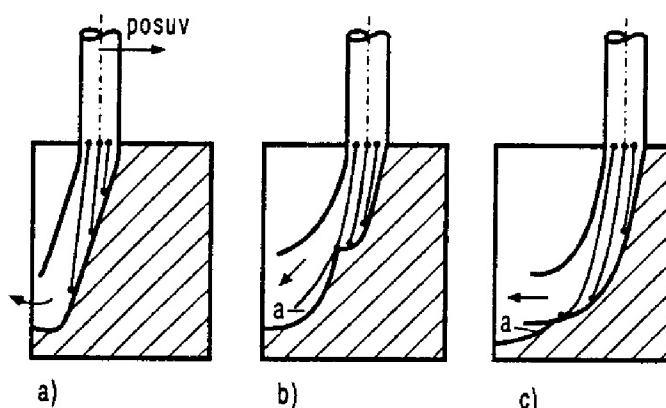
Kromě tradičního uplatnění vodního paprsku pro dělení materiálů má své opodstatnění i v oblasti soustružení. Při soustružení obrobek rotuje a nástroj v podobě vodního paprsku se posouvá ve směru podél osy obrobku. Soustružení vodním paprskem se volí zejména pro tvrdé, těžko obrobitelné materiály jako jsou například vysokopevnostní slitiny, keramiky, kompozity, kameny atd. Radiální posuv zajišťuje požadovanou hloubku řezu. Obr. 1.41 znázorňuje princip metody soustružení vodním paprskem.[8]



Obr. 1.41 Soustružení vodním paprskem [8]

1.5 Frézování vodním paprskem

Frézování abrazivním vodním paprskem se používá pro tvarově složité obrobky. Metoda je založena na principu řezání materiálu oproti klasickému frézování, kde se jedná o oddělování. Zobrazený řezný cyklus na obr. 1.51 ukazuje jednotlivé fáze řezání. Na obr. 1.51 a) představuje začátek tvoření stopy řezu. Na obr. 1.51 b) je stabilizovaná stopa řezu s již viditelnými stupni posuvu. Na poslední obr. 1.51 c) je patrné vyrovnání stupňovitosti řezu. Frézování AWJ paprskem je proces, při kterém paprsek vícekrát přechází po obráběné ploše a tím se geometrie obrobku postupně blíží požadovaným hodnotám.[8]



Obr. 1.51 Řezný cyklus frézování abrazivním vodním paprskem [8]

Velice perspektivní aplikace pro frézování abrazivním vodním paprskem je výroba tvářecích nástrojů.

1.6 Gravírování

Technika gravírování AWJ paprskem je velmi podobná technologii frézování AWJ paprskem. Snahou je odstranit materiál pouze v povrchových vrstvách do určité hloubky. Silou vodního paprsku je do materiálu vytvarován celkový výsledný reliéf, nebo je následně ještě opracován umělcem do požadovaného finálního designu. S výhodou lze touto technikou opracovávat i vícevrstevné materiály (plasty, eloxovaný hliník, více vrstev plastů, aj.), které po gravírování vytvářejí prostorové či barevné efekty.[15]

Technika gravírování AWJ paprskem je velice univerzální a progresivní díky schopnosti odebrat takřka jakýkoliv materiál (křehký, sendvičový, hůře obrobitelný, pružný, atd.). Omezení minimálního zaoblení rohů je dáno průměrem paprsku. Pro měkké a tenčí materiály se používá paprsek o průměru 0,2 mm bez přidaného abraziva. Pro tvrdé a silnější materiály se volí paprsek o průměru 0,5 – 2,5 mm a přidává se abrazivo.[15]

2. ROZBOR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH DAT

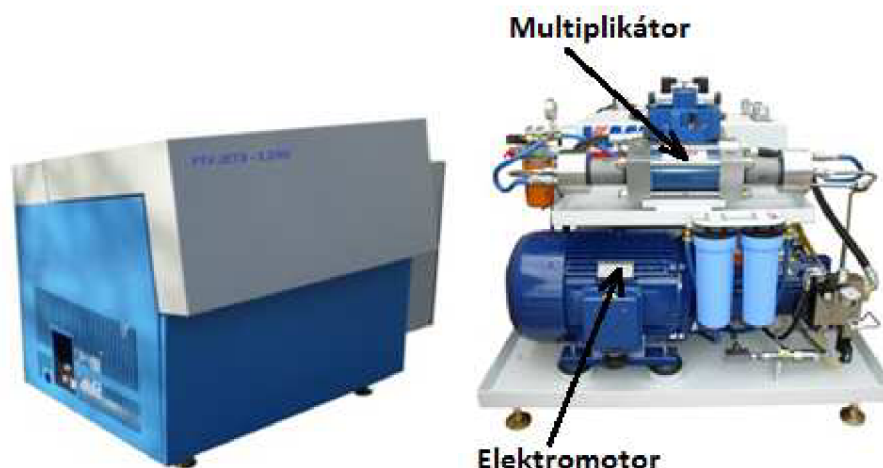
Pro hlubší porozumění a pochopení technologie řezání vodním paprskem je vhodné se seznámit s jednotlivými částmi celého systému. Z tohoto důvodu budou následující kapitoly zaměřené na rozbor hlavních a nejdůležitějších částí systému řezání vodním paprskem. Poté bude rozebrána problematika zadávání technologických dat a způsoby řízení.

2.1 Vysokotlaká čerpadla

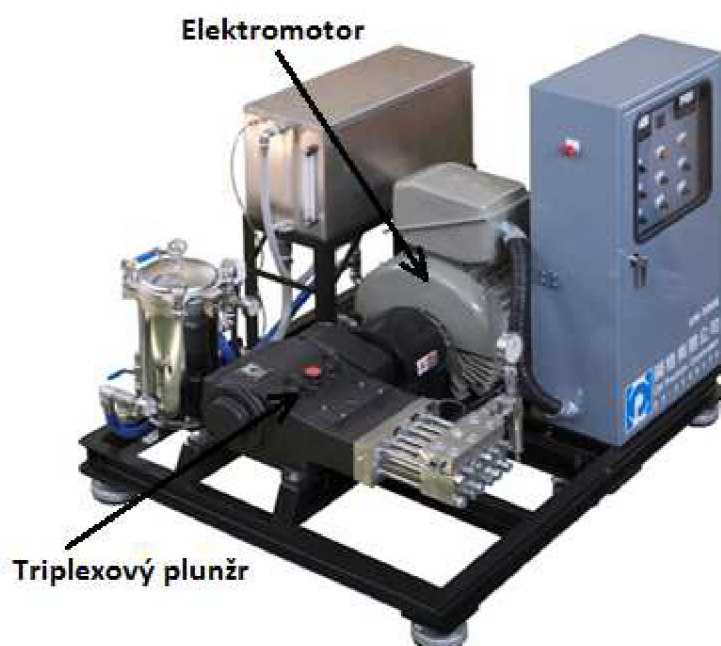
Zaručit dostatečně vysoký tlak je velmi důležité pro technologii dělení kapalinovým paprskem. Tento úkol zajišťuje hydraulické zařízení s aplikací multiplikátoru nebo triplexového plunžru. Druh a konstrukce je závislá na výrobci. Americká firma Flow vyrábí hydraulické zařízení s multiplikátorem. Japonské firmy prosazují systém s triplexovým plunžrem.[8]

Plunžrová čerpadla se z počátku používala prakticky výhradně v oblasti odstraňování vrstev či čištění povrchů plošně působícím vodním paprskem. Limitujícím prvkem byl pracovní tlak vody, který nepřevyšoval hodnotu 200 MPa. Nynější triplexové plunžry mohou nabídnout výstupní pracovní tlak až do 350 MPa, což umožňuje uplatnění i v technologii dělení vodním paprskem. Velkou výhodou plunžrových čerpadel je jejich účinnost, která se pohybuje až na hranici 90%.[1,30]

Pro představu jak tato zařízení vypadají, ukazuje následující obrázek obr. 2.11 stroj obsahující multiplikátor (zakrytovaný stav a bez krytu). Obr. 2.12 zobrazuje čerpadlo s technologií triplexového plunžru od společnosti OH Precision Corporation.



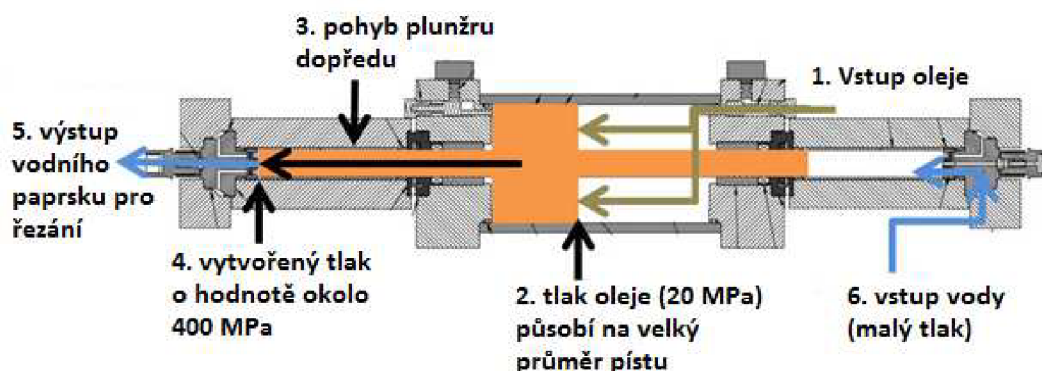
Obr. 2.11 Vysokotlaké čerpadlo PTV JETS 2.2/60 s multiplikátorem [9]



Obr. 2.12 Vysokotlaké čerpadlo UH 210E s triplexovým plunžrem [10]

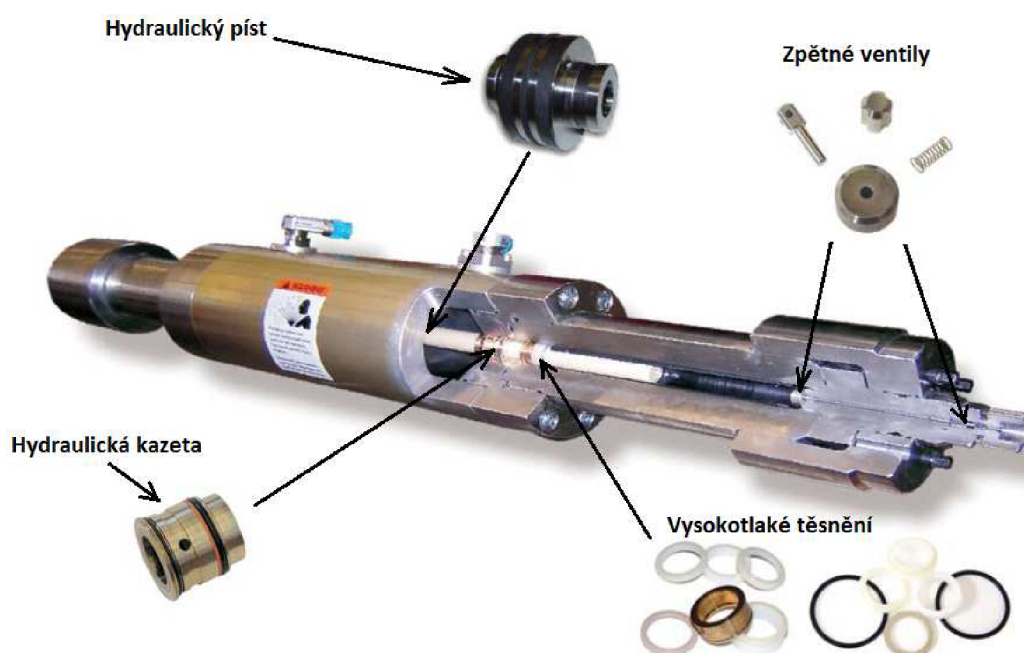
Vysokotlaké čerpadlo se skládá z několika hlavních částí, mezi které patří - vodní čerpadlo, hydraulické čerpadlo, elektromotor, multiplikátor nebo triplexový plunžr a akumulátor tlaku. Stroj s multiplikátorem obsahuje dva tlakové okruhy. Nízkotlaký okruh pracuje s tlakovým olejem pod tlakem cca 20 MPa a tento řídí druhý vysokotlaký okruh pracující již s řezacím médiem - vodou. Výsledný tlak kapaliny, který opouští multiplikátor je již finální, který pokračuje do akumulátoru a dále vysokotlakým potrubím do řezací hlavice.

Schéma multiplikátoru (obr. 2.13) naznačuje dva tlakové okruhy (olejový a vodní) a postupné vytváření vysokého tlaku vodního paprsku.



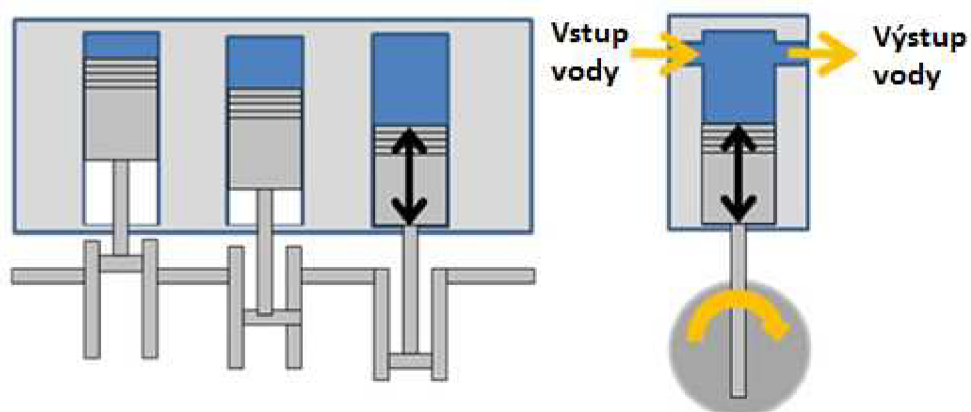
Obr. 2.13 Princip multiplikátoru[11]

Řez reálným multiplikátorem a jednotlivé segmenty jsou zobrazeny na obr. 2.14. Zpětné ventily jsou umístěny na každé straně multiplikátoru dva. Jeden vždy slouží pro přívod vody do systému a druhý je určen pro odvod výstupní již vysokotlaké vody do akumulátoru.

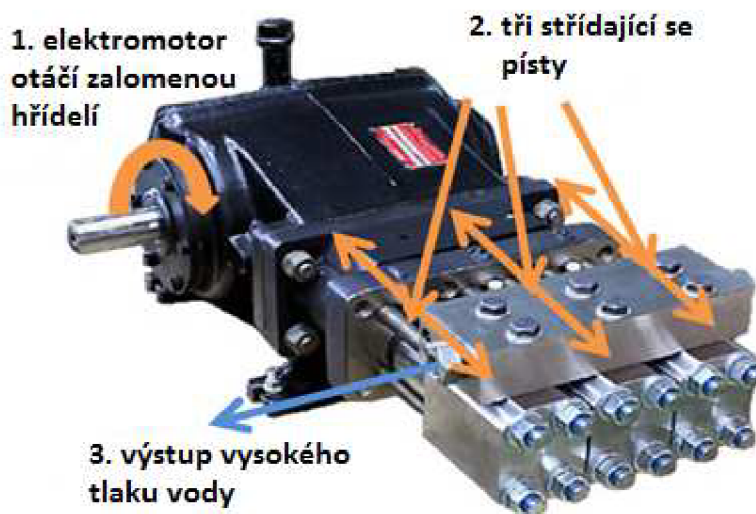


Obr. 2.14 Řez multiplikátorem [16]

Schéma triplexového plunžru (obr. 2.15 a) a b)) naznačuje princip této technologie. Tlakový okruh je zde pouze jeden. Elektromotor otáčí zalomeným hřídelem, na kterém se nacházejí vedle sebe umístěné písty. Stlačení kapaliny probíhá postupně ve třech pístech (obr. 2. 15 a)). Výsledný tlak vody dále směřuje vysokotlakým potrubím do řezné hlavice.



Obr. 2.15 a) Princip funkce stlačování kapaliny [11]



Obr. 2.15 b) Princip funkce triplexového plunžru[11]

Výkon, maximální nepřetržitý výstupní tlak kapaliny a maximální možný výstupní tok média patří mezi základní technické specifikace každého takového speciálního čerpadla. Tab. 2.11 udává rozdělení dle výkonových řad těchto vysokotlakých čerpadel.

Tab. 2.11 Technické specifikace vysokotlakých čerpadel [11]

Výkon	22 kW	37 kW	56 kW	75 kW	112 kW
Max. nepřetržitý výstupní tlak	413,686 MPa				
Max. výstupní tok média [l/min]	2,46	4,16	6,06	8,33	12,1

Nárůst tlaku kapalin z vysokotlakých čerpadel je rázový a pro přímé řezání jsou pulzy nepřijatelné. Proto se kapalina přivádí do vysokotlaké nádoby zvané akumulátor, kde se rázy utlumí a zaručí se rovnoměrný tlak média a stejná rychlost proudění kapaliny. Jedná se o tlustostěnnou válcovou nádobu upravenou autofretáží.

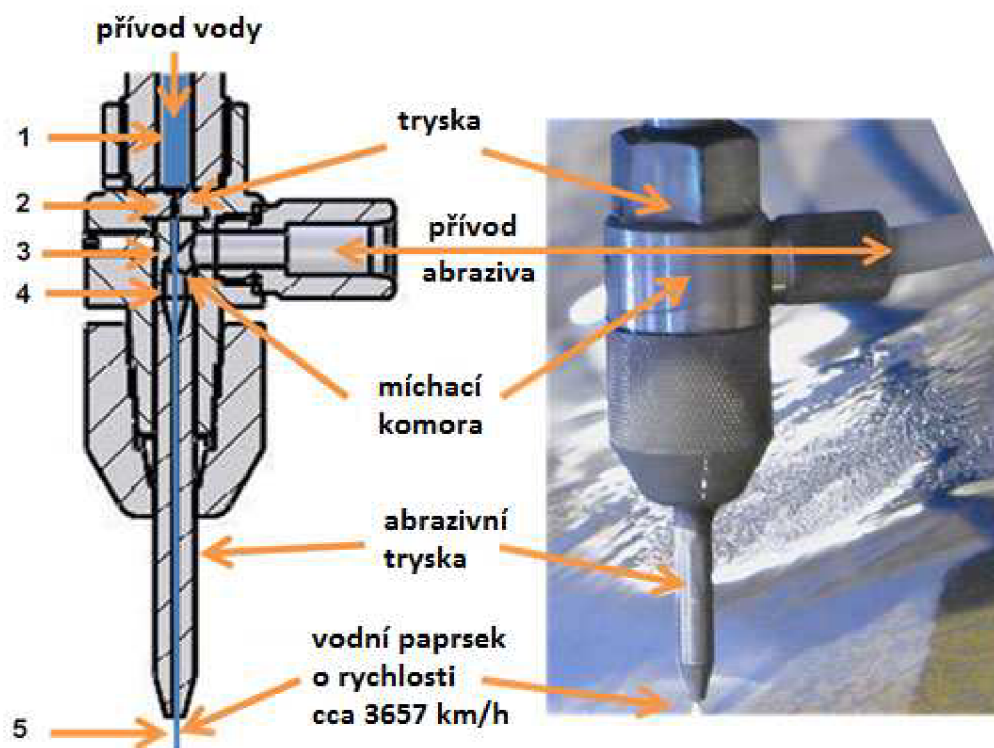
Autofretáž je proces nárazového přetlakování za účelem zpevnění. Vlivem přetlakování dojde v nádobě k plastické deformaci. V místech, kde plastická deformace dosáhne kritických hodnot (hranice makro vad), dojde právě v těchto částech ke koncentraci napětí a tím i ke zpevnění. Díky tomuto postupu se zamezí šíření mikro i makrotrhlin, které by mohly případně vzniknout při pulzujícím režimu přívodu tlakové vody do akumulátoru.[13]

2.2 Řezné hlavice

Řezná hlavice formuje výsledný tvar vodního paprsku a tím i ovlivňuje kvalitu řezu. Jedná se tedy o jednu z nejdůležitějších součástí celého stroje. Provedení řezných hlavice jsou odlišné dle metod řezání. Např. hlavice pro

dělení čistou vodou (metoda WJM) neobsahuje mísící komoru jak u metody AWJ atd.

Podrobnější popis hlavních částí řezné hlavice bude ukázán na abrazivní hlavici (metoda AWJ), jak ukazuje obr. 2.21.



2.21 Abrazivní řezná hlava [12]

Prívod vodního paprsku (1) skrze vysokotlaké vodní potrubí dále směřuje do trysky (2). Tryska utváří tvar výsledného vodního paprsku. Vlivem velmi intenzivního opotřebování trysky se tyto vyrábí z materiálů, které poměrně dobře odolávají tomuto zatížení. Nejčastější materiály použité pro výrobu trysek jsou safír, slinutý karbid, KNB, nebo diamant. Na požadovaném pracovním tlaku vody závisí volba materiálu, ze kterého se bude tryska vyrábět. Trysky pro tlak vody cca do 150 MPa se vyrábějí z nerezavějící oceli. Tvrdokovy, nebo keramika je použita u trysek pro pracovní tlaky cca do 250 MPa. Pro vyšší tlaky než 250 MPa se používá na výrobu trysek materiály, jako jsou safír, rubín nebo umělý diamant. V současnosti se safírové trysky nahrazují diamantovými, které mají až 10 krát větší životnost. Průměr dýzy nabývá hodnot od 0,075 do 1,5 mm. Průměrná pracovní doba safírové dýzy je okolo 200 hodin. Poté se dýza zanese nejrůznějšími nečistotami obsaženými ve vodě a minerálními usazeninami. Diamantová dýza má tu výhodu, že ji je možné několikrát vyčistit. Oproti tomu je ale 7 až 10 krát dražší, než je cena safírové trysky.[8,1]

Jakmile paprsek opustí dýzu, pokračuje následně do směšovací komory (4). V této fázi dochází k míchání přiváděného přesně dávkovaného abraziva s vodním paprskem. Vystupující paprsek z dýzy je urychlen na obrovskou rychlost (řádově stovky $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a vytváří podtlak v řezné hlavě. Vytvořený podtlak napomáhá přisávat abrazivum ze zásobníku. Po smíchání paprsku a

abraziva se dále nyní již abrazivní paprsek (5) dostává do zaostřovací abrazivní trubice a následně již opouští řeznou hlavici rychlostí cca 1 - 4 Mach. Abrazivní (sekundární, zaměřovací) tryska má vnitřní průměr od 0,75 do 2,5 mm. I když jsou tyto zaměřovací trysky vyráběny z extrémně tvrdých materiálů, tak i tyto podléhají opotřebení. Abrazivum přiváděné do paprsku opotřebení velmi zintenzivňuje. Ústí zaměřovací trubice se zvětší cca o 0,002 mm za jednu hodinu provozu stroje. Obr. 2.22 velice názorně ukazuje toto opotřebení. Tabulka 2.21 srovnává životnost jednotlivých směšovací trubice z různých materiálů.[8,13,1]



Obr. 2.22 Opotřebení zaměřovací abrazivní trysky[12]

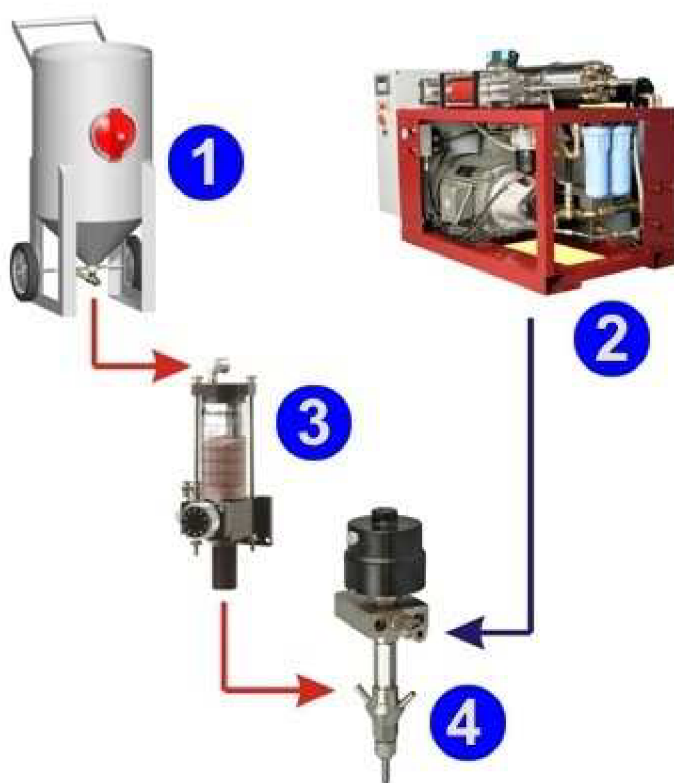
Tab. 2.21 Životnost směšovací trubice[1]

Materiál	Životnost [hod]	Popis
Standardní karpid wolframu	4 - 6	Původní směšovací trubice. Nízká výkonnost a poměr cena/hodina. Mají sklon k mimosovému opotřebování, požadují velmi častou výměnu.
Levný kompozitní karpid	35 - 60	Vhodné pro hrubé dělení materiálů nebo pro zaučování nového operátora.
Střední životnost kompozitní karpid	80 - 90	Vhodné pro všechny aplikace dělení materiálů.
Premium kompozitní karpid	100 - 150	Nejlepší vlastnosti vykazuje souosé a předvídatelné opotřebení. Užívá se pro přesné řezání i každodenní práce.

Výkon vodního paprsku se pohybuje v rozmezí od 7 do 45 kW.[8]

2.3 Zásobník abraziva

Pro abrazivní řezání vodním paprskem se do řezné hlavice přivádí jak kapalina, tak i abrazivum. Dva systémy přívodů zaručují přísun jednotlivých složek výsledného řezného nástroje. Z velkokapacitního zásobníku abraziva (1) je přívod abraziva dále směřován do odměřovacího zásobníku (3), ve kterém je přesně nastaveno dávkování do řezné hlavice (4). Tento odměřovací zásobník je umístěn v horní pozici osy Z- nad řeznou hlavou. Menší odměřovací zásobník pojme až 285 kg abraziva. Druhý obvod pro kapalně médium směřuje z vysokotlakého čerpadla (2) do řezné hlavice (4). Celé schéma je zobrazeno na obr. 2.31.[14]



Obr. 2.31 Přívod abraziva a kapaliny do řezné hlavice [14]

2.4 Zařízení na úpravu vody

Aby se předcházelo usazeninám, znečišťování dýzy a agresivnímu působení vody na kov, zpětné ventily a těsnění, provádí se úprava vody a to v zásadě demineralizováním, deionizováním či reverzní osmózou. Reverzní osmózou se rozumí odstraňování solí z kapaliny. Látky obsažené ve vodě (např. soli, železo, mangan, křemík a oxid křemíku) zanechávají usazeniny na trysce, které komplikují či úplně znemožňují kvalitní řezání. Úprava vody je realizována již před vstupem do vysokotlakého čerpadla. Jelikož dýzy nejmenších průměrů (0,075 mm) jsou opravdu velmi náchylné na ucpávání a zanášení, musí být vnitřní průměr dýzy ochráněn proti usazování příměsí a nečistot z vody. Výrobci strojů si stanovují různé požadavky na kvalitu média, které je používáno při pracovním cyklu stroje. Doba správného chodu stroje je závislá na čistotě a kvalitě používané pracovní kapaliny.[8,30]

2.4.1 Filtrace

Filtrace patří mezi neoddelitelnou součást systému dělení vodním paprskem. Napomáhá podstatně chránit a prodlužovat celkovou životnost stroje. Pomocí filtrů jsou zachytávány a odplavovány nečistoty od velikosti 1,2 μm až do 0,5 μm . [8]

2.4.2 Aditiva

Aditiva, nebo též přísady do vody jsou příměsi různých polymerů s lineárními molekulami. Jejich úkolem je vytvořit souvislý paprsek, který je bez nadměrné turbulence a tento je potom při procesu řezání kompaktnější, energeticky koncentrovanější a tedy i účinnější. Příkladem roztoku vody a polymerů je například PAA (polyakrylamid), nebo PEO (polyetyloxid). Tato úprava vody se vyžaduje např. pro vytvoření ostrých hran děleného materiálu. [8]

2.5 Rozvod kapaliny – vysokotlaké potrubí

Rozvod kapaliny musí být flexibilně přizpůsoben pohybu řezné hlavy a musí splňovat bezpečnostní podmínky pro vysokotlaký rozvod kapalin.

Materiály použité na výrobu vysokotlakých potrubí a armatur jsou nejčastěji vysokopevnostní nerezové ocele (např. ocel AISI 309, ČSN 41 7348, atd.). [1]



Obr. 2.51 Vysokotlaké potrubí [12]





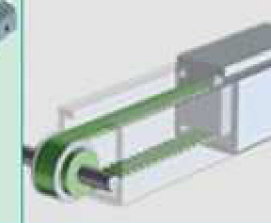

2.6 Záchytná nádrž (tlumící)

Nádrž, jejímž účelem je především tlumit a zachytávat vodní paprsek po ukončení řezného procesu. Nádrž je naplněna nejčastěji vodou. Hladina vody musí mít alespoň minimální výšku a to v závislosti na používaném pracovním tlaku kapaliny, aby docházelo ke správné tlumící funkci.

2.7 Řezací stoly

Tento prostor je určen pro upevňování řezaných dílců. Velikosti se liší dle typu stroje. Časté velikosti těchto stolů jsou od 1,2 x 1,2 m, přes 3 x 2 m, 4 x 3 m, až po 4 x 6 m, dle požadavků zákazníka. Pod řezacím stolem se nachází záchytná nádrž naplněná vodou. Boky stolu jsou opatřeny vedením pohybového systému stroje. Vedení pro posuvy může být řešeno několika

možnými variantami. Obr. 2.70 ukazuje některé možné varianty pohybového aparátu stroje a jejich stručnou charakteristiku.[30]

Vysoký výkon ←						→ Nizký výkon
Lineární motor	Dělený pastorek a čelní hřeben	Kuličkový šroub	Ozubený hřeben a pastorek	Pásový pohon	Třecí, nebo tažný pohon	
						
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velmi drahé ▪ Nevhodné pro drsné prostředí ▪ Extrémně rychlé ▪ Extrémně přesné 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Drahé ▪ Robustní, pro drsné prostředí ▪ Osvědčené pro velké břemena ▪ Vyžaduje určitou údržbu 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Přijatelná cena ▪ Vysoká přesnost a rychlost ▪ Odolné proti drsnému prostředí ▪ Dlouhá životnost ▪ Vhodné pro mnoho velikostí ▪ Minimální údržba ▪ Poměrně tichý provoz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nízká cena ▪ Vysoká rychlost, nízká přesnost ▪ Vynikající odolnost proti drsnému prostředí ▪ Osvědčená konstrukce ▪ Hlučnější provoz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velmi nízká cena ▪ Vysoká rychlost, nízká přesnost ▪ Pás vyžaduje zpětnou vazbu pro případ prokluzu ▪ Hlučnější provoz ▪ Zvládne i větší zátěže 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velmi nízká cena ▪ Nízká rychlost, nízká přesnost ▪ Nutná vnější zpětná vazba ▪ Zvládne i velmi těžká břemena ▪ Nevhodné pro drsné prostředí 	

Obr. 2.70 Pohybové systémy [30]

2.8 Software pro zadávání vstupních dat

Moderní stroje pracující s technologií vodního paprsku disponují takřka výhradně NC, či CNC technologií řízení. Většina softwarů užívaných v této oblasti podporuje a spolupracuje s programy typu CAD. CAD programy jsou velmi známé v oboru strojírenství a jsou rozšířené takřka po celém světě. V CAD programech je poměrně snadné připravit kompletní výkresovou dokumentaci. Soubory uložené v těchto programech disponují obvykle koncovkou *.dwg, *.dxf, *.CNC, apod. a tyto lze s výhodou dále aplikovat i v řídicím softwaru. Je-li tedy jednou zhotovená geometrie obrobku, není nutné ji opětovně překreslovat, ale stačí ji pouze přehrát do řídicího programu.[34]

Pomocí menu lze nastavovat správné parametry rezných rychlostí, děrování, funkce stroje, pumpy aj. Některé programy jako např. FlowMaster navíc obsahují i předem nadefinované rezné parametry materiálů pro široké spektrum jejich tloušťek.[5]

Úkolem řídicího softwaru je co nejjednodušším způsobem komunikovat mezi obsluhou a strojem a přitom zajistit optimální chod stroje. U softwaru FlowMaster dokonce není nezbytné znát problematiku CNC programování. Obsluha je velmi jednoduchá. Vše co je nezbytné je zadat materiál, tloušťku materiálu a požadovanou kvalitu řezu a vše je připraveno. U složitější technologie Dynamic Water Jet a řízení taktéž programem FlowMaster je řízení opět co nejvíce zjednodušeno. Program sám dynamicky řídí polohu rezačí hlavy vůči materiálu ke každému bodu rezné dráhy. Pro nulový úkos musí program vyhodnotit danou situaci. Čili, pro vyšší rychlost musí program umožnit větší naklonění rezné hlavy. Tímto napomáhá zvýšit efektivitu oproti konvenčnímu řezání.[5]

2.7.1 Příklady softwarů

Flow MASTER – Jedná se o inteligentní řídicí program od společnosti Flow. Program běží pod operačním systémem MS Windows. Velkou výhodou jsou již předdefinované a nastavené rezné parametry pro různé materiály a jejich tloušťky. Do programu lze nahrát jakoukoli výkresovou dokumentaci vytvořenou v CAD prostředí s příponami např. dxf, igs, atd.[5]

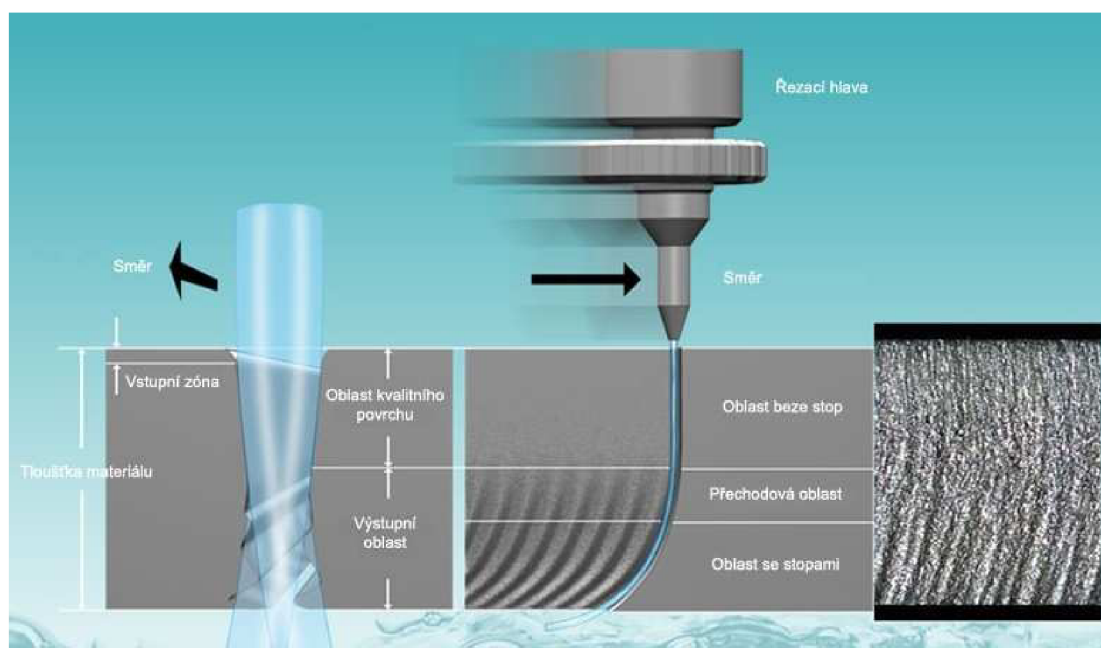
AsperWin – Jeden z mnoha programů zaměřený nejen na řezání vodním paprskem od firmy MicroStep CDM. Tímto programem je řízeno také i řezání laserem či plazmou. Program tvoří k úsekům řezaného plánu automatické nájezdy a výjezdy podle předem nastavených parametrů, které lze dále modifikovat. Program běží opět pod operačním systémem MS Windows.[33]

3. VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA JAKOST POVRCHU A PŘESNOST OBRÁBĚNÍ

3.1 Kvalita a přesnost povrchu

Snahou téměř každé výrobní technologie je zajistit co možná nejpřesnější produkci výrobků. Ne vždy je to ale nutné a výhodné. Např. u hrubovacího procesu soustružení dosahovaná kvalita povrchu není rozhodujícím faktorem, a tudíž se na tuto problematiku nebere ohled. Z pohledu hrubování je jednoznačně nejdůležitější odebrat co možná nejvíce materiálu za co nejkratší čas. Až po hrubování mnohdy následuje dokončovací operace, která zajistí požadovanou kvalitu výsledného povrchu, je-li to nutné. U většiny ostatních technologií je kvalita a přesnost povrchu rozhodující a velice důležitým faktorem. U dělení materiálů se obecně řeší otázka dosažené kvality povrchu po procesu a také se bere v potaz množství materiálu, který se odebere při dělení. Jednoznačně do této problematiky také spadá i dělení abrazivním vodním paprskem. Řezání vodním paprskem zaručuje minimální ztráty základního materiálu a poměrně velmi vysokou kvalitu povrchu.

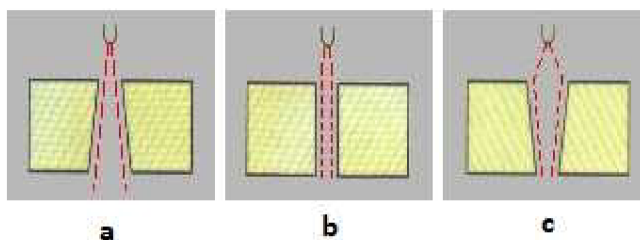
Možnosti jak ovlivnit dosahovanou kvalitu řezu jsou různé. Základní závislost kvality povrchu je na rychlosti řezání. Čím rychlejší bude posuv řezné hlavice, tím bude kvalita povrchu klesat a to obzvláště v oblasti, kdy paprsek opouští materiál (tzv. výstupní oblast). Tam se tzv. „striace“ projevuje nejvíc. Další nepřesnost na obrobku se vyskytuje ve formě úkosu hran materiálu. Tento úkos vzniká jak v oblasti kvalitního povrchu, tak i ve výstupní oblasti jak je naznačeno na obr. 3.11. Zmíněná vyspělá metoda DWJ umožňuje tyto nedostatky zcela eliminovat díky unikátnímu matematickému modelu, který zaručuje optimální řez bez chyb a nedostatků.



Obr. 3.11 Oblasti povrchu děleného materiálu[35]

Tvary úkosů jsou zobrazeny na obr. 3.12. Je-li řez velmi pomalý, nebo je-li dělený materiál měkký, stihne paprsek probrousit kuželový tvar zobrazený na

obr. 3.12 a). Varianta b) nastává zvolením optimálních řezných parametrů. Rychlost řezu pro dané materiálové charakteristiky, včetně tloušťky materiálu, je optimálně nastavena a úkos v tomto případě nevzniká. Poslední případ nastává, pokud je zvolen velmi rychlý posuv hlavice, nebo řeže-li se odolnější materiál. Tento tvar je způsoben tím, že paprsek nestihne probrousit vstupní část ve svém celém průměru a řez se směrem dolů uzavírá.[3]



Obr. 3.12 Tvary úkosů [17]

Výpočet kvalitní zóny (tedy oblasti beze stop) na řezaném materiálu dle Hashishe [1] :

$$h_c = \frac{\frac{v_a \cdot d_a}{C_k}}{\left(\frac{\pi \cdot \rho_p \cdot v_p \cdot d_a^2}{14 \cdot m_a}\right)^{\frac{2}{5}} + \frac{v_e}{C_k}} \quad (1)$$

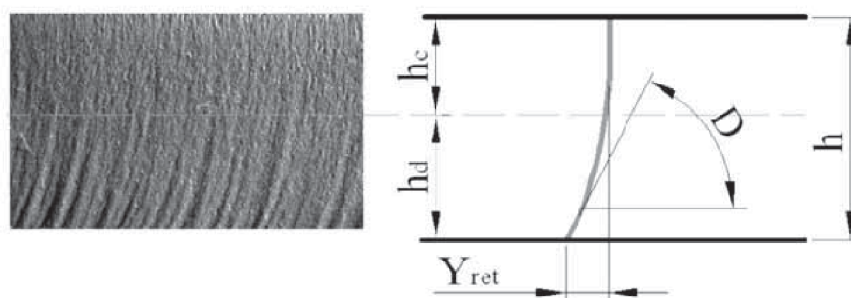
Výpočet deformované zóny (tedy oblasti se stopami) opět dle Hashishe [1] :

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_a \cdot \sigma_{kl} \cdot v_p}{2 \cdot C_1 \cdot m_a \cdot (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f}{d_a} \cdot \frac{v_a}{(v_a - v_e)}} \quad (2)$$

Celková velikost dělicího řezu je potom určené vztahem [1]:

$$h = h_c + h_d \quad (3)$$

Mezi hlavní parametry profilu povrchu vytvořeného abrazivním vodním paprskem se řadí střední aritmetická drsnost povrchu R_a , zpoždění řezné stopy Y_{ret} , deviační úhel D a také samotná hloubka řezu h . Pro porozumění jsou tyto parametry vyznačeny na obr. 3.13.[7]



Obr. 3.13 Hlavní parametry povrchu [7]

Než se provede samotný proces řezání, je velmi důležité vědět, jaká má být požadovaná kvalita povrchu řezu. Podle toho se dále volí a upravují hlavní vstupní parametry, mezi které patří:

- hydraulické parametry,
- parametry materiálu,
- tvar a zrnitost abraziva,
- technické parametry proudu.

Vzájemné ovlivňování vstupních materiálových a technologických hodnot s hodnotami výstupními geometrickými parametry povrchu je u vyspělých systémů (DWJ) otázkou aplikace matematického modelu. Jakmile budou zadány nezbytné vstupní údaje, model vyhodnotí nejlépe vyhovující metodu a aplikuje ji na zadaný úkol.[7]

Kvalita povrchu řezu může být od nejkvalitnějšího řezu Q5 až po hrubý dělicí řez Q1 označený na obr. 3.14.



Obr. 3.14 Jakost povrchu řezu [3]

Následující tabulka tab. 3.11 uvádí orientační hodnoty jednotlivých stupňů přesnosti povrchů (skutečné hodnoty se mohou lišit dle typu materiálu).

Tab. 3.11 Hodnoty stupňů přesnosti [3]

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	Hrubý 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 +

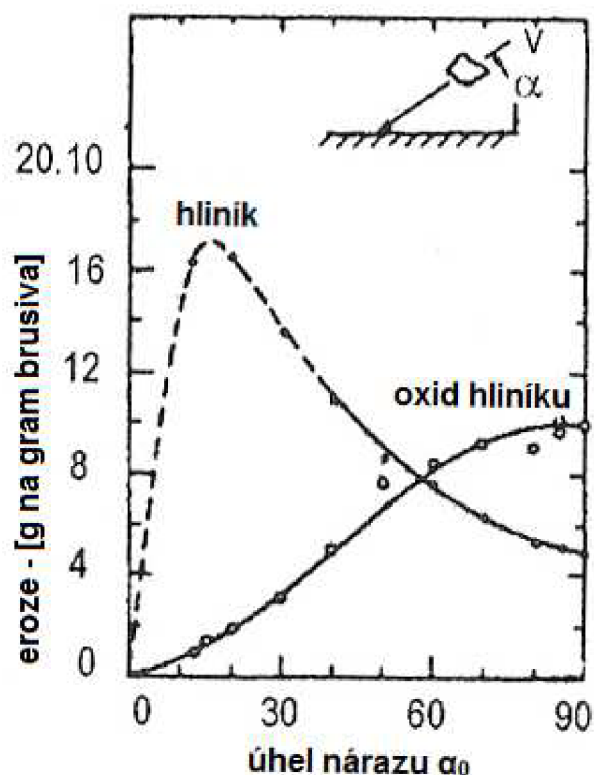
3.2 Vliv abraziva na kvalitu povrchu

Jak již bylo v úvodu řečeno, proces eroze je v podstatě narážení pevných částic na povrch pevného tělesa. U abrazivního vodního paprsku je s výhodou využíváno abrazivum ve formě nejrůznějších jemných písků, jako jsou např.: **granát (různé druhy), olivín, oxid hlinitý, křemičitý písek** aj. Erozní účinek je závislý především na dvou významných faktorech. První a velmi důležitý faktor je úhel nárazu abrazivní částice α_0 na povrch materiálu. Druhým faktorem jsou pevnostní vlastnosti obráběného materiálu.[8]

Tabulka 3.21 uvádí tzv. kritické hodnoty úhlů nárazu abrazivních částic α_0 a mechanismus oddělování materiálu, který při těchto úhlech vzniká. Níže uvedený obrázek 3.21 popisuje závislost vlivu materiálu a úhlu nárazu abrazivních částic. Pro názornost je použit tvárný materiál (hliník) a křehký materiál (oxid hliníku). Pro vytvoření grafu byly použity abrazivní částice SiC o zrnitosti 120 a rychlosti 152 m/s.[8]

Tab. 3.21 Reakce materiálů na různé úhly dopadu abraziva α_0 [8]

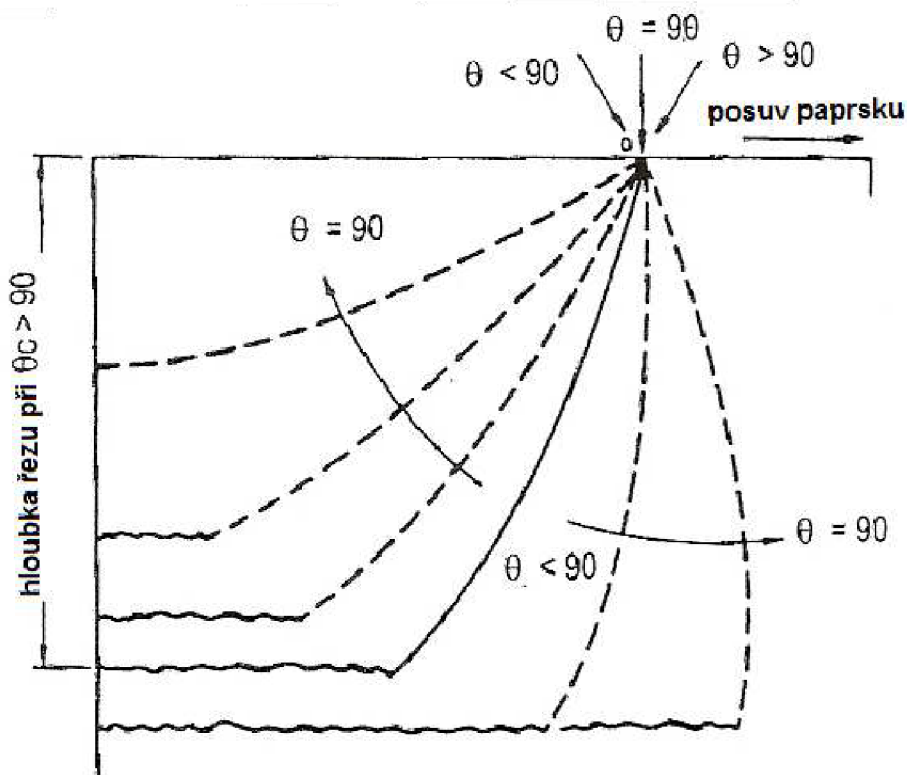
materiál	úhel nárazu α_0		
	$<20^\circ$	45°	90°
tvárný	maximální řezné opotřebení	smíšený režim	maximální deformační opotřebení
křehký	velmi malá eroze	střední eroze	maximální eroze



Obr. 3.21 Příklad erozní charakteristiky tvárného a křehkého materiálu [8]

Při konečné fázi procesu řezání vodním paprskem dochází ke vzniku trojúhelníkového nedořezání na samotném konci řezu. Nedořezání je výsledkem váznutí paprsku a potvrzuje, že proces je ustálený jen do určité hloubky řezu označené h_c (výpočet dle vzorce 3.1 a zobrazení zóny je na obr. 3.13). Z tohoto poznatku vyplývá požadavek především pro dělení materiálu, aby hloubka h_c byla větší, než je celková tloušťka materiálu. Nastavení tzv. úhlu řezání θ napomáhá upravit požadovanou hloubku h_c pro různé tloušťky materiálů, jak uvádí obrázek 3.22.[8]

Pro minimalizování vzniku trojúhelníkového nedořezání v závěrečné fázi řezu se v praxi provádí zpomalení posuvu na minimální hodnoty a tím se podstatně eliminuje nežádoucí váznutí paprsku a tedy i nedořezání.



Obr. 3.22 Změna hloubky řezu vlivem změny úhlu θ [8]

Velikost abraziva je dána jeho zrnitostí a je značena podle ISO 525-75, dle velikosti zrna a udává se v jednotkách označených jako MESH. MESH jednotka představuje počet ok síta na délku jednoho palce (25,4 mm). Nejběžnější a nejčastěji používaná abraziva jsou různé druhy granátu (australský, čínský, aj.). Z hlediska nákladů, rychlosti řezání, životnosti míchací trubice zajišťuje granát velmi vhodné podmínky. Aplikace granátu se může lišit podle velikosti zrna např. takto: [18]

- zrnitost 120 Mesh se používá pro dokončovací operace, kde je požadovaný velmi hladký povrch,
- zrnitost 80 Mesh je široce používaná zrnitost pro běžné použití,
- zrnitost 50 Mesh pro hrubé opracování velkými posuvovými rychlostmi. [18]

Výpis průměrného chemického složení granátu (hm%): [28]



SiO ₂	38%
Al ₂ O ₃	22%
Fe ₂ O ₃	30%
TiO ₂	1%
MnO.....	1%
CaO.....	1%
MgO.....	7%

Obr. 3.23 Zrnko granátu MESH 80 [28]

Typická fyzikální charakteristika abraziva ve formě granátu (australského):

Sypná hmotnost je $2,38 \text{ t/m}^3$. Tvrdost (dle Mohra) se uvádí 7,50 - 8,0. Bod tavení je $1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Tvar p řírodních zrn je kubický.[9]

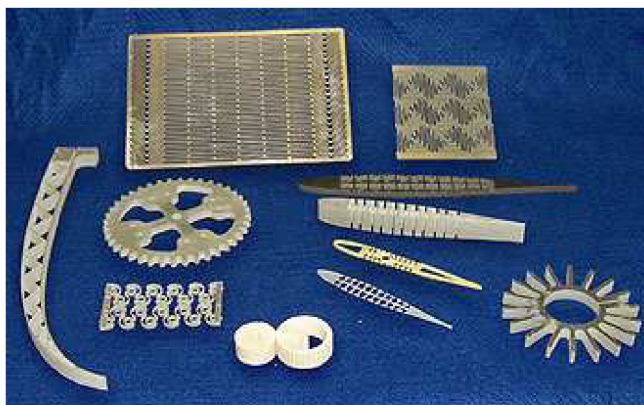
Spotřeba abraziva je různá a závisí na mnoha okolnostech. Dávkování přiváděného abraziva je závislé zejména na tloušťce materiálu, tlaku výstupního média a také na průměru abrazivní (míchací) trysky. Například pro neúčinnější řezání vodním paprskem o tlaku 400 MPa se přivádí abrazivo (granát) do paprsku v množství od $0,4 \text{ kg/min}$ až do $1,2 \text{ kg/min}$ v závislosti na velikosti průměru míchací trysky.[18]

Donedávna se použitá abraziva po procesu řezání již dále nerecyklovala. V dnešní době jsou i použité abrazivní písky do značné míry znovu recyklovatelné a tudíž i znovu použitelné po vyseparování nečistot. Vysoké poplatky za ekologickou likvidaci donutilo mnoho velkých firem k procesu recyklace těchto písků.

3.3 Řezání tvarových dílů

Při realizaci složitějších řezů není vhodné použít konstantní posuvovou rychlost, která se používá u jednodušších (přímkových) řezů. Konstantní posuvová rychlost způsobuje u složitých tvarů řezů tzv. podřezání v rozích, a proto je vhodné dynamicky optimalizovat proces řezání.[15]

Ostrost vnitřních rohů je ovlivněna výsledným průměrem řezného paprsku. Poloměr zaoblení vnitřního rohu vytvořeného vodním paprskem je závislý na průměru paprsku (průměr paprsku bez abraziva je $0,1$ až $1,5 \text{ mm}$ a s abrazivem od $1,2$ do 2 mm).

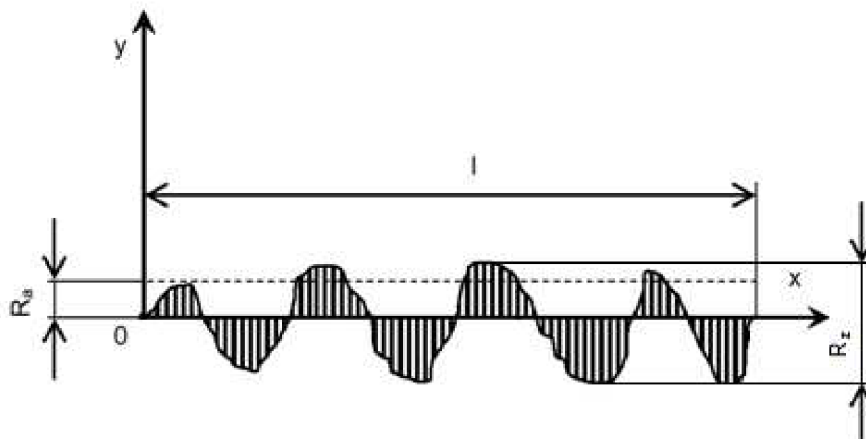


Obr. 3.31 Ukázka složitějších tvarových dílců zhotovených AWJ metodou [36,37]

3.4 Vliv rychlosti řezu na výslednou kvalitu povrchu - (EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ)

Metodika posuzování profilu povrchu:

U daných vzorků se posuzuje střední aritmetická úchylka profilu R_a a největší výška měřeného povrchu R_z (součet výšky nejvyššího výstupku a hloubky nejnižší rýhy uvnitř měřené délky). Obr. 3.41 nastiňuje pozice měřených hodnot.



Obr. 3.41 Drsnost povrchu s vyznačením R_a a R_z

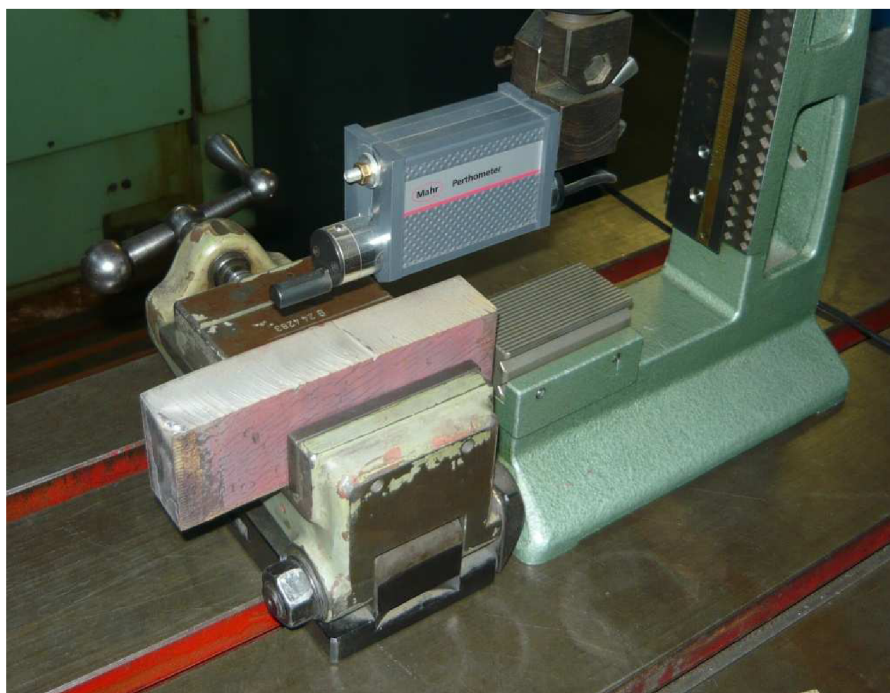
Pro experiment a posouzení výsledné kvality řezného povrchu byly použity 3 druhy materiálů o různých tloušťkách. Jedná se o materiály 11523 (S355) v tloušťkách 10, 20, 30 mm, 17240 v tloušťce 10 mm a hliník 4413 AlMg₃ v tloušťkách 10, 20 a 30 mm. Každý vzorek byl nařezaný čtyřmi odlišnými rychlostmi. Neměnné řezné parametry, které byly nastaveny na stroji a po celou dobu řezání zachovány, jsou:

- tlak kapaliny 380 MPa,
- abrazivo GRANÁT,
- zrnitost abraziva MASH 80,
- průtok abraziva 360 g/min,
- \varnothing vodní rubínové trysky 0,33 mm,
- \varnothing abrazivní trysky 1,02 mm,
- vzdálenost abrazivní trysky od povrchu materiálu 2 mm.

Řezání vzorků se realizovalo na stroji MICRO STEP Aqua Cut 4001. 25W ve firmě AWAC s.r.o. se sídlem v Brně. Tlak vody zajišťoval multiplikátor pod označením Accu Stream AS – 6075 o výkonu 75 kW.

Dosažené kvality povrchů (R_a a R_z) byly měřeny v různých hloubkách vzorků (3mm, 6mm, 10mm, 15mm).

Pro měření drsnosti povrchu byl použit drsnoměr Mahr Perthometer M2 (obr. 3.42) o měřícím rozsahu do 15 μ m. Délka měřeného úseku byla vždy 5,6 mm a doba měření 7s.



Obr. 3.42 Měření přístrojem Mahr Perthometer M2

Tabulky 3.41, 3.42 a 3.43 uvádějí naměřené hodnoty nařezaných vzorků v daných hloubkách. Naměřené hodnoty jsou následně na obr. 3.43a - g zobrazené v grafech.

Tab. 3.41 Naměřené hodnoty drsnosti povrchů (hliník AlMg₃) přístrojem Mahr Perthometer M2

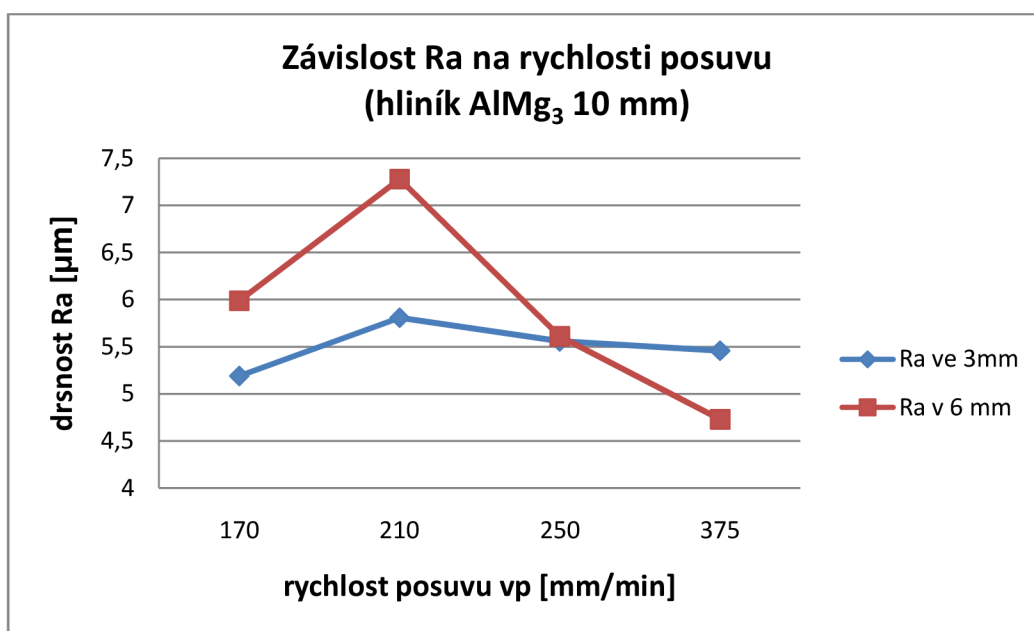
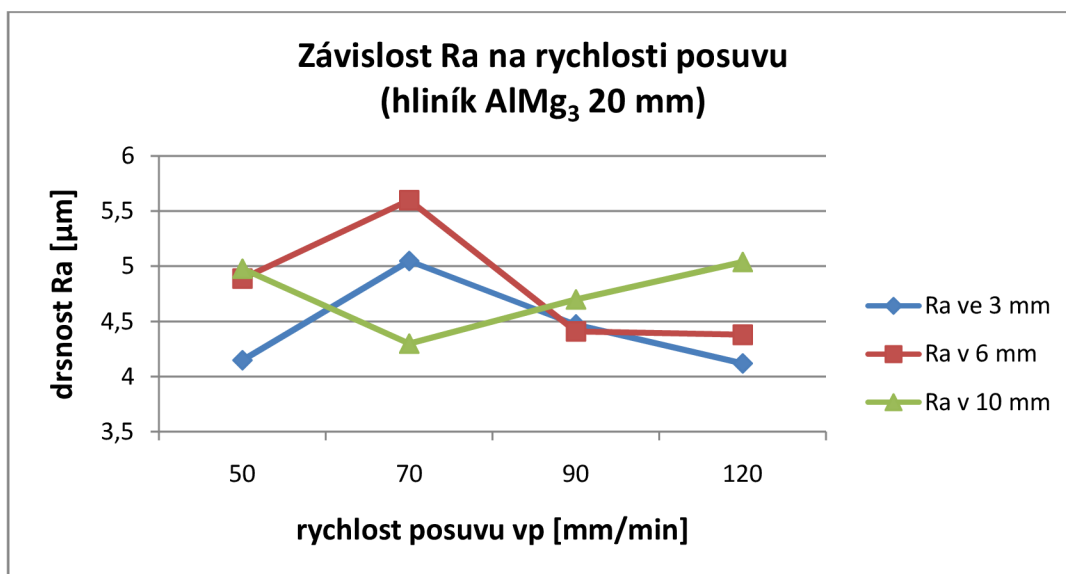
	Hloubka měření							
	3mm	6mm	10mm	15mm	3mm	6mm	10mm	15mm
Hliník tl. 10	$v_p=170$ mm/min				$v_p=210$ mm/min			
Ra [μ m]	5,19	5,99	-	-	5,81	7,28	-	-
Rz [μ m]	30,5	37,1	-	-	34,2	39,5	-	-
Hliník tl. 10	$v_p=250$ mm/min				$v_p=375$ mm/min			
Ra [μ m]	5,56	5,61	-	-	5,46	4,73	-	-
Rz [μ m]	33,6	33,9	-	-	32,8	27,7	-	-
Hliník tl. 20	$v_p=50$ mm/min				$v_p=70$ mm/min			
Ra [μ m]	4,15	4,89	4,98	-	5,05	5,6	4,3	-
Rz [μ m]	24,6	31,1	28,2	-	31,1	34,5	28,7	-
Hliník tl. 20	$v_p=90$ mm/min				$v_p=120$ mm/min			
Ra [μ m]	4,47	4,41	4,7	-	4,12	4,38	5,04	-
Rz [μ m]	29	27	27,3	-	24,2	26,7	30,5	-
Hliník tl. 30	$v_p=45$ mm/min				$v_p=60$ mm/min			
Ra [μ m]	4,51	4,6	4,06	5,58	5,2	4,93	4,76	4,63
Rz [μ m]	28,1	32,8	23,6	33,9	29,1	28,2	28,7	29,6
Hliník tl. 30	$v_p=76$ mm/min				$v_p=120$ mm/min			
Ra [μ m]	4,82	4,52	5,25	5,09	5,07	5,09	5,68	5,65
Rz [μ m]	27	28,2	28,2	29,2	30,3	29,7	32,7	38,3

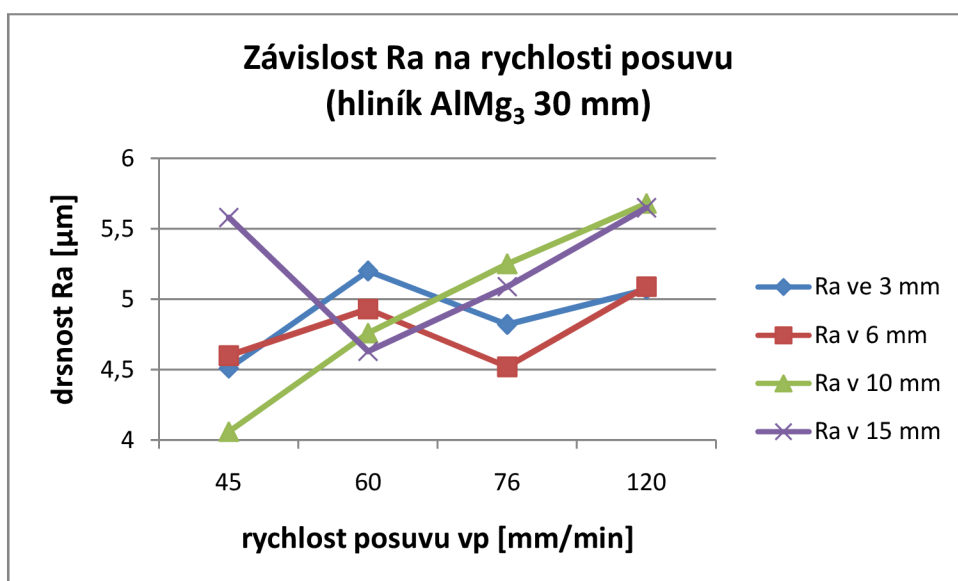
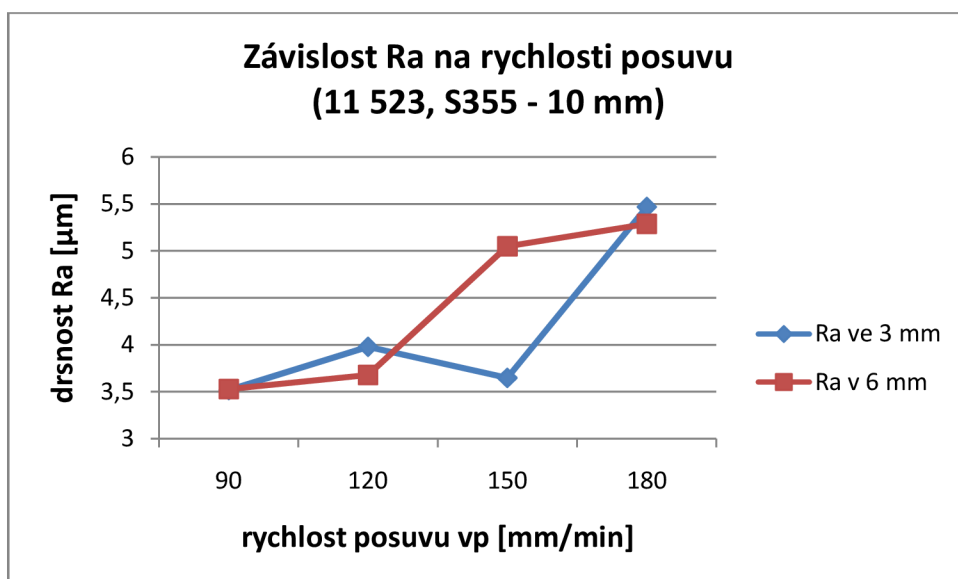
Tab. 3.42 Naměřené hodnoty drsnosti povrchů (11523) přístrojem Mahr Perthometer M2

	Hloubka měření							
	3mm	6mm	10mm	15mm	3mm	6mm	10mm	15mm
11523 tl. 10	vp=90 mm/min				vp=120 mm/min			
Ra [μm]	3,52	3,53	-	-	3,98	3,68	-	-
Rz [μm]	25,3	23,5	-	-	22,3	21,3	-	-
11523 tl. 10	vp=150 mm/min				vp=180 mm/min			
Ra [μm]	3,65	5,05	-	-	5,47	5,29	-	-
Rz [μm]	22,1	28,5	-	-	29,8	26,2	-	-
11523 tl. 20	vp=35 mm/min				vp=50 mm/min			
Ra [μm]	3,22	2,5	2,78	-	3,04	3,73	3,89	-
Rz [μm]	20,5	16,9	17,3	-	22,7	22,6	22,3	-
11523 tl. 20	vp=68 mm/min				vp=96 mm/min			
Ra [μm]	3,25	3,66	3,03	-	4,3	3,33	4,09	-
Rz [μm]	19,9	24	20,6	-	25,1	18,5	21	-
11523 tl. 30	vp=15 mm/min				vp=25 mm/min			
Ra [μm]	2,92	2,53	2,98	2,96	2,96	3,06	2,95	3,85
Rz [μm]	15,4	15,9	18,2	18,8	20,5	19,1	18,6	21,1
11523 tl. 30	vp=36 mm/min				vp=56 mm/min			
Ra [μm]	2,88	3,45	2,93	-	3,33	3,68	4,58	-
Rz [μm]	19,7	21,9	19,1	-	20,9	21	22,7	-

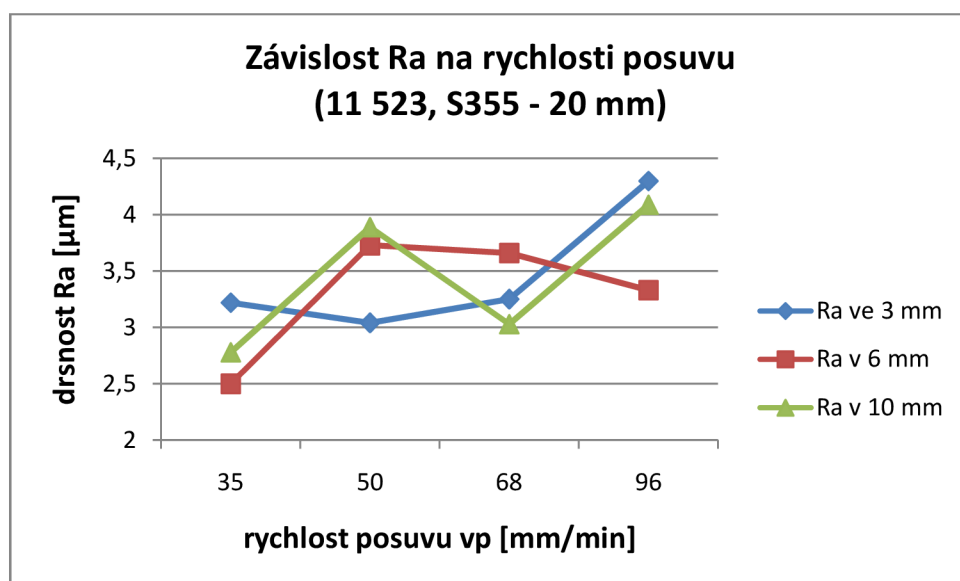
Tab. 3.43 Naměřené hodnoty drsnosti povrchů (17240) Mahr Perthometer M2

	Hloubka měření					
	3mm	6mm	10mm	3mm	6mm	10mm
17240 tl. 10	vp=90 mm/min			vp=120 mm/min		
Ra [μm]	3,12	3,22	-	4,12	4,18	-
Rz [μm]	18,5	21,3	-	24,8	22,5	-
17240 tl. 10	vp=150 mm/min			vp=180 mm/min		
Ra [μm]	3,8	4,47	-	3,77	3,95	-
Rz [μm]	23,4	25	-	23,2	24,6	-

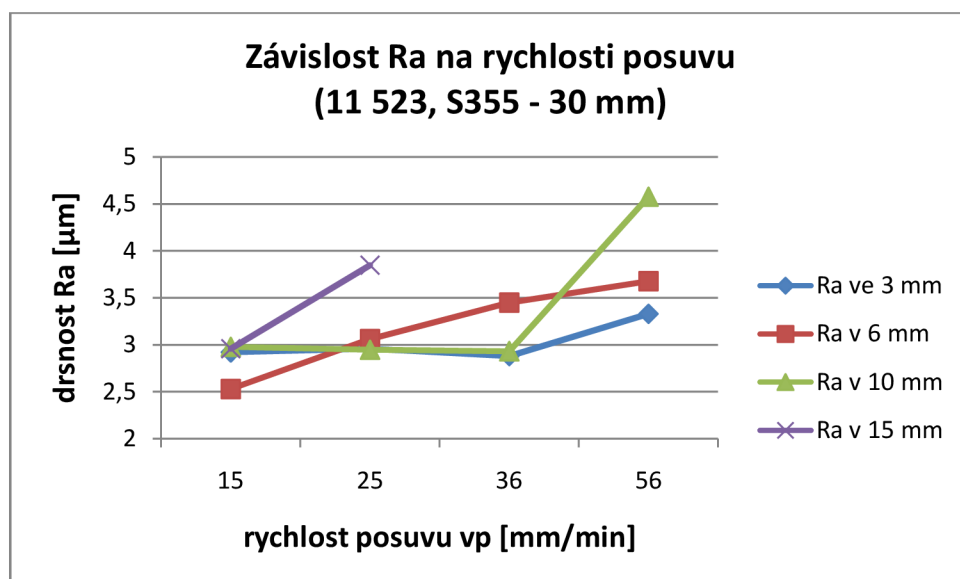
Obr. 3.43a Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 10 mm)Obr. 3.43b Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 20 mm)

Obr. 3.43c Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 30 mm)

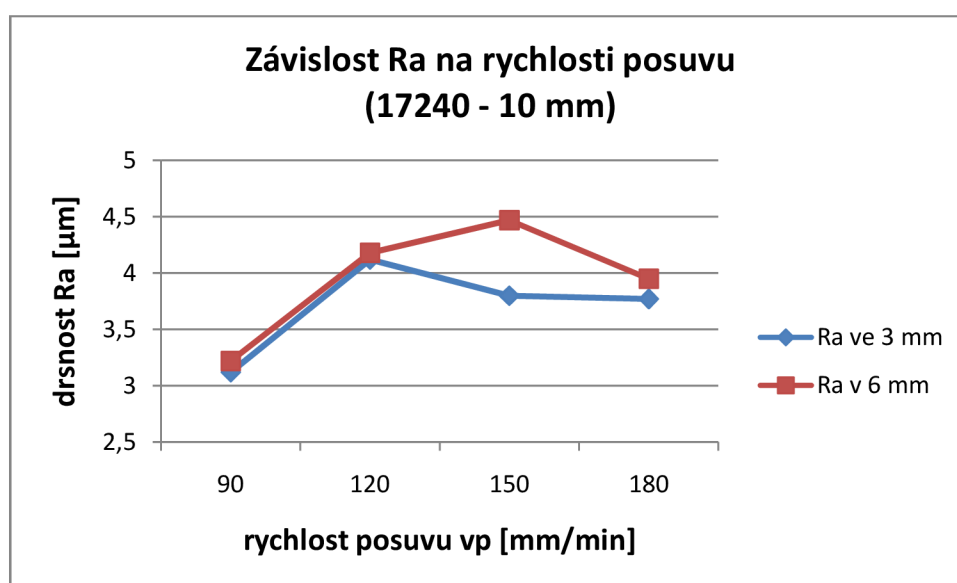
Obr. 3.43d Závislost Ra na rychlosti posuvu (11 523, S355 - 10 mm)



Obr. 3.43e Závislost Ra na rychlosti posuvu (11 523, S355 - 20 mm)



Obr. 3.43f Závislost Ra na rychlosti posuvu (11 523, S355 - 30 mm)



Obr. 3.43g Závislost Ra na rychlosti posuvu (17 240 - 10 mm)

Hodnoty, naměřené přístrojem Mahr Perthometer M2, nabývají v některých intervalech poněkud odlišných velikostí, oproti předpokládaným. Jak je uvedeno ve spoustě odborné literatury a taktéž i v předcházejícím textu této práce, je prokázán vznik dvou oblastí – horní, kvalitní oblast řezu a výstupní, méně kvalitní oblast řezu. Směrem od vstupu až po výstup paprsku z místa řezu se tedy kvalita řezu postupně zhoršuje. S tímto souvisí i předpokládané a naměřené hodnoty. U hodnot, naměřených měřidlem Mahr Perthometer M2, tento předpoklad nebyl potvrzen, jak je patrné z uvedených hodnot a grafů. Naměřené hodnoty ve hloubce 3 mm jsou mnohdy horší, než hodnoty naměřené v hloubce 10 mm a očividně někde v měření vznikala chyba. Povrchy horších kvalit (R_a větší jak $15 \mu\text{m}$) nebyly měřeny, a to z důvodu potenciálně možného porušení měřícího zařízení.

Vzniklá chyba nebyla způsobena vadou přístroje. Chyba se v měření projevovala vlivem kopírování diamantového hrotu po “zvlnění” a větších nerovnostech, které vznikly na povrchu při dělení jako stopy po vodním paprsku. Přístroj Mahr Perthometer M2 není schopen zaznamenat a vyhodnotit toto “zvlnění” a pouze jej kopíruje. Přitom současně měří kvalitu povrchu (R_a a R_z), ale bez akceptování tohoto “zvlnění” a větších nerovností. Stručně řečeno, přístroj měří drsnost povrchu (R_a i R_z), ale přitom kopíruje větší nerovnosti bez záznamu těchto větších nerovností a toto není vhodné brát jako regulérní a vypovídající výstup z měření. Výstup z měření přístrojem Mahr Perthometer M2 je tedy zkreslený a podstatně nepřesný.

Při druhém měření vzorků byly zaznamenány hodnoty již podstatně věrohodnější a přesnější. Pro měření bylo tentokrát použito měřící zařízení pod označením Talysurf Intra 50 (obr. 3.44) s připojením a výstupem dat na počítači. Přístroj Talysurf Intra 50 je schopen měřit na délce od 0,1 mm do 50 mm s datovou roztečí $0,5 \mu\text{m}$. Délka raménka s kuželovým diamantovým snímacím hrotem byla 60 mm. Měření struktury povrchu s hodnotami R_a od 2 do $10 \mu\text{m}$ se provádělo na délce 15 mm. U drsností povrchů větších jak $10 \mu\text{m}$

se délka měření zvětšila na 48 mm, dle norem ČSN EN ISO 4288. Tento přístup k měření struktury povrchu zaručil co možná největší přesnost získaných dat.



Obr. 3.44 Měření struktury povrchu přístrojem Talysurf Intra 50

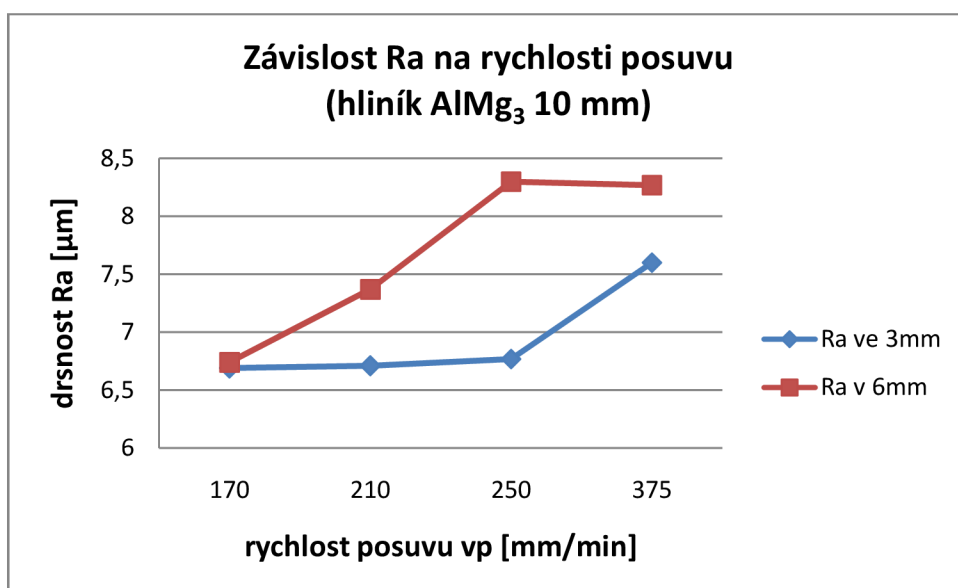
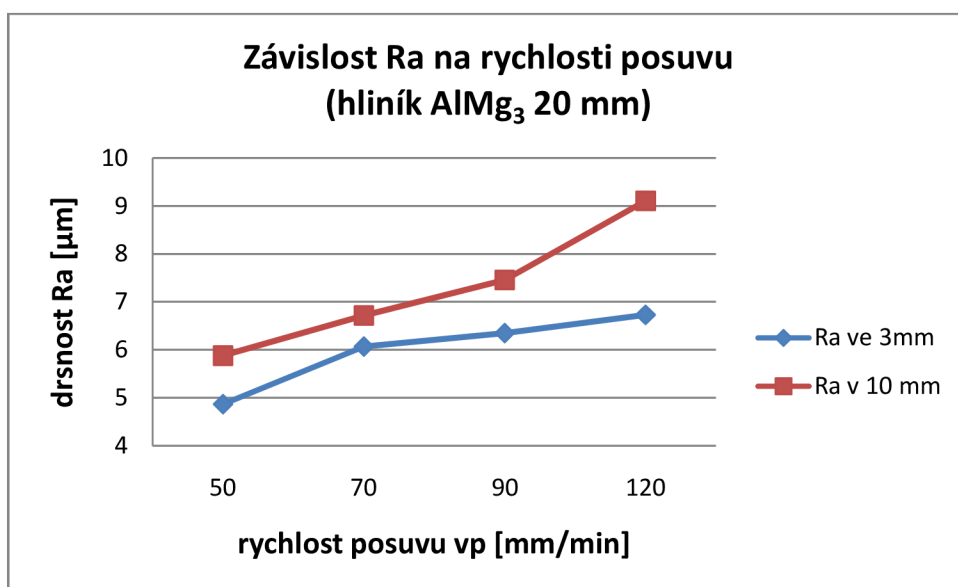
Pro porovnání naměřených hodnot z přístroje Mahr Perthometer M2 a hodnot z přístroje Talysurf Intra 50 bylo naměřených dat z druhého přístroje jen určité množství (nebyly proměřeny všechny hloubky vzorku, jako u prvního měření). Měřila se především horní oblast vzorku (3 mm pod povrchem) a střední část (dle tloušťky vzorku). Měření jednotlivých úseků daných vrstev bylo realizováno tak, aby ležely vždy dané dva úseky pod sebou. Tímto předpokladem se zaručí co možná největší objektivnost a přesnost měření. V tabulce 3.44 a 3.45 jsou uvedeny naměřené hodnoty z druhého měření přístrojem Talysurf Intra 50. Grafické vyhodnocení daných hodnot z tabulky 3.44 a 3.45 je zaneseno v grafech na obr. 3.45a až 3.45e.

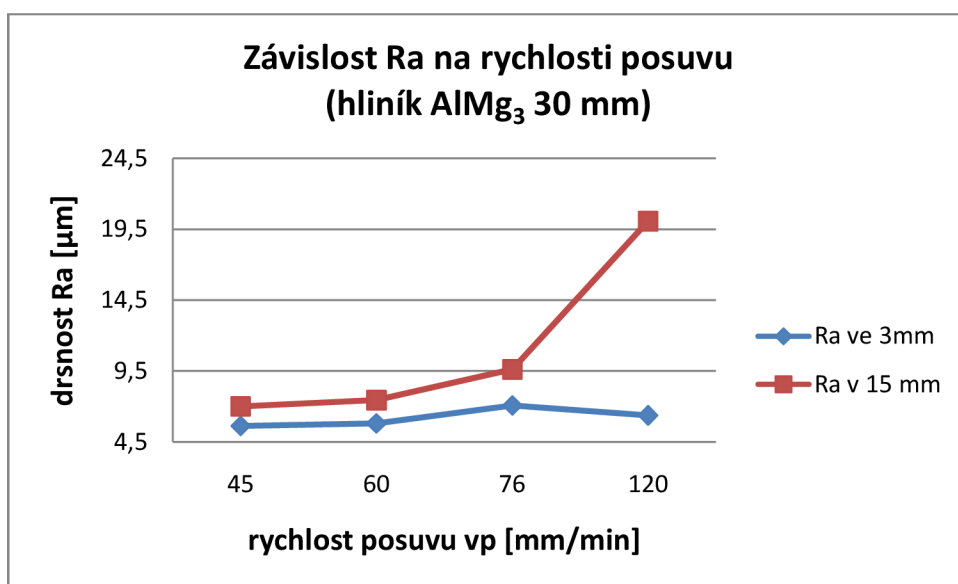
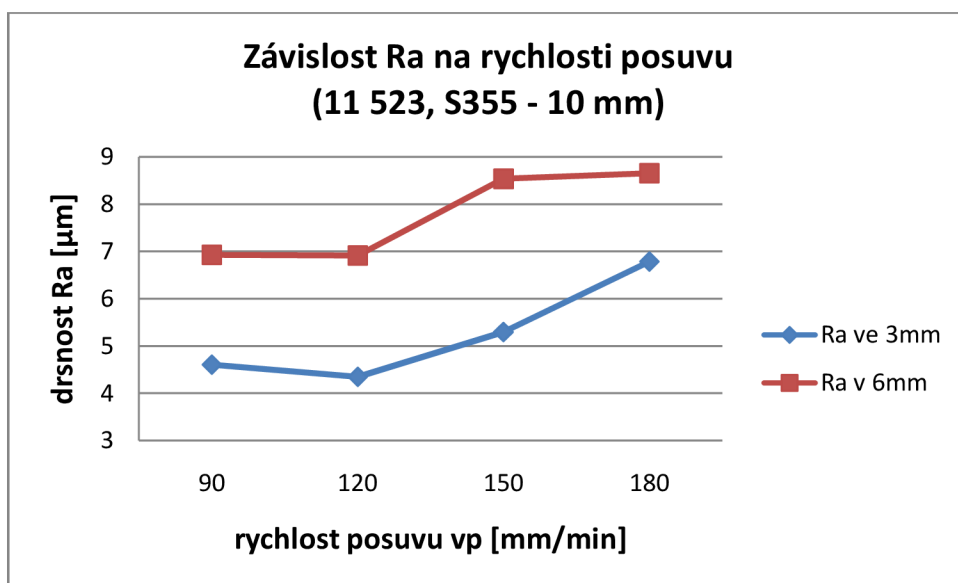
Tab. 3.44 Naměřené hodnoty drsnosti povrchů (hliník AlMg₃) přístrojem Talysurf Intra 50

	hloubka měření							
	3mm	6mm	10mm	15mm	3mm	6mm	10mm	15mm
hliník	vp=170 mm/min				vp=210 mm/min			
tl.10 Ra [μm]	6,69	6,74	-	-	6,71	7,37	-	-
Rz [μm]	46,23	44,36	-	-	45,48	47,94	-	-
hliník	vp=250 mm/min				vp=375 mm/min			
tl.10 Ra [μm]	6,77	8,3	-	-	7,6	8,27	-	-
Rz [μm]	45,96	52,11	-	-	50,33	54,91	-	-
hliník	vp=50 mm/min				vp=70 mm/min			
tl.20 Ra [μm]	4,87	-	5,88	-	6,07	-	6,72	-
Rz [μm]	36,15	-	43,72	-	43,62	-	44,89	-
hliník	vp=90 mm/min				vp=120 mm/min			
tl.20 Ra [μm]	6,35	-	7,46	-	6,73	-	9,11	-
Rz [μm]	42,04	-	46,06	-	42,68	-	60,75	-
hliník	vp=45 mm/min				vp=60 mm/min			
tl.30 Ra [μm]	5,64	-	-	7,02	5,82	-	-	7,46
Rz [μm]	38,59	-	-	44,87	38,06	-	-	46,53
hliník	vp=76 mm/min				vp=120 mm/min			
tl.30 Ra [μm]	7,09	-	-	9,63	6,38	-	-	20,08
Rz [μm]	47,08	-	-	54,78	43,74	-	-	101,3

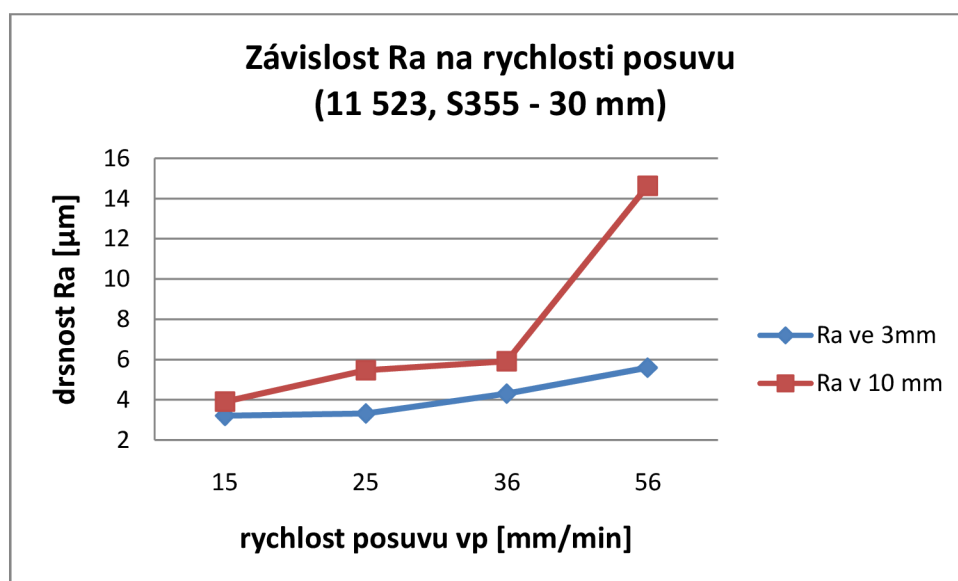
Tab. 3.45 Naměřené hodnoty drsnosti povrchů (11 523) přístrojem Talysurf Intra 50

	hloubka měření							
	3mm	6mm	10mm	15mm	3mm	6mm	10mm	15mm
11 523	vp=90 mm/min				vp=120 mm/min			
tl.10 Ra [μm]	4,61	6,93	-	-	4,35	6,92	-	-
Rz [μm]	32,88	42,56	-	-	33,16	42,57	-	-
11 523	vp=150 mm/min				vp=180 mm/min			
tl.10 Ra [μm]	5,3	8,54	-	-	6,79	8,66	-	-
Rz [μm]	35,13	47,94	-	-	40,62	49,84	-	-
11 523	vp=150 mm/min				vp=25 mm/min			
tl.30 Ra [μm]	3,21	-	3,92	-	3,33	-	5,48	-
Rz [μm]	21,4	-	28,81	-	23,49	-	36,75	-
11 523	vp=36 mm/min				vp=56 mm/min			
tl.30 Ra [μm]	4,31	-	5,92	-	5,6	-	14,64	-
Rz [μm]	29,51	-	35,63	-	37,02	-	80,02	-

Obr. 3.45a Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 10 mm)Obr. 3.45b Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 20 mm)

Obr. 3.45c Závislost Ra na rychlosti posuvu (hliník AlMg₃ 30 mm)

Obr. 3.45d Závislost Ra na rychlosti posuvu (11 523, S355 - 10 mm)



Obr. 3.45e Závislost Ra na rychlosti posuvu (11 523, S355 - 30 mm)

Zhodnocení experimentu:

Při měření a zjišťování výsledné kvality povrchu po opracování vzorků abrazivním vodním paprskem bylo použito dvou měřidel. Toto rozhodnutí jsem volil kvůli pochybnostem naměřených hodnot z prvního měření. Jak se dále prokázalo, první měření bylo opravdu značně nepřesné, a to z důvodu nevhodné volby měřicího přístroje. Opětovné měření vhodnějším přístrojem Talysurf Intra 50 prokázalo značné rozdíly jak je patrné z naměřených hodnot, tak i z grafů. Z těchto dat je patrné na první pohled, že se zvětšující se hloubkou měřené vrstvy klesá kvalita povrchu vzorku a se zvětšující se rychlostí posuvu v_p , taktéž klesá kvalita povrchu. Tento výsledek se dá již považovat za korektní a je v souladu jak s předpoklady, tak i s teorií.

Pro doplnění a ukázkou jsou v příloze 3 a 4 uvedeny zaznamenané hodnoty (číselné i grafické) prvního (na délce 15 mm) a posledního (na délce 45 mm) měření vzorků přístrojem Talysurf Intra 50.

Při řezání vodním paprskem je nezbytné správně a optimálně volit posuvovou rychlost paprsku, zejména z důvodu výsledné kvality povrchu a ekonomického hlediska.

4. VÝVOJOVÉ SMĚRY KONCEPCE TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Téměř každá technologie prochází procesem zdokonalování a inovování za účelem zkvalitnění výroby, zvýšení produktivity či zefektivnění produkce výroby obecně. U strojů, jejichž chod je řízen téměř výhradně výpočetní technikou je pokrok v posledních letech patrný asi nejvíc. Stroje, pracující s vysokotlakým vodním paprskem (určené pro dělení materiálů) jsou taktéž podrobovány neustálé inovaci. Nejen samotné stroje, ale taktéž i veškeré příslušenství je znovu a znovu zdokonalováno. Následující text rozebere a popíše některé novinky z této problematiky, které zaznamenaly v posledních letech razantní změny z pohledu vývoje.

4.1 Technologie Dynamic Waterjet

Jak již bylo řečeno v odstavci 1.3.5 je technologie DWJ na velmi vysoké úrovni vyspělosti. Vysoká přesnost a vysoká produktivita jsou často kladené požadavky na výrobu a technologie DWJ je spolehlivě dokáže pokrýt.

Přesnost polohování IFB (Integrated Flying Bridge) stroje při $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $\pm 0,08\text{ mm}$. Přesnost opakovaného polohování je $\pm 0,05\text{ mm}$. Zdvih v ose Z je do 200 mm. Rychlost posuvu řezání je max. do 7,6 m/min a rychloposuv max. do 12,5 m/min dle typu stroje. Velikosti řezacích stolů jsou vyráběny ve více variantách. Např. 7,2 x 2 m; 3,6 x 2 m, nebo 2,4 x 1,2m dle typu stroje.[27]

Přesnost polohování WMC (Waterjet Machining Center) stroje při $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $\pm 0,08\text{ mm}$. Přesnost opakovaného polohování je $\pm 0,025\text{ mm}$. Zdvih v ose Z je do 200 mm. Rychlost posuvu řezání je max. do 25 m/min a rychloposuv max. do 35 m/min dle typu stroje. U technologie WMC jsou rozsahy řezání pro osu X (most) 2m, 3 m, a 4 m a pro osu Y až do 6 m.[27]

Obr. 4.11 ukazuje rozdílnou konstrukci strojů IFB a WMC od společnosti Flow.



Obr. 4.11 IFB stroj a WMC stroj od firmy Flow [27]

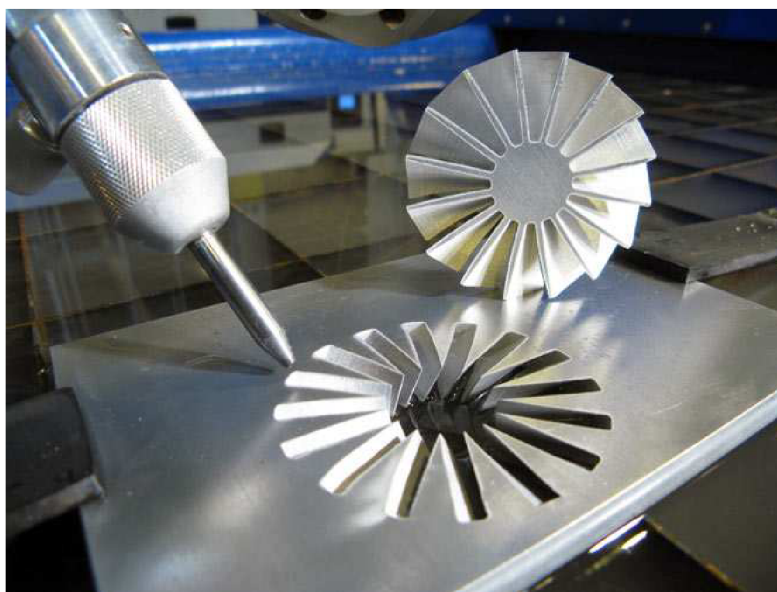
Výhody:

- rychlost řezání je o 25 – 400% vyšší oproti klasickým metodám vodního paprsku,
- snížení skutečných nákladů na jeden díl až o 75%,
- špičková rozměrová a tvarová přesnost,
- eliminuje chyby úkosu řezné hrany,
- eliminuje chyby geometrie vnitřních rohů,
- minimalizuje další potřebné opracování řezaných dílů,

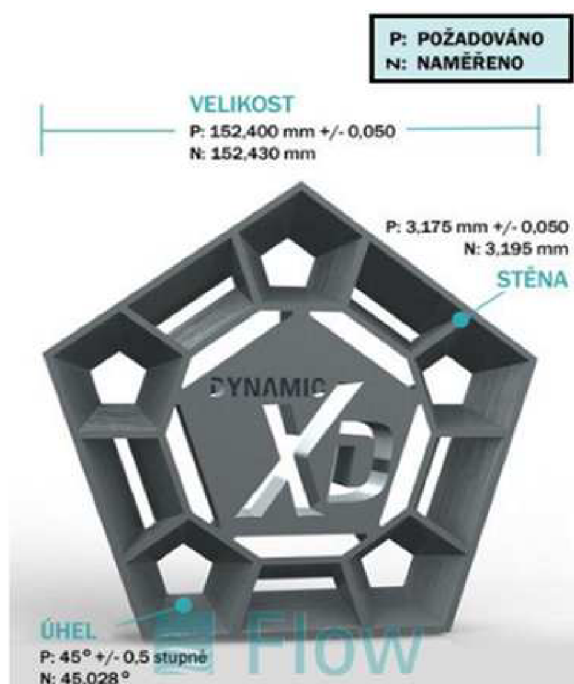
- velmi jednoduché ovládání.

4.2 Technologie Dynamic Waterjet XD

Mechanismus řezací hlavice této technologie umožňuje naklonění řezné hlavy až do hodnoty 60° a to současně s nejvyšší přesností a rychlostí. O přesnost řezu se stará opět unikátní matematický model, který vyhodnocuje danou polohu řezací hlavice. Na obr. 4.21 je zobrazena nakloněná řezná hlavice při výrobě dané součásti. Obr. 4.22 ukazuje zhotovený dílec technologií Dynamic Waterjet XD s požadovanými a naměřenými hodnotami. Jak je vidět z uvedených hodnot, tak přesnost výroby je opravdu vysoká.



Obr. 4.21 Ukázka možností DWJ XD technologie [23]



Obr. 4.22 Zhotovený dílec technologií DWJXD [5]

4.3 Hyper tlak

Větší tlak při řezání vodou znamená vyšší rychlost proudění kapaliny s abrazivním pískem, zmenšení průměru paprsku, který je koncentrovanější a tím i efektivnější. Celkové náklady na řezání klesají a produktivita naopak roste. Dnešní nejnovější multiplikátory (od firmy KTM) jsou schopné dosáhnout tlaku vody až na hranici 700 MPa. Přitom standardní a velmi často používané hodnoty tlaků kapaliny jsou kolem 400 MPa (tíle typu stroje). Podívejme se na rychlosti řezání vodním paprskem o tlaku 689 MPa (100 000 psi) a tlaku 413 MPa (60 000 psi). Rozdíly jsou dobře měřitelné a patrné na první pohled (viz. tabulka 4.31 a následný obr. 4.31). Pro představu, paprsek o tlaku 413 MPa (60 000 psi) urychluje vodní paprsek až na hodnoty 1000 m/s. [25, 27]

Vývoj tlakových čerpadel určených pro řezání vodním paprskem začal již v roce 1985, kdy dosahované tlaky nabývaly hodnot okolo 2000 barů. Postupně se tlak zvyšoval takto: v roce 1986 na hodnoty okolo 2500 barů, v roce 1987 - 3000 barů, 1989 - 4000 barů, 2006 - 6000 barů, až na dnešní nejvyšší hodnoty atakující 100000 barů.[27]

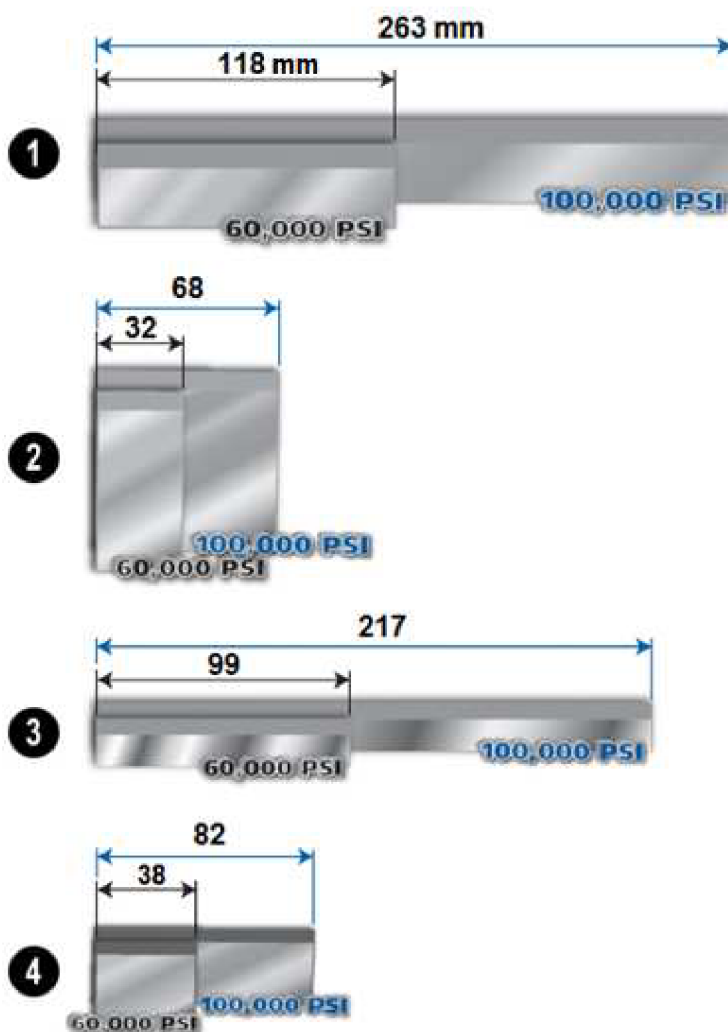


Obr. 4.30 Srovnání produktivity dle použitého řezného tlaku při různých posuvech (20 – 100%)

Značný pokrok je také patrný a nezbytný i u vnitřních dílů multiplikátoru. U takto vysokých tlaků musí tyto díly dobře odolávat obrovskému zatížení při chodu stroje a musí zaručit bezporuchový chod po určitou minimální dobu životnosti.

Tab. 4.31 Srovnání rychlostí řezání vod. paprskem odlišnými tlaky [25]

	materiál	tloušťka [mm]	tlak [MPa]	abrazivo [kg/min]	rychlost [mm/min]
1.	Hliník	25,4	689	0,454	263
	Hliník	25,4	413	0,34	118
2.	Hliník	63,5	689	0,454	68
	Hliník	63,5	413	0,34	32
3.	Nerez. ocel	12,7	689	0,454	217
	Nerez. ocel	12,7	413	0,34	99
4.	A36 ocel (S235JR)	25,4	689	0,454	82
	A36 ocel (S235JR)	25,4	413	0,34	38



Obr. 4.31 Srovnání produktivity řezání dle použitého tlaku na různých materiálech dle tab. 4.31[25]

4.4 3D Řezání robotickou rukou

3D řezání se dělí na dvě podskupiny:

- řezací stoly s řízenými osami X (vpřed/vzad), Y (vlevo/vpravo) a Z (nahoru/dolů),
- 5-ti osý systém robotické paže s řezací hlavou.

Do skupiny řezacích stolů s řízenými osami X,Y,Z se řadí např. technologie Dynamic WaterJet. Touto metodou je možné řezat polotovary plochých deskovitých tvarů. Členité a geometricky náročnější obrobky touto metodou není možné řezat. Pro členité obrobky se používá druhý způsob dělení - 5-ti osý systém robotické ruky. Přívod vysokotlaké kapaliny musí být navržen tak, aby poměrně složitá kinematika pohybu ramene neporušovala přívodního potrubí.



Obr. 4.41 Příklad robotické ruky s řezací hlavou na konci [26]

Bezpečnostní opatření musí být pro 3D řezání robotickou rukou obzvláště vysoké. Okolní prostor robotické ruky musí být zabezpečen především proti vniknutí osob do prostoru řezání.

4.5 Příslušenství

Široká škála nejrůznějšího příslušenství může být součástí zařízení pro vysokotlaké dělení vodním paprskem. Toto příslušenství slouží např. pro zjednodušení obsluhy, zvýšení produktivity výroby, atd. Příklady příslušenství budou uvedeny od firmy Flow, která se zabývá touto technologií velmi intenzivně.

4.5.1 Řezací hlava PASER ECL Plus

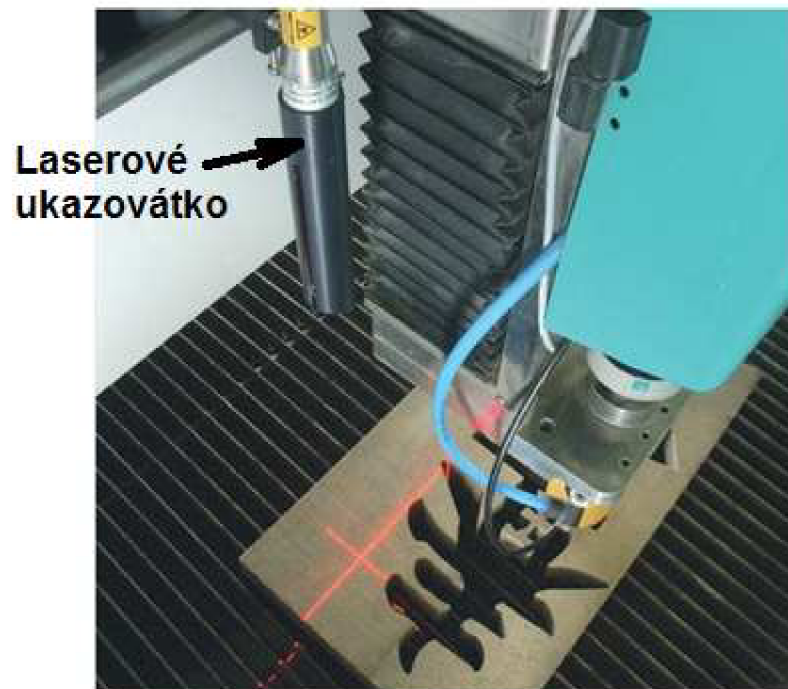
Tato speciální řezná hlavice je vyrobena ve velmi přesných tolerancích, což umožňuje vytvořit velmi přesný a především koherentní (soustředěný) paprsek. Vlivem přesnosti zhotovení této hlavice je paprsek až o 30% koncentrický a může tak snadněji prorazit řezaný materiál a to i poměrně křehké materiály jako jsou např. sklo, keramika, kompozity apod. bez jiného porušení. Navíc nedochází k rychlému opotřebenosti samotné řezné hlavice díky své konstrukci a přesnosti. Mixážní komora je navržena tak, aby bylo strhávání abraziva co možná neoptimálnější a nedocházelo k turbulenci uvnitř komory. Ochranný kroužek na obr. 4.51 zabraňuje znečištění hlavice od zpětně odražených částic z místa řezu a taktéž zabraňuje i znečištění celého okolí.[5,20]



Obr. 4.51 Řezací hlava PASER ECL Plus [20]

4.5.2 Laserové pravítko

Pro nastavení nulové (výchozí) pozice pro řezání slouží laser umístěný na řezací hlavě. Ručním posuvem dojde obsluha řeznou hlavicí s laserem na požadované místo a poté uloží tuto pozici jako výchozí. Celkem lze takto navolit a uložit až 10 pozic (dle typu stroje a softwaru). Při zahájení řezání stroj automaticky najede na zvolený bod. Laserové ukazovátko takto snižuje čas potřebný k nastavení.[19,5]



Obr. 4.52 Laserové ukazovátko [5]

4.5.3 Výškové čidlo

Pro zaručení konstantní stand - off vzdálenosti (vzdálenost mezi tryskou a materiálem) slouží výškové čidlo. Umožňuje automatické najetí řezné hlavy na předdefinovanou vzdálenost od materiálu.[19]



Obr. 4.53 Výškové čidlo [5]

4.5.4 Dynamické řízení vzdálenosti stand - off

Toto příslušenství napomáhá v řezání materiálů, které mají nerovný terén (např. prohnuté či jinak zakřivené materiály). Povrch materiálu je snímán třemi navzájem nezávislými senzory v jakémkoli směru řezání. Jakmile sensor zjistí jinou, než optimální vzdálenost trysky od materiálu, systém upraví vzdálenost v z-ose. Díky této dynamické kontrole vzdálenosti stand – off jsou po celou dobu řezání zaručeny optimální řezné podmínky.[5]

4.5.5 Kolizní senzor

Kolizní systém zabraňuje střetu řezací hlavičky s případnými překážkami. Elektricky vodivý prsteneц zobrazený na obr. 4.55 je nasunut na řezné hlavě. Senzor je propojen s řídicím systémem, který vyhodnocuje danou situaci. Dojde-li ke střetu prstence s překážkou, systém okamžitě zareaguje a vypne veškeré posuvy a vodní paprsek.[5]



Obr. 4.55 Kolizní senzor [5]

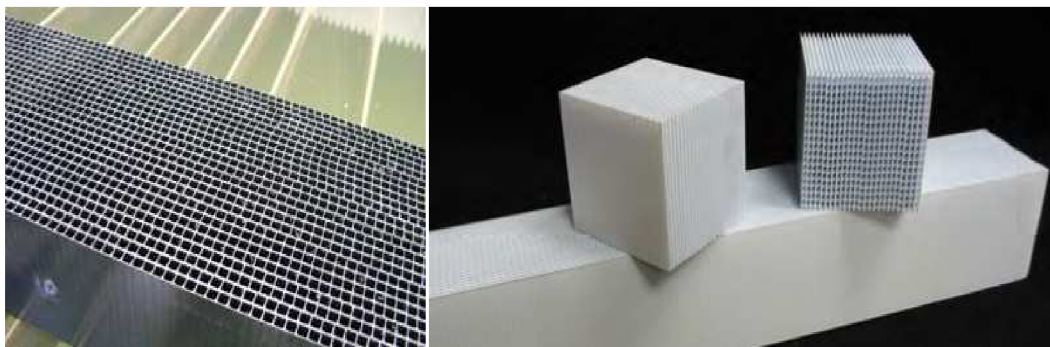
4.5.6 Vrtací pomůcka UltraPierce

Vrtací pomůcka UltraPierce od firmy Flow, otevírá nové možnosti při vrtání děr i do křehkých nebo laminátových materiálů (např. keramika, kámen, sklo, kompozitní materiály, aj.). Mechanické předvrtání u většiny materiálů zcela odpadá.[30]

Princip této pomůcky spočívá v okamžitém přivádění abraziva do vodního paprsku, ihned při prvotním průchodu kapaliny vodní tryskou.

4.5.7 Podkladové rošty

Podkladové rošty jsou určeny především pro řezání velmi malých, nebo tenkých dílců. Díky podkladovým roštům vyrobených z polyethylenu či polypropylenu nedochází ke smáčení nasákavých povrchů řezaného materiálu. Taktéž napomáhají dobrému odvodu vody a zabraňují nadměrnému rozstříku kapaliny do okolí. Obr. 4.57 ukazuje příklad podkladové kostky.[22]



Obr. 4.57 Podkladový rošt [21,22]

4.5.8 Abrazivní odkalovací systém

Pro snadné čištění použité vody v záchytné nádrži je využíváno systému, pracujícího na principu Venturiho efektu. Oddělený abrazivní písek a kal je ukládán do kontejneru mimo záchytnou nádrž. Na obr. 4.58 je představen příklad odkalovacího systému.[25]



Obr. 4.58 Odkalovací systém [25]

5. TECHNICKO EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Technologie vodního paprsku zaznamenává v několika posledních letech velmi podstatný rozvoj a prosazuje se stále v širších a širších oblastech použití (od potravinářského průmyslu, až po letecký průmysl). Kombinací nových, dynamicky se rozvíjejících technologií, nových velmi specifických materiálů (použitých při konstrukci strojů) a nových poznatků této technologie napomáhá dosahovat stále lepších a přesnějších výsledků technologie vodního paprsku. Dosahovaná kvalita a přesnost po opracování vodním paprskem je na takové úrovni, že mnohdy odpadají další technologické operace, které obvykle následují po konvenčních metodách výroby.

To, že se stále více firem věnuje technologii vodního paprsku, potvrzuje rozvoj této nekonvenční metody. Velmi mnoho stávajících, osvědčených firem musí konkurovat nově vznikajícím, což je v konečném důsledku výhodou pro zákazníka.

Technologie vodního paprsku je poměrně drahá záležitost jak z pohledu ceny samotného stroje, tak i z pohledu provozních nákladů.

Prvotní pořizovací náklady na provozovnu řezání vodním paprskem jsou nemalé. Cena stroje (dle typu, velikosti, výkonu, technologie, příslušenství, atd.) se pohybuje standardně okolo 3 000 000 – 4 000 000 Kč. Novější technologie DWJ je cenově poněkud nákladnější. Pořizovací cena standardního DWJ stroje (Mach3 - 3020b – 3m x 2m, čerpadlo 4150 barů, 50HP) se pohybuje okolo 5 000 000 Kč (u firmy FLOW). To, zda pořídit klasický levnější stroj, nebo dražší stroj, který je mnohdy výkonnější, produktivnější a s většími možnostmi řezání, závisí především na odpovídající práci, kterou by tento měl vykonávat. Kupující by měl najít rovnováhu a optimální variantu, mezi cenou stroje, schopnostmi stroje pro výrobu, na kterou má být stroj určen a také na produktivitu stroje.[32]

Další příslušenství, bez kterého by se výroba podstatně zkomplikovala, opět vyžaduje nezanedbatelné náklady. Samotný provoz je taktéž finančně poměrně náročný. Dnešní doba bere v potaz samozřejmě i důležité ekologické hledisko výroby. V této technologii je ekologie (ekologická zátěž) zmíněna především z jednoho důvodu, a to kvůli ekologické likvidaci již použitého abrazivního písku a s tím i související poplatky za likvidaci. Každý takovýto poplatek se ve finálním výsledku promítne do výsledné ceny výrobku. Z tohoto důvodu se mnoho firem tuto problematiku snaží úspěšně řešit opětovnou recyklací použitého abraziva a tím uspořit nemalé částky a být i více konkurenceschopnějšími. Například firma AQUAdem s.r.o. si dokázala zhotovit zařízení na recyklaci abraziva sama. Touto úpravou nyní dokáže uspořit nezanedbatelné náklady jak na nové abrazivo, tak i za daleko menší poplatky za ekologickou likvidaci již vyřazeného abrazivního písku. Mezi firmy, které se věnují profesionálně systému odkalování a recyklace, patří i firma PTV spol. s.r.o. Tato firma nabízí recyklační zařízení, které dokáže vytěžit opět znovupoužitelné abrazivo ve množství okolo 50 – 70% z již použitého. Cena tohoto zařízení je poměrně vysoká. Pohybuje se okolo 1 600 000 Kč (může se lišit v závislosti na typu). Je-li spotřeba abraziva nad určitou hranici (okolo 200 t/rok), potom se firmě vyplatí vložit náklady na pořízení a samotný provoz recyklačního zařízení. Za určitou dobu se vynaložené náklady vrátí a firma bude dále už jen šetřit na této položce.[31,9]

Určitou roli zaujímají i často měněné díly. Mezi tyto se řadí celá škála nejrůznějších těsnění (vysokotlaké a nízkotlaké), filtry, spojky, těsnící kroužky, díly na multiplikátoru, ventily atd. Poměrně často měněné díly jsou i v řezné hlavici. Dýzy či zaměřovací abrazivní trysky se intenzivně opotřebovávají (příklad opotřebení abrazivní trysky je zobrazen na obr. 2.22) a je třeba tyto důkladně kontrolovat. Dýzy zhotovené ze safíru či rubínu stojí cca 390 Kč a vydrží v provozu obvykle několik desítek hodin. Naproti tomu dýzy vyrobené z diamantu jsou sice dražší (cena 11590 Kč u firmy PTV), ale jsou schopny plnit funkci až 1000 hodin. Firma PTV nabízí novou diamantovou hlavu za cenu 18590 Kč. Výhodou této již sestavené hlavy je absolutní souosost paprsku a dlouhá životnost. Abrazivní tryska má životnost okolo 100 hodin a cena je cca 2590 Kč (od firmy PTV).[31]

Cena abraziva ve formě granátu se pohybuje u indického okolo 7000 Kč za tunu a u australského potom o 1000 až 1500 Kč více za tunu. Tuto cenu uvádí firma PKIT Praha s.r.o.

Průměrná cena provozu stroje se pohybuje na hranici 600 Kč/hod. Výsledná cena pro zákazníka se dále upravuje a odvíjí od počtu kusů, které požaduje vyrobit (množstevní sleva) a také na požadované kvalitě řezné plochy, tvarové složitosti součásti, tloušťce řezaného materiálu, současné ceně energie atd.

Cena jednoho metru řezu vodním paprskem 1mm tlustého plechu se pohybuje okolo 45 Kč/m (cenu uvádí firma WAPA). U 10 mm plechu se cena vyšplhá na cca 200 Kč/m (cenu uvádí firma WAPA). Výsledné ceny se opět mohou lišit podle druhu řezaných materiálů, požadované kvalitě povrchu, složitosti součásti, aktuální ceně energie atd.[34]

ZÁVĚR

Práce je zaměřena na rozbor nekonvenční technologie řezání abrazivním vodním paprskem, jak z hlediska možných technologií, tak i z hlediska přesnosti výroby. Rozdělení a charakterizování jednotlivých metod řezání, frézování, obrábění či gravírování vodním paprskem jsou popsány v úvodních kapitolách. Pro důkladné pochopení a porozumění této technologie byly v další části textu dopodrobna rozebrány a popsány veškeré části celého systému.

Spojení vyspělé technologie spolu s novými materiály a výpočetní technikou je ideální nástroj pro zdokonalování této velmi progresivní technologie. Materiály, které dobře odolávají abrazivnímu opotřebení, napomáhají k delší životnosti značně namáhaných dílů. Produktivita řezání nesporně souvisí s velikostí vytvořeného tlaku kapaliny. Pro tento účel slouží zmíněné speciální zařízení, jako jsou multiplikátory (násobiče) či triplexové plunžry. Tlak kapaliny se od roku 1985 (počátky zavedení technologie vodního paprsku) takřka ztrojnásobil na hodnoty atakující 100 000 psi (7000 barů) a zřejmě se nezastaví ani na těchto hodnotách. Tím, že se zvyšuje tlak vody v procesu řezání, rostou i požadavky na přesnost a odolnost dílů, použitých pro vysokotlaká čerpadla. Na druhou stranu roste produktivita práce, úspora abraziva a také i podstatná úspora času řezání.

Za pozornost určitě stojí zmínka DWJ metody, která je schopna vytvářet požadované díly ve velmi přesných tolerancích, díky implementovanému unikátnímu matematickému modelu do systému řezání. Matematický model okamžitě vyhodnocuje danou polohu paprsku vzhledem k požadované geometrii obrobku, a je-li to nutné, vydá impuls pro korekci, která se neprodleně provede. Řeznou hlavici u DWJ-XD lze navíc naklánět ve všech směrech a takto lze s výhodou provádět řezání takřka ve všech směrech.

Provedený experiment na vyhodnocení vlivu rychlosti posuvu abrazivního vodního paprsku a výsledné kvality řezné plochy byl realizován ve firmě AWAC s.r.o. v Brně. Vzorky z různých materiálů a jejich tloušťek (viz. samotný experiment) byly nařezány různými rychlostmi posuvů. Ostatní parametry zůstaly konstantní během celého procesu řezání. Poté se měřila dosažená drsnost povrchu v určitých hloubkách materiálu. Pro měření bylo použito dvou měřidel, a to z důvodu předpokládané nesrovnalosti a určité nepřesnosti při prvním měření. Druhé měření prokázalo, že kvalita povrchu po řezání vodním paprskem se s větší hloubkou prokazatelně zhoršuje a vyšší rychlosti posuvu taktéž ubírají na kvalitě řezu.

V ekonomickém zhodnocení je nastíněna cenová náročnost provozování této technologie. Veškeré ceny strojů i ceny jednotlivých dílů, které se poměrně značně opotřebovávají, a jejich výměna je poměrně častá, jsou uváděny podle aktuálních informací poskytnutých danými firmami.

Nekonvenční technologie abrazivního vodního paprsku se řadí mezi velmi progresivní metody řezání s mnoha výhodami oproti klasickým běžným metodám dělení materiálů. Nachází velmi všestranné uplatnění v mnoha oborech. Vývoj abrazivního vodního paprsku se neustále posouvá kupředu. Plnění stále vyšších cílů co se týče přesnosti, univerzálnosti či výsledné produktivity jsou rok od roku spolehlivě dosahovány za neustálého zdokonalování a inovování této technologie.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VALÍČEK, Jan a Sergej, HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vydání. Ostrava : ÁMOS Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
2. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I.*. 1. vydání. Ostrava : VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
3. HLA VATÝ, Ivo. VŠB – Technická univerzita Ostrava [online] [cit.2011-02-28]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>>
4. Eroze. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 6.1.2005, last modified on 9.1.2011 [cit. 2011-01-15]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Eroze>>
5. *Flow international Corporation* [online]. 2009 [cit. 2011-01-18]. Technologie řezání vodním paprskem. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem-26/>>
6. HSIEN-TA LIU. *Ultrahigh-pressure fluidjet technology* [online]. [cit. 2011-02-13]. Dostupné z WWW: <http://www.stereovisionengineering.net/UHP%20fluidjets_b.htm>
7. Odborné a vědecké články [online]. 2006 [cit. 2011-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.strojarstvo.sk/docwww/SK/255/255.pdf>>
8. MAŇKOVÁ, Ildíkó. *Progresívne technologie*. Košice: Technická univerzita Košice, Vienaľa, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
9. *PTV spol. s r.o.* Hostivice, [online]. 2006 [cit. 2011-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/cerpadla/index.html>>
10. *OH Precision Corporation* [online]. [cit. 2011-03-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.b2b-waterjet.com/>>
11. *WARD Jet* [online]. [cit. 2011-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>>
12. *WARD Jet* [online]. [cit. 2011-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.wardjet.com/01-waterjet-cutting-characteristics.html>>
13. PIŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 1. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-802-1440-258.
14. *CNC Machines International*, [online]. 2005 [cit. 2011-03-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.cncmi.net/plumbing.htm>>
15. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [cit. 2011-03-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvenčni-technologie-awj>>
16. *KMT Waterjet Systems*, [online]. 2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.kmtwaterjet.com/videos-photos.aspx>>
17. *LAVAP Water Cutting*, [online]. 2008 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.lavap.cz/?web=princip-deleni-vodnim-proudem>>
18. *Xinology*, [online]. 2011 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-Supplies-Consumables/glass-cutting/water-jet-cutting/overview/abrasive.html>>
19. *Flow Products* [online]. [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.sheetmetal.ie/waterjet.htm>>

20. *Flow Asia Corporation* [online]. 2007 [cit. 2011-03-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.flowasia.com/waterjet-products.cfm-id=135.htm>>
21. *Waterjet.org.pl* [online]. 2010 [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.waterjet.org.pl/maszyny.html>>
22. *United Automation* [online]. [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <http://www.automation-dfw.com/pdf_other/waterjetbricks.pdf>
23. *WaterJets.org* [online]. 2011 [cit. 2011-03-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.listings.waterjets.org/Listings/Equipment-manufacturers/>>
24. *Technical Solutions* [online]. 2007 [cit. 2011-03-29]. Dostupné z WWW: <http://www.technical-solutions.lv/water_jet_solutions_accessories_eng.html>
25. *KMT Waterjet Systems*, [online]. 2011 [cit. 2011-04-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.kmtwaterjet.com/pro-100k-cut-chart.aspx>>
26. *KMT Waterjet Systems*, [online]. 2011 [cit. 2011-04-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.kmtwaterjet.com/videos-photos.aspx>>
27. *Flow International Corporation* [online]. 2009 [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.flowcorp.cz/upload/File/Pdf/Cerpadla/highpressure_cz_01.pdf>
28. *Universal Minerals* [online]. 2008 [cit. 2011-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://www.universalminerals.com/garnet-abrasive-sharpjet.shtml>>
29. *KovoJuza* [online]. 2010 [cit. 2011-04-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.kovojuza.cz/vodni-paprsek.html>>
30. Flow corp – Inovativní řešení vodním paprskem - Prospekty firmy
31. Interní informace firmy PTV spol. s.r.o.
32. Interní informace firmy FLOW International Corporation
33. AWAC spol. s.r.o. [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=15&m4=0&id_clanku=51>
34. Interní informace firmy WAPA
35. *Flow international Corporation* [online]. 2009 [cit. 2011-04-19]. NOVINKY A TISKOVÉ ZPRÁVY. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/novinky-15/?aid=91&p=1>>
36. NASA [online]. 2010 [cit. 2011-04-22]. Dostupné z WWW: <http://www.nasa.gov/centers/langley/news/researchernews/rn_waterjet6.06.06.html>
37. *Paragon Steel Rule Dies, Inc.* [online]. 2008 [cit. 2011-04-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.paragonsrd.com/pages/waterjet.html>>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
ASJ		Abrasive Slurry Water Jet
AWJ		obrábění abrazivním paprskem
CNC		Computer Numerical Control
CAD		Computer Aided Design
DWJ		Dynamic Waterjet
EBM		obrábění elektronovým paprskem
EDM		elektroerozivní obrábění
IFC		Integrated Flying Bridge
IJM		Ice Jet Machining
KNB		kubický nitrid boru
LBM		obrábění laserem
MESH		jednotka zrnitosti
NC		Numerical Control
PAA		polyakrylamid
PBM		obrábění plazmou
PEO		polyetyloxid
USM		obrábění ultrazvukem
WJM		obrábění vodním paprskem
WMC		Water Machining Center
$Q_1 - Q_5$		označení jakosti povrchu pro vodní paprsek
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
vp	[mm/min]	rychlost posuvu řezné hlavy
Y_{ret}	[mm]	délka zpoždění řezné stopy
C_f	[-]	koeficient odporu stěny materiálu
C_k	[-]	koeficient charakteristické rychlosti
C_1	[-]	koeficient druhu řezaného materiálu
d_a	[m]	průměr zaostřovací trubice
m_a	[$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]	hmotnostní tok abraziva
ρ_p	[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	hustota abrazivního materiálu
v_p	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	rychlost posuvu řezné hlavy
v_e	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	kritická rychlost abrazivních částic
σ_{kl}	[MPa]	mez kluzu řezaného materiálu
α_0	[°]	úhel nárazu abrazivních částic
θ	[°]	nastavení úhlu řezání
SiO_2		oxid křemičitý
Al_2O_3		oxid hlinitý
Fe_2O_3		oxid železitý
TiO_2		oxid titaničitý
MnO		oxid manganatý
CaO		oxid vápenatý
MgO		oxid hořečnatý
dwg		DraWinG – formát souborů (výkresů) programu AutoCAD

dxf

Drawing Interchange Format - formát pro
popis tvaru dílu systému AutoCAD
(textová varianta)

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hodnoty rychlostí řezání pro vybrané druhy materiálů a jejich různé tloušťky pro tlak 6000 barů.
- Příloha 2 Hodnoty rychlostí řezání pro vybrané druhy materiálů a jejich různé tloušťky pro tlak 4100 barů.
- Příloha 3 Změřený profil vzorku – hliník AlMg₃ – tl. 10 mm – vp=170 mm/min v hloubce 3 mm
- Příloha 4 Změřený profil vzorku – 11523 – tl. 30 mm – vp=56 mm/min v hloubce 10 mm

Příloha 1

Hodnoty rychlostí řezání pro vybrané druhy materiálů a jejich různé tloušťky pro tlak 6000 barů.[30]

RYCHLOSTI ŘEZÁNÍ V MM/MIN

TLAK 6.000 BAR					
Materiál	Tloušťka materiálu				
	5 mm	10 mm	20 mm	50 mm	100 mm
Hliník	779 - 3.893	425 - 2.123	194 - 971	56 - 279	21 - 103
Chromniklové oceli	288 - 1.441	157 - 785	72 - 359	21 - 103	8 - 38
Titan	374 - 1.874	204 - 1.022	93 - 467	27 - 135	10 - 50
CFK (umělé hmoty zpevněné uhlíkem)	1.355 - 6.774	739 - 3.693	338 - 1.689	97 - 486	36 - 179
GFK (umělé hmoty zpevněné vláknou)	1.618 - 8.092	882 - 4.412	404 - 2.018	116 - 581	43 - 214
Sklo	1.494 - 7.469	815 - 4.073	372 - 1.862	107 - 536	40 - 198
Žula	1.378 - 6.891	751 - 3.757	344 - 1.718	99 - 495	36 - 182
Mramor	1.618 - 8.088	882 - 4.410	403 - 2.017	116 - 580	43 - 214

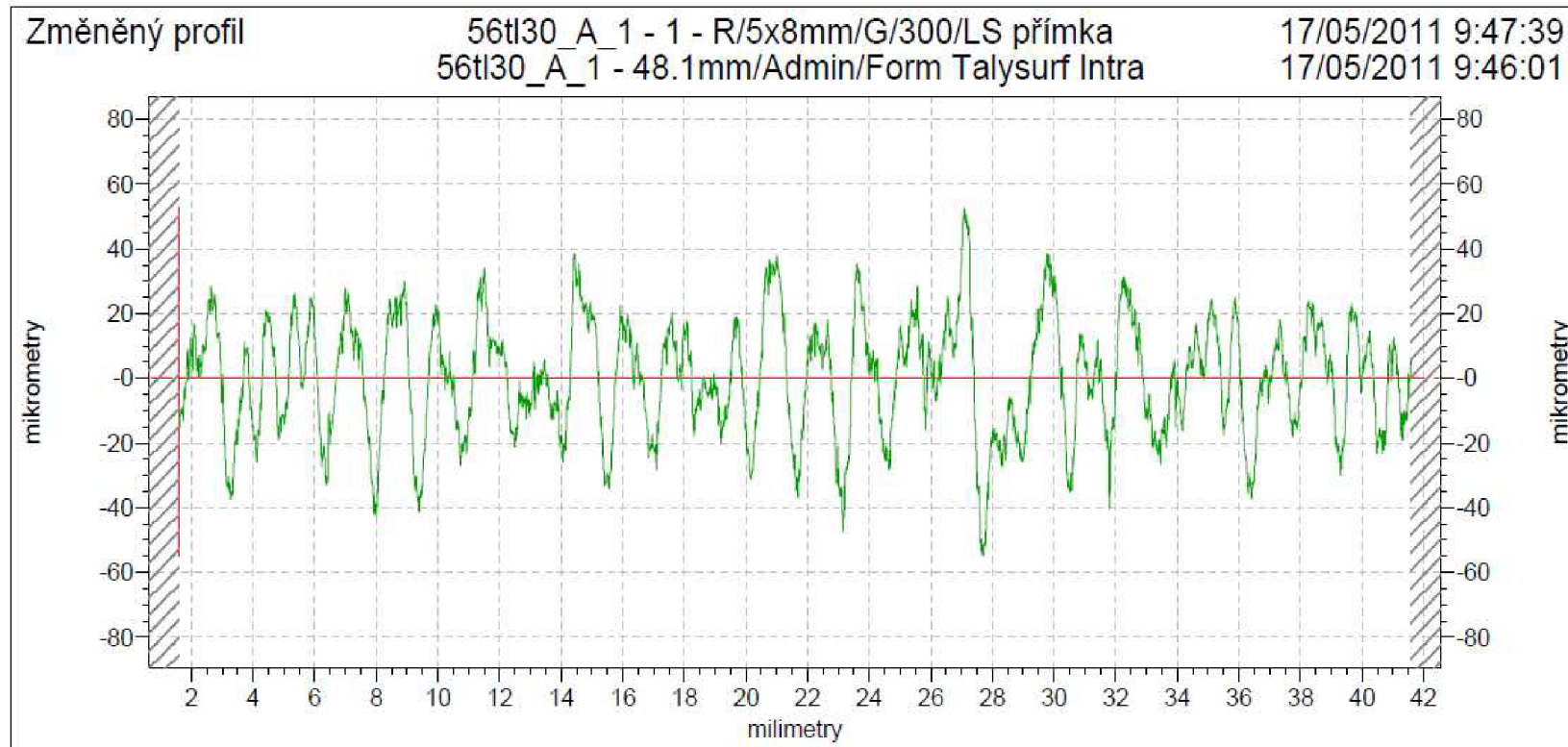
Příloha 2

Hodnoty rychlostí řezání pro vybrané druhy materiálů a jejich různé tloušťky pro tlak 4100 barů.[30]

RYCHLOSTI ŘEZÁNÍ V MM/MIN

Materiál	Pouška materiálu			
	5 mm	10 mm	20 mm	50 mm
Hliník	474 - 2.368	258 - 1.291	118 - 591	34 - 170
Chromniklové oceli	175 - 876	96 - 478	44 - 218	13 - 63
Titan	228 - 1.140	124 - 622	57 - 284	16 - 82
CFK (umělé hmoty zpevněné uhlíkem)	824 - 4.121	449 - 2.247	206 - 1.028	59 - 296
GFK (umělé hmoty zpevněné vlákny)	985 - 4.924	537 - 2.685	246 - 1.228	71 - 353
Sklo	909 - 4.545	496 - 2.478	227 - 1.133	65 - 326
Žula	839 - 4.193	457 - 2.286	209 - 1.045	60 - 301
Mramor	984 - 4.921	537 - 2.683	245 - 1.227	71 - 353

Uvedené údaje jsou teoretické údaje a mohou se od prakticky získaných výsledků mírně odlišovat. Nižší řezná rychlost představuje řez v nejvyšší kvalitě povrchu řezné hrany (20 % maximální řezné rychlosti). U vyšší řezné rychlosti se jedná o řez v kvalitě povrchu řezné hrany typické pro dělení materiálu.



Ra	14.6394	μm	Rq	17.8431	μm	Rz(JIS)	56.4832	μm						
Rsk	-0.1433		Rku	2.6532		R3z	55.0709	μm						
Rp	36.7548	μm	Rv	43.2622	μm	R3y	66.4233	μm						
RLo	40.9368	mm	Rt	107.4314	μm	Rz(DIN)	80.0170	μm						
Rlq	507.78	μm	Rdq	12.45	°	Rmr(c)	52.36	%	Výška (stř. hod.)	0.000	μm			
Rda	9.73	°	Rz	80.0170	μm	RHSC	40	výstupků	Výška (stř. hod.)	0.000	μm			
RS	241.09	μm	RSm	1324.77	μm	Rdc	107.4314	μm	mr 1%	0.0	%	mr 2%	100.0	%
Rln	40.0000	mm	Rc	52.2544	μm	Rmr	50.00	%	Offset	0.000	μm	mr %	50.00	%
						RVo	0.7833	objem	Offset	0.000	μm	mr %	50.00	%
						RPc	21.0	výst/cm	Výška (stř. hod.)	0.000	μm	šířka pásma	0.00	μm