



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VODNÍ PAPERSEK S 3D HLAVOU

WATER JET WITH 3D HEAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. HYNEK VLÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Hynek Vlček

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 kúšebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vodní paprsek s 3D hlavou

v anglickém jazyce:

Water jet with 3D head

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace technologie řezání 3D abrazivní řezací hlavou u technologie vodního paprsku.
Vyhodnocení nasazení technologie.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Teorie abrazivního vodního paprsku.

Technologické možnosti abrazivního vodního paprsku se 3D vybavením.

Vyhodnocení nasazení technologie z hlediska rozměrové a tvarové přesnosti součástí.

Vyhodnocení nasazení technologie z hlediska nákladů na provoz a nároků na údržbu.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonené metody obrábění. Skriptum FSI VUT. Praha : Vydavatelství VUT, 1989.

MA KOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálů okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Ji í Pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lú v praxi WJM. 1.vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mra ko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.

SN ISO 3207. Statistická interpretace údaj . Stanovení statistického toleran ního intervalu. Praha: eský normaliza ní institut, 1993, 30 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osi ka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven asovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brn , dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
editel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
D kan fakulty

ABSTRAKT

Téma diplomové práce je zaměřené na technologii vodního paprsku a na rozměrovou a tvarovou přesnost vyráběných dílů. V teoretické části je popsán princip technologie a současné využití ve strojírenském průmyslu. Kromě toho se teoretická část věnuje popisu jednotlivých dílů stroje, které jsou v současné době využívány. Z velké části se práce zabývá technologií 3D řezání a příslušenstvím pro eliminaci podřezu. Praktická část je zaměřena na rozměrovou a tvarovou přesnost součástí vyráběných technologií vodního paprsku za použití 3D hlavy při různých rychlostech řezu. V neposlední řadě jsou v práci rozebrány náklady na provoz a údržbu stroje. Z hlediska údržby je porovnávána skutečná životnost dílů s životností, kterou deklaruje výrobce stroje.

Klíčová slova

vodní paprsek, 3D hlava, rozměrová a tvarová přesnost, životnost dílů, abrazivo

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on waterjet technology, dimensional and shape accuracy of manufactured parts. In the theoretical section, the principle of technology and its use in engineering industry at the present time, are described. Moreover, the theoretical section includes description of every single parts of the machine of waterjet cutting, that are nowadays used. The biggest part of diploma thesis focuses on 3D cutting technology and on attachments for elimination of undercutting. Practical section focuses on dimensional and shape accuracy of manufactured parts manufactured by waterjet technology that makes use of 3D head and different cutting speed. The practical section also includes operating and maintenance cost of the machine. In terms of maintenance, real service life of components is compared there with a lifespan declared by machine producer.

Key words

Waterjet, 3D head, dimensional and shape accuracy, service life of components, abrasive

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VLČEK, Hynek. *Vodní paprsek s 3D hlavou*. Brno 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 79 s. 14 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vodní paprsky s 3D hlavou** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Hynek Vlček

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat zejména Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za odborné cenné rady a připomínky v průběhu zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Dušanovi Lukšovi a všem zaměstnancům firmy AWAC, spol. s r.o. za poskytnutí materiálů nezbytných pro zpracování diplomové práce.

Současně mé poděkování náleží Ing. Josefu Knoblochovi, MSc za pomoc při měření jednotlivých rozměrů a geometrických parametrů všech vzorků.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TEORIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU.....	10
1.1 Vývoj technologie řezání vodním paprskem.....	10
1.2 Princip řezání vysokoenergetickým vodním paprskem	11
1.3 Využívané technologie kapalinových paprsků.....	12
1.3.1 Řezání metodou čistého vodního paprsku	13
1.3.2 Řezání metodou abrazivního vodního paprsku.....	14
1.4 Obrábění vodním abrazivním paprskem	15
1.4.1 Soustružení metodou AWJ	16
1.4.2 Frézování metodou AWJ	16
1.4.3 Vrtání metodou AWJ	17
1.4.4 Gravírování pomocí AWJ.....	18
1.5 Konstrukční složení a řešení zařízení pro řezání vodním paprskem.....	19
1.5.1 Vysokotlaké čerpadlo	19
1.5.2 Filtrační jednotka	21
1.5.3 Vysokotlaký akumulátor.....	21
1.5.4 Potrubí na rozvod vody.....	21
1.5.5 Lapač vody.....	21
1.5.6 Řezací stůl.....	21
1.5.7 Tryska a řezací hlavice	22
1.6 Abrazivo.....	24
1.6.1 Granát.....	26
1.7 Model řezné zóny	26
1.8 Kvalita opracovaného povrchu při řezání vodním paprskem	29
1.8.1 Teplota v místě řezu.....	30
1.9 Chyby vzniklé při dělení vodním paprskem	30
1.9.1 Odchylka kolmosti.....	31
1.9.2 Zpoždování řezu a neúplný řez	32
2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU SE 3D VYBAVENÍM.....	34
2.1 Technologie Dynamic Waterjet	34

2.2	Technologie Dynamic Waterjet XD.....	35
2.3	Řezání za pomoci šestiosých robotů	36
2.4	Software pro řezání vodním paprskem	38
2.5	Technologie Hyperpressure	39
2.6	Příslušenství pro 3D řezání	40
2.6.1	Vakuový přípravek ULTRAPIERCE	40
2.6.2	Snímač a regulátor výšky.....	41
2.6.3	Laserové zaměřování polohy	41
2.6.4	Přídavný vodní paprsek	42
2.6.5	Kolizní senzor	43
3	VYHODNOCENÍ NASAZENÍ TECHNOLOGIE Z HLEDISKA ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ PŘESNOSTI	44
3.1	Rozbor vyráběných a měřených vzorků.....	44
3.2	Prostředí a popis výroby vzorků.	46
3.3	Prostředí a popis měření vzorků.....	49
3.4	Postup vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti měřených vzorků	53
3.4.1	Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 10 mm	55
3.4.2	Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 20 mm	56
3.4.3	Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 30 mm	58
3.4.4	Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 10 mm	59
3.4.5	Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 20 mm	61
3.4.6	Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 30 mm	62
3.5	Vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti měřených vzorků	63
4	VYHODNOCENÍ TECHNOLOGIE Z HLEDISKA NÁKLADŮ NA PROVOZ A NÁROKŮ NA ÚDRŽBU	65
4.1	Náklady na provoz	65
4.2	Náklady spotřebního materiálu	66
4.3	Náklady na preventivní údržbu	67
4.4	Celkové náklady na výrobu technologií vodního paprsku strojem Mach4.....	69
	DISKUZE	70
	ZÁVĚR	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

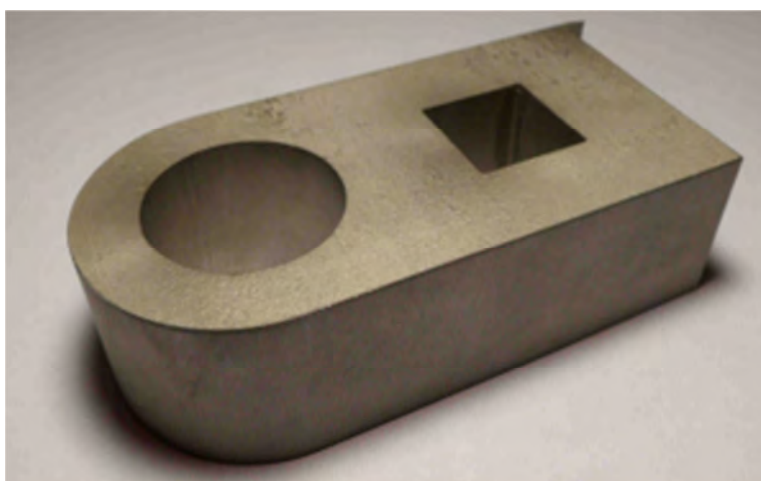
Voda je jednou ze základních složek naší planety, pokrývá přibližně 70 % procent zemského povrchu a její neuvěřitelná síla je známá již mnoho tisíciletí. Postupem času začal člověk tuto sílu využívat k vlastnímu prospěchu. V současné době se voda využívá téměř ve všech průmyslových odvětvích jako je například stavebnictví, lékařství, potravinářství, hornictví, energetika a v neposlední řadě i strojírenství.

Velký pokrok zaznamenalo využití vody v době, kdy byla objevena skutečnost, že přivedením vody o vysokém tlaku do dýzy o malém průměru získáme velké množství energie. Nejprve byla tato energie využívána pro důlní účely. Pokrok pokračoval a tlak vodního paprsku se začal využívat i pro čištění a úpravu povrchů různých materiálů. Se zvyšujícím se tlakem vody rostly i možnosti jejího použití až do 70 let minulého století, kdy se vodní paprsek začal komerčně využívat k řezání materiálu.

Obrábění a dělení materiálů technologií vodního paprsku zažívá v poslední době velký rozvoj. Díky dynamickému vývoji se snižují výrobní časy a se zvyšujícím se tlakem roste i rozměrová a tvarová přesnost v celé ploše řezu. Zásluhou moderních technologií klesají také náklady spojené s energiemi a abrazivem. Vzhledem k těmto skutečnostem již technologie vodního paprsku není výhradou pouze specializovaných firem, ale začíná se objevovat i v menších firmách, které jsou zaměřeny na jiný druh výroby a technologií vodního paprsku využívají spíše jako výrobu přidruženou.

Výše uvedené skutečnosti mě vedly k rozhodnutí řešit problematiku vodního paprsku. V práci je hodnocena rozměrová a tvarová přesnost, která patří společně s kvalitou řezného povrchu k nejvýznamnějším parametrům nekonvenčních technologií. V současné době se na technologii vodního paprsku pohlíží jako na technologii velmi náročnou z ekonomického hlediska. Z tohoto důvodu nebyla problematika technologie vodního paprsku řešena pouze po technické stránce, ale věnuje se také nákladům na provoz stroje a ekonomickou náročnost údržby.

Celá práce je psaná ve spolupráci s firmou AWAC, spol. s r.o., která se zabývá problematikou v oblasti dělení a řezání materiálů nekonvenčními technologiemi a především se specializuje na technologii hydroabrazivního paprsku.



Obr. 1 Vyrobený vzorek.

1 TEORIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Řezání vodním paprskem patří do kategorie nekonvenčních technologií obrábění, které nevyužívají pro obrábění a dělení materiálů běžných nástrojů, ale využívají zákonitosti o erozi materiálu. Při těchto metodách nedochází k přímému kontaktu nástroje s obráběným materiálem. V případě vodního paprsku je nástroj zastoupen tryskou, která formuje proud vody. Pomocí vysokého tlaku se vytváří koncentrovaná energie ve vodním sloupci, jenž podporuje v obráběném materiálu erozivní účinky a tím dochází k dělení materiálu [1, 2, 3].

Technologie vodního paprsku si v technické oblasti začala budovat své místo již v 70. letech 20. století. Začátkem 80. let se vodní paprsek začal mísit s abrazivem, což vedlo ke zvýšení průraznosti paprsku. Díky své schopnosti dělit vysoce pevné materiály o velkých tloušťkách se technologie vodního paprsku stala jednou z nejuniverzálnějších metod pro tvarové dělení materiálu. Výhodou je dosažení naprosto studeného řezu bez otřepů. V současné době najdeme pouze velmi malé množství materiálů, které jsou nevhodné k řezání pomocí vodního paprsku. Jedním z představitelů je kalené sklo, které disponuje velkým vnitřním pnutím protisměrného charakteru. Abrazivní vodní paprsek dokáže proniknout i do tohoto materiálu, ale bezprostředně po najetí do materiálu dojde vlivem vysokého vnitřního pnutí k jeho roztržení [2, 3].

1.1 Vývoj technologie řezání vodním paprskem

Erozivní působení vody na pevné látky je známé již celá tisíciletí. V 19. století se zjistilo, že pokud se voda za pomoci vysokého tlaku přivede do dýzy o malém průměru, zvýší se její erozivní účinek a poté sloupec vody dokáže bez větších problémů odstraňovat a přemísťovat materiál. V druhé polovině 19. století bylo využíváno vodního proudu k erozivnímu odstraňování horniny. Tato technologie měla velký význam při těžbě drahých kovů [3, 8].



Obr. 1.1 Těžba drahých kovů v 19. století pomocí vodního proudu [3].

Vodní paprsek je využíván pro řezání materiálů od 50. let dvacátého století. V těchto letech se s vodním paprskem začínaly provádět experimenty při řezání dřevěných dílů [4, 5].

Obrovského rozmachu dosáhla technologie vodního paprsku na konci 70. let, kdy Dr. Mohamed Hashish zjistil, že přidáním abraziva do čistého vodního paprsku prudce vzroste jeho účinnost. Na základě této skutečnosti Dr. Mohamed Hashish založil společnost FLOW, která působila na území USA a stala se nejvýznamnějším producentem

této technologie. Původně se tato technologie využívala především ve vojenském a kosmickém průmyslu. Již v druhé polovině 80. let byla široce uplatňována především v americkém a západoevropském bloku. Na přelomu 80. a 90. let se vodní paprsek rozšířil i do střední a východní Evropy. Dnes je technologie vodního paprsku rozšířená do celého světa a uplatňuje se při řezání téměř všech materiálů [4, 5].



Obr. 1.2 Obložení spodní části raketoplánu keramickými destičkami, které jsou vyráběny metodou AWJ [55].

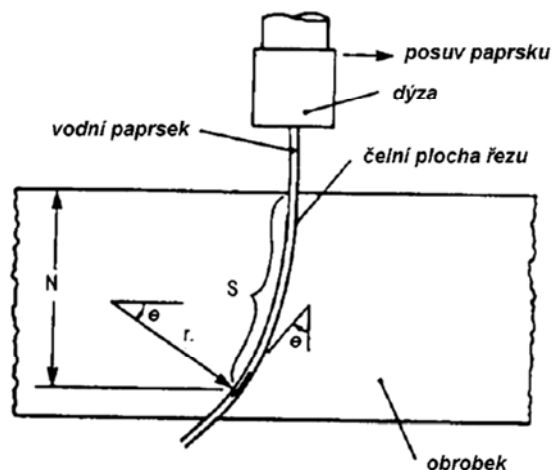
1.2 Princip řezání vysokoenergetickým vodním paprskem

Jak již bylo zmíněno výše, tato technologie je založena na principu uměle vytvořené eroze materiálu, v tomto případě vyvolané pomocí vysokoenergetického vodního paprsku. Tento paprsek je vytvářen vysokotlakým vodním čerpadlem, multiplikátorem fungujícím na principu převádění nízkého tlaku oleje na vysoký tlak vody nebo takzvaným plunžrovým čerpadlem, které pracuje na principu pístového čerpadla. Vysokotlaká čerpadla se mohou lišit příkonem, který se pohybuje v rozmezí 9 až 75kW a průtokem vody, jenž bývá 1,2 – 7,6 l/min. Pracovní tlak vody může v současné době dosahovat až 6500 barů [1, 12].

Fyzikální podstata řezání materiálu paprskem vody vychází z úvahy, že paprsek pohybující se dvou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze považovat z hlediska jeho účinku za pevné těleso. Proces řezání se dělí na dvě etapy. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění na otvor. Ve druhé etapě pak dochází k jeho prohlubování a vytvoření řezné spáry. Při nárazu čela vodního paprsku na obrobek (při tzv. prvním nástřelu) dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, díky tomu je vytvořen prvotní otvor. V řezném materiálu pak začínají vznikat rázové trhliny a mikrotrhliny, které se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří a tím dochází k rozrušení děleného materiálu. K destrukci řezaného materiálu dochází také pomocí turbulentního proudění kapaliny ve spáře s účinkem kavitačních bublin [1, 12].

Od chvíle, kdy paprsek projde celou tloušťkou materiálu, se silové zatížení velice sníží. V důsledku tohoto procesu není nově vzniklý povrch tepelně ovlivněn a nevykazuje známky zbytkového pnutí. Tyto vlastnosti v zásadní míře odlišují a zvýhodňují vodní paprsek oproti ostatním technologiím, které se používají pro dělení materiálu jako je

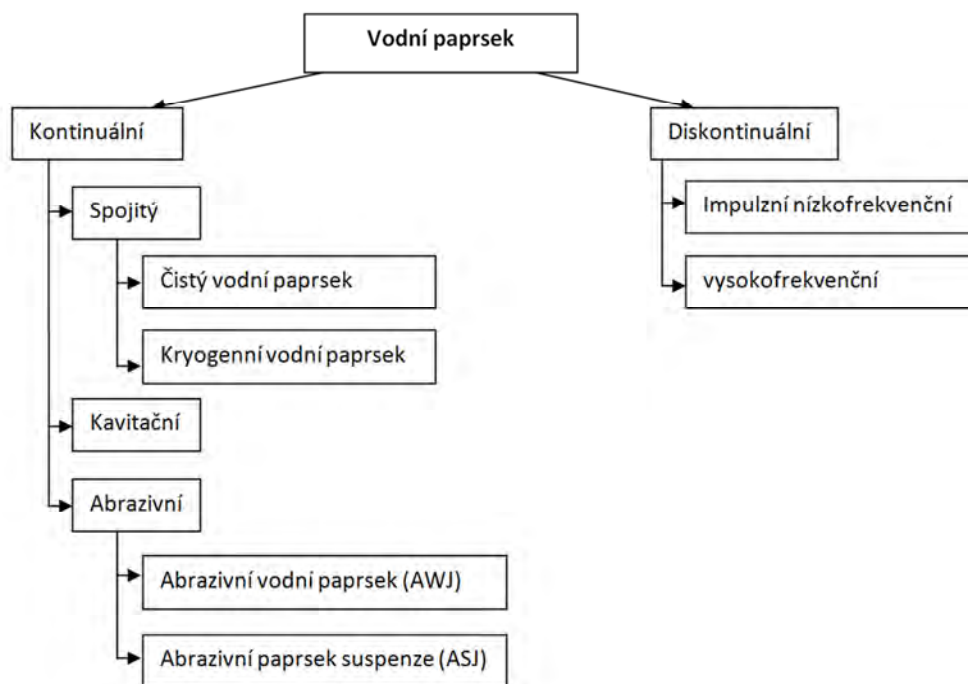
například laser nebo plazma. Zjednodušený princip řezání pomocí vodního paprsku je znázorněn na obrázku 1.3 [1, 12].



Obr. 1.3 Schéma principu řezání vodním paprskem [8].

1.3 Využívané technologie kapalinových paprsků

V současné době mají největší uplatnění dva základní způsoby řezání technologií vodního paprsku. Jeden z těchto způsobů je čistý vodní paprsek (WJM – Water jet Machining). Druhý způsob je řezání vodním paprskem s přidaným abrazivem (AWJ – Abrasive Water jet). Dále můžeme technologie vodního paprsku rozdělit na kontinuální, diskontinuální a kavitáční. Podrobnější rozdělení je znázorněno na obrázku 1.4 [5, 6].



Obr. 1.4 Rozdělení vodního paprsku [7].

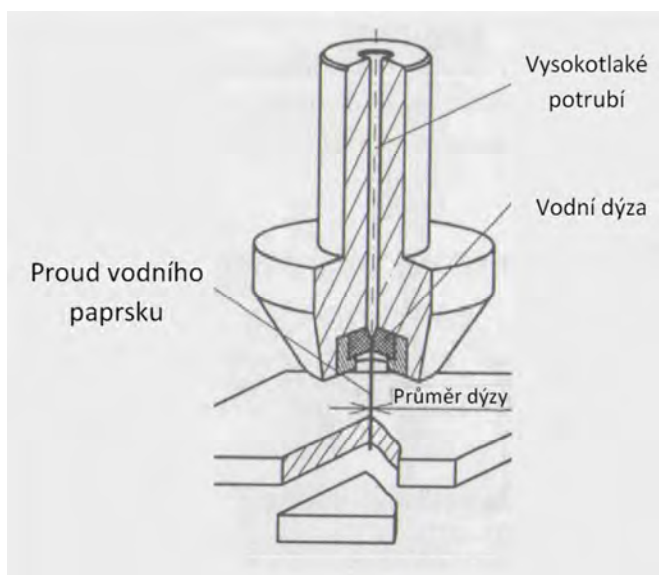
Systém diskontinuálního vodního paprsku využívá krátkodobého a opakovaného trvání vodního pulzu, takzvaný vznik tlakových špiček. Tyto tlakové špičky urychlují rozšiřování řezné mezery a tím i rychlost řezu [8].

Systém nepřetržitého (kontinuálního) vodního paprsku se vyznačuje neměnnou energií v celém procesu řezu. Tato metoda je v současné době nejvíce rozšířená a dá se použít při řezání prakticky všech materiálů [8].

Systém kavitačního vodního paprsku je charakterizován lokálním rozrušováním materiálu destruktivní silou kavitačních bublin. Jedná se o metodu s neměnným množstvím energie [8].

1.3.1 Řezání metodou čistého vodního paprsku

Systém čistého vodního paprsku plně využívá vlastnosti vody při vysokém tlaku. Nejčastěji se využívá obyčejná voda z vodovodu, případně jsou z ní odstraněny usazeniny a minerály nerozpustné ve vodě. Tím předcházíme a zabraňujeme nadměrnému opotřebení trysky či nebezpečnému poškození ostatních částí zařízení [7, 13].



Obr. 1.5 Zjednodušený model čistého vodního paprsku [3].

Řezání čistým vodním paprskem je charakterizováno velmi tenkým proudem vody, který se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,25 mm, vzhledem k tomuto faktu se dají řezat velmi přesné a detailní tvary. Další výhodou je, že při řezání dochází k minimálnímu prořezu a tím i ke vzniku malého množství materiálového odpadu. Zjednodušený model čistého vodního paprsku je zobrazen na obrázku 1.5 [13, 18].

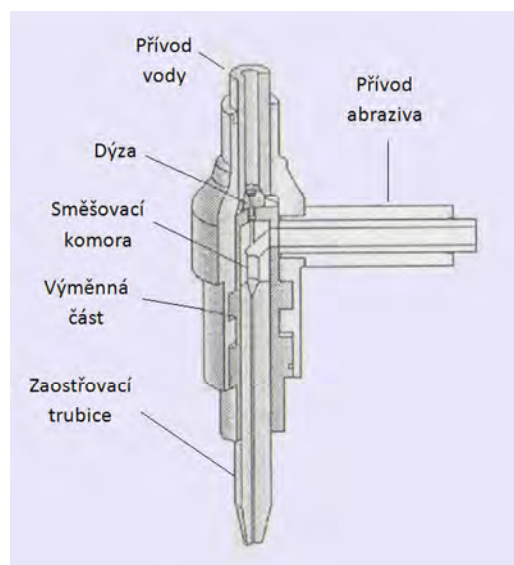
Čistý vodní paprsek není úplně vhodný pro řezání kovových materiálů. Používá se spíše pro řezání materiálů s nižší pevností. Nejvíce se tato technologie uplatňuje při řezání jednorázových plen, papíru a plastových doplňků v interiéru automobilů, ale také je velmi často využívána ve stavebnictví při řezání stavebních materiálů [13, 18].

Tab. 1.1 Parametry vodního paprsku pro nekovové materiály [7].

	Vlnitá lepenka	Lisovaná lepenka	Koberec	Sklovitá vlnitá látka	Kůže	Guma	Dřevo	Plst'	Polykarbonát	Azbestový cement
Tloušťka materiálu h [mm]	7	3	4	1,4	7	50	12	22	30	6
Průměr vodního proudu d [mm]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Pracovní tlak p [Mpa]	260	300	300	400	400	400	400	100	400	300
Průtokové množství vody Q [l.min ⁻¹]	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	0,7	1,4	1,2
Rychlost posuvu f [m.min ⁻¹]	200	5	3	2	15	0,5	0,5	200	6	10

1.3.2 Řezání metodou abrazivního vodního paprsku

Abrazivní vodní paprsek se v několika aspektech liší od takzvaného čistého vodního paprsku. U vodního paprsku bez abrazivních částic je materiál rozrušován proudem vody o nadzvukové rychlosti. V případě abrazivního vodního paprsku voda pouze urychluje pohyb abrazivních částic, které porušují řezaný materiál. Model abrazivního vodního paprsku je znázorněn na obrázku 1.6. Vodní paprsek s přidáním abraziva dosahuje až stonásobku výkonnosti oproti paprsku bez abrazivních částic. Abrazivní vodní paprsek se standardními parametry dokáže řezat materiály s velmi vysokou tvrdostí a pevností jako je například kámen, keramika, kompozity a veškeré kovové materiály [6, 9, 13, 18].



Obr. 1.6 Zjednodušený model abrazivního vodního paprsku [3].

Na základě řezaného materiálu je velmi důležité zvolit vhodné abrazivo, protože náklady na něj jsou velmi vysoké a jeho množství ve vodním paprsku se promítá na konečné ceně řezu. Je možné použít jak syntetické tak i přírodní abrazivo jako je například korund nebo granát. Přírodní abraziva nezatěžují životní ani pracovní prostředí. Z tohoto důvodu jsou pro technologii vodního paprsku vhodnější. Použitá abraziva je možné recyklovat, což vede k velkým výrobním úsporám [6, 21].

Tab. 1.2 Parametry vodního paprsku s abrazivem pro dané materiály s pracovním tlakem 350 MPa [8].

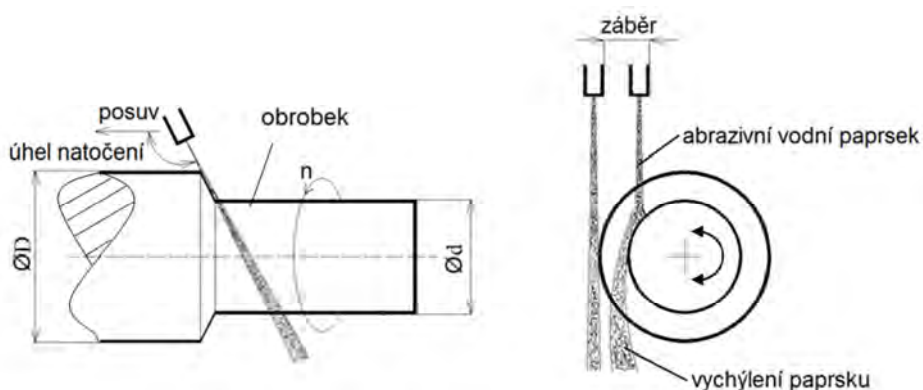
Materiál	Tloušťka materiálu h [mm]	Rychlost posuvu f [m.min ⁻¹]
Konstrukční ocel	1,6	0,50
	13	0,10
	50	0,038
	180	0,010
Korozivzdorná ocel	5	0,40
	13	0,15
	25	0,076
Hliník	1,6	1,3
	6	0,50
	25	0,13
	100	0,025
Titan	3	0,50
	6	0,40
	12	0,10
Sklo	13	1,30
	19	0,60
	25	0,13
Mramor	50	0,40
Beton	250	0,025

1.4 Obrábění vodním abrazivním paprskem

Vodní abrazivní paprsek nenachází své uplatnění pouze při klasickém dělení materiálů. Poslední dobou se začíná využívat i v operacích obrábění a to především u soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů. Touto metodou se ve většině případů obrábí tvrdé a obtížně obrobitelné materiály. Technologie se začíná prosazovat také v oboru gravírování a tvarovém 3D řezání. Na kvalitu obráběného povrchu má největší vliv rychlost posuvu, tlak a úhel dopadu vodního paprsku, což jsou velmi významné veličiny, které ovlivňují i výkon obrábění [8, 21, 23].

1.4.1 Soustružení metodou AWJ

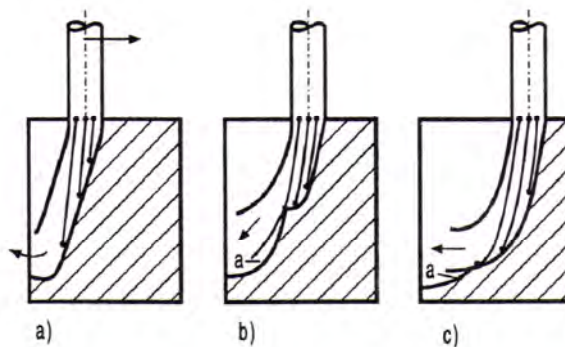
Soustružení hydroabrazivním paprskem zachovává zákonitosti klasického konvenčního soustružení. To znamená, že obrobek se otáčí kolem své osy a AWJ se pohybuje v axiálním směru vůči obrobku. Materiál je odebrán radiálním přísuvem paprsku do požadované hloubky řezu. Vzhledem k malému zatížení obrobku řeznou silou je možné upnout obrobek pouze do sklíčidla bez použití opěrného hrotu. Nekonvenčním soustružením se dají obrábět součásti s poměrem délky k průměru až třikrát větším než při klasickém konvenčním soustružení. Princip soustružení metodou AWJ je zobrazen na obrázku 1.7 [8, 22, 23].



Obr. 1.7 Princip soustružení hydroabrazivním vodním paprskem [8].

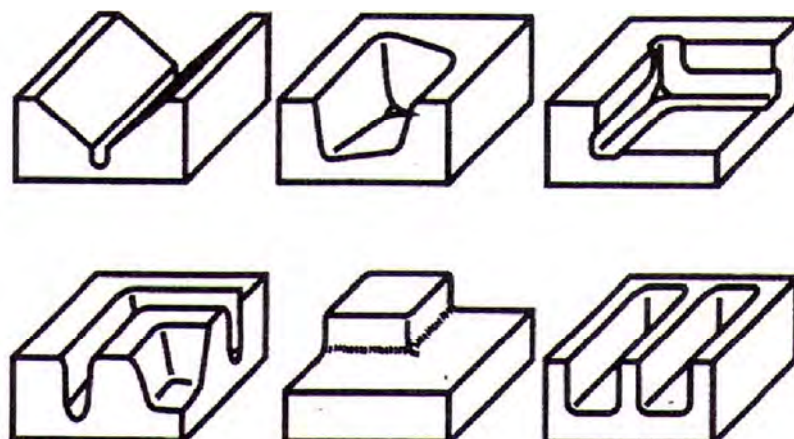
1.4.2 Frézování metodou AWJ

Metoda se nejčastěji využívá při obrábění skla a různých minerálů jako jsou například žula a křemen. Dále se frézování pomocí AWJ používá při obrábění složitých obrobků z kovových i nekovových materiálů. Při frézování nedochází k dělení materiálu, ale pouze k jeho řezání. Tloušťka materiálu je tedy větší než hloubka řezu (viz obrázek 1.8). Frézování metodou AWJ je proces, při kterém vodní paprsek cyklicky přechází po obráběné ploše obrobku a postupně vytváří požadovaný tvar konečného výrobku. Ve strojírenství je tato metoda využívána při výrobě tvářecích nástrojů a při opracování titanu a jeho slitin. Velké využití si tato metoda našla i v oblasti sochařství při opracování žuly, mramoru, pískovce a opuky [8, 22].



Obr. 1.8 Cykly při frézování metodou AWJ [8].

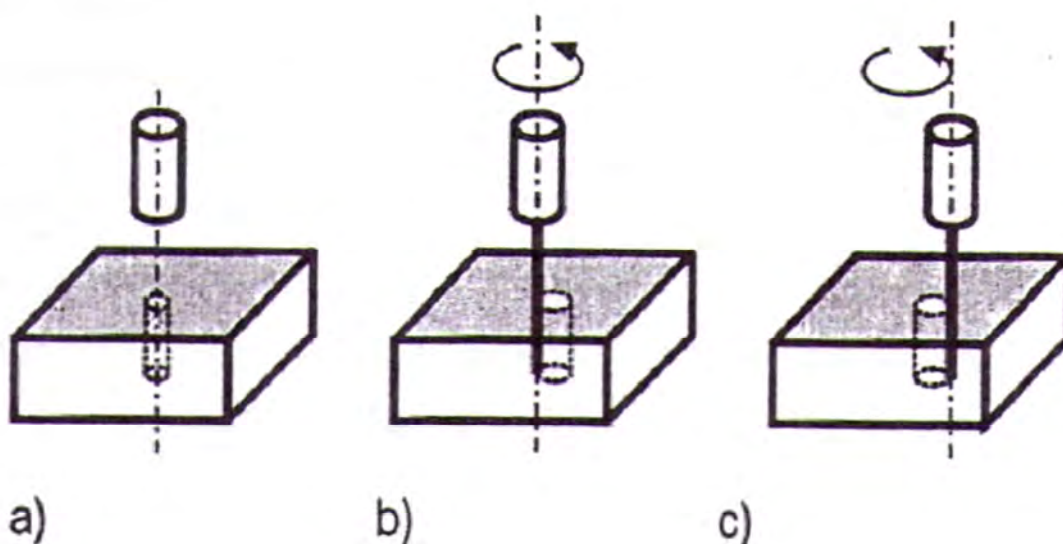
- Vytvoření prvotní stopy řezu
- Stabilizování řezné stopy s posuvem paprsku
- Vyrovnaní stupňovitosti řezu s posuvem vodního paprsku



Obr. 1.9 Příklady geometrických tvarů zhotovené frézováním metodou AWJ [8].

1.4.3 Vrtání metodou AWJ

Vrtání pomocí AWJ je považováno za velmi produktivní technologii, a to hlavně u těžkoobrobitelných materiálů jako jsou sklo, keramika a niklové slitiny, které se používají nejčastěji pro plynové turbíny. V dnešní době se využívá několik způsobů vrtání děr charakterizovaných vzájemně se pohybujícím obrobkem a hydroabrazivním paprskem. Nejpoužívanější metodou vrtání je metoda se stacionárním vodním paprskem i obrobkem, která je znázorněna na obrázku 1.10a. Dále se velmi často používá vrtání rotujícím nebo kmitajícím vodním paprskem a nepohybujícím se obrobkem, čemuž odpovídá obrázek 1.10b). Další velmi rozšířený způsob výroby děr je vyřezávání středu otvorů, takzvané frézování děr, které je vidět na obrázku 1.10c) [8, 22].



Obr. 1.10 Tři základní způsoby vrtání metodou AWJ [8].
a) vrtání, b) vyřezávání, c) frézování

1.4.4 Gravírování pomocí AWJ

Podobně jako u frézování nedochází při gravírování metodou AWJ k prořezání celé tloušťky materiálu, ale pouze se odstraní povrchová vrstva do požadované hloubky. Pomocí vodního paprsku může být do materiálu vytvarován konečný reliéf, nebo je následně opracovaný materiál ještě dokončen klasickými konvenčními nástroji jako jsou diamantový hrot a čakan. Při použití vícevrstvých materiálů například kombinace plastů, kovů či plastu s kovem vznikají kromě prostorových efektů také efekty barevné. Je to způsobeno postupným odebráním jednotlivých vrstev materiálu. Příklad gravírování metodou hydroabrazivního paprsku je znázorněn na obrázku 1.11 [3, 24].

Tato technologie začíná být konkurence schopná s běžnějšími metodami gravírování, jako jsou nekonvenční laserové gravírování a konvenční takzvané rytí, zejména proto, že technologie AWJ umožňuje gravírovat prakticky veškeré typy materiálů (křehké, těžkoobrobitelné, flexibilní i sendvičové). Úspěšnost konvenčních metod gravírování je podmíněna schopností opracovatelnosti materiálu, jako je dobrá obrobitelnost, dostatečná tvrdost a adhezní nepřilnavost, aby materiál neulpíval na fréze. Technologií laserového gravírování nelze opracovávat keramiku, sklo, minerály ani materiály tepelně citlivé nebo dokonce hořlavé, u kterých by mohlo dojít ke vznícení či uvolňování karcinogenních a jedovatých látek [3, 24].

Technologie gravírování metodou AWJ má jediné omezení a to je případný vliv vlhkého prostředí na materiál. Z tohoto důvodu je důležité znát hodnotu relativní nasákavosti, intenzitu ovlivnění materiálu vodou, korozní odolnost a hloubku proniknuté vody do materiálu [3, 24].

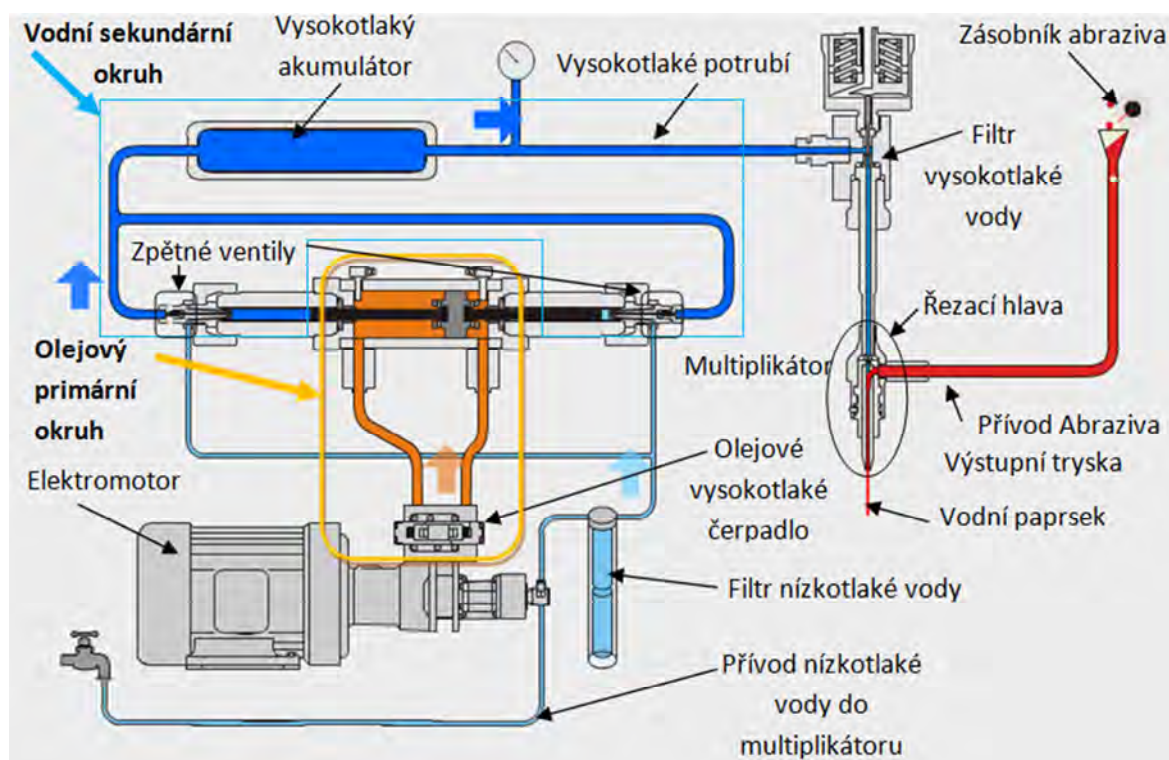
Tak jako u všech technologií je u metody AWJ stanoven minimální rádius vnitřních rohů, který je dán průměrem řezného paprsku. Při obrábění měkkých a tenkých materiálů, kde není nezbytné použít abrazivum, bývá průměr paprsku až 0,1 mm. Pro materiály s větší odolností je nutné použít vodní paprsek s abrazivem, kde bývá průměr paprsku 0,5 až 2,5 mm. Tento průměr je ovlivněn stupněm opotřebení abrazivní trysky [3, 24].



Obr. 1.11 Gravírování reliéfu pomocí technologie AWJ [24].

1.5 Konstrukční složení a řešení zařízení pro řezání vodním paprskem

V současné době se na trhu vyskytují dvě rozdílná konstrukční řešení vodního paprsku. První z nich využívá k narušování materiálu abrazivní částice, které jsou poháněny vodou, tudíž je zařízení vybaveno zásobníkem s abrazivem a směšovací komorou. Schéma tohoto zařízení je znázorněno na obrázku 1.12. Druhá možnost využití vodního paprsku je bez přísady abraziva, kde je materiál rozrušován pouze tlakem vodního proudu. Toto zařízení je jednodušší a levnější, ale ve strojírenském průmyslu se využívá jen velmi zřídka. Využívá se například pro řezání měkkých a mechanicky méně odolných materiálů, jako jsou lamináty, papír, grafitové kompozity, sklotextil, gumotextil atd. [6, 9].



Obr. 1.12 Schéma zařízení technologie AWJ [11].

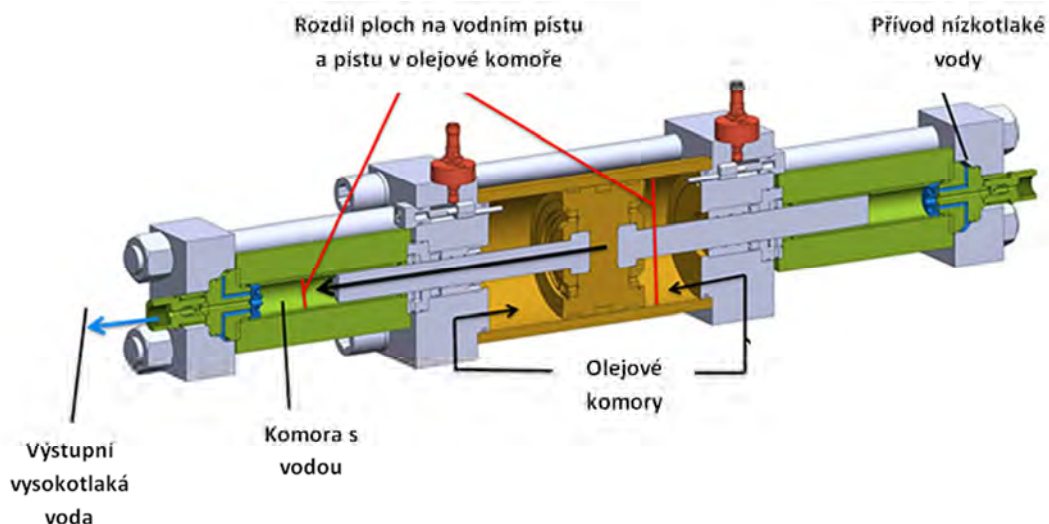
1.5.1 Vysokotlaké čerpadlo

Vysokotlaké čerpadlo je základem každého primárního okruhu řezacího systému. Slouží pro vytvoření vysokého tlaku vody. Vysokotlaký vodní paprsek se vytváří pomocí hydraulického zařízení s multiplikátorem nebo triplexovým plunžrovým čerpadlem. Druh konstrukce záleží většinou na výrobci zařízení. Nejznámější výrobce je americká firma Flow Systems, která prosazuje spíše hydraulickou jednotku s multiplikátorem. Triplexového plunžrového čerpadla se drží spíše japonský výrobci, jako je třeba firma Sugino Machine [1, 8, 10].

Multiplikátor

Multiplikátor slouží jako zesilovač tlaku. Používá se především pro řezání vodním paprskem z důvodu vysokých výstupních tlaků použité kapaliny. Tlak může dosahovat až 700 MPa, což v současné době nedokáže vygenerovat žádné jiné zařízení. Samotný proces probíhá tak, že olej z vysokotlakého hydraulického čerpadla o tlaku 25 MPa je tlačěn přes uzavírací ventil, který umožňuje střídavě přerušovat průtok před pístem i za pístem

hydraulického zesilovače tlaku (multiplikátoru). Tímto tlakem působíme na plochu většího pístu, který je spojen se dvěma pístnicemi o menším průřezu, jak je vidět na obrázku 1.13. Každá pístnice dokáže vytvořit v tlakové komoře až 25x větší tlak. Velikost zesílení tlaku závisí na poměru velkého pístu k průřezu menších pístnic. [1, 12].

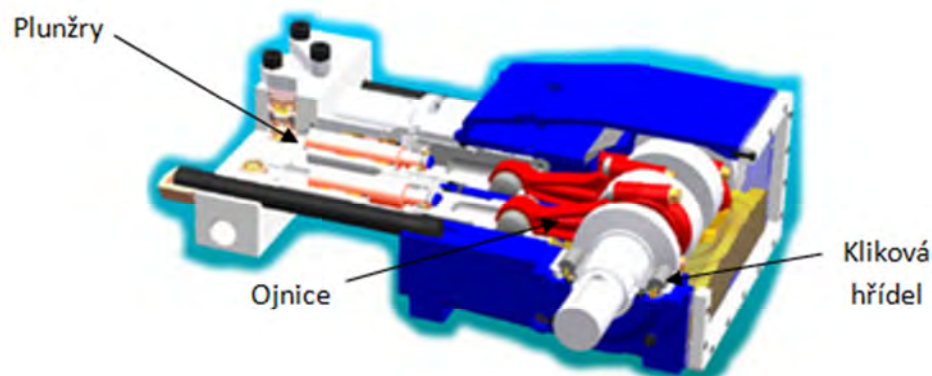


Obr. 1.13 Multiplikátor [15].

Plunžrová čerpadla

Plunžrové čerpadlo je z hlediska konstrukce téměř stejné jako čerpadlo pístové s tím rozdílem, že pístní tyč a píst splývají v jednu součást o stejném průměru takzvaný plunžr. Čerpadlo bývá konstruované jako jednočinné nebo i dvojčinné zařízení, viz. obrázek 1.14. Nejvýznamnější vlastností čerpadla je schopnost čerpat vodu s velkým nadmořským převýšením [12, 15].

V současné době plunžrová čerpadla dosahují pracovního tlaku až 380 MPa, což umožňuje využít tato čerpadla i při dělení kovových materiálů. V minulosti se tato čerpadla využívala výhradně pro aplikace jako je odstraňování vrstev zeminy, sanace betonových povrchů a k čištění různých povrchů. V současnosti jsou plunžrová čerpadla spíše využívána v těžebním, chemickém a cukrovarnickém průmyslu [6, 12].



Obr. 1.14 Plunžrové čerpadlo [14].

1.5.2 Filtrační jednotka

Do obou tlakových komor multiplikátoru je přiváděna voda přes filtrační jednotku. Filtrační jednotka odděluje a odplavuje nečistoty o velikosti 1,2 až 0,5 μm , tímto je chráněna vstupní tryska před možným mechanickým poškozením cizím tělískem. Kromě filtrace se voda také změkčuje a deionizuje [6, 8, 12,].

1.5.3 Vysokotlaký akumulátor

Akumulátor je vyroben formou pancéřované vysokotlaké komory, která má za úkol tlumit rázy v kapalině, které jsou vyvolané pulzací jedné i druhé tlakové komory v multiplikátoru. Akumulátor je upraven procesem, při kterém je nádoba přetlakována (autofretážována) tak, aby došlo k vytvoření plastických deformací v materiálu, a to hlavně na hranici makro vad. Na těchto místech dochází ke koncentraci napětí a zároveň zpevnění. Tímto nárazovým přetížením nádoby akumulátoru dochází k zamezení růstu mikro a makro trhlin, který by mohl způsobit nestabilní tlak přiváděné vody. Z akumulátoru vystupuje přetlaková voda požadovaného konstantního tlaku a má konstantní rychlost [1, 8, 12].

1.5.4 Potrubí na rozvod vody

Jedná se o vysokotlaké potrubí, které je napojeno na multiplikátor, akumulátor a řezací hlavu. Skládá se z normalizovaných armatur o průměru 6 – 14 mm a spojovacích elementů. Elementy jsou vyrobeny z korozivzdorné oceli. Potrubí je vyrobeno tak, aby se dokázalo plně přizpůsobit pohybu řezací hlavy [1, 8].

1.5.5 Lapač vody

Lapač vody slouží k zachytávání vodního paprsku, který vystupuje z řezaného materiálu. Dále je určen k tlumení hluku, který dosahuje při použití metody AJW až 105 dB. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby nedocházelo k nárazu vodního paprsku do dna nádrže, požadovaná hloubka nádrže je 300 až 800 mm. V případě nedostatku místa se používají mělké nádrže naplněné kovovými kuličkami. V současné době se začínají na trhu objevovat bodové lapače, které jsou synchronně vedeny s řezací hlavou [8, 13].

1.5.6 Řezací stůl

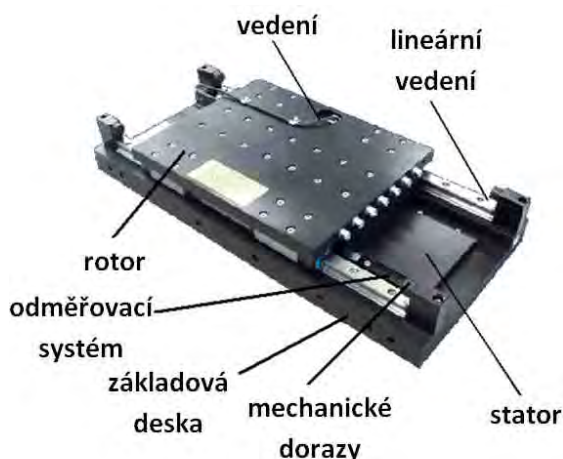
Řezací stůl slouží jako opora řezaného materiálu a je upevněn nad vodní nádrž. Stoly jsou vyráběny v různých rozměrových variantách, a to od 1,25m x 1,25m až po rozměry 4 m x 6 m. CNC stoly jsou vybaveny přesnou mechanickou konstrukcí a řídicím systémem. Na stranách stolu je uležené vedení stroje, které se může lišit z hlediska pohybových komponentů [17, 18].

Lineární motor je velmi drahá varianta s extrémní přesností a rychlostí. Tento pohon je nevhodný pro prašné a špinavé prostředí, Z tohoto důvodu se lineární motor na stolech vodního paprsku téměř nevyskytuje. Příklad a popis lineárního motoru je zobrazen na obrázku 1.15 [17, 18].

Další poměrně drahou variantou je pohon děleným pastorkem a čelním hřebenem. Vyznačuje se hlavně velkou robustností a přesností. Je zapotřebí pravidelná údržba. Na trhu se vyskytuje i hřeben s běžným pastorkem, který ve většině případů nedisponuje velkou přesností, ale je to velmi odolná varianta pohonu s nízkými pořizovacími náklady [17, 18].

Pohon za pomoci kuličkového šroubu je nepoužívanější variantou při řezáním vodním paprskem. Je charakterizován vysokou přesností, rychlostí a odolností v kterémkoliv prostředí. Velkou výhodou kuličkového šroubu je také dlouhá životnost a přijatelná cena. Dokáže pracovat téměř bez údržby a s velmi malou hlučností. Kuličkový šroub, který se velmi často využíván k vedení portálu vodního parsku je zobrazen na obrázku 1.16 [17,18].

Dále se velmi zřídka vyskytují pohony pásové a třecí. Tyto pohony dosahují velmi nízkých přesností, vysokých hlučností a mohou se u nich vyskytovat prokluzu. Jedinou výhodou těchto pohonů je nízká cena a schopnost manipulovat i s poměrně těžkými břemeny [17, 18].



Obr. 1.15 Lineární motor [19].

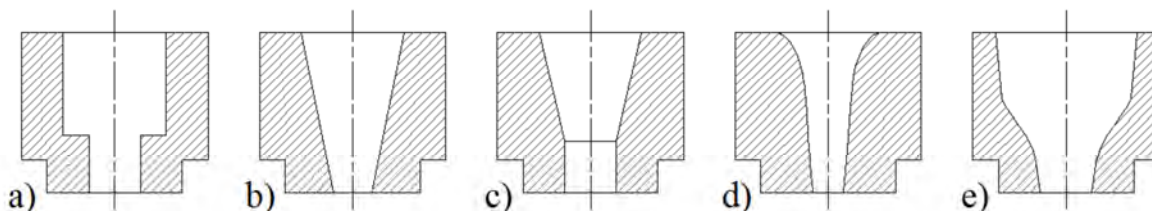


Obr. 1.16 Kuličkový šroub [20].

1.5.7 Tryska a řezací hlavice

Tryska je u technologie vodního paprsku jednou z nejdůležitějších součástí. Je to utvářecí prvek samotného vodního paprsku, na kterém závisí kvalita řezného povrchu i produktivita řezání. Tryska se využívá jak u řezání čistým vodním paprskem, tak i u řezání abrazivním vodním paprskem [1, 18].

Vodní trysky jsou vyráběny v různých tvarech zužující se dýzy, což tvoří kontinuální proud a zvyšuje rychlost vodního paprsku na výstupu z trysky. Výstupní rychlost proudu vody bývá až 4x větší než je rychlost zvuku a tvoří válec o průměru 0,01 až 2,5 mm. Používané konstrukční tvary zúžení jsou uvedeny na obrázku 1.17 [1, 18].



Obr. 1.17 Konstrukční tvary vyráběných dýz [7].

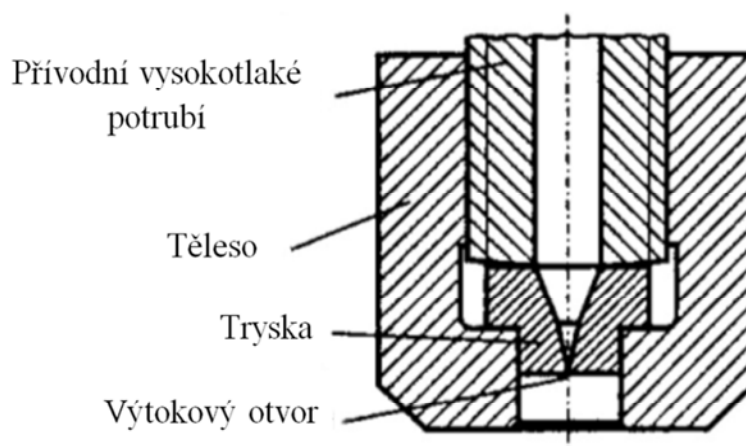
Velmi důležitým aspektem pro životnost trysky je materiál, ze kterého je tryska vyrobena. V současné době se trysky vyrábějí nejčastěji ze safíru, rubínu nebo spékaného karbidu, které vydrží až 200 pracovních hodin. Tyto materiály začínají být na trhu pomalu

vytlačovány syntetickým diamantem, který dosahuje až šestinásobné pracovní životnosti, což je velkou výhodou z hlediska údržby, neboť se prodlužuje doba mezi jednotlivými odstávkami stroje. Cena diamantové trysky se však pohybuje o jeden řád výše než trysky z běžných materiálů [8, 54].

Tab. 1.3. Životnost trysky z různých materiálů [6, 54].

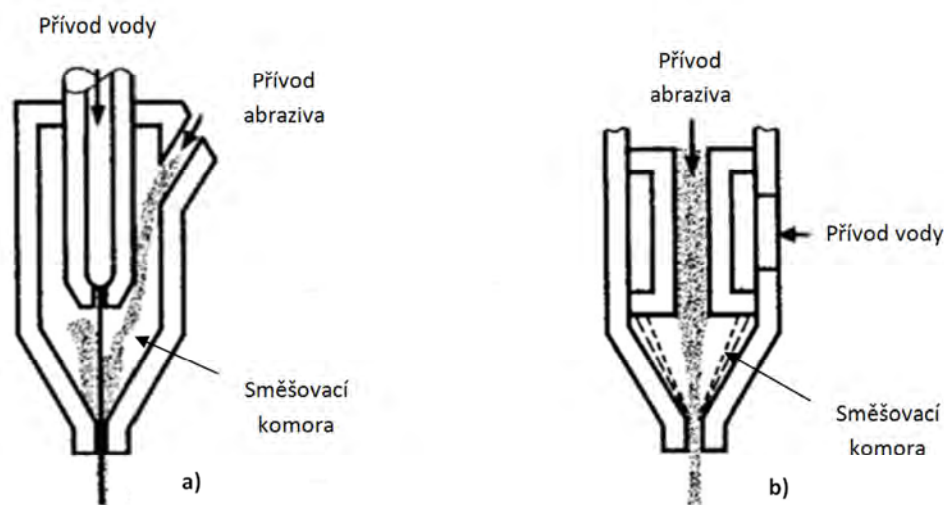
Materiál	Životnost	Popis
Standardní karbid wolframu	4-6	Trysky minulého století
Levný kompozitní karbid	40-60	Vhodné pro hrubé dělení
Standardní kompozitní karbid wolframu	90-140	Vhodné pro všechny aplikace dělení
Safír	600	Vysokovýkonostní řezání až 4200bar
Rubín	800	Vysokovýkonostní řezání až 4200bar
Syntetickým diamantem	Až 1200	Vysokovýkonostní řezání až 6500bar

Jak již bylo zmíněno výše, řezací hlavy se zpravidla dělí na dvě základní konstrukce. Prvním konstrukčním řešením je řezací hlava, která se používá pro řezání čistým vodním paprskem. Konstrukční řešení této hlavy je znázorněno na obrázku 1.18 [3, 8].



Obr. 1.18 Konstrukční řešení řezací hlavy čistého vodního paprsku [8].

Druhým konstrukčním řešením je řezací hlava obohacená o přívod abraziva a o směšovací komoru. Abrazivo je možné k trysce přivádět dvěma způsoby. Radiálním, který je snadněji vyrobitelný a lze ho využít i pro řezání vodním paprskem bez použití abraziva, viz. obrázek 1.19a. Z hlediska opotřebení je však výhodnější axiální přívod abraziva, u kterého dochází i k lepšímu promísení vody a přidaného abraziva, viz. obrázek 1.19b [3, 8].



Obr. 1.19 Konstrukční rozdíl v přívodu abraziva [8].

a) Radiální přívod abraziva

b) Axiální přívod abraziva

1.6 Abrazivo

Abrazivo je velmi důležitou součástí technologie AWJ. Jeho druh a množství má významný vliv na výkon řezání, hloubku řezu a na kvalitu obráběného povrchu. Jeho dodávané množství se udává v jednotkách $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$. Abrazivo je směs jemných zrn materiálů s nepravidelnou geometrií. Velikost zrna je udávána v jednotkách MESH, je to počet ok v sítu na délku jednoho palce. Abrazivní materiál je charakterizován výraznou abrazivní schopností a tvrdostí, nejčastěji se jedná o minerály a křemičité písky. Účinnost vodního paprsku se s přidáním abraziva značně zvětšuje, z důvodu dopadů abrazivních částic na materiál dochází k mechanickému poškození v místě řezu obráběného materiálu a ke vzniku třísek [6, 22, 25].

Tab. 1.4 Velikost abrazivních částic [7].

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

Výběr správného abraziva závisí na technických a ekonomických parametrech. Dalším důležitým aspektem volby abraziva je jeho vliv na životní prostředí. Pokud se výběr abrazivního materiálu zaměří pouze na technické hledisko technologie AWJ, potom se musí brát v potaz tři nejvýznamnější materiálové vlastnosti, a to hustota abraziva, tvrdost a pevnost [7].

Tab. 1.5 Vlastnosti abraziva ovlivňující řez materiálu [6].

Hustota abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • s vyšší hustotou abraziva roste kinetická energie paprsku a tím i výkonnost,
Tvrдость abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší tvrdost abraziva zvyšuje účinnost řezu, • nižší trvanlivost směšovací komory a trysky,
Velikost zrn abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • větší zrna urychlí prořezání materiálu, • menší zrna abraziva dosahují lepší jakosti povrchu,
Tvar zrn abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • kulatější zrna dosahují lepší jakosti povrchu, • ostré zrna dosahují větší hloubky děleného materiálu,
Hmotnostní tok abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • zvyšující se hmotnostní tok zvyšuje dosahovanou hloubku děleného řezu, z důvodu zvyšující se kinetické energie paprsku, • při dosažení kritické hodnoty hmotnostního toku se dosahovaná hloubka dělicího řezu zmenšuje,
Ekologičnost abraziva	<ul style="list-style-type: none"> • některé abraziva mohou mít neblahý vliv na zdraví obsluhy,

Z ekonomického hlediska je důležitá hlavně cena abrazivního materiálu. Mezi nejdražší materiály patří kovová drť a oxidy hliníku. Nejlevnější materiál, který lze použít jako abrazivo je křemičitý písek. Jeho cena je asi o 30% nižší než cena granátu, který má v současné době nejlepší poměr ceny k výkonu. Volba abraziva je ve velké míře závislá i na opotřebením součástí stroje a to především trysky. Zpravidla platí, že čím je použité abrazivo měkčí, tím je opotřebením součástí menší. V současné době má velký význam na ekonomičnost vodního paprsku recyklace, která sebou přináší i některá omezení. Běžně používané materiály jako je křemičitý písek a granát se během nárazu lámou na jemnější zrna, což není příliš vhodné k dalšímu použití. Naopak při použití ocelového abraziva k řezání nekovových materiálů jako jsou plasty a stavební materiály je recyklace velmi vhodná. U těchto materiálů je možné využít jejich magnetické vlastnosti k separaci od nekovového odpadu [8].

Tab. 1.6 Vlastnosti abrazivních materiálů, které lze použít pro řezání vodním paprskem [7].

Abrazivní materiál	Velikost částic MESCH	Materiálové vlastnosti				
		Tvrdość Podle KNOOPA	Tvrdość relativní	Hustota ρ [kg×m ⁻³]	Kruhovitost	Kulatost
Granát	16-250	1350	1	3,5-4,1	0,48	0,78
Křemičitý písek	16-120	700	0,7	2,5	0,57	0,78
Karbid křemíku	80-200	2500	50	3,2	0,31	0,75
Ocelové piliny	16-100	400-800	2	7,5	0,55	0,82
Měděné piliny	16-100	1050	0,4	2,5	0,5	0,78

1.6.1 Granát

Granát je nejčastěji používaným abrazivem v technologii AWJ. Přírodní granát je nekovový inertní materiál s chemickou neutralitou. Jedná se o materiál ekologický s nulovým obsahem karcinogenních a zdraví ohrožujících látek. Čistý granát využívaný jako abrazivum by neměl obsahovat žádné železo a soli. Granát je dále charakterizován relativně vysokou tvrdostí a pevností, malou drobitostí a poměrně velkou hustotou. Vzhledem k vysoké pevnosti a poměrně nízké drobitosti lze granát recyklovat, a to i vícekrát, což snižuje náklady na abrazivum. Další výhodou čistého granátu je možnost velmi jednoduchého skladování, neboť nevstřebává vlhkost. V současné době se na trhu čítý granát vyskytuje v mnoha velikostech zrn. Díky tomuto aspektu je možné dělit a obrábět materiál s různou jakostí povrchu [6, 7, 26].

Tab. 1.7 Chemické složení přírodního granátu [26].

FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
25-40 %	35-40 %	18-25 %	< 2 %	< 2 %	< 2 %	< 2,5 %

1.7 Model řezné zóny

Jak už bylo zmíněno v kapitole 1.1, princip řezání a oddělování materiálu vodním paprskem spočívá v úběru materiálu procesem erozního opotřebení. Eroze je proces, který je spojený s nárazem částic na povrch určitého materiálu. Tento proces je z velké části závislý na úhlu nárazu α_0 abrazivní částice na obráběný materiál a na pevnostních

vlastnostech materiálu. Kritické úhly nárazu pro křehké a houževnaté materiály a jejich vliv na mechanismu erozního opotřebení jsou popsány v tabulce 1.8 [3, 7, 8].

Tab. 1.8 Reakce materiálu na úhel dopadu částice [8].

Úhle nárazu částice α_0	Materiál	
	Tvárný	Křehký
< 20°	Maximální řezné opotřebení	Minimální erozní účinnost
45°	Smíšené opotřebení	Střední erozní účinnost
90°	Maximální deformační opotřebení	Maximální erozní účinnost

Roku 1987 Dr. Hashish vytvořil analytický model erozní částice, podle kterého se plocha řezu dělí na dvě zóny dle převládajícího mechanismu úběru materiálu. Úhel nárazu částice je definován jako úhel sklonu mezi normálovým vektorem rychlosti posuvu a vektorem rychlosti vodního paprsku [3, 8].

Použitý pojem, zóna opotřebovaná řezáním, je definován pro malý úhel nárazu částice. Můžeme říct, že materiál je v této oblasti řezán. Spodní část plochy se nazývá zóna opotřebovaná deformací. V této zóně je materiál rozrušován takzvaným mikrorytím, kde částice narážejí na materiál pod větším úhlem. Mezní úhel je nazván úhlem kritickým, viz tabulka 1.8 [7, 8].

Každá zóna je definovaná určitou hloubkou. Zóna řezného opotřebení se značí h_c a zóna deformačního opotřebení se značí h_d . Celková hloubka řezu se značí h a prezentuje výslednou hloubku, do které je vodní paprsek schopen řezat bez větší ztráty účinnosti [3, 7, 8].

Zóna řezného opotřebení [8]:

$$h_c = \frac{C \cdot d_j}{2,5} \cdot \left(\frac{14 \cdot m_a}{\pi \cdot \rho_a \cdot u \cdot d_j^2} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \frac{v_a}{v_c} \quad [mm] \quad (1.1)$$

ρ_a – hustota abraziva [kg/m³]

u – posuvová rychlost [mm/s]

v_c – charakteristická rychlost [m/s]

d_j – průměr vodního paprsku [mm]

v_a – rychlost abrazivních částic [m/s]

C – experimentálně stanovená konstanta reprezentující část vodního paprsku v řezu

Zóna deformačního opotřebení [8]:

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_j \cdot E_d \cdot u}{2(1-C) \cdot m_a \cdot (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f \cdot v_a}{d_j \cdot v_a - v_e}} \quad [mm] \quad (1.2)$$

v_e – maximální rychlost abrazivních částic [m/s]

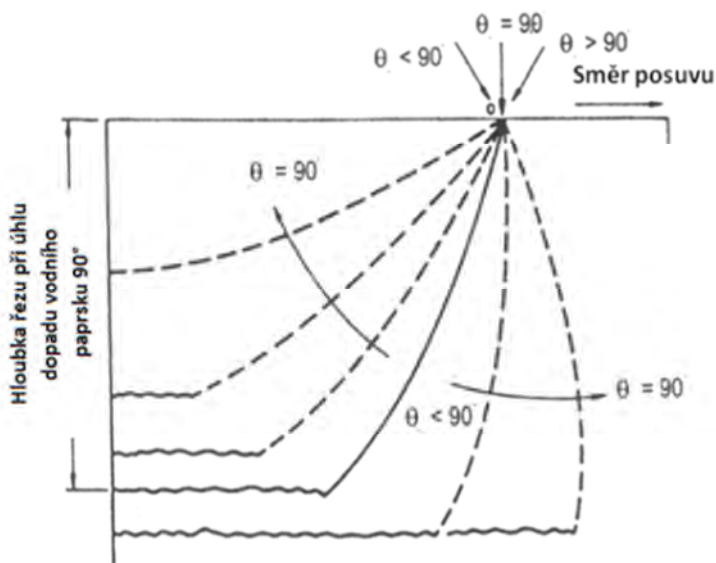
C_f – koeficient tření

E_d – specifická energie pro deformované opotřebení

Celková hloubka řezu [8]:

$$h = h_c + h_d \quad (1.3)$$

V zóně h_c opotřebování řezáním se vlivem nárazu vodního paprsku odřezává materiál pouze s malou odchylkou směru částic. Pod hranicí zóny h_c se vodní paprsek zaobljuje a mění svůj směr, tudíž se mění i úhel dopadu, viz. obrázek 1.20 a zhoršuje se i kvalita řezu. Z tohoto důvodu je nezbytné pro přesný a kvalitní řez bez výrazného rýhování nastavit úhel řezu a ostatní parametry stroje tak, aby byla hloubka h_c větší, než tloušťka řezaného materiálu. Poměr hloubky h_c/h se mění nastavením úhlu α , který udává směr dopadu vodního paprsku [3, 8].



Obr. 1.20 Vliv úhlu řezání na hloubku řezu [8].

Dalším významným faktorem ovlivňujícím hloubku řezu jsou mechanické vlastnosti řezaného materiálu. Je to především tvrdost, která brání průniku vodního paprsku materiálem a houževnatost. Při řezání velmi tvrdých materiálů jako jsou například karbidy křemíku (SiC) nebo bóru (B₄C) je možné dosáhnout až 4krát větší hloubky řezu, než u materiálů tvrdých a zároveň houževnatých. Do této skupiny materiálů patří například karbid wolframu (WC). Je nutné neopomíjet také tvrdost a velikost použitého abraziva, jakožto vliv na hloubku řezu. Vliv abraziva je popsán v kapitole 1.6 [7, 8].

Jednoznačně nejvýznamnějšími faktory jsou provozní parametry, které mají vliv na kvalitu obrobeneho povrchu a na účinnost celého procesu. Je to především výstupní rychlost paprsku, která je z velké části závislá na tlaku kapaliny před výstupem z trysky. Výstupní rychlost vodního paprsku je možné dopočítat z Benoulliho rovnice pro proudění nestlačitelné kapaliny, která je zobrazena níže (1.4). [3, 8].

Benoulliho rovnice pro proudění nestlačitelné kapaliny [8]:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (1.4)$$

v – Rychlost proudění kapaliny [m/s]

p – Tlak kapaliny [MPa]

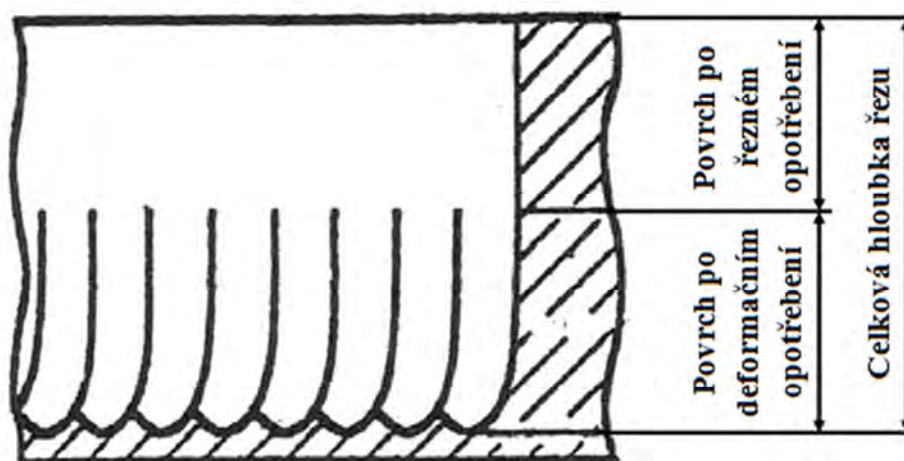
ρ – Hustota kapaliny [kg/m³]

1.8 Kvalita opracovaného povrchu při řezání vodním paprskem

Kvalita řezné plochy je z velké části závislá na hloubce řezu. Jak technologie hydroabrazivního paprsku, tak technologie čistého vodního paprsku zanechává na povrchu obrobene plochy viditelné rýhování. Tyto rýhy velmi významně ovlivňují kvalitu povrchu, tvarovou a rozměrovou přesnost obrobene plochy [3, 8].

V současné době se obrobena plocha dělí ve vertikálním směru na horní erozní zónu, přechodovou erozní zónu a dolní erozní zónu. Tyto zóny jsou způsobeny ztrátou kinetické energie vodního paprsku, který proniká řezaným materiálem [3, 8].

Na vrchní části povrchu se zpravidla dosahuje relativně dobré a stejnoměrné průměrné aritmetické úchytky profilu povrchu. Tato oblast je výsledkem takzvané zóny řezného opotřebení. Rýhovaná oblast, která se nachází ve spodní části řezu, vzniká působením deformačního opotřebení při řezání vodním paprskem [3, 8].



Obr. 1.21 Erozní zóny řezu [8].

Stav povrchu je ve většině případů kvalifikován přes parametry průměrné aritmetické úchytky profilu v závislosti na řezných parametrech. Průměrná aritmetická úchytka profilu v hladké zóně není zcela závislá na řezné rychlosti a je téměř nezávislá na hloubce řezu. V oblasti rýhované zóny se vzrůstající rychlostí posuvu a zvyšující se hloubkou řezu se parametry Ra a Rq velmi rychle zvyšují [3, 8].

Podle zrnitosti abraziva se kvalita povrchu lineárně mění. Použitím jemnějšího abraziva dosáhneme povrchu s jemnějším opracováním. Vodní paprsek s drobným abrazivem ztrácí rychleji svoji kinetickou energii při výstupu z trysky, což má za následek snížení rychlosti řezu a zvýšení vlnitosti povrchu [3, 8].

Kvalita řezného povrchu je velmi významně ovlivňována také tlakem kapaliny. Zvyšováním tlaku vody nám vzroste výstupní rychlost vodního paprsku, což vede ke zvýšení kinetické energie. Působením vyšší kinetické energie na řezaný materiál se zmenšuje vlnitost povrchu, průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu a zároveň se urychluje úběr materiálu v oblasti deformačního opotřebení [8, 13].

Na průměrnou aritmetickou úchylku profilu povrchu a jeho vlastnosti mají vliv také vibrace vodního paprsku, které zapříčiňují chvění i v mechanických částech stroje [8, 13].

1.8.1 Teplota v místě řezu

Řezání čistým vodním paprskem i hydroabrazivním paprskem se všeobecně považuje za technologii studeného řezání bez jakékoliv ovlivněné oblasti [8].

Pro většinu materiálů zvýšení teploty o pár stupňů oproti teplotě původní nepředstavuje výrazné ovlivnění jakýchkoli vlastností, a už vůbec ne jejich strukturu. Při pozorování vodního paprsku vycházejí z místa řezu jiskry a vodní páry, které poukazují na zvýšení teploty v bezprostřední blízkosti řezu, což potvrzuje zvýšení teploty v místě řezu a tepelné ovlivnění určitých materiálů [7, 8, 13].

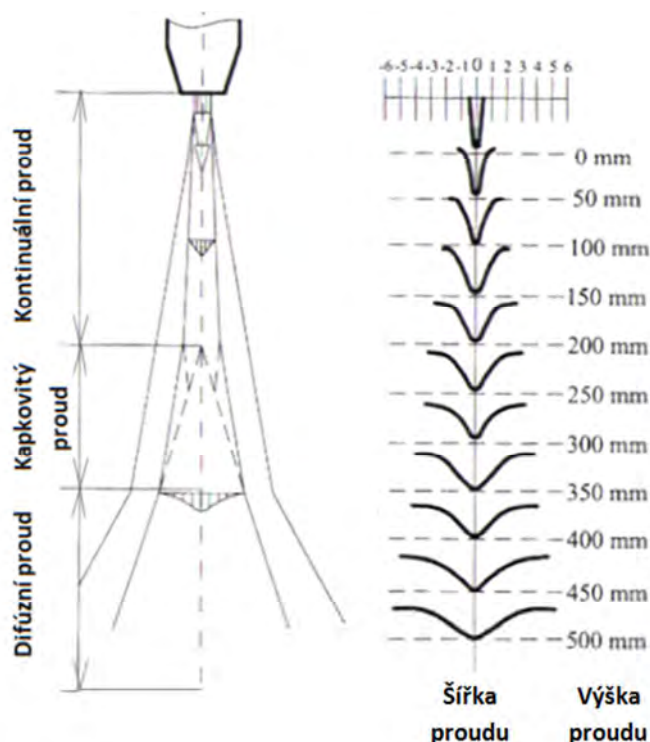
Na malé zvýšení teploty jsou citlivé především plastové a některé bio materiály. U těchto materiálů může zvýšení teploty jen o několik málo stupňů způsobit vznik trhlin a drobnou strukturální deformaci [7, 8, 13].

Technologie vodního paprsku je založena na úběru materiálu ve formě velmi drobných, takřka mikroskopických třísek. Kinetická energie vodního paprsku, která je vynaložena na úběr materiálu se mění na energii tepelnou. Většina této tepelné energie je pohlcena vodním paprskem, část této energie přechází i do obrobku. Teplota povrchu materiálu v místě řezu se zvýší přibližně o 20 °C. V porovnání s jinými vysokoenergetickými technologiemi, jako je například řezání plazmou nebo laserem, kde teplota v místě řezu můžeme dosáhnout až 10⁴ °C, lze nárůst teploty o 20 °C zcela zanedbat [1, 8].

1.9 Chyby vzniklé při dělení vodním paprskem

Po výstupu vodního paprsku z trysky se původně soudržný proud rozpíná do okolí. S rostoucí vzdáleností od trysky se zvětšuje i průměr vodního válce a tím klesá i erozní účinek v dolní části proudu v důsledku postupné ztráty kinetické energie. Je to způsobeno prudkým uvolněním nahromaděné energie do okolí a odporem řezaného materiálu [3, 13].

Tvar plochy obráběného materiálu je zcela závislý na tvaru vodního paprsku, jak je vidět na obrázku 1.22. Výsledný tvar vzniká působením soudržného proudu vody na povrchu řezaného materiálu a částečně rozptýleným proudem o větším průměru na spodním povrchu řezaného materiálu. Dalo by se říct, že vodní paprsek kopíruje svůj tvar do řezné mezery [3, 13].

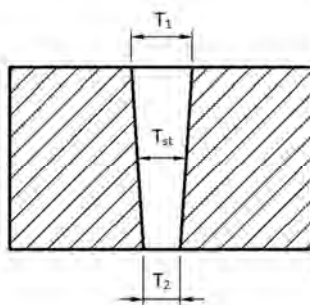


Obr. 1.22 Struktura kapalinového proudu a geometrie řezné mezery [3].

1.9.1 Odchylka kolmosti

Tolerance kolmosti je určena dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance kolmosti a kolmými k základní rovině. Při dělení materiálu vodním paprskem se jedná ve většině případů o zúžení stěn řezané plochy. Technologie vodního paprsku je postavená na erozi materiálu, což způsobuje vznik odchylky kolmosti, která je částečně závislá na čase působícího proudu na jedno místo řezu. Rozlišujeme čtyři základní druhy odchylek [3, 6].

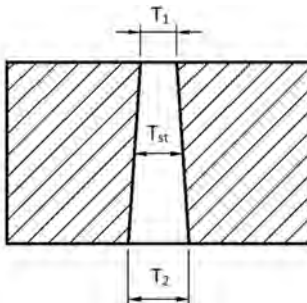
Odchylka tvaru „V“ je charakterizována širší mezerou v horní části řezu než ve spodní části řezaného materiálu. Tento tvar odchylky je nejčastěji způsoben delším působením vodního proudu, čímž eroduje vrchní část řezu více než část spodní. Tato odchylka vzniká i při odrazu abrazivních částic do vrchní části řezaného materiálu. Odchylka tvaru „V“ se vyskytuje v nejvíce případech řezání metodou AWJ a je znázorněna na obrázku 1.23 [3, 6].



Obr. 1.23 Odchylka kolmosti tvaru „V“ [3].

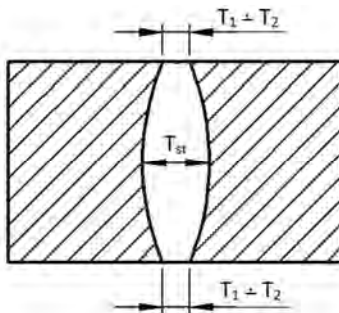
Reverzní odchylka tvaru „V“ se vyznačuje užší mezerou v místě vstupu vodního proudu a vyšší šířkou štěrbinu v místě výstupu řezaného materiálu. Vznik tohoto typu odchylky

bývá především u měkkých materiálů, kde vodnímu paprsku nic nebrání tomu, aby se rozpínal a zvyšoval tím průměr vodního válce. Jelikož tvar vodního paprsku kopíruje tvar řezaného materiálu, je ve spodní části materiál více odebírán. Reverzní odchylka tvaru „V“ je znázorněna na obrázku 1.24 [3, 6].



Obr. 1.24 Reverzní odchylka tvaru „V“ [3].

Soudečková odchylka kolmosti vzniká při obrábění velmi hrubých obrobků a je charakterizovaná užší šířkou štěrbin v horní a dolní části řezaného materiálu. Mezera mezi řezanými materiály je pak nejširší uprostřed tloušťky řezu [3, 6].



Obr. 1.25 Soudečková odchylka kolmosti [3].

Lichoběžníková odchylka kolmosti je způsobena špatným nastavením úhlu řezné hlavy. Prakticky se jedná o odchylku tvaru „V“ [3].

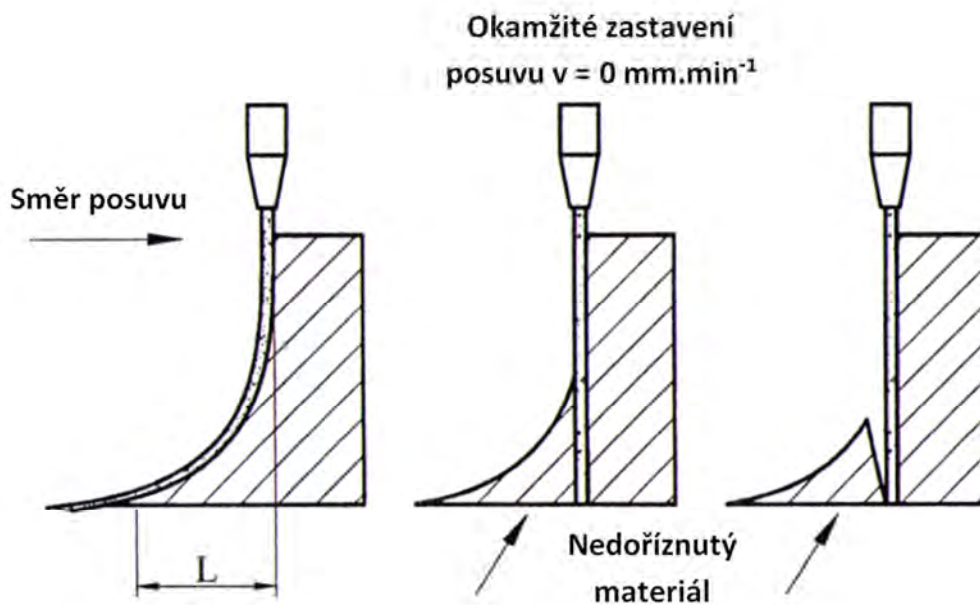
Odchylky kolmosti je možné minimalizovat nebo úplně eliminovat několika způsoby. V současné době jsou moderní stroje schopny eliminace pomocí 3D hlavy, kterou lze naklánět všemi směry, a tím změnit úhel dopadu vodního proudu. V některých případech stačí použít kvalitnější abrazivo nebo změnit provozní parametry jako je například snížení rychlosti posuvu, použití menšího průměru trysky nebo snížení vzdálenosti trysky od řezaného materiálu. Velikost a druh vzniklé odchylky je také závislý na vlastnostech materiálu, a to především na tvrdosti a obrobitelnosti. Velkou roli při vzniku odchylek hraje také síla řezaného materiálu. Čím je síla materiálu větší, tím je obtížnější udržet řez bez větších odchylek. Velikost odchylky řezu určuje nutnost dalšího opracování. Na základě velikosti odchylky se určují přídatky na případné další obrábění a snižuje se celkové využití materiálu, což znamená i vyšší náklady na výrobu. Z tohoto důvodu je velmi důležité odchylky co nejvíce minimalizovat [3, 6].

1.9.2 Zpoždování řezu a neúplný řez

Se vzrůstající hloubkou řezu se snižuje kinetická rychlost paprsku a dochází ke zpoždování řezu. Obecně se dosahuje lepších výsledků řezu při nižších rychlostech posuvu, vyšším hmotnostním průtoku abraziva a vyšším tlaku kapaliny. Odchylka

zpoždění řezu při dělení materiálu je způsobena změnou tvaru nástroje (hydroabrazivního proudu). Původně kolmý proud se v určité hloubce řezu začne zakřivovat a odklánět od své vlastní osy. Velikost tohoto zakřivení je závislá především na rychlosti posuvu a úbytku kinetické energie. Úbytek kinetické energie roste se zvyšujícím se odporem děleného materiálu, který je dán tvrdostí, pevností a celkovou obrobiteľností materiálu. Délka zpoždění L je definována rozdílem vstupního a výstupního místa vodního proudu. Zpravidla výstupní proud zaostává za proudem vstupním o délku L . Je tomu tak proto, že paprsek má největší výkon při vstupu do materiálu, avšak svoji energii postupně ztrácí se vrůstající tloušťkou materiálu, a to až do místa výstupu. Díky tomuto zpoždění se snižuje přesnost a vznikají geometrické chyby. Velikost zpoždění proudu se pohybuje řádově od desítek milimetru až po několik milimetrů [3, 6].

Při řezání materiálu s velmi vysokými provozními parametry, jako je například rychlý posuv a malý hmotnostní tok abraziva, dochází ke vzniku takzvané neproříznuté zóny. Důvodem vzniku této zóny je přeskocení vodního proudu. Je to zapříčiněno již zmiňovaným zpožděním proudu o délku L . V okamžiku, kdy dojde k prudkému zpomalení nebo úplnému zastavení posuvu za stálého proudění vodního paprsku, vznikne nedoříznutá zóna rychlým vzpřímením vodního proudu, jak je vidět na obrázku 1.26 [3, 6].

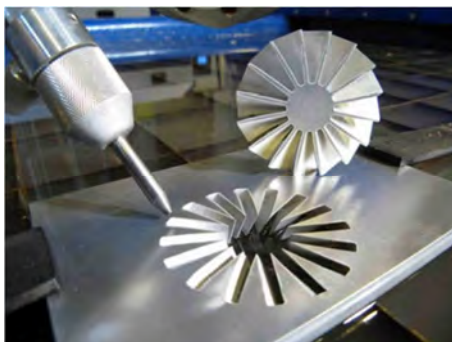


Obr 1.26 Nedoříznutí materiálu vlivem prudkého zastavení posuvu [3].

2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU SE 3D VYBAVENÍM

System 3D obrábění a řezání technologií vodního paprsku byl vyvinut již v 90. letech minulého století. Z počátku se jednalo pouze o přídatná zařízení, která se montovala k systémům 2D. Tyto systémy se využívaly a využívají především ve strojírenství při řezání tvarových dílců nebo při eliminaci takzvaného podřezání. V současné době je 3D příslušenství na takové úrovni, že je možné obrábět a vyřezávat tvary všech složitostí. Z tohoto důvodu se této technologii dostalo obliby i v uměleckých směrech, a to především v sochařství [22].

Dále se 3D řezání pomocí vodního paprsku dělí na dvě základní skupiny. První z nich je klasické řezání za pomoci řezné hlavy s 3D naklápěním a CNC řízeným stolem, jak je vidět na obrázku 2.1. Druhá možnost obrábění tvarových součástí vodním paprskem je obrábění pomocí robotické ruky, která se používá při výrobě velkých a velmi složitých součástí. [22].



Obr. 2.1 Turbína vyrobená 5 osou řeznou hlavou [32].

2.1 Technologie Dynamic Waterjet

Dynamické řezání vodním paprskem bylo vyvinuto za účelem zvýšení tvarové a rozměrové přesnosti obrobků, které jsou způsobené především kuželovitostí a ohybem vodního paprsku. Tyto dva faktory je možné z velké míry eliminovat snížením řezného posuvu, což vede k delším výrobním časům a výraznému zvýšení nákladů na výrobu [28].

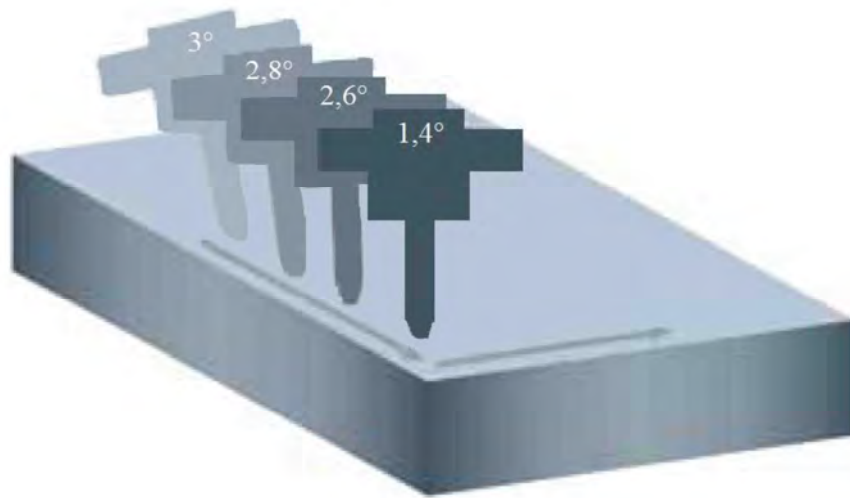


Obr. 2.2 Řezací hlavice Dynamic Waterjet [30].



Obr. 2.3 Řezání vrstvených materiálů technologií Dynamic Waterjet [30].

Technologie Dynamic Waterjet je znázorněná na obrázku 2.2. Tato technologie umožňuje eliminovat úkosy řezné hrany a ohyb vodního paprsku. Využívá matematických modelů, které firma Flow nazvala „SmartTream“. Na základě těchto modelů je řezací hlava naklápěna na stranu podle potřeby eliminace úkosů řezu. Dále jsou tyto matematické modely schopny řezací hlavu naklápět dopředu popřípadě dozadu tak, aby se minimalizoval ohyb vodního paprsku. Vše je vyhodnocováno řídicím systémem na základě řezných parametrů, které jsou zadávány operátorem. Pro kvalitní a rychlý řez materiálem je nezbytné zadat i jeho druh, tloušťku a požadovanou kvalitu řezné plochy. Na obrázku 2.4 jsou znázorněné úhly korekce vodního paprsku [28].



Obr. 2.4 Možnosti naklápění řezní hlavy technologii Dynamic Waterjet [29].

Díky schopnosti řezat materiál s vysokou přesností za velmi vysoké rychlosti posuvu dostává tato technologie širší výrobní možnosti, a zvyšuje se tak i její konkurenceschopnost. Díky eliminaci tvarových a rozměrových nepřesností se obrobek často nemusí dále zpracovávat, což vede k další úspoře času a nákladů na výrobu [28].

Fakta technologie Dynamic Waterjet: [27]

- rychlost řezání 4x větší oproti klasické řezací hlavici,
- možnost vrstvit součásti, viz. obrázek 2.3,
- odstranění úkosů (úkos je < 1 stupeň),
- pětiosá kinematika naklápění pomocí dvou kloubů až o 10° ,

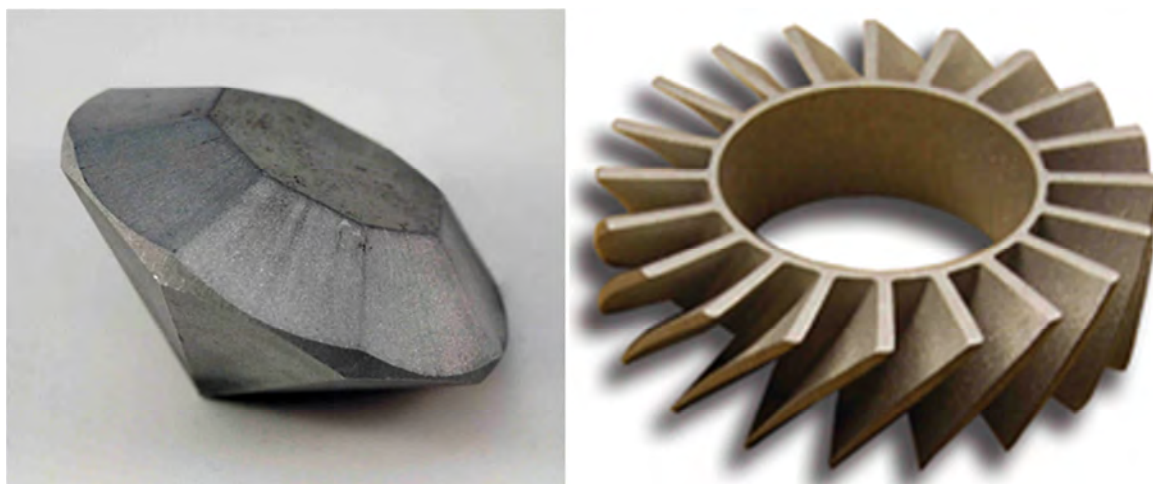
2.2 Technologie Dynamic Waterjet XD

Na základě technologie Dynamic Waterjet byla vyvinuta technologie, o které můžeme s jistotou říct, že se jedná o technologii 3D řezání za pomoci vodního paprsku. Řezací hlavice Dynamic Waterjet XD je zobrazená na obrázku 2.5. Na rozdíl od technologie Dynamic Waterjet je možné naklápět řeznou hlavu v pěti osách až o 60° , což neslouží pouze k eliminaci rozměrových a tvarových nepřesností, ale také k tvarovému řezání [36, 37].



Obr. 2.5 Řezací hlavice Dynamic Waterjet XD [30].

Technologie využívá matematických modelů „SmartStream“ stejně jak technologie Dynamic Waterjet. Její rozšíření o 3D řezání přináší i rozsáhlejší software. Program je vytvářen na základě modelu, který bývá nejčastěji vytvořen 3D programem. Systém „SmartStream“ si na základě zvoleného materiálu a požadované výstupní řezné plochy zvolí řezné parametry jako je rychlost posuvu, hmotnostní průtok abraziva atd. Řezání metodou Dynamic Waterjet XD je v současné době nejpřesnější a nejproduktivnější technologie hydroabrazivního paprsku s 3D hlavou. Některé výrobky, které je možné vyrobit technologií Dynamic Waterjet XD jsou znázorněny na obrázku 2.6 [36, 37].



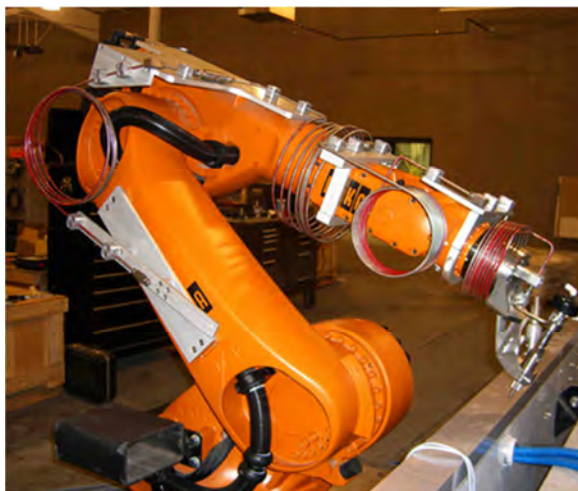
Obr. 2.6 Výrobky vyrobené technologií Dynamic Waterjet XD [34, 35].

2.3 Řezání za pomoci šestiosých robotů

Řezání materiálu za použití průmyslového robota vnáší do technologie vodního paprsku nové možnosti. Především pokud se jedná o řezání tvarově složitých součástí, jak je vidět na obrázku 2.8. Moderní šestiosý průmyslový robot dokáže vést řeznou hlavici s vysokou rychlostí a zároveň s přesností až $\pm 0,01$ mm. Výrobci průmyslových robotů garantují přesnost opakování operací, která odpovídá dané přesnosti robota. Velkou

výhodou průmyslových robotů je jejich maximální dosah ramene, a to ve třech rozměrech, který může být až 3000 mm [38].

V současné době přední výrobci průmyslových robotů jako je například firma ABB nebo KUKA spolupracují s firmami, které se zabývají technologií vodního paprsku. Výsledkem této spolupráce jsou průmyslově vyráběné roboty, které jsou vybaveny příslušenstvím k řezání vodním paprskem, jak je vidět na obrázku 2.7 [39].



Obr. 2.7 Průmyslový robot firmy KUKA se systémem vodního paprsku od firmy FLOW [39].

Robotizovaná pracoviště sebou přinášejí i velký důraz na bezpečnost práce. Pro zajištění bezpečnosti těchto pracovišť je nutné dodržovat mezinárodní bezpečnostní normy, které nám určují přesné požadavky, za kterých je možné robotizované pracoviště provozovat [41].

Bezpečnostní zásady robotizovaného pracoviště [41]:

- robot nesmí při práci přijít do styku s obsluhou (rameno robota nesmí dosáhnout na obsluhu),
- pracovní prostor robota musí být zajištěn bezpečnostními prvky (ploty, optické závory atd.),
- robot musí být vybaven STOP tlačítkem, které slouží k úplnému vypnutí robota a jeho příslušenství,
- robotizované pracoviště musí být vybaveno nadřazeným řídicím systémem, který slouží k úplnému zastavení robota,



Obr. 2.8 Výroba součásti s požitím robotického ramene [40].

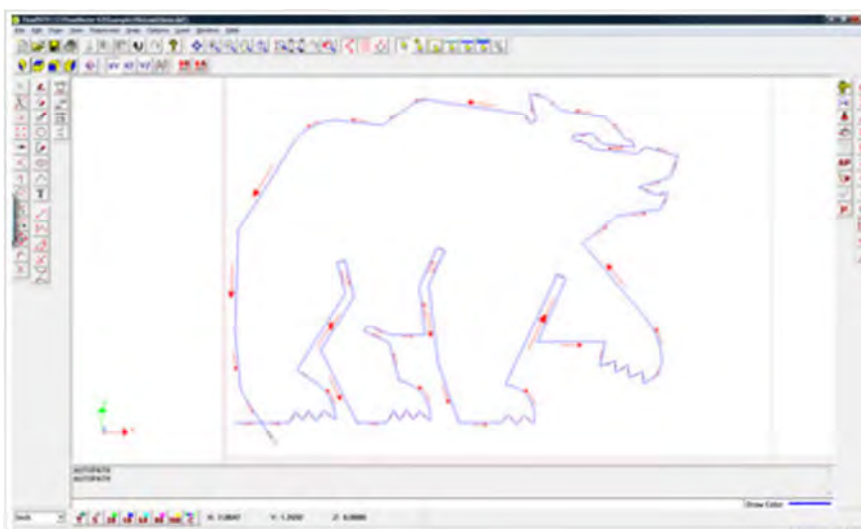
2.4 Software pro řezání vodním paprskem

Řídicí software má za úkol zprostředkovávat komunikaci mezi operátorem a samotným strojem, čímž se zajistí bezproblémové fungování stroje. CNC řízení je nedílnou součástí i technologie vodního paprsku. Většina výrobců využívá univerzálních řídicích systémů, jako je například ASPERWIN jehož rozhraní je znázorněno na obrázku 2.9. Tyto programy jsou určeny pro tvorbu řezacích plánů a následnému generování NC programu. V programu není možné vytvořit samotný díl, ale je nutné ho nahrát z klasických CAD systémů. Program je schopný uspořádat jednotlivé díly tak, aby byly vyrobeny s co nevyšší využitelností materiálu [44].



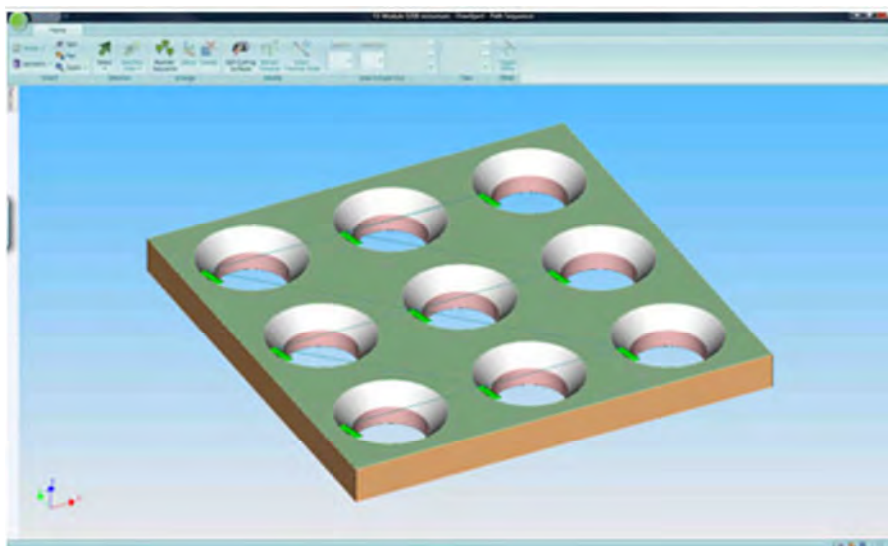
Obr. 2.9 Plánování výroby pomocí programu ASPERWIN [44].

Firma Flow vyvinula roku 1996 řídicí systém s názvem FlowMaster jehož rozhraní je znázorněno na obrázku 2.10, který je dodnes nejvyužívanějším softwarem pro 2D řezání vodním paprskem. Software pracuje pod operačním systémem Windows a jeho ovladatelnost je velmi snadná. FlowMaster je schopen řídit a zároveň zobrazovat všechny funkce a nastavené parametry stroje i vysokotlakého čerpadla. Systém se liší od ostatních řídicích systémů svoji obsáhlou integrovanou databází parametrů řezání pro většinu materiálů ve všech tloušťkách. Na základě databáze je systém schopen optimalizovat řeznou rychlost i dráhu zcela automaticky pro všechny materiály v databázi [43].



Obr. 2.10 Rozhraní softwaru FlowMaster [43].

S novou technologií 3D řezání bylo potřeba i nového řídicího systému, proto firma Flow vyvinula nový řídicí systém, který nazvala FlowXpert pro 3D programování. Rozhraní tohoto softwaru je zobrazeno na obrázku 2.11. Program je vytvářen na základě 3D modelu, který může být vytvořen prakticky ve všech používaných formátech. Programování je velmi snadné v podstatě stačí nahrát model, a software automaticky optimalizuje řezné rychlosti na základě parametrů, které jsou vymezeny pro danou součást. Optimalizované parametry jsou vyhodnoceny na základě materiálové databáze, která obsahuje více jak 100 různých materiálů ve všech tloušťkách [37].



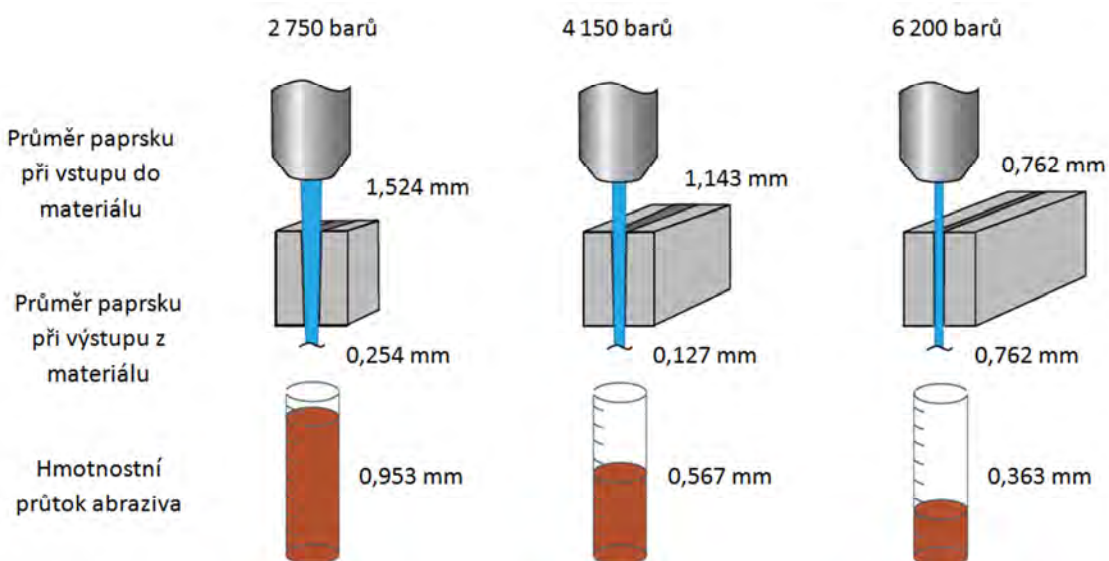
Obr. 2.11 Rozhraní softwaru FlowXpert [37].

2.5 Technologie Hyperpressure

Pod názvem Hyperpressure se skrývá čerpadlo s technologií, která disponuje tlakem 6 481 barů, přičemž je schopno dodávat trvalý provozní tlak až 5 998 barů. Následkem vyššího tlaku roste kinetická energie vodního paprsku a tím i výkon. Výstupní rychlost vodního paprsku je přibližně 4x větší než rychlost zvuku, což je asi $1300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Se vzrůstajícím

provozním tlakem se zvyšuje i hmotnostní průtok hydroabrazivního paprsku a je možné použít i vyšších řezných posuvů, a to až o 50 % [45].

S použitím čerpadla o vyšším tlaku roste rychlost proudu a zmenšuje se průměr vodního paprsku. Díky tomu je tato technologie výhodná i z ekonomického hlediska. Pokud se zmenší průměr vodního paprsku, sníží se i hmotnostní průtok abraziva, v tomto případě až o 50% oproti běžně používaným čerpadlům s tlakem přibližně 4000 barů. Abrazivo tvoří přibližně 60 % provozních nákladů. Z tohoto důvodu je tato technologie výhodnější jak z technického, tak z ekonomického hlediska. Ekonomická úspora hmotnostního průtoku je graficky znázorněna na obrázku 2.12 [45].



Obr. 2.12 Vliv pracovního tlaku na základní parametry [42].

2.6 Příslušenství pro 3D řezání

V současné době se na trhu vyskytuje mnoho přídavných technologií, které jsou přímo určeny k řezání vodním paprskem. Slouží většinou ke zvýšení produktivity, bezpečnosti a k usnadnění práce obsluhy. Největším a nejvýznamnějším výrobcem, co se týče strojů pro řezání vodním paprskem, je firma FLOW. Tato firma se také velmi intenzivně věnuje vývoji pomocných zařízení.

2.6.1 Vakuový přípravek ULTRAPIERCE

Technologie je založená na vakuu ve směšovací komoře. Díky vakuu dojde k naplnění komory abrazivem ještě před spuštěním vodního paprsku, při spuštění vodního proudu je abrazivo strhnuto do paprsku. Vede to ke krátkodobému zvýšení obsahu abraziva ve vodním paprsku, a tím i ke zvýšení průraznosti. Technologie vakuového přípravku je zobrazena na obrázku 2.13 [46].

Tato technologie je vhodná pro řezání křehkých materiálů jako je sklo, mramor, kamen, lamináty a různé komposity. Tato technologie je především určená pro děrování a řezání výrobků, kde je zapotřebí přerušovaných řezů. Vzhledem k velké průrazové síle se zvětšuje kvalita povrchu v oblasti vstupu vodního paprsku do materiálu a zároveň dochází ke snižování výrobních časů [46].

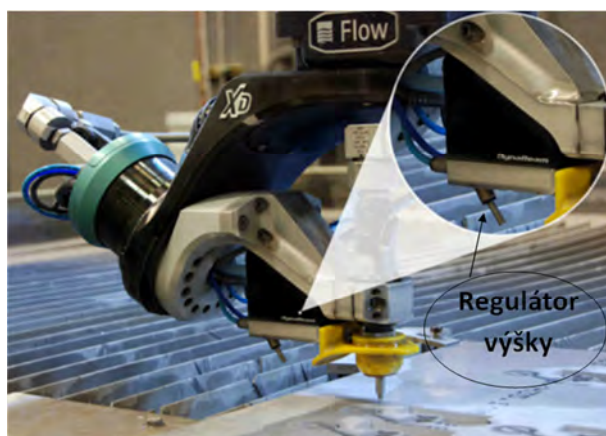


Obr. 2.13 Vakuový přípravek ULTRAPIERCE [46].

2.6.2 Snímač a regulátor výšky

Regulátor výšky pracuje na principu laserového snímání. Jeho úkolem je automaticky upravovat nebo udržovat konstantní vzdálenost od obrobku. Tato technologie se uplatňuje především při řezání členitých obrobků s nepravidelnou výškou povrchu jako jsou například vodní nádrže viz. obrázek. 2.15 [47].

Měření probíhá periodicky po celou dobu řezu a před každým novým průstřelem. Jedná se o technologii, která se používá výhradně k 3D řezání. Dále se tato technologie velmi často využívá při řezání s použitím šestiosých robotů. Příklad použití je zobrazen na obrázku 2.14 kde je snímač a regulátor výšky součástí řezací hlavy Dynamic Waterjet XD [47].



Obr. 2.14 3D řezací hlava s regulátorem výšky [49].

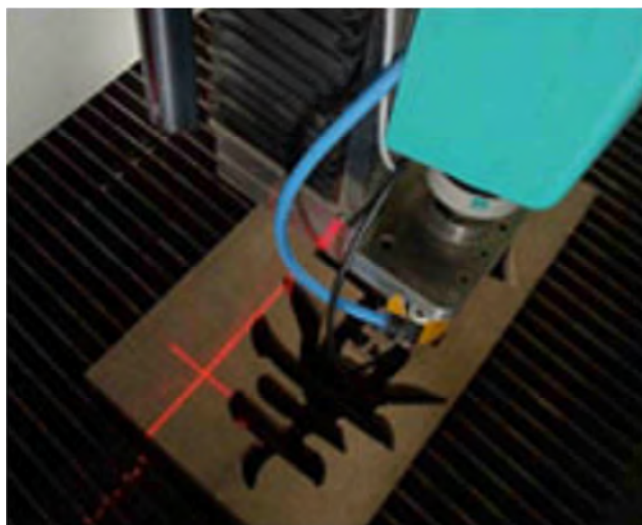


Obr. 2.15 Víko tlakové vodní nádrže vyrobeno za pomoci 3D řezací hlavy s regulátorem výšky[48].

2.6.3 Laserové zaměřování polohy

Laserové zaměřování polohy umožňuje operátorovi rychlé a přesné nastavení vodního paprsku vůči řezanému materiálu. Použití této technologie je velmi jednoduché.

Obsluha pohybuje s řezací hlavou na okraji řezaného materiálu tak, aby laser místy překročil hranu obrobku a to zhruba na 10 místech. Zařízení poté pomocí laseru vyhodnotí a nastaví souřadnice tak, aby byl roh materiálu považován za nulový bod. Zařízení společně s laserovým křížem je na obrázku. 2.16 [50].



Obr. 2.16 Laserové zaměřování polohy [50].

2.6.4 Přídavný vodní paprsek

Technologie čistého vodního paprsku je známa již řadu desetiletí. V současné době se využívá spíše pro měkké materiály s nízkou pevností. Mezi tyto materiály můžeme zařadit například pryže, plastické hmoty, teflon, papír a lepenku. Tyto materiály se používají ve velkém množství na výrobu těsnících prvků, které mohou být tvarově velmi složité. Z tohoto důvodu se řezná hlavice s možností 3D naklápění začala vybavovat i tryskou pro čistý vodní paprsek, jak je zobrazeno na obrázku 2.17 [51].

Řezání čistým vodním paprskem s sebou přináší mnoho technických i ekonomických výhod. Největší výhodou je vysoká přesnost a velmi malý průměr řezného proudu, který může dosahovat až jedné desetiny milimetru. Další výhodou jsou velmi malé výrobní náklady v porovnání s technologií AWJ, kde je nutné použít velmi drahého abraziva. V současné době může být řezací hlavice pro čistý vodní paprsek přidána jako příslušenství k téměř jakémukoliv 3D systému [51].



Obr. 2.17 Čistý vodní paprsek, jako příslušenství k 3D systému firmy FLOW [51].

2.6.5 Kolizní senzor

Senzor slouží ke sledování vzdálenosti mezi řezným materiálem a hrotem směšovací trubice. Dále je schopen automaticky udržovat konstantní vzdálenost trysky od obrobku. Hlavním úkolem kolizního snímače je detekovat drobné překážky jako jsou šrouby a podobné výstupky, které by mohly poškodit řezací hlavu a směšovací komoru [52].

Technologie je založená na třech nezávislých nohách a detekčním kroužku, které přenášejí výškové rozdíly na obrobku, a to v rozsahu 360° v rovině XY. Případné nerovnosti povrchu jsou převáděny na osu Z, která automaticky přenastaví výšku řezné hlavy. Detekční kroužek je vybaven kontaktním páskem, který je v případě kolize stlačen určitým objektem. Na základě stlačení detekčního kroužku dojde k zastavení řezací hlavy i proudu vodního paprsku. Zařízení kolizního senzoru je zobrazeno na obrázku 2.18 [52].



Obr. 2.18 Kolizní senzor [53].

3 VYHODNOCENÍ NASAZENÍ TECHNOLOGIE Z HLEDISKA ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ PŘESNOSTI

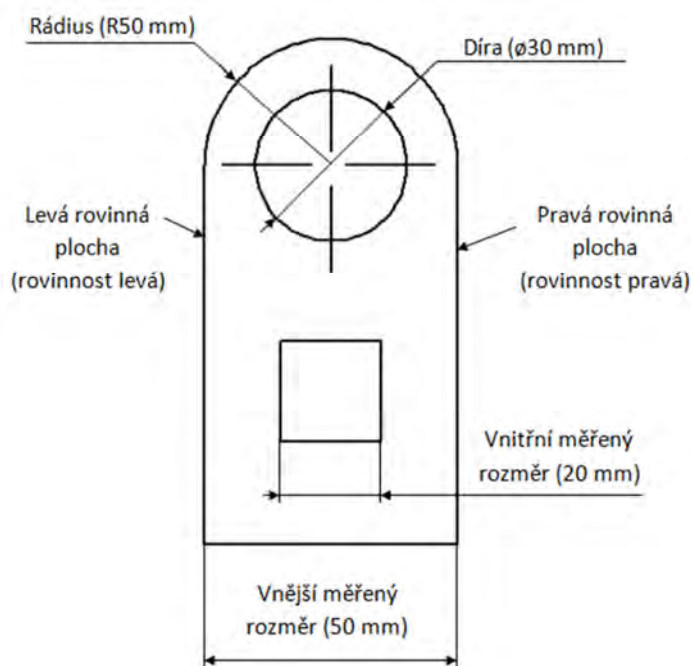
Vyhodnocení tvarových a rozměrových přesností technologie AWJ proběhlo ve spolupráci s brněnskou pobočkou firmy AWAC, spol. s r.o. (dále jen AWAC). Firma AWAC se specializuje jak na dělení materiálu, tak na výrobu tvarově složitých dílů technologií AWJ.

Technologie AWJ s příslušenství Dynamic Waterjet XD je vyhodnocována z hlediska rychlosti posuvu na rozměrovou a geometrickou přesnost. Vzorky jsou vyrobeny ze dvou různých materiálů s různou tloušťkou a odlišnými rychlostmi posuvu. Na základě výsledků měření dojdeme k závěrům, jaký je rozdíl mezi rozměrovou a geometrickou přesností ve dvou různých hloubkách, tudíž k jakému podřezání dochází při použití technologie Dynamic Waterjet XD.

3.1 Rozbor vyráběných a měřených vzorků

Vzorky byly vyráběny ve třech různých tloušťkách materiálu 10 mm, 20 mm, 30 mm. Pro každou sílu materiálu byly vyrobeny čtyři vzorky za použití čtyř základních rychlostí posuvu, a to 20 %, 40 %, 60 % a 80 % z maximální rychlosti posuvu, která dokáže proříznout daný materiál. Tyto rychlosti posuvu jsou dále vysvětleny v kapitole 3.2. To znamená, že pro jeden materiál bylo vyrobeno a změřeno celkem 12 vzorků.

Vzorky byly sestaveny z obecných tvarů, které jsou charakteristické téměř pro všechny vyráběné součásti metodou hydroabrazivního paprsku v plošném řezání. Vzorky se skládají ze dvou válcových ploch, na kterých je měřena rozměrová přesnost a kruhovitost. Jedná se o rádius (R50 mm) a o díru (Ø30 mm). Dále je vzorek definován sedmi rovinnými plochami, na kterých je měřen vnější rozměr (50 mm) a vnitřní rozměr (20 mm). Kromě těchto rozměrů jsou měřeny rovinnosti na takzvané levé a pravé rovinné ploše. Všechny měřené plochy a rozměry jsou zobrazeny na obrázku 3.1. Detailnější znázornění vzorku je zobrazeno na výkrese, který je umístěn v příloze 1.



Obr. 3.1 Měřené rozměry a tvary vzorku.

Každý vzorek, bez ohledu na jeho tloušťku, byl měřen ve dvou hloubkách od základní roviny, která je umístěna na vrchní ploše vzorku. Hloubky měření vzorků byly stanoveny tak, aby byly zřejmé rozdílne nepřesnosti v místě vstupu a výstupu vodního paprsku. Zároveň nebylo možné měřit vzorky přímo v těchto místech z důvodu drobných otřepů, které v nich mohou vznikat. Dále bylo nutné brát v potaz průměr sondy, který je 2 mm. S ohledem na všechny skutečnosti byly vzorky měřeny v hloubkách 1mm od vrchní plochy a 2 mm nad spodní plochou, nebo-li 2 mm od upínacího stolu.

Celkem bylo vyrobeno a změřeno 24 vzorků ze dvou různých materiálů, z kterých firma AWAC vyrábí naprostou většinu svých výrobků. Prvním materiálem je korozivzdorná ocel x5CrNi18-10. Druhým použitým materiálem je hliníková slitina s označením ENAW 5052. Vlastnosti a využití těchto materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.1 a 3.2.

Tab. 3.1 Vlastnosti korozivzdorné oceli [60].

Austenitická korozivzdorná ocel							
Číslo materiálu	ČSN		EN				
1.4301	41 7240		EN 10088/1-3-95		X5CrNi18-10		
Chemické složení [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
max 0,07	max 1,0	max 2,0	max 0,045	max 0,015	17,0–19,5	8,00–10,5	max 0,11
Mechanické vlastnosti							
Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez kluzu Rp1,0[MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A % min		Nárazová práce KV [J]		
			podél	napříč	podél	napříč	
200	230	500–700	45	35	100	60	
Fyzikální vlastnosti							
Hustota ρ [kg×m ⁻³]	Měrná tepelná kap. cp [J×kg ⁻¹ ×K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztlačnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W×m ⁻¹ K ⁻¹]		Rezistivita ρ [Ω ×mm ² ×m ⁻¹]		
7 900	500	16×10 ⁻⁶	15		0,15		
Technologické údaje							
Tepelné zpracování		Rozpouštěcí žhání 1000 – 1100 °C (ochlazovat vzduch nebo voda)					
Tvářitelnost		teploty tváření 1200–900 °C (ochlazovat na vzduchu)					

Tab. 3.2 Vlastnosti hliníkové slitiny [61, 62].

Hliníková slitina										
Číslo materiálu	ČSN					EN				
AW-5251	42 4412					EN 573-3				AlMg2
Chemické složení [hm. %]										
Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Ti	Zn	Sb	Fe+Si	Ostatní	Al
1,7-2,6	0,05-0,4	0,5	0,4	0,1	0,2	0,2	0,25	0,6	0,8	Zb.
Mechanické vlastnosti										
Mez kluzu Rp0,2 [MPa]		Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]				Tažnost Amin [%]		Tvrdost Brinel HB		
150		230				8		40-60		
Fyzikální vlastnosti										
Hustota ρ [kg×m ⁻³]	Měrná tepelná kap. c_p [J×kg ⁻¹ ×K ⁻¹]	Teplotní souč. roztažnosti α [K ⁻¹]			Tepelná vodivost λ_t [W×m ⁻¹ K ⁻¹]		Rezistivita ρ [Ω ×mm ² ×m ⁻¹]		Teplota tavení T [°C]	
2 650	896	24×10 ⁻⁶			130-170		0,5		630	
Technologické údaje										
Tepelné zpracování		Žíhání 320-360 °C a setrvání na teplotě 1-5 hod								
Vhodnost pro svařování		Vhodný předehřev na teplotu 100-300 °C podle tloušťky materiálu								
Tváření za tepla		350-420 °C								
Použití										
Na středně namáhané konstrukce, které odolávají korozi a mořské vodě, potravinářský, chemický průmysl, pro vnější i vnitřní architekturu a pro stavbu vozidel.										
Charakteristické vlastnosti										
Střední pevnost. Velmi dobrá chemická stálost. Větší odolnost proti mořské vodě a alkalickým roztokům než u čistého hliníku. Velmi dobrá leštitelnost.										

3.2 Prostředí a popis výroby vzorků.

Prostředí výroby

Jak již bylo zmíněno, vzorky jsou vyráběny v brněnské pobočce firmy AWAC. Tato pobočka disponuje třemi CNC stroji AQUACUT s maximálním pracovním prostorem 3000 mm x 6000 mm. Tyto stroje pracují s provozním tlakem 4100 barů a jsou využívány na méně náročné operace. V roce 2013 byl rozšířen strojový park firmy AWAC o stroj

Mach 4C vyrobený firmou FLOW, který je zobrazen na obrázku 3.2. Toto zařízení je doposud považováno za nejmodernější a nejvýkonnější na světě. Stroj disponuje pracovním tlakem 6000 barů. Díky tomuto tlaku se výstupní rychlost vodního proudu blíží čtyřnásobku rychlosti zvuku. Z této skutečnosti vychází i název stroje MACH 4. Zároveň je stroj vybaven technologií Dynamic Waterjet XD, která dokáže eliminovat podřezání, a tím snížit rozměrovou nepřesnost ve spodní části řezu.



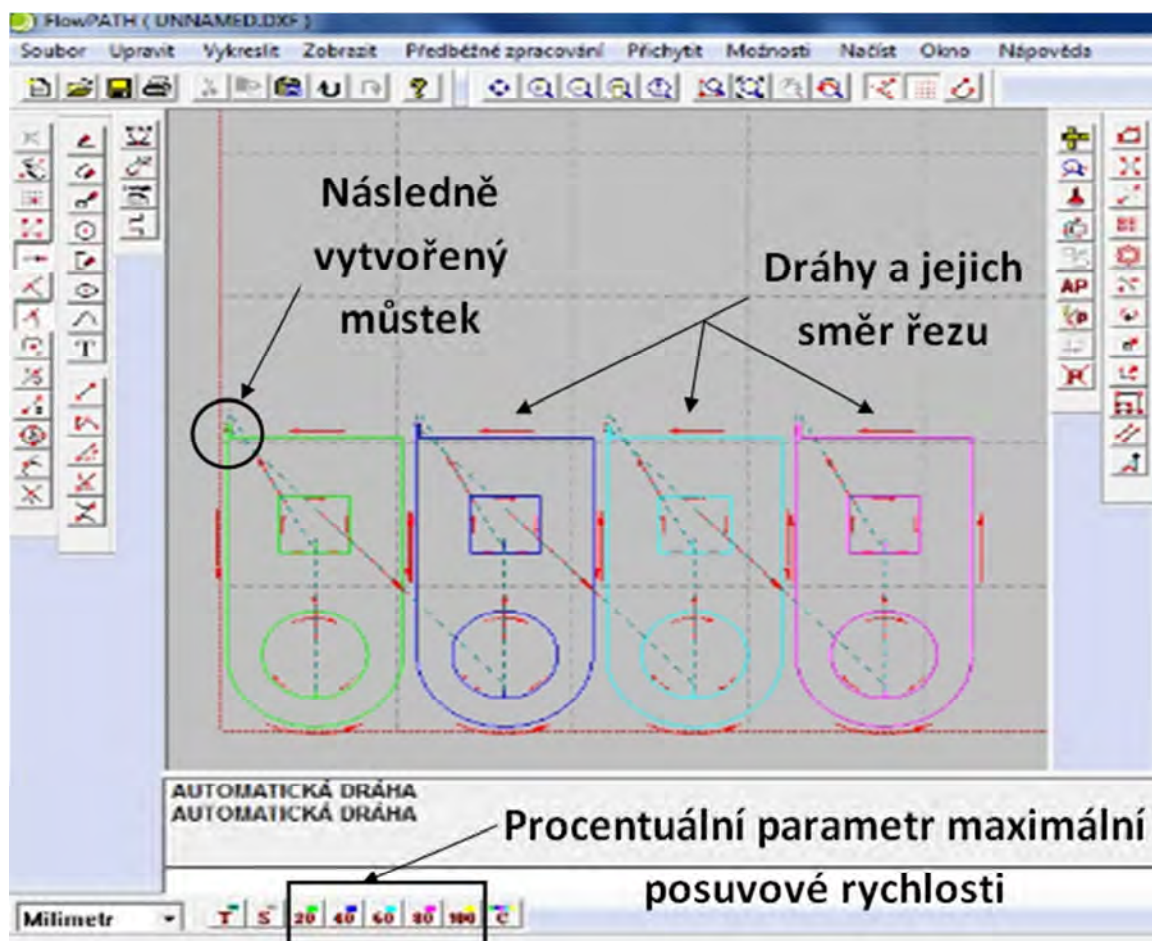
Obr. 3.2 Stroj MACH4 od firmy Flow [56].

Stroj je vybaven řídicím systémem FlowXpert, který nám umožňuje importovat již vytvořenou geometrii v jiném programu. Je možné použít prakticky všechny formáty 2D nebo 3D souborů. Dále je stroj vybaven již zmiňovanou technologií SmartStream, která po zadání geometrie, typu a tloušťky materiálu, automaticky spočítá maximální rychlost posuvu, která dokáže proříznout daný materiál. Jde o takzvanou 100% rychlost posuvu. Ostatní parametry, jako je hmotnostní průtok abraziva, tlak vodního paprsku a vzdálenost abrazivní trysky od materiálu zůstávají konstantní. Řídicí systém FlowXpert umožňuje nastavovat čtyři základní rychlosti posuvu, a to 20 %, 40 %, 60 % a 80 % z maximální rychlosti posuvu. Od nastavení dané rychlosti řezu se odvíjejí rozměrové a tvarové nepřesnosti, které jsou předmětem měření v kapitole 3.3 a vyhodnocené v kapitole 3.4. Dále má nastavená rychlost vliv na samotnou kvalitu řezu a typické rýhování ve spodní části řezu. Je obecně známo, že s rostoucí rychlostí řezu se zvyšuje i průměrná aritmetická úchylna profilu v místě řezu a s největší pravděpodobností by měly růst i rozměrové a tvarové nepřesnosti součástí, v našem případě vzorků.

Popis výroby a nastavení stroje

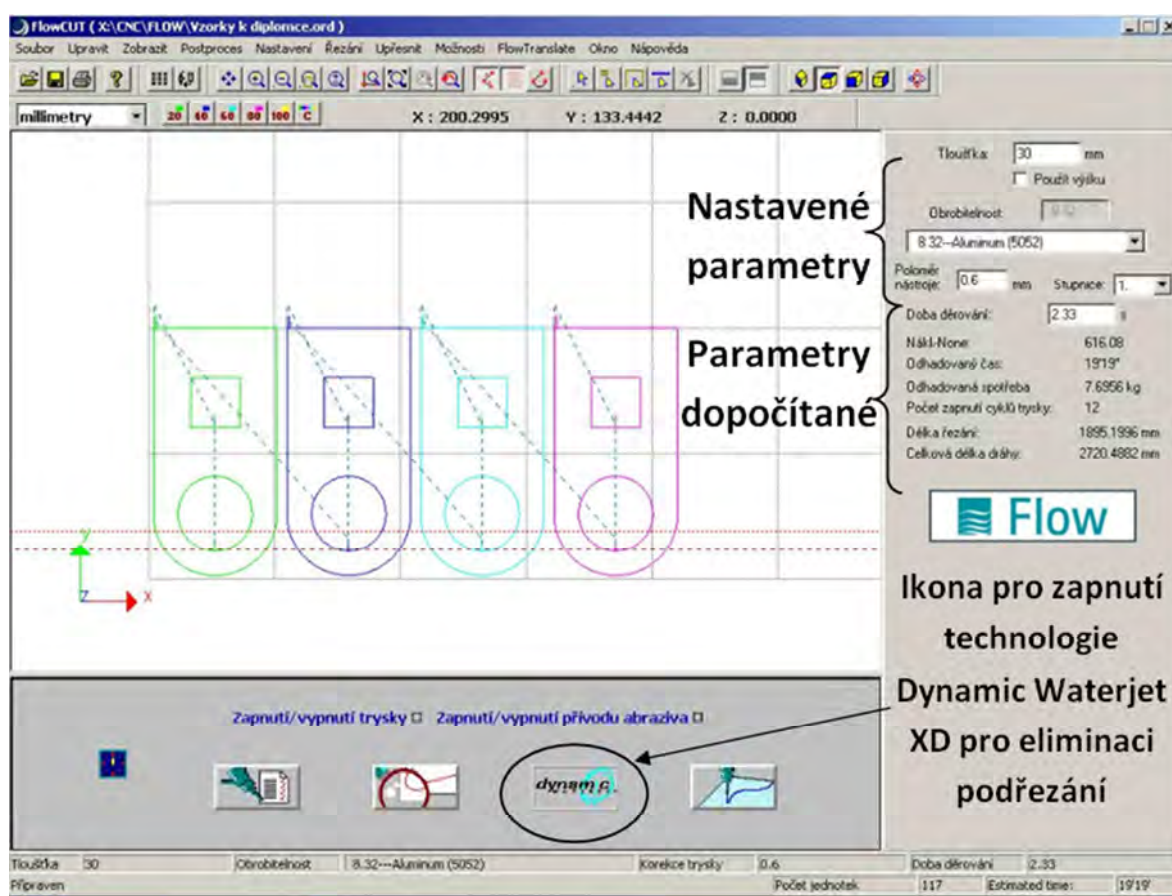
Výkres vyráběných vzorků byl vytvořen za pomoci softwaru AutoCAD Mechanical 2014 a je uveden v příloze č. 1. Do softwaru FlowPATH byl výkres importován ve formátu DXF. Software FlowPATH slouží k vytvoření programu, který určuje trajektorii řezu a rychlost řezací hlavy vůči řezanému materiálu. Tyto rychlosti, respektive procentuální parametry maximální rychlosti posuvu, které jsou schopny proříznout daný materiál, se od

sebe barevně odlišují, jak je vidět na obrázku 3.3. Tento software dále umožňuje drobné úpravy již vytvořených výkresů jako je vytvoření můstků a podobně.



Obr. 3.3 Rozhraní softwaru FlowPATH.

Po vytvoření dané trajektorie a nastavení rychlosti posuvu byl program importován do stroje, kde se nastavily zbylé parametry jako je druh materiálu, tloušťka materiálu a poloměr nástroje. Zbývající parametry potřebné ke kvalitnímu řezu jsou dopočítány technologií SmartStream, a pro všechny vzorky jsou stejné, mimo rychlosti posuvu. Zadávané a vypočítané parametry jsou sepsány v tabulce 3.3 a vyznačeny na obrázku 3.4. Pro výrobu vzorku byla zároveň použita technologie, které byla vyvinuta především pro eliminaci podřezání takzvaný Dynamic Waterjet XD.



Obr. 3.4 Rozhraní stroje MACH4 se softwarem FlowCUT.

Tab. 3.3 Parametry stroj, které jsou použité u všech vzorku.

Jednotlivé parametry stroje	Hodnota parametru
Průměr směšovací trubice	1,016 mm
Průměr trysky	0,25 mm
Provozní tlak kapaliny	600 MPa
Druh abraziva	Granát
Velikost abraziva	80 MESCH
Hmotnostní průtok abraziva	0,4 kg · min ⁻¹

3.3 Prostředí a popis měření vzorků.

Prostředí měření

Vzorky byly měřeny v Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky. Ústav disponuje manuálním 3D souřadnicovým měřicím přístrojem, který je vyroben firmou Mitutoyo a jedná se o modelovou řadu CRYSTA-PLUS M544, viz. obrázek 3.5. Přístroj bývá v současné době obvykle vybaven softwarem MCOSMOS MiCAT, který umožňuje měřit veškeré 3D tvary. Měřicí zařízení je vybaveno starší verzí softwaru MCOSMOS MiCAT.

S jeho pomocí je možné měřit pouze 2D tvary. Z tohoto důvodu je měření z části omezeno. Dále je stroj vybaven teplotním kompenzačním čidlem, které umožňuje měřit bez jakýchkoliv nepřesností stroje v rozsahu teplot 16 – 26 °C. Přesné informace od výrobce stroje jsou uvedeny v tabulce 3.4 [57].

Tab. 3. 4 Parametry měřicího zařízení CRYSTA-PLUS M544 [57].

Jednotlivé parametry stroje	Hodnota parametru
Rozměry stroje: šířka / délka / výška	1082 / 1078 / 2285 [mm]
Celková hmotnost stroje	495 [kg]
Dodávku vzduchu: objem / tlak	25 l/min / 0,5 – 0,9 [MPa]
Požadované okolní teplota	16 – 26 [°C]
Vedení	Vzduchová ložiska na všech
Rozsah měření: osa x / y / z	500 / 400 / 400 [mm]
Měřicí rozlišení	0,5 [μm]
Maximální parametry měřeného dílce: výška /	510 mm / 180 [kg]
Možnosti upnutí: počet závitů M8	9 [ks]

Nedílnou součástí měřicího zařízení je také měřicí hlava MH20i. Jedná se o manuálně nastavitelnou hlavici, která kombinuje pohyb ve dvou osách. Osa A se otáčí v rozsahu $\pm 180^\circ$ v rovině X-Y a osu B lze natáčet v rozsahu $\pm 90^\circ$ v rovině Z. Hlavice lze natáčet po 15° v obou osách, což umožňuje celkem 168 poloh. Dále je hlavice vybavena osmi nastavci různých délek, které slouží k uchycení měřicí sondy. Na obrázku 3.6 je vidět měřicí hlavice s nastavcem a sondou [58].



Obr. 3.5 Měřicí zařízení CRYSTA-PLUS M544 na ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.



Obr. 3.6 Měřicí sonda MH20i s nástavcem a sondou.

Postup měření

Před samotným měřením vzorku je nutné vytvořit průvodní program, na jehož základě se provádí samotné měření. Program je vytvořen z příkazů, které přesně definují měřicí operaci a počet bodů, který je k dané operaci zapotřebí. Průvodní program použitý k měření je umístěn v příloze číslo 2. Další nezbytný úkon, který je nutné provést před samotným měřením, je kalibrace sondy, která se provádí za pomoci kalibračního tělíska. V našem případě se jedná o tělísko ve tvaru koule, která je zobrazena na obrázku 3.7. Jejíž přesný průměr je uložen v měřicím softwaru. Kalibrace se provádí pomocí 5 až 6 dotyků na rovníku a jedním dotykem na vrchním pólu koule.



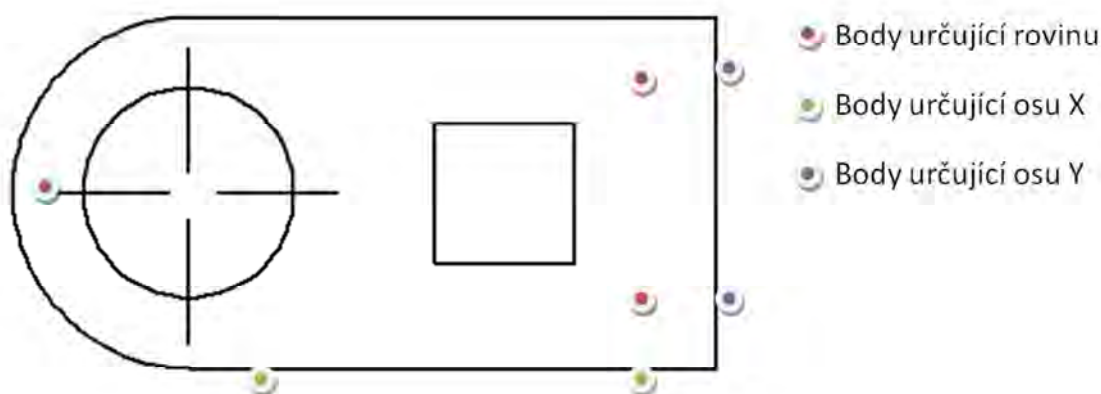
Obr. 3.7 Kalibrační tělísko.



Obr. 3.8 Upnutí vzorku.

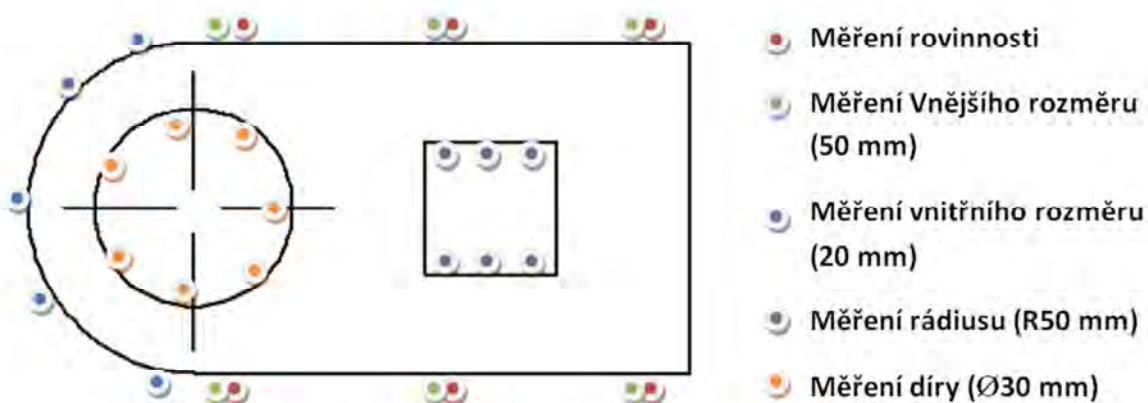
Po vytvoření měřicího programu a zkalibrování sondy je nutné upnout vzorek do nehybné polohy. K upnutí měřeného vzorku slouží devět děr se závitem M8, které jsou součástí stolu stroje. Z důvodu minimálních sil, které působí na vzorek během měření, nebylo nutné využít upínacích závitů. Vzorek byl ustaven a zafixován modelínou, jak je možné vidět na obrázku 3.8, která do jisté míry usnadnila upínání a zvýšila tím rychlost měření.

Součástí samotného měření je definice souřadného systému, který je nutno definovat u každého měřeného vzorku. V našem případě se jedná o měření ve 2D, proto je nutné definovat rovinu, směr osy X a Y. Základní rovina byla definována třemi body na povrchu měřeného vzorku. Osy X a Y byly definovány pomocí dvou bodů na řezných plochách. Přibližné umístění bodů, které určují souřadný systém, je zobrazeno na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 Umístění bodů, které určují souřadný systém.

Po určení souřadného systému byly měřeny tvarové a rozměrové tolerance v pořadí, které přesně odpovídá průvodnímu programu měření, který je umístěn v příloze 1. Přibližné body měření v základní rovině jsou znázorněny na obrázku 3.10. Každý vzorek byl měřen ve dvou hloubkách řezu od základní roviny. Na obrázku 3.10 jsou znázorněny body měření pouze v jedné hloubce od základní roviny. V druhé rovině, která je umístěna v jiné hloubce, jsou body měření téměř totožné se základní rovinou.



Obr. 3.10 Umístění bodů v základní rovině při měření jednotlivých rozměrů.

Výstupem měřicího softwaru je protokol o měření, v kterém jsou zaznamenány všechny měřené rozměry včetně geometrických tolerancí, které byly nastaveny v průvodním programu měření. Ukázkový protokol o měření je součástí přílohy č. 3. Dále je možné vygenerovat z měřicího softwaru grafické záznamy jednotlivých měřených rozměrů a tvarů. Vzorové grafické záznamy jsou součástí příloh 4 až 6.

3.4 Postup vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti měřených vzorků

Pro vyhodnocení naměřených hodnot jsou vzorky rozdělené podle druhu a tloušťky materiálu. Na základě naměřených hodnot jsou vypočítány rozměrové úchytky jmenovitých rozměrů, z kterých je spočítána odhadovaná střední hodnota nepřesnosti daného vzorku řezaného určitou rychlostí posuvu. Mezi sebou jsou porovnávány vždy čtyři vzorky o jednotné tloušťce materiálu, a každý vzorek je řezán odlišnou rychlostí posuvu.

Střední hodnoty kruhovitosti a rovinnosti jsou počítány podle vzorce (3.1) a (3.2). Výpočet odhadu středních hodnot kruhovitosti a rovinnosti je znázorněn pouze pro vzorek vyrobený z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 10 mm, řezaný rychlostí posuvu 20 %. Hodnoty pro vzorový výpočet jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Odhad střední hodnoty úchytky kruhovitosti \bar{u}_{kru} [59]:

$$\bar{u}_{kru} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{kruhi} \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

n – počet měřených hodnot [mm]

u_{kruhi} – úchytky kruhovitosti [mm]

Vzorový výpočet:

$$\bar{u}_{kru} = \frac{1}{4} \times (0,017 + 0,018 + 0,054 + 0,018) = 0,0269 \text{ mm}$$

Odhad střední hodnoty úchytky rovinnosti \bar{u}_{rov} [59]:

$$\bar{u}_{rov} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{rovi} \text{ [mm]} \quad (3.2)$$

u_{rovi} – úchytky rovinnosti [mm]

Vzorový výpočet:

$$\bar{u}_{rov} = \frac{1}{2} \times (0,014 + 0,030) = 0,022 \text{ mm}$$

Rozměrové úchytky a odhadované střední hodnoty jsou počítány podle vzorce (3.3) a (3.4). Výpočet rozměrové úchytky je znázorněn pouze pro vnější rozměr (50 mm) v hloubce 1 mm od základní roviny vzorku vyrobeného z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 10 mm řezaného rychlostí posuvu 20 %.

Výpočet odhadované střední hodnoty je znázorněn pouze pro měření v hloubce 1 mm od základní roviny pro tentýž vzorek. Dále jsou rozměrové úchytky uvedeny v tabulce 3.5.

Rozměrové úchytky u_{ri} [59]:

$$u_{ri} = Nr - Jm \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

Nr – skutečná hodnota rozměru [mm]

Jm – jmenovitá hodnota rozměru [mm]

Vzorový výpočet:

$$u_{ri} = 49,88 - 50 = -0,12 \text{ mm}$$

Odhad střední hodnoty rozměrové úchytky \bar{u}_r [59]:

$$\bar{u}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ri} \text{ [mm]} \quad (3.4)$$

u_{ri} – rozměrová úchytky [mm]

Vzorový výpočet:

$$\bar{u}_r = \frac{1}{4} \times (-0,123 - 0,113 - 0,038 - 0,148) = -0,105 \text{ mm}$$

V následujících podkapitolách jsou uvedeny tabulky s naměřenými a vypočítanými hodnotami jednotlivých vzorků. Každá podkapitola se zabývá porovnáváním rozměrové a geometrické přesnosti v závislosti na rychlosti řezání u čtyř vzorků z totožného materiálu o stejné tloušťce. Výstupem z každé podkapitoly je graf, který znázorňuje střední úchytku rozměrů ve dvou hloubkách řezu, kruhovitost a rovinnost v závislosti na rychlosti posuvu. V přílohách 7 až 12 jsou umístěny grafy znázorňující střední hodnoty úchytek rozměrů ve dvou hloubkách měření od základní roviny a rozdíl přesnosti mezi těmito rovinami. Dále jsou v těchto přílohách zobrazeny úchytky kruhovitosti a rovinnosti. Každá z těchto příloh odpovídá jedné příslušné podkapitole.

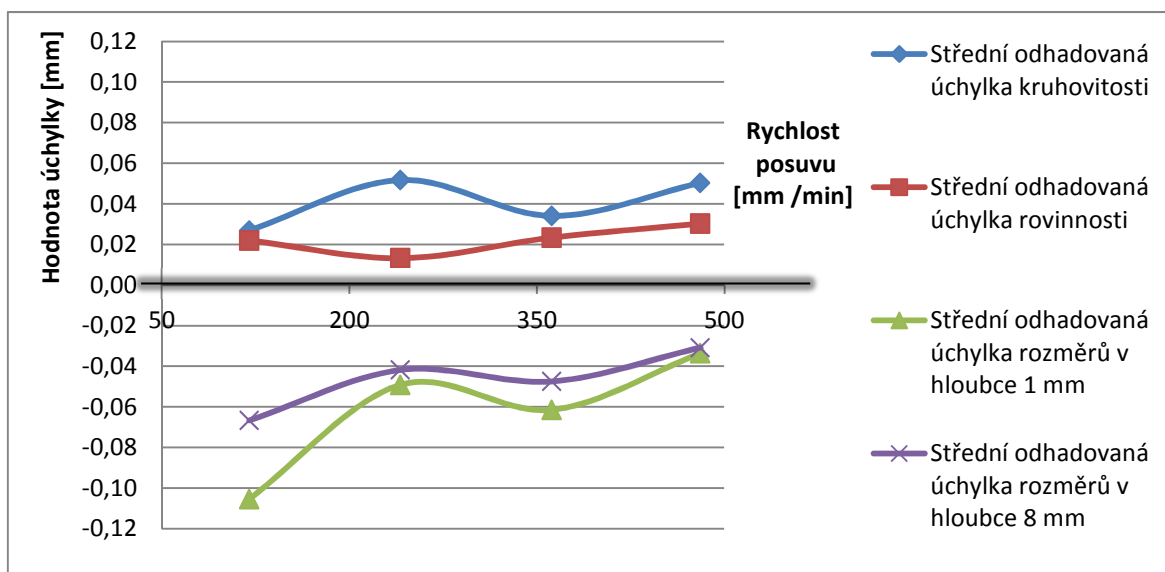
3.4.1 Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 10 mm

Tab. 3.5 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 10 mm, Typ mat. x5CrNi18-10.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	120	241	362	481
1	Vnější rozměr (50 mm)	49,877	50,026	49,942	49,976	
	Rádus (R50 mm)	49,887	50,035	49,945	50,042	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,962	19,881	19,940	19,941	
	Díra (Ø30 mm)	29,852	29,861	29,928	29,906	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,017	0,064	0,062	0,058	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,018	0,031	0,009	0,029	
8	Vnější rozměr (50 mm)	49,840	50,049	49,969	49,990	
	Rádus (R50 mm)	49,931	50,046	49,988	50,049	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	20,006	19,852	19,907	19,914	
	Díra (Ø30 mm)	29,955	29,886	29,946	29,924	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,054	0,090	0,037	0,101	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,018	0,022	0,028	0,013	
	Rovinnost levá	0,014	0,013	0,036	0,027	
	Rovinnost pravá	0,030	0,013	0,011	0,033	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,029	0,035	0,028	0,044	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,029	0,024	0,019	0,039	

Tab. 3.6 Rozměrové úchyly a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchyly jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		120	241	362	481
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,123	0,026	-0,058	-0,024
	Rádus (R50 mm)	-0,113	0,035	-0,055	0,042
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,038	-0,119	-0,060	-0,059
	Díra (Ø30 mm)	-0,148	-0,139	-0,072	-0,094
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,105	-0,049	-0,061	-0,034
Hloubka měření 8 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,160	0,049	-0,031	-0,010
	Rádus (R50 mm)	-0,069	0,046	-0,012	0,049
	Vnitřní rozměr (20 mm)	0,006	-0,148	-0,093	-0,086
	Díra (Ø30 mm)	-0,045	-0,114	-0,054	-0,076
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,067	-0,042	-0,047	-0,031



Obr 3.11 Střední úchytky rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

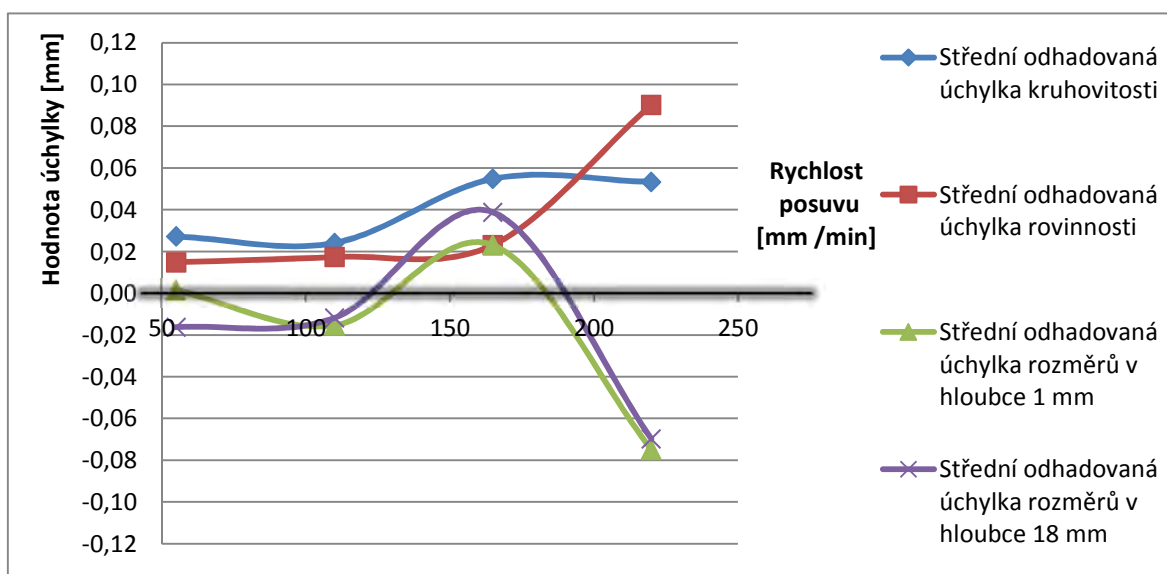
3.4.2 Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 20 mm

Tab. 3.7 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 20 mm, Typ mat. x5CrNi18-10.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	55	110	165	220
1	Vnější rozměr (50 mm)	50,086	50,073	50,142	50,033	
	Rádus (R50 mm)	50,068	50,015	50,153	49,964	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,915	19,940	19,915	19,862	
	Díra (Ø30 mm)	29,938	29,910	29,883	29,841	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,022	0,037	0,026	0,022	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,018	0,009	0,029	0,024	
18	Vnější rozměr	50,120	50,078	50,141	49,990	
	Rádus (R50 mm)	50,067	50,045	50,189	49,951	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,864	19,892	19,910	19,863	
	Díra (Ø30 mm)	29,884	29,938	29,916	29,917	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,045	0,024	0,118	0,143	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,024	0,026	0,046	0,024	
	Rovinnost levá	0,014	0,009	0,016	0,074	
	Rovinnost pravá	0,015	0,026	0,030	0,107	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,027	0,024	0,055	0,053	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,015	0,017	0,023	0,090	

Tab. 3.8 Rozměrové úchyly a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchyly jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		55	110	165	220
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,086	0,073	0,142	0,033
	Rádus (R50 mm)	0,068	0,015	0,153	-0,036
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,085	-0,060	-0,085	-0,138
	Díra (Ø30 mm)	-0,062	-0,090	-0,117	-0,159
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	0,002	-0,015	0,023	-0,075
Hloubka měření 18 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,120	0,078	0,141	-0,010
	Rádus (R50 mm)	0,067	0,045	0,189	-0,049
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,136	-0,108	-0,090	-0,137
	Díra (Ø30 mm)	-0,116	-0,062	-0,084	-0,083
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,016	-0,012	0,039	-0,070



Obr. 3.12 Střední úchyly rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

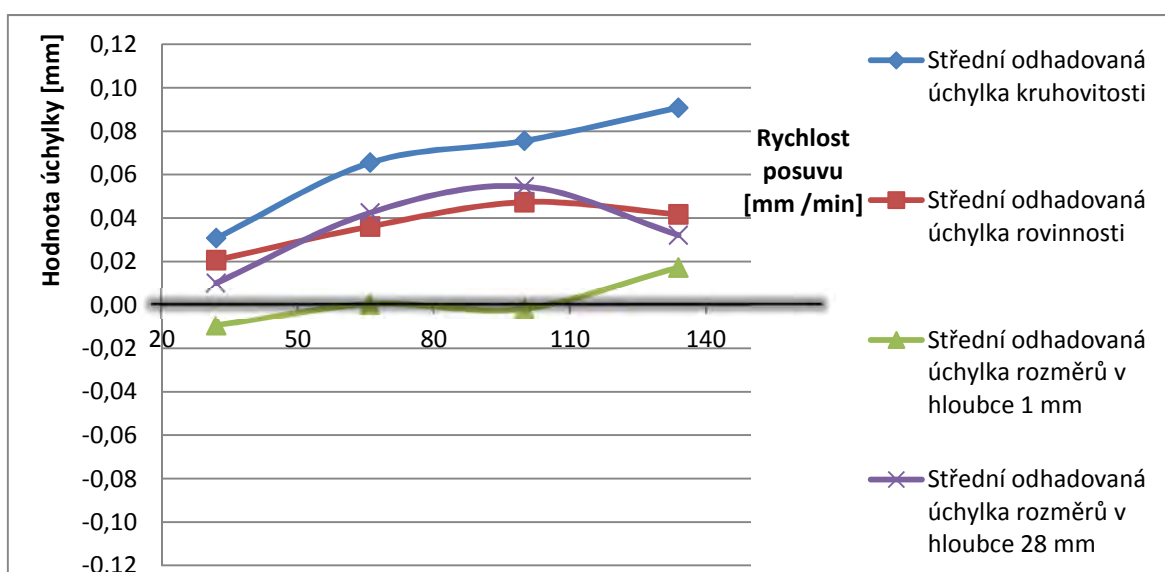
3.4.3 Vzorky z materiálu x5CrNi18-10 o tloušťce 30 mm

Tab. 3.9 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 30 mm, Typ mat. x5CrNi18-10.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	32	66	100	134
1	Vnější rozměr (50 mm)	50,054	50,071	50,032	50,020	
	Rádus (R50 mm)	49,978	50,016	49,940	49,944	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,981	19,998	20,050	20,101	
	Díra (Ø30 mm)	29,949	29,917	29,972	30,004	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,025	0,058	0,030	0,048	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,025	0,008	0,021	0,030	
28	Vnější rozměr	50,112	50,090	50,024	49,842	
	Rádus (R50 mm)	50,080	50,203	50,147	50,055	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,956	19,930	19,972	20,006	
	Díra (Ø30 mm)	29,892	29,947	30,076	30,225	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,052	0,176	0,231	0,236	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,021	0,019	0,020	0,048	
	Rovinnost levá	0,023	0,046	0,027	0,050	
	Rovinnost pravá	0,018	0,027	0,067	0,034	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,031	0,066	0,076	0,091	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,021	0,036	0,047	0,042	

Tab. 3.10 Rozměrové úchytky a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchytky jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		32	66	100	134
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,054	0,071	0,032	0,020
	Rádus (R50 mm)	-0,022	0,016	-0,060	-0,056
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,019	-0,002	0,050	0,101
	Díra (Ø30 mm)	-0,051	-0,083	-0,028	0,004
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchytky	-0,009	0,001	-0,002	0,017
Hloubka měření 28 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,112	0,090	0,024	-0,158
	Rádus (R50 mm)	0,080	0,203	0,147	0,055
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,044	-0,070	-0,028	0,006
	Díra (Ø30 mm)	-0,108	-0,053	0,076	0,225
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchytky	0,010	0,042	0,055	0,032



Obr. 3.13 Střední úchytky rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

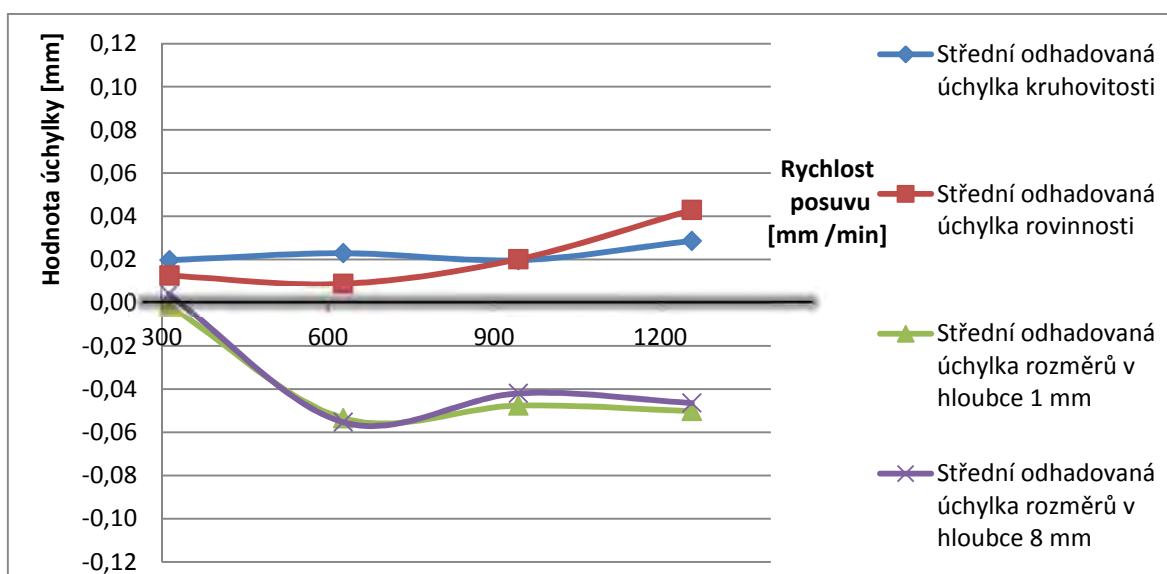
3.4.4 Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 10 mm

Tab. 3.11 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 10 mm, Typ mat. EN AW-5052.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	314	628	944	1257
1	Vnější rozměr (50 mm)	50,016	49,994	49,999	50,000	
	Rádus (R50 mm)	50,003	49,944	49,990	50,004	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,982	19,923	19,916	19,912	
	Díra (Ø30 mm)	29,995	29,926	29,905	29,883	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,025	0,020	0,019	0,034	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,011	0,015	0,014	0,003	
8	Vnější rozměr	50,006	49,948	49,957	49,920	
	Rádus (R50 mm)	50,001	49,910	49,939	49,962	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	20,003	19,950	19,938	19,949	
	Díra (Ø30 mm)	30,006	29,970	29,998	29,983	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,035	0,038	0,029	0,051	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,008	0,019	0,016	0,027	
	Rovinnost levá	0,010	0,011	0,019	0,052	
	Rovinnost pravá	0,015	0,007	0,022	0,034	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,020	0,023	0,020	0,029	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,013	0,009	0,020	0,043	

Tab. 3.12 Rozměrové úchyly a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchyly jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		314	628	944	1257
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,016	-0,006	-0,001	0,000
	Rádus (R50 mm)	0,003	-0,056	-0,010	0,004
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,018	-0,077	-0,084	-0,088
	Díra (Ø30 mm)	-0,005	-0,074	-0,095	-0,117
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,001	-0,053	-0,048	-0,050
Hloubka měření 8 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	0,006	-0,052	-0,043	-0,080
	Rádus (R50 mm)	0,001	-0,090	-0,061	-0,038
	Vnitřní rozměr (20 mm)	0,003	-0,050	-0,062	-0,051
	Díra (Ø30 mm)	0,006	-0,030	-0,002	-0,017
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	0,004	-0,055	-0,042	-0,046



Obr. 3.14 Střední úchylna rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

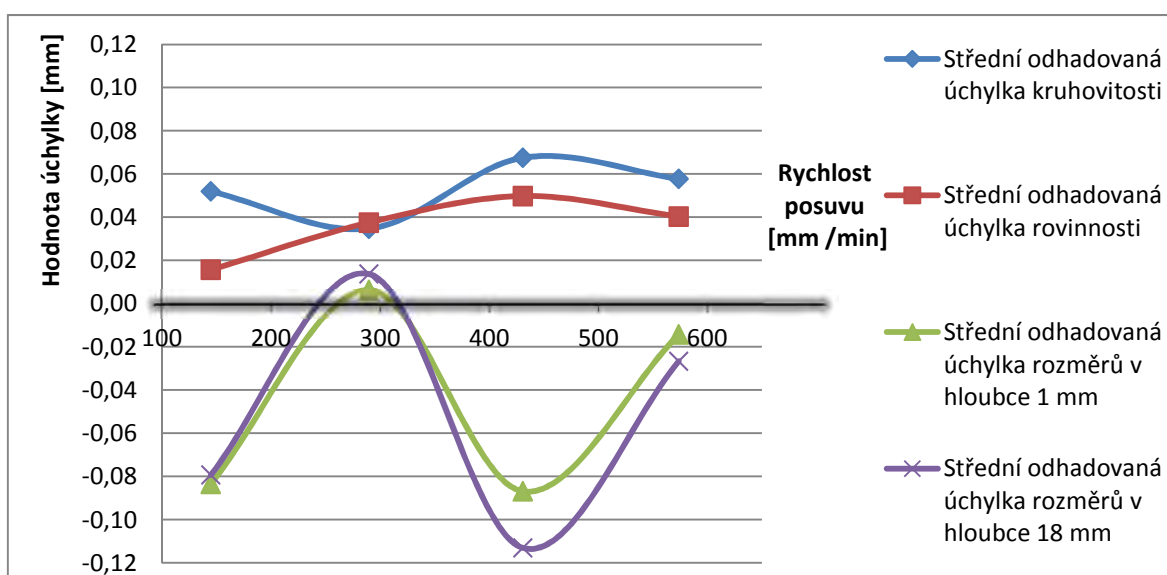
3.4.5 Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 20 mm

Tab. 3.13 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 20 mm, Typ mat. EN AW-5052.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	145	290	431	574
1	Vnější rozměr (50 mm)	49,875	50,054	49,971	49,997	
	Rádus (R50 mm)	49,907	50,050	49,946	50,026	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,956	19,976	19,855	19,962	
	Díra (Ø30 mm)	29,930	29,946	29,880	29,958	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,081	0,046	0,127	0,064	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,024	0,024	0,005	0,011	
18	Vnější rozměr	49,835	49,927	49,862	49,894	
	Rádus (R50 mm)	49,832	50,041	49,823	49,911	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,991	20,037	19,911	20,009	
	Díra (Ø30 mm)	30,025	30,050	29,951	30,079	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,077	0,061	0,106	0,121	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,026	0,008	0,032	0,035	
	Rovinnost levá	0,014	0,033	0,050	0,041	
	Rovinnost pravá	0,017	0,042	0,050	0,040	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,052	0,035	0,068	0,058	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,016	0,038	0,050	0,040	

Tab. 3.14 Rozměrové úchytky a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchytky jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		145	290	431	574
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,125	0,054	-0,029	-0,003
	Rádus (R50 mm)	-0,093	0,050	-0,054	0,026
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,044	-0,024	-0,145	-0,038
	Díra (Ø30 mm)	-0,070	-0,054	-0,120	-0,042
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchytky	-0,083	0,006	-0,087	-0,014
Hloubka měření 18 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,165	-0,073	-0,138	-0,106
	Rádus (R50 mm)	-0,168	0,041	-0,177	-0,089
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,009	0,037	-0,089	0,009
	Díra (Ø30 mm)	0,025	0,050	-0,049	0,079
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchytky	-0,079	0,014	-0,113	-0,027



Obr. 3.15 Střední úchytky rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

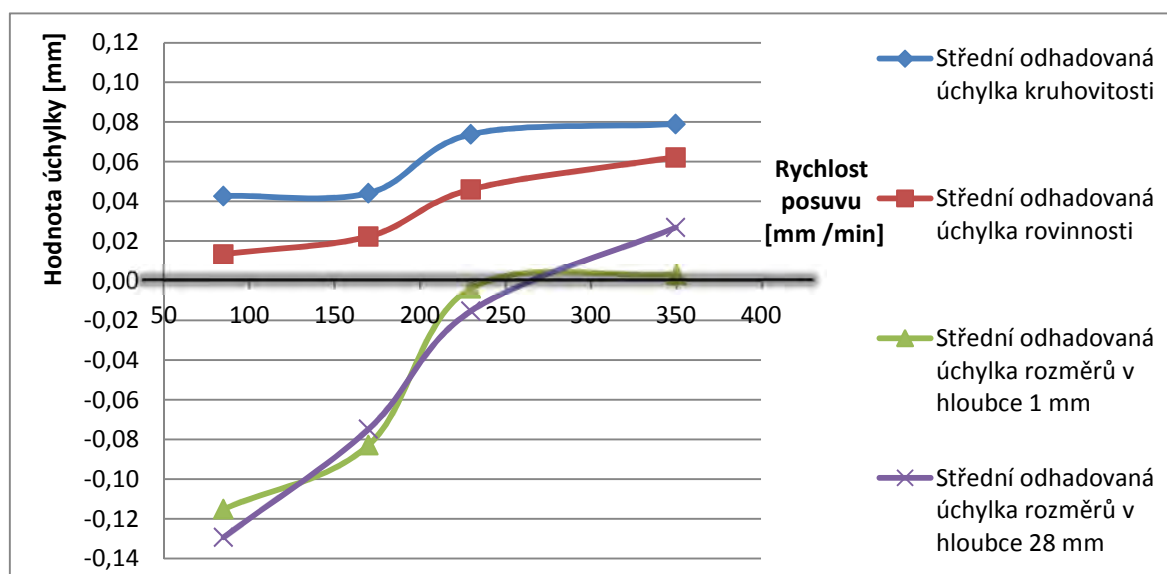
3.4.6 Vzorky z materiálu EN AW-5052 o tloušťce 30 mm

Tab. 3.15 Rozměry vzorku: Tloušťka mat. 30 mm, Typ mat. EN AW-5052.

Hloubka měření od základní roviny [mm]	Měřené plochy	Nastavení parametru stroje				
		Procentuální rychlost posuvu	20	40	60	80
		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]	85	170	230	350
1	Vnější rozměr (50 mm)	49,847	49,887	50,030	50,074	
	Rádus (R50 mm)	49,857	49,927	50,036	50,052	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,885	19,937	19,983	19,976	
	Díra (Ø30 mm)	29,951	29,918	29,936	29,910	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,045	0,031	0,052	0,053	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,015	0,015	0,008	0,020	
28	Vnější rozměr	49,718	49,760	49,835	49,899	
	Rádus (R50 mm)	49,744	49,818	49,896	49,939	
	Vnitřní rozměr (20 mm)	19,979	20,049	20,098	20,129	
	Díra (Ø30 mm)	30,042	30,073	30,110	30,141	
	Kruhovitost díra (Ø30 mm)	0,106	0,097	0,194	0,176	
	Kruhovitost rádus (R50 mm)	0,005	0,033	0,042	0,066	
	Rovinnost levá	0,008	0,014	0,046	0,073	
	Rovinnost pravá	0,019	0,031	0,046	0,052	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti kruhovitosti		0,043	0,044	0,074	0,079	
Odhadovaná střední hodnota nepřesnosti rovinnosti		0,013	0,022	0,046	0,062	

Tab. 3.16 Rozměrové úchyly a jejich střední hodnoty.

Rozměrové úchyly jednotlivých rozměrů		Odpovídající rychlost posuvu [mm/min]			
		85	170	230	350
Hloubka měření 1 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,153	-0,114	0,030	0,074
	Rádus (R50 mm)	-0,143	-0,073	0,036	0,052
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,115	-0,063	-0,017	-0,024
	Díra (Ø30 mm)	-0,049	-0,082	-0,064	-0,090
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,115	-0,083	-0,004	0,003
Hloubka měření 28 [mm]	Vnější rozměr (50 mm)	-0,282	-0,240	-0,165	-0,101
	Rádus (R50 mm)	-0,256	-0,182	-0,104	-0,061
	Vnitřní rozměr (20 mm)	-0,021	0,049	0,098	0,129
	Díra (Ø30 mm)	0,042	0,073	0,110	0,141
	Odhadovaná střední hodnota rozměrové úchyly	-0,129	-0,075	-0,015	0,027



Obr. 3.16 Střední úchyly rozměrů, kruhovitosti a rovinnosti v závislosti na rychlosti posuvu.

3.5 Vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti měřených vzorků

Z naměřených hodnot a následně vytvořených grafů plyne, že řezání vodním paprskem je z velké části závislé na přesnosti řídicího systému a na kvalitě upnutí. Pokud porovnáme jednotlivé střední hodnoty úchylek zjistíme, že nepřesnosti řezu vznikají již v oblasti základní roviny, tudíž v místě vstupu vodního paprsku do materiálu a díky technologii Dynamic Waterjet XD je obdobná nepřesnost i v oblasti výstupu vodního paprsku z materiálu. Potvrzuje to skutečnost, že ve vytvořených grafech kopíruje fialová křivka křivku zelenou. Větší úchyly nepřesnosti mezi vstupem a výstupem vodního paprsku z materiálu vznikla pouze u vzorku z korozivzdorné oceli o síle 30 mm, kterou je možné vyčíslit z grafu na obrázku 3.13. Tato nepřesnost je zhruba 0,055 mm. Z tohoto poznatku vyplývá, že řezání vodním paprskem s technologií Dynamic Waterjet XD je velice přesné,

pokud se zajistí přesné vedení trysky a zabrání se pohybu obrobku při řezání. V případě špatné fixace řezaného materiálu dochází k jeho rozkmitání a to z důvodu odražení vodního paprsku ode dna nádrže a následnému nárazu do řezného materiálu.

Z hlediska geometrických úchylek je zřetelné, že nepřesnost roste s tloušťkou řezaného materiálu a to zhruba s přírůstkem 0,02 mm na 10 mm tloušťky. Dále je z grafů patrné, že vodní paprsek dokáže řezat s větší přesností rovinné plochy, oproti plochám válcovým. Ve většině případů vychází rovinnost přesněji o 0,01 až 0,02 mm.

4 VYHODNOCENÍ TECHNOLOGIE Z HLEDISKA NÁKLADŮ NA PROVOZ A NÁROKŮ NA ÚDRŽBU

Náklady na provoz samotné výroby se velmi výrazně projevují v ceně vyráběných dílů. Dalším výrazným představitelem ceny samotného výrobku jsou náklady na preventivní údržbu a spotřební materiál stroje. Následující podkapitoly vyčíslují jak přímé náklady na provoz stroje, tak i náklady na jednotlivé díly, které podléhají výměnám nebo servisu při pravidelných odstávkách stroje. Dále se podkapitoly věnují hodinovým nákladům na celkový chod stroje. Rozbor a vyhodnocení nákladů proběhlo na stroji Mach 4 od firmy Flow za období od 1.1.2014 do 31.12.2014. Do nákladů na provoz stroje nejsou započítány finanční výdaje na nájem prostor, obsluhu stroje a ostatní výdaje, které nesouvisí s přímými náklady na samotnou výrobu stroje z důvodu individuálního přístupu a možnostem každé firmy, ve které by byl daný stroj umístěn. Veškeré ceny, které jsou v následujících kapitolách zmíněny odpovídají cenám k datu 1.1.2014. Čas, který strávil stroj Mach 4 v provozu, je měřen v takzvaných motohodinách, které jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Stav počítadla motohodin.

Motohodiny ke dni 1.1.2014	856 Mth
Motohodiny ke dni 30.12.2014	2761 Mth
Spotřeba motohodin stroje za rok 2014	1905 Mth

Stroj podléhá dvousměnnému provozu o délce směny 7,5 hodin. V roce 2014 bylo celkem 252 pracovních dní (1890 hod/směnu). Dvousměnný provoz poskytoval v roce 2014 celkem 3780 hodin. Podle procentuálního poměru byl stroj v pracovním režimu 50,4 % času z celkového ročního fondu pracovních hodin.

4.1 Náklady na provoz

Provozní náklady stroje, který je určen pro technologii hydroabrazivního vodního paprsku, nejsou příliš rozmanité. Jedná se o malé množství položek, které jsou do jisté míry velmi nákladné. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.6, abrazivo patří k nejnákladnější položce provozních nákladů, tvoří asi 60 % všech přímých provozních nákladů. Další velmi nákladnou položkou je elektrická energie, která tvoří přibližně 30 % všech provozních nákladů. Nejmenší podíl nákladů, které je třeba vynaložit na provoz této technologie, tvoří voda. Při současných cenách vody jsou náklady kolem 5 %. Ceny jednotlivých položek a celkové částky na provoz stroje jsou uvedeny v tabulce 4.2. Výpočet hodinových a celkových nákladů na provoz je vytvořen na základě vzorců 4.1 a 4.2.

Výpočet hodinových nákladů na provoz stroje $N_{pro/h}$:

$$N_{pro/h} = SPT \times C_{pol/j} \text{ [Kč.hod}^{-1}\text{]} \quad (4.1)$$

$C_{pol/j}$ – cena položky za jednotku [Kč]

SPT – spotřeba provozního materiálu za hodinu provozu stroje

Výpočet nákladů na provoz stroje za rok 2014 N_{PRO2014} :

$$N_{\text{PRO2014}} = \text{Mot}_{2014} \times \sum N_{\text{pro/h}} \quad (4.2)$$

Mot_{2014} – motohodiny za rok 2014 (1905 Mth)

Tab. 4.2 Ceny jednotlivých spotřeb a celkové roční náklady na provoz stroje.

	Cena za jednotku	Spotřeba za motohodinu	Výpočet nákladů	Hodinové náklady na položku [Kč/hod]
Abrazivo	6,47 Kč.kg ⁻¹	25,2 kg.hod ⁻¹	25,2 × 6,47	163,0
Energie	3,76 Kč.KWh ⁻¹	22,08 KW.h ⁻¹	42 060 × 3,76	82,6
Voda	66 Kč.m ⁻³	0,177 m ³ .h ⁻¹	0,177 × 66	11,7
Hodinové náklady na provoz stroje				257,3 Kč/hod
Náklady na provoz stroje za 1 rok			1905 × 257,3	490 156,5 Kč

4.2 Náklady spotřebního materiálu

Spotřební materiál je součástí každé technologie a každé strojírenské výroby. V případě vodního paprsku vytváří náklady na spotřební materiál hlavně hydroabrazivní tryska, která má předepsanou životnost přibližně 100 hodin. V případě, že nedojde ke kolizi trysky s obrobkem, což nebývá příliš běžné, je schopná udržet stabilní a tvarově přesný proud přibližně 200 hodin. Statisticky za rok 2014 byla životnost trysky přibližně 124,9 hodin. Jednotlivé výměny hydroabrazivní trysky za rok 2014 jsou zaznamenány v příloze číslo 14.

Dalším spotřebním materiálem, který se výrazně projeví ve výsledných nákladech jak na hodinový provoz, tak i na celkový provoz za určité období, je diamantová směšovací tryska, která má předepsanou přibližnou životnost asi 1000 hodin. Ve většině případů se však skutečná životnost hodnotě 1000 hodin ani nepřiblíží. Průměrná životnost za rok 2014 byla asi 433 hodin. Jednotlivé výměny směšovací trysky za rok 2014 jsou zaznamenány v příloze číslo 14.

Ostatní komponenty, které jsou zařazeny do spotřebního materiálu, se měnily podle potřeb a nejsou definovány žádnou určitou životností. Jejich životnost se odvíjí spíše od prostředí, v kterém se stroj nachází a hlavně od rozmanitosti a technické náročnosti dílů, které jsou na stroji vyráběny. Víceméně se jedná o lamely, které slouží jako stůl stroje, o údržbu vodních filtrů, vodní nádrže a o bezpečnostní komponenty, které brání rozstříku vodního proudu do okolí. Všechny zaznamenané komponenty s příslušnými cenami, které podlely v roce 2014 nějaké údržbě nebo výměně, jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Výpočet hodinových nákladů z hlediska spotřebního materiálu stroje $N_{spot/h}$:

$$N_{spot/h} = \frac{C_{spot/ks} \times N_{spot}}{Mot_{2014}} \quad (4.3)$$

$C_{spot/ks}$ – cena spotřebního materiálu za kus

N_{spot} – počet měněných spotřebních materiálů za jedno období životnosti

Výpočet nákladů z hlediska spotřebního materiálu stroje za rok 2014 $N_{SPOT2014}$:

$$N_{SPOT2014} = Mot_{2014} \times \sum N_{spot/h} \quad (4.4)$$

Tab. 4.3 Ceny spotřebních materiálů, celkové hodinové a roční náklady na provoz stroje.

	Cena za 1 kus [Kč]	Spotřeba za rok 2014	Výpočet nákladů	Hodinové náklady na položku [Kč/hod]
Tryska abrazivní	1 750	15	$1750 \times 15 / 1905$	13,8
Tryska směšovací	11 250	5	$11250 \times 5 / 1905$	29,5
Lamely stolu	1 200	16	$1200 \times 16 / 1905$	10,1
Vodní filtr	980	8	$980 \times 8 / 1905$	4,1
Rozprašovací štít	375	12	$375 \times 12 / 1905$	2,4
Hodinové náklady na spotřební materiály stroje				59,9 Kč/hod
Náklady na spotřební materiály stroje za rok 2014			$59,9 \times 1905$	114 109,5 Kč

4.3 Náklady na preventivní údržbu

Jak už je známo z předchozích kapitol, technologie vodního paprsku disponuje vysokým tlakem, některé díly jsou zatěžovány tlakem až 600 MPa. Z tohoto důvodu je velká většina komponentů stroje velmi náročná na pevnost materiálů a na velmi vysokou přesnost jednotlivých dílů. Tento fakt řadí technologii vodního paprsku k technologiím náročným právě z hlediska nákladů na preventivní údržbu.

Díly, jenž podléhají preventivní údržbě stroje Mach 4 od firmy Flow, se dělí do čtyř skupin v závislosti na životnosti. Hodinové náklady na preventivní údržbu jsou počítány podle vzorce 4.5. A jelikož jsou náklady na provoz počítány za rok 2014, jsou i náklady na preventivní údržbu přepočítány podle vzorce 4.6 na období roku 2014, což je 1905 Mth. Všechny díly podléhající preventivní údržbě jsou uvedeny včetně jejich cen v tabulce 4.4. Sestavy některých dílů, které podléhají preventivní údržbě, jsou přiloženy v příloze č. 13.

Výpočet hodinových nákladů na preventivní údržbu $N_{pu/h}$:

$$N_{pu/h} = \frac{C_{dil/ks} \times N_{dil}}{\text{živ}} [\text{Kč.hod}^{-1}] \quad (4.5)$$

$C_{dil/ks}$ – cena dílu za kus [Kč]

N_{dil} – počet měněných dílů za jedno období životnosti [ks]

živ – životnost dílu [Mth]

Výpočet nákladů na preventivní údržbu za rok 2014 N_{PU2014} :

$$N_{PU2014} = M_{ot2014} \times \sum N_{pol/h} \quad (4.6)$$

Tab. 4.4 Ceny dílů, celkové hodinové a roční náklady na preventivní údržbu stroje.

Jednotlivé díly	Cena položky za kus [Kč]	Počet měněných dílů za jedno období životnosti	Výpočet nákladů	Hodinové náklady na položku [Kč]
Životnost 500 Mth				
Vysokotlaké těsnění	8 347	4	$8\,347 \times 4 / 500$	66,8
Výstup zpětného ventilu multiplikátoru	3 983	2	$3\,983 \times 2 / 500$	15,9
Vstup zpětného ventilu multiplikátoru	605	2	$605 \times 2 / 500$	2,4
Životnost 1500 Mth				
Odvzdušňovací sada	5 050	1	$5\,050 \times 1 / 1\,500$	3,4
Vysokotlaký válec multiplikátoru	15 460	4	$15\,460 \times 4 / 1\,500$	51,2
Životnost 2000 Mth				
Vysokotlaký píst	22 643	4	$22\,643 \times 4 / 1\,500$	60,4
Těleso zpětného ventilu	6 994	4	$6\,994 \times 4 / 1\,500$	18,7
Životnost 4000 Mth				
Nízkotlaké těsnění	2 727	1	$2\,727 \times 1 / 4\,000$	0,7
olejový filtr	3 438	1	$3\,438 \times 1 / 4\,000$	0,9
Hodinové náklady na preventivní údržbu				220,4 Kč/hod
Náklady na preventivní údržbu za rok 2014			$1905 \times 220,4$	419 862 Kč

4.4 Celkové náklady na výrobu technologií vodního paprsku strojem Mach4

Jak již bylo výše zmíněno, celkové náklady se týkají pouze přímých nákladů na stroj. V těchto celkových nákladech nejsou započítány náklady na obsluhu stroje, výrobní prostory, vedení a náklady na reklamní účely firmy. Celkové hodinové náklady jsou počítány podle vzorce 4.7 a celkové náklady na užívání stroje za rok 2014 jsou počítány podle vzorce 4.8.

Výpočet celkových nákladů na hodinové užívání stroje $N_{cel/h}$:

$$N_{cel/h} = N_{pro/h} + N_{spot/h} + N_{pu/h} \quad (4.7)$$

Výpočet celkových nákladů na užívání stroje za rok 2014 N_{PU2014} :

$$N_{CEL2014} = N_{PRO2014} + N_{SPOT2014} + N_{PU2014} \quad (4.8)$$

Tab. 4.5 Celkové náklady na provoz stroje.

Celkové hodinové náklady na provoz stroje	257,3 + 59,9 + 220,4	537,6 Kč/h
Celkové náklady na provoz stroje za rok 2014	490 156,5 + 114 109,5 + 419 862	1 024 128 Kč

Na základě těchto nákladů je možné určit hodinovou taxu výroby stroje, pokud se k částkám uvedeným v tabulce 4.5 připočítají nepřímé náklady spojené s výrobou. Do těchto nákladů se zahrnují výlohy spojené s pronájmem prostor, obsluhou stroje a ostatními režijními náklady. Celkové hodinové náklady na provoz stroje mohou v mnoha případech sloužit jako orientační hodnota při nacenění jednotlivých výrobků.

DISKUZE

Celá diplomová práce se zaměřuje na technologii vodního paprsku, pohlíží na ni jak z technického, tak i z ekonomického hlediska. Z technického hlediska je v práci řešena problematika rozměrových a tvarových přesností v různých hloubkách řezu v závislosti na rychlosti posuvu. Vzorky byly vyrobeny na stroji Mach 4 od firmy Flow, který disponuje technologií Dynamic Waterjet XD sloužící k eliminaci podřezání. Měření vzorku probíhalo na měřícím 3D zařízení CRYSTA-PLUS M544, které je bohužel omezeno softwarem, jež nedokáže změřit a vyhodnotit všechny geometrické tolerance.

Je obecně známo, že ve spodní části řezu s použitím vyšších řezných rychlostí vzniká charakteristické rýhování, které zcela jistě ovlivňuje měření dotykovou metodou. Touto metodou nelze měřit vnitřní plochy jednotlivých rýh. Z tohoto důvodu by bylo efektivnější a přesnější měřit vzorky metodou bezdotykovou. Většina bezdotykových optických metod měření je založena na zaostření signálu do určitého místa na povrchu. Běžně je toto místo charakterizováno několika mikrometry, tudíž je optická metoda schopna změřit i záhyby a vnitřní plochy rýhování, na rozdíl od metod dotykových, kde je dotek definován i několika milimetry.

Vyhodnocení probíhalo celkem na 24 vzorcích, které byly vyrobeny ze dvou různých materiálů. Z každého materiálu byly vyrobeny vzorky o třech různých tloušťkách. Z těchto důvodů byly vzorky rozděleny do šesti skupin po čtyřech vzorcích, které byly řezány různou rychlostí posuvu. Z důvodu malého množství dat ke každé skupině vzorků, nebylo možné rozměrovou a tvarovou přesnost statisticky vyhodnotit, a proto jsou všechny střední hodnoty rozměrové i geometrické nepřesnosti počítány a vyhodnoceny jako odhadované střední hodnoty. Odhadované střední hodnoty mají vypovídající hodnotu, ze které je možné vyvodit mnoho závěrů, ale tyto závěry se vzhledem k malému množství dat nedají považovat za statistický údaj.

Z ekonomického hlediska se práce zabývá provozními náklady na hodinový chod stroje a finanční náročností provozu za rok 2014. V práci jsou detailně popsány a vyčísleny přímé náklady spojené s provozem stroje. Do přímých nákladů je zahrnuta preventivní údržba, nároky na spotřební materiál a v neposlední řadě i celkové náklady na provoz stroje jako je abrazivo, energie a voda. Nepřímé náklady související s výrobou, jako jsou režijní náklady, náklady na pronájem prostor a obsluhu stroje, nejsou v práci zmíněny z důvodů individuality každé firmy. Proto nelze výslednou částku za uplynulý rok 2014 i hodinové provozní náklady považovat za konečné. Hodinové provozní náklady by bylo možné považovat za hodinovou sazbu stroje, pokud by se k nim přičetly i náklady na obsluhu stroje, pronájem prostor a zbylé režijní náklady.

ZÁVĚR

První část diplomové práce je zaměřena na obecný popis technologie vodního paprsku. Jsou zde popsány principy řezání a zařízení vodního paprsku. Další kapitola se zaměřuje na vodní paprsek se 3D vybavením a další moderní příslušenství vodního paprsku, které je v současné době k dispozici.

Praktická část je zaměřena na vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti v závislosti na rychlosti posuvu. Celkem bylo vyrobeno 24 vzorků ze dvou materiálů o třech různých tloušťkách. Vzorky byly vyráběny na stroji od firmy Flow, kterým disponuje strojový park firmy AWAC. Měření proběhlo na měřícím 3D zařízení CRYSTA-PLUS M544, který je umístěn v Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

Z naměřených hodnot vzorků vyplývají tyto skutečnosti:

- řezání vodním paprskem je z velké části závislé na přesnosti polohování trysky vůči stolu stroje a na stabilitě obrobku,
- nepřesnosti řezu vznikají již v oblasti vstupu vodního paprsku do materiálu a díky Dynamic Waterjet XD je obdobná nepřesnost i v oblasti výstupu vodního paprsku z materiálu,
- větší úchylka nepřesnosti mezi vstupem a výstupem vodního paprsku z materiálu vznikla pouze u vzorku z korozivzdorné oceli o síle 30 mm, která činí 0,055 mm,
- v případě špatné fixace řezaného materiálu dochází k jeho rozkmitání, a to z důvodu odražení vodního paprsku ode dna nádrže a následnému nárazu do řezného materiálu, proto je nutné lehčí polotovary zatížit jiným materiálem o určité hmotnosti,
- z hlediska geometrických úchylek je zřetelné, že nepřesnost roste s tloušťkou řezaného materiálu a to zhruba s přírůstkem 0,02 mm na 10 mm tloušťky,
- z grafů je patrné, že vodní paprsek dokáže řezat s větší přesností rovinné plochy oproti plochám válcovým. Ve většině případů vychází rovinnost přesněji o 0,01 až 0,02 mm,

V neposlední řadě se práce zabývá provozními náklady na hodinový chod stroje a finanční náročností provozu za rok 2014. V práci jsou popsány a vyčísleny pouze přímé náklady spojené s provozem stroje. Do těchto nákladů jsou zahrnuty i náklady spojené s preventivní údržbou a výlohy, které se týkají spotřebních materiálů. Do spotřebního materiálu jsou zahrnuty především řezné a směšovací trysky. Dále jsou v práci náklady za rok 2014 přepočítány na hodinový provoz stroje, který není možné považovat za hodinovou taxu výroby stroje a to z důvodu, že do této částky nejsou započítány režijní náklady.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025.
2. OSÍČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
3. HÍREŠ, Ondřej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálů okružnou pílou, vodním proudem a plazmovým oblúkom*. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
4. Technologie řezání vodním paprskem. *Strojírnoství* [online]. 2014 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/2184-technologie-ezani-vodnim-paprskem>
5. Technologie. *Chps s.r.o.* [online]. 2012 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie>
6. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vyd. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
7. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. 1. vyd. Bratislava: Ing. Miroslav Mračko, 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
8. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, viii, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
9. KOČMAN, Karel, Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 272 s. ISBN 80-214-3068-0.
10. Řezání vodním paprskem. SUGINO [online]. 2009 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.sugino.cz/index.php?page=water-jet-cutter.htm>
11. Waterjet Cutting Technology. *KMT: KMT Waterjet* [online]. 2015 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://www.kmtwaterjet.com/waterjet-technology.aspx>
12. KARAFIÁTOVÁ, Stanislava a Ivo LANGER. *Nekonvenční technologie*. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 1998, 164 s. ISBN 80-7200-296-1.
13. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
14. AQM 50. *AQP: AQ PUMPY, s. r. o.* [online]. 2000-2015 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.aqpumpy.cz/cerpadlo.php?cerpadlo=AQM%2050&razeni=nazev&skupina=vysokotlak%E1%20plun%9Erov%E1%20%E8erpadla>
15. Plunžrové čerpadlo. *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. 1998-2015 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>

16. Chapter 3 - How It Works. *Ward jet* [online]. 2010 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/03-how-it-works>
17. Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
18. Technologie vodního paprsku: Řezání čistým vodním paprskem. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/pure-waterjet.aspx>
19. Lineární pohony. *Pavel Lasák* [online]. 2005 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://pavel.lasakovi.com/projekty/elektrotechnika/linearni-pohony/>
20. Volba kuličkových šroubů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: <http://pavel.lasakovi.com/projekty/elektrotechnika/linearni-pohony/>
21. Řezání vodním paprskem vnáší nový rozměr do stavebnictví. *Tretiruka* [online]. 2013 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/rezani-vodnim-paprskem-vnasi-novy-rozmer-do-stavebnictvi1/>
22. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue.com* [online]. 2001-2003 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
23. Soustružení abrazivním kapalinovým paprskem zvyšuje trvanlivost. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-abrazivnim-kapalinovym-paprskem-zvysuje-trvanlivost.html>
24. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>
25. HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění - 3. část*. Brno, 2005. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
26. Přírodní granát - GARNET. *Abranova* [online]. 2007 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.abranova.cz/brusne-materialy/prirodni-granat-garnet.htm>
27. Stroje pro řezání vodním paprskem: Dynamic Waterjet®. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/dynamic%20waterjet.aspx>

28. Technologie vodního paprsku: Dynamic Waterjet. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/dynamic-waterjet.aspx>
29. FLOW INTERNATIONAL COEPORATION. Brožura Mach 4 [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://www.flowwaterjet.com/~media/pdfs/Brochure/Cutting/Mach-4/Mach_4_Brochure_2012_02.ashx
30. The next generation of Flow Dynamic waterjet cutting technology arrives at BridMet. *BridMet: Sheet Metal Fabricators* [online]. 2008-2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.bridmet.co.uk/news/2014/02/20/next-generation-flow-dynamic-waterjet-cutting-technology-arrives-bridmet>
31. The most advanced and robust high pressures system available. Product Sheet 87k Hyper Pressure-1 [online]. 2007 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://www.flowasia.com/uploadedFiles/Resources/Brochures/Waterjet_Brochures/Systems/ProductSheet%2087k%20HyperPressure-1.pdf
32. 10322436-wardjet-psywinder-5axis-waterjet-cutting-head. *Vy-tech steel s.r.o.: Sheet Metal Fabricators* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.vytech.cz/fotoalbum/10322436-wardjet-psywinder-5axis-waterjet-cutting-head.html>
33. Dynamic 3D Cutting. *FoxMachinery* [online]. 2014 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.foxmachinery.com/public/product.aspx?ProductID=10121>.
34. Waterjet Bevel Cutting Made Easy. *CIM: Canadian Industrial Machinery* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.cimindustry.com/article/formingfabricating/waterjet-bevel-cutting-made-easy>
35. WaterJet Cutting Services. *STAINLESS TECHNOLOGIES* [online]. 2013 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.sawaterjet.co.za/>
36. Technologie vodního paprsku: Dynamic Waterjet XD. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/dynamic-waterjet-xd.aspx>
37. Stroje pro řezání vodním paprskem: Software pro řezání vodním paprskem Flowxpert™. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/software/FlowXpert.aspx>
38. Prostorové řezání pomocí průmyslového robota. *Hadyna-International, spol. s r.o.* [online]. 2013 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/smartwelding/>

39. Stroje pro řezání vodním paprskem: Robotická pracoviště. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/advanced/Cutting%20Systems/Robotic%20Machining.aspx>
40. Vítejte na stránkách Sugino Machine Europe. *Sugino* [online]. 2009 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z:
<http://www.sugino.cz/nove/index.php?page=water-jet-katana.htm>
41. Bezpečnost práce na robotizovaných pracovištích Europe. *Smart welding* [online]. 2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z:
http://www.hadyna.cz/smartwelding/motoman/download/Bezpecnost_RP.pdf
42. Stroje pro řezání vodním paprskem: Brožury. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/video-bro%C5%BEury-veletrhy/brochures.aspx>
43. Stroje pro řezání vodním paprskem: Software pro řezání vodním paprskem Flowmaster®. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/software/FlowMaster.aspx>
44. Řídící systémy. *Awac* [online]. 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z:
<http://www.awac.cz/cz/3-Prodej-a-servis-br-CNC-delicich-stroju-br/7-Prodej-delicich-stroju/15-Ridici-systemy/0-/51->
45. Technologie vodního paprsku: Technologie HyperPressure. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-11]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/hyperpressure.aspx>
46. Stroje pro řezání vodním paprskem: Vakuový přípravek UltraPierce™ Vacuum Assist. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/ultrapierce-vacuum-assist.aspx>
47. Rotační osa: dělení rotačních materiálů. *Rychlý TOM s.r.o.: technologie vodního paprsku* [online]. 2012 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z:
<http://www.rychlytom.cz/cs/prislusenstvi/stroje-pro-rezani-vodnim-paprskem/prislusenstvi>
48. Reportáž z MSV 2013: Vodní paprsek od Rychlý TOM na MSV 2013. *Rychlý TOM s.r.o.: technologie vodního paprsku* [online]. 2013 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z:
<http://www.rychlytom.cz/cs/novinky/novinky/reportaz-z-msv-2013>
49. What's New: Advanced Waterjet Technology Brings High Accuracy Laser Height Sensing for More Precise Parts. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z:
<http://www.flowwaterjet.com/en/whats-new/press-releases/press/DynaBeam.aspx>

50. LASEROV ZAMOVAC K. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/laser%20edge%20finder.aspx>
51. Stroje pro řezání vodním paprskem: Systém řezání vodním paprskem Pure Waterjet. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/pure-waterjet.aspx>
52. Stroje pro řezání vodním paprskem: Dynamic Contour Follower™. *Flow* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/dynamic%20contour%20follower.aspx>
53. Job diversity through a waterjet. *FMA: Thefabricator.com* [online]. 2015 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/job-diversity-through-a-waterjet>
54. AWAC [online]. 2009 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/cz>
55. TEPELNÁ OCHRANA KOSMICKÝCH LODÍ PŘI LETU ATMOSFÉROU. *MEK: Malá encyklopedie kosmonautiky* [online]. 2006 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz/zaklady/technika/ochrana.htm>
56. Mach 4. *Foxmachinery* [online]. 2014 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.foxmachinery.com/public/product.aspx?ProductID=10120>
57. Strojový park: KONTROLA JAKOSTI - 3D měření. *Kovo-pro* [online]. 2013 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: http://www.kovo-pro.cz/stroj_park_mereni_cz/Crysta%20Plus%20M_CZ_new.pdf
58. MH20i. *Renishaw apply innovation* [online]. 2001-2015 [cit. 2015-03-31]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/mh20i--7384>
59. PROKOP, Jaroslav. *VYSOCE PŘESNÉ METODY OBRÁBĚNÍ* [online]. 2005 [cit. 2015-05-05]. ISBN 978-80-214-4352-5. Dostupné z: http://cp.forever.cz/sites/default/files/12s_prokop.pdf
60. ČSN 10088-1. *Korozivzdorné oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
61. ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
62. Hliník AlMg2 - ČSN 424412. *PROAL* [online]. 2009 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424412.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

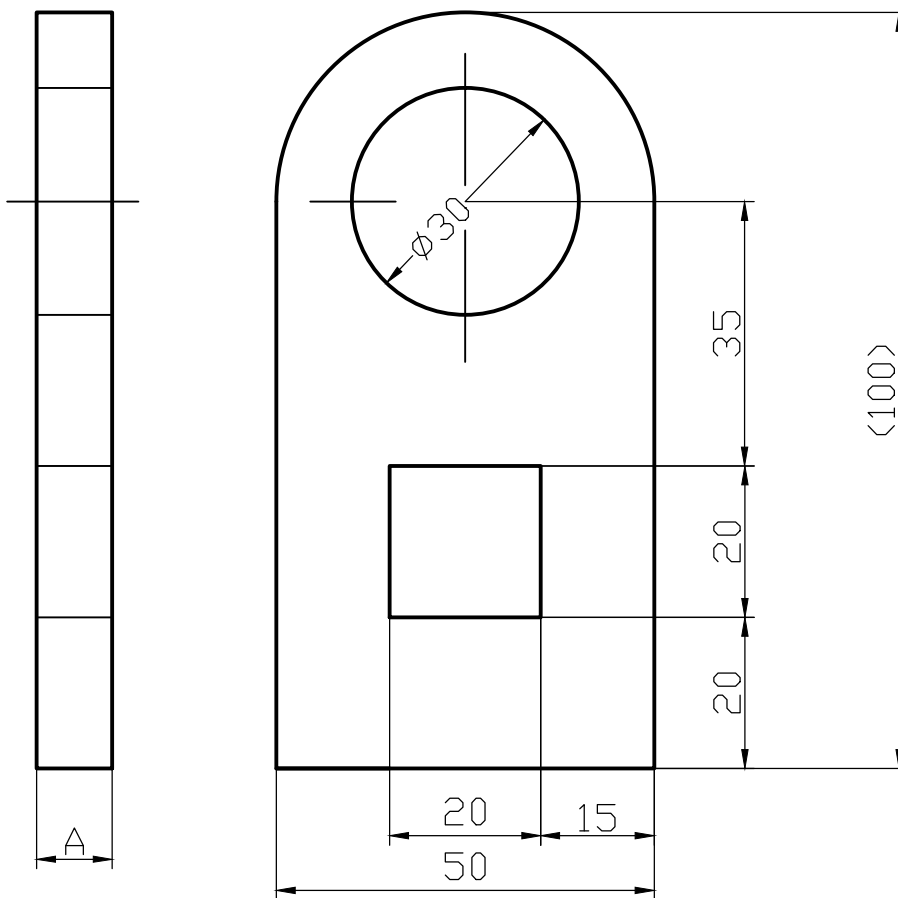
Zkratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	dvourozměrný prostor
3D	[-]	třírozměrný prostor
AWJ	[-]	abrasive Water jet
CAD	[-]	computer Aided Design
CNC	[-]	computer Numerical Control
WJM	[-]	water jet Machining

Symbol	Jednotka	Popis
C	[-]	experimentálně stanovená konstanta reprezentující část vodního paprsku v řezu
C_{díl/ks}	[Kč]	cena dílu za kus
C_f	[-]	koeficient tření
C_{pol/j}	[Kč]	cena položky za jednotku
C_{spot/ks}	[Kč.ks ⁻¹]	cena spotřebního materiálu
E_d	[-]	specifická energie pro deformované opotřebení
J_m	[mm]	jmenovitá hodnota rozměru
L	[mm]	zpoždění vodního paprsku
Mot₂₀₁₄	[Mth]	motohodiny za rok 2014
N_{cel/h}	[Kč.hod ⁻¹]	celkové náklady na hodinové užívání stroje
N_{díl}	[ks]	počet měněných dílů za jedno období životnosti
N_{pro/h}	[Kč.hod ⁻¹]	hodinové náklady na provoz stroje
N_{PRO2014}	[Kč]	náklady na provoz stroje za rok 2014
N_{pu/h}	[Kč.hod ⁻¹]	hodinové náklady na preventivní údržbu
N_{PU2014}	[Kč]	náklady na preventivní údržbu za rok 2014
N_{PU2014}	[Kč]	celkové náklady na užívání stroje za rok 2014
N_r	[mm]	skutečná hodnota rozměru
N_{spot}	[ks]	počet měněných spotřebních materiálů za jedno období životnosti
N_{spot/h}	[Kč.hod ⁻¹]	hodinové náklady spotřebního materiálu

$N_{SPOT2014}$	[Kč]	náklady na spotřební materiál stroje za rok 2014
Q	[m.min ⁻¹]	průtokové množství vody
R_a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
R_q	[μm]	průměrná kvadratická úchylka profilu
R_z	[μm]	největší aritmetická úchylka profilu
SPT	[-]	spotřeba provozního materiálu za hodinu provozu troje
d_j	[mm]	průměr vodního paprsku
h	[mm]	tloušťka materiálu
h_c	[mm]	zóna řezného opotřebení
h_d	[mm]	zóna deformačního opotřebení
p	[MPa]	pracovní tlak
u	[mm.s ⁻¹]	posuvová rychlost
\bar{u}_{kru}	[mm]	odhadovaná střední hodnota úchylky kruhovitosti
u_{kruhi}	[mm]	úchylka kruhovitosti
\bar{u}_r	[mm]	odhadovaná střední hodnota rozměrové úchylky
u_{ri}	[mm]	rozměrové úchylky
u_{ri}	[mm]	rozměrová úchylka
\bar{u}_{rov}	[mm]	odhadovaná střední hodnota úchylky rovinnosti
u_{rovi}	[mm]	úchylka rovinnosti
v	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění kapaliny
v_a	[m.s ⁻¹]	rychlost abrazivních částic
v_c	[m.min ⁻¹]	řezná rychlost
v_c	[m.s ⁻¹]	charakteristická rychlost
v_e	[m.s ⁻¹]	maximální rychlost abrazivních částic
$\dot{z}iv$	[Mth]	životnost dílu
α	[°]	úhel dopadu vodního paprsku
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota kapaliny
ρ_a	[kg.m ⁻³]	hustota abraziva

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Výkres vzorku
- Příloha 2 Průvodní program měření
- Příloha 3 Výstupní protokolu z měření (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 30 mm, rychlost řezu 20 %)
- Příloha 4 Znázornění tolerančního pole kruhovitosti (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 30 mm, rychlost řezu 20 %)
- Příloha 5 Znázornění tolerančního pole rovinnosti (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 30 mm, rychlost řezu 20 %)
- Příloha 6 Znázornění všech dotyků měření (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 30 mm, rychlost řezu 20 %)
- Příloha 7 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 10 mm)
- Příloha 8 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 20 mm)
- Příloha 9 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál x5CrNi18-10, tloušťka 30 mm)
- Příloha 10 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál EN AW-5052, tloušťka 10 mm)
- Příloha 11 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál EN AW-5052, tloušťka 20 mm)
- Příloha 12 Grafy středních rozměrových úchylek a úchylek kruhovitosti a rovinnosti (Materiál EN AW-5052, tloušťka 30 mm)
- Příloha 13 Sestavy některých dílů podléhajících preventivní údržbě
- Příloha 14 Jednotlivé výměny a životnosti hydroabrazivní a směšovací trysky



Vzorky	A=10 mm
Vzorky	A=20 mm
Vzorky	A=30 mm

Struktura povrchu:	Hrany:	Měřítko 1:1	Přesnost	ISO 2768-mH
			Tolerování	ISO 8015
			Promítání	
Materiál	Polotovary	Hmotnost	kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
	Druh dokumentu	VÝROBNÍ VÝKRES	Název VZORKY A=10, 20, 30 mm	
	Kreslil	Vlček Hynek		
	Schválil		Číslo dokumentu	PŘÍLOHA Č. 1
	Datum vydání	4.5.2015		
			List	/

PŘÍLOHA 2

GEOPAK Part program editor v2.3.R8 Edition 8 in MCOSMOS-1

Soubor Editovat Element Stroj Tolerance Dotek Souř. sys. Výdej Přepočítat Program Okno Nápověda

AWAC (XMT) *		
1		Dotek Z = 1 Průměr = 2.93379 A = 0.0 B = 0.0
2		1
3		1
4		Mikotoyo Standard Report C:\Documents and Settings\vmiroskop\Plocha\vmkt.pdf
5		Rovina Levá (2) Gauss
6		Počet bodů = 6
7		
8		Element = Rovina Levá (2) Šířka tolerance = 0.10000
9		Rovina Pravá (3) Gauss
10		Počet bodů = 6
11		
12		Element = Rovina Pravá (3) Šířka tolerance = 0.10000
13		Rozmer 50 Levá Vrchní (5) Gauss
14		Počet bodů = 3
15		
16		Rozmer 50 Pravá Vrchní (6) Gauss
17		Počet bodů = 3
18		
19		Rozmer 50 Vrchní (1)
20		Rozmer 50 Levá Spodní (3) Gauss
21		Počet bodů = 3
22		
23		Rozmer 50 Pravá Spodní (4) Gauss
24		Počet bodů = 3
25		
26		Rozmer 50 Spodní (2)
27		Rozmer 20 Levá Vrchní (7) Gauss
28		Počet bodů = 3
29		

GEOPAK Part program editor v2.3.R8 Edition 8 in MCOSMOS-1			
Soubor Editovat Element Stroj Tolerance Dotek Souř. sys. Výdej Přepočítat Program Okno Nápověda			
AWAC (XMT) *			
30		Přímka	Rozmer 20 Pravá Vrchní (8) Gauss
31		Manuální měřený bod	Počet bodů = 3
32		Element hotov	
33		Vzdálenost	Rozmer 20 Vrchní (3)
34		Přímka	Rozmer 20 Levá Spodní (9) Gauss
35		Manuální měřený bod	Počet bodů = 3
36		Element hotov	
37		Přímka	Rozmer 20 Pravá spodní (10) Gauss
38		Manuální měřený bod	Počet bodů = 3
39		Element hotov	
40		Vzdálenost	Rozmer 20 Spodní (4)
41		Válec	Rádus 50 Vrchní (1) Gauss
42		Manuální měřený bod	Počet bodů = 5
43		Element hotov	
44		Tolerance Kruhovitost	Element = Rádus 50 Vrchní (1) Šířka tolerance = 0.15000
45		Válec	Rádus 50 Spodní (2) Gauss
46		Manuální měřený bod	Počet bodů = 5
47		Element hotov	
48		Tolerance Kruhovitost	Element = Rádus 50 Spodní (2) Šířka tolerance = 0.15000
49		Válec	Díra 30 Vrchní (3) Gauss
50		Manuální měřený bod	Počet bodů = 7
51		Element hotov	
52		Tolerance Kruhovitost	Element = Díra 30 Vrchní (3) Šířka tolerance = 0.15000
53		Válec	Díra 30 Spodní (4) Gauss
54		Manuální měřený bod	Počet bodů = 7
55		Element hotov	
56		Tolerance Kruhovitost	Element = Díra 30 Spodní (4) Šířka tolerance = 0.15000
57		Výdej protokolu	Mitutoyo Report C:\Documents and Settings\mironosk.op\Plocha\vmr.pdf

PŘÍLOHA 3

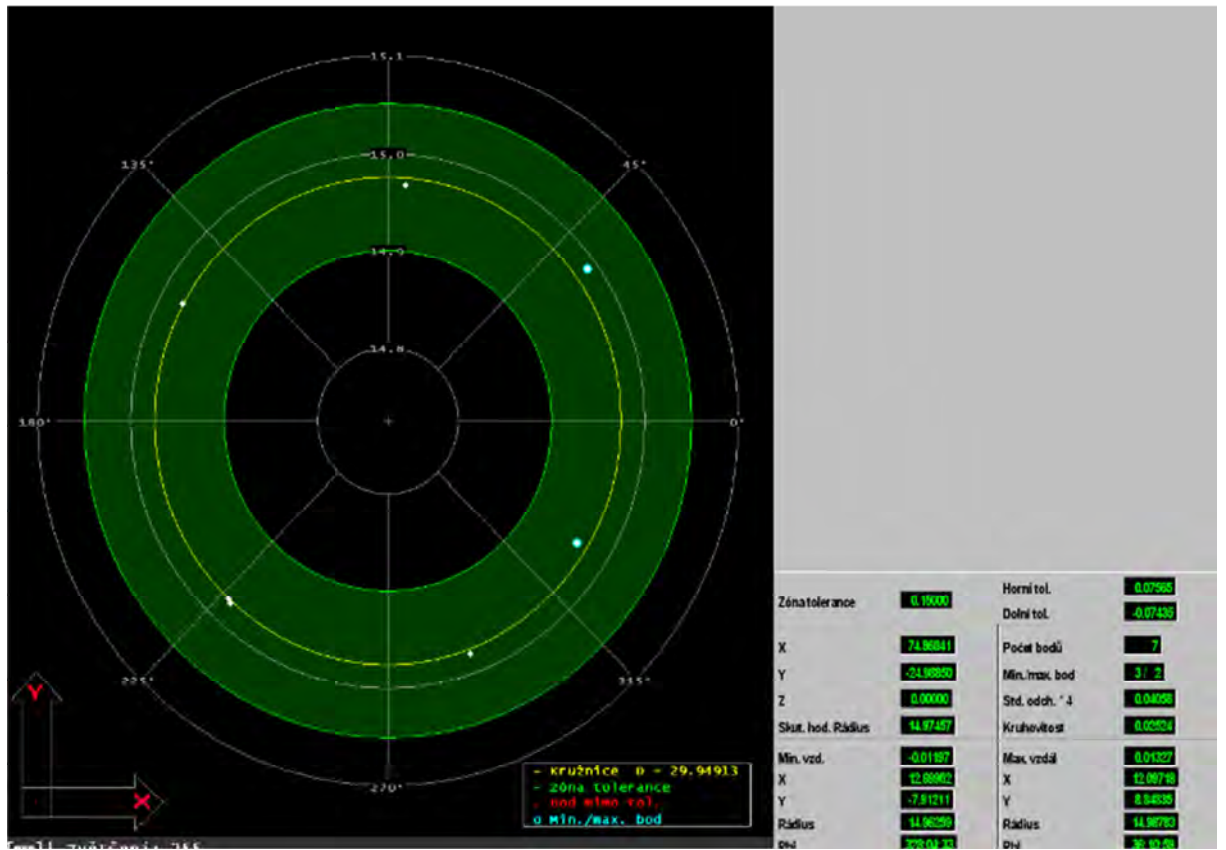


Uživatel: Admin
20.03.2016 18:24

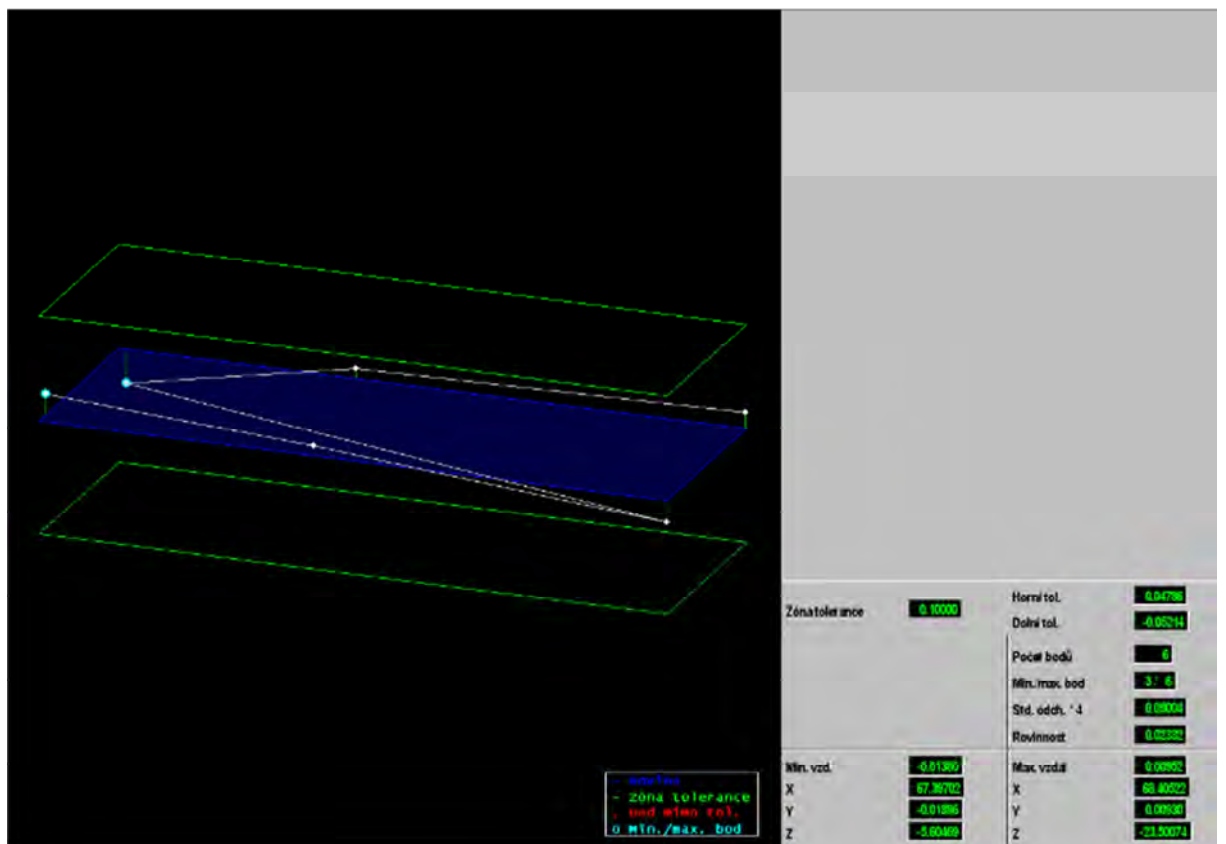
Číslo protokolu (1)
XMT

1	2	3	4	
El. No.	Line No. Element Tolerance	Pkt. Ref. X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	
		Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	
			Variance	
2	5 Rovina Levá Gauss	6 0.00000	-0.00741 0.00000	0.02332
		90:00:02	0:00:57 89:59:03	
2	6 Rovina Levá		0.10000 0.02332	0.02332
	Rovinnost			**_
3	9 Rovina Pravá Gauss	6 0.05015	-50.07658 0.15840	0.01794
		89:58:33	179:48:36 89:49:08	
3	12 Rovina Pravá		0.10000 0.01794	0.01794
	Rovinnost			**_
6	13 Rozmer 50 Levá Vrchní	3 0.00000	-0.00016 0.00000	0.00463
		0:00:01	89:59:59 90:00:00	
6	16 Rozmer 50 Pravá Vrchní	3 0.04491	-50.08785 0.00000	50.08787
		0:03:05	89:58:55 90:00:00	0.00962
1	19 Rozmer 50 Vrchní Bez		0.00013 -50.05378 0.00000	50.05378
3	20 Rozmer 50 Levá Spodní	3 0.00001	-0.02589 0.00000	0.02589
		0:01:17	89:58:43 90:00:00	0.00273
4	23 Rozmer 50 Pravá Spodní	3 0.07810	-50.18290 0.00000	50.18296
		0:05:21	89:54:39 90:00:00	0.02740
2	26 Rozmer 50 Spodní Bez		0.01869 -50.11195 0.00000	50.11195
7	27 Rozmer 20 Levá Vrchní	3 0.00498	-15.01184 0.00000	15.01184
		0:01:08	89:58:52 90:00:00	0.00985
8	30 Rozmer 20 Pravá Vrchní	3 0.03461	-35.01235 0.00000	35.01238
		0:03:24	89:58:36 90:00:00	0.00470
3	33 Rozmer 20 Vrchní Bez		0.00863 -19.98147 0.00000	19.98147
6	34 Rozmer 20 Levá Spodní	3 0.09081	-15.22126 0.00000	15.22154
		0:20:31	89:39:29 90:00:00	0.00727
10	37 Rozmer 20 Pravá spodní	3 -0.00214	-34.99673 0.00000	34.99673
		0:00:13	90:00:13 90:00:00	0.00622
4	40 Rozmer 20 Spodní Bez		0.11906 -19.95810 0.00000	19.95645
1	41 Rádus 50 Vrchní Gauss	5 74.95043	-24.96583 0.00000	49.97838
1	44 Rádus 50 Vrchní		0.15000	0.02470
	Kruhovitost			**_
2	45 Rádus 50 Spodní Gauss	5 74.83313	-25.01559 0.00000	50.07970
2	48 Rádus 50 Spodní		0.15000	0.02149
	Kruhovitost			**_
3	49 Dıra 30 Vrchní Gauss	7 74.86841	-24.98850 0.00000	29.94913
3	52 Dıra 30 Vrchní		0.15000	0.02524
	Kruhovitost			**_
4	53 Dıra 30 Spodní Gauss	7 74.78432	-25.02928 0.00000	29.89194
4	56 Dıra 30 Spodní		0.15000	0.05170
	Kruhovitost			**_

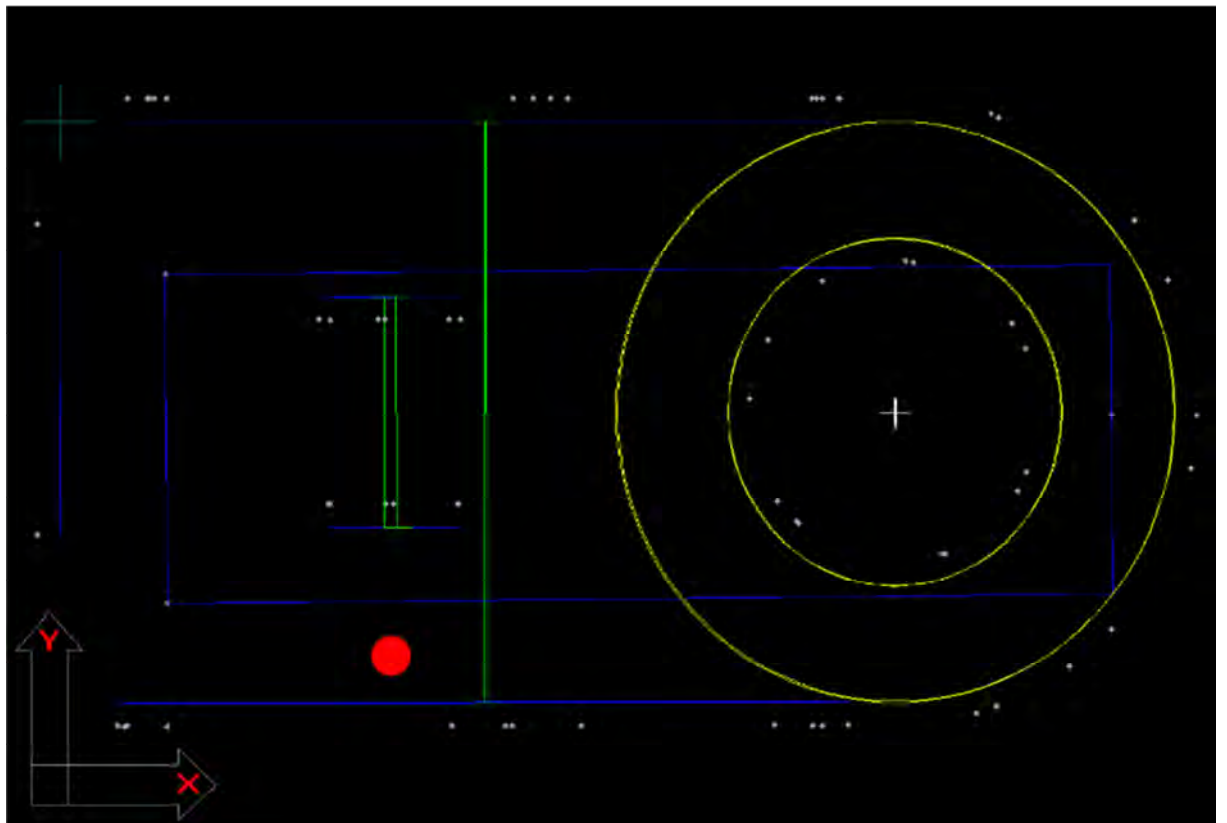
PŘÍLOHA 4



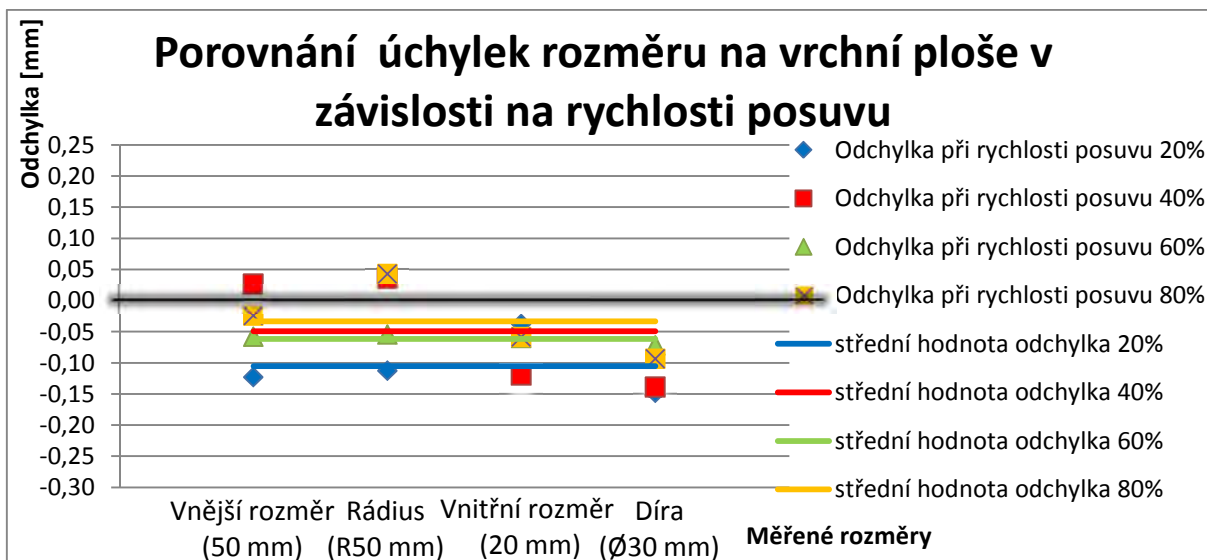
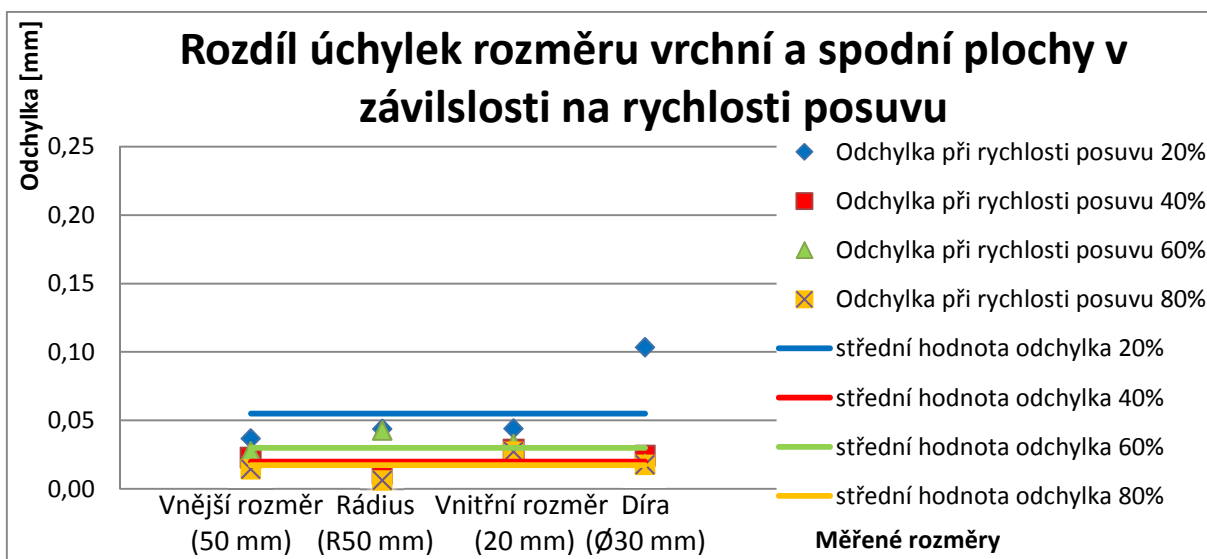
PŘÍLOHA 5

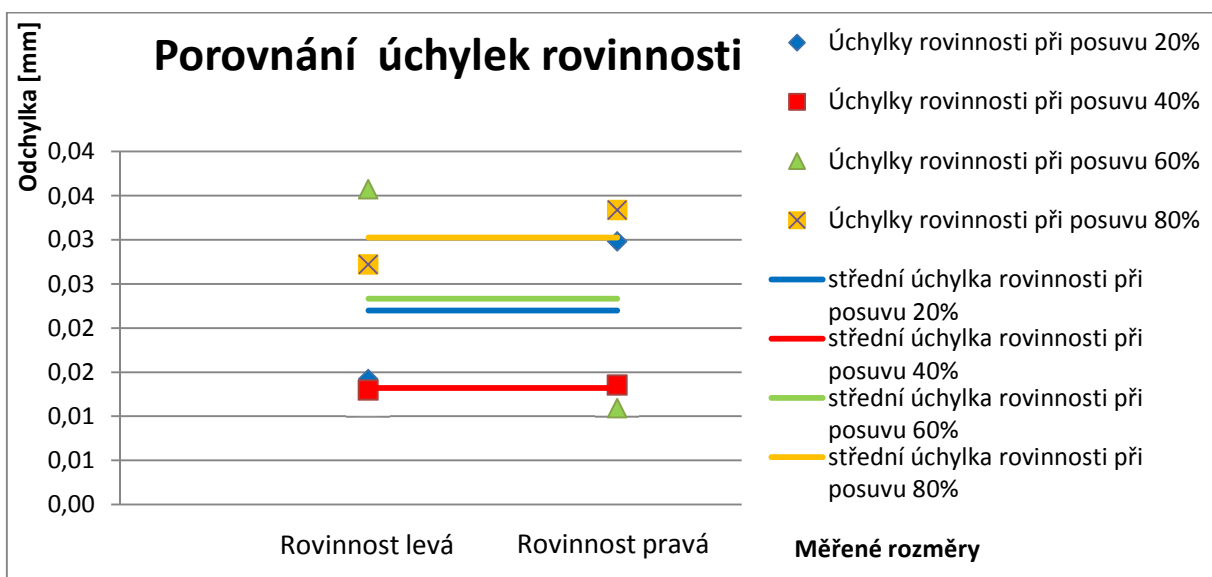
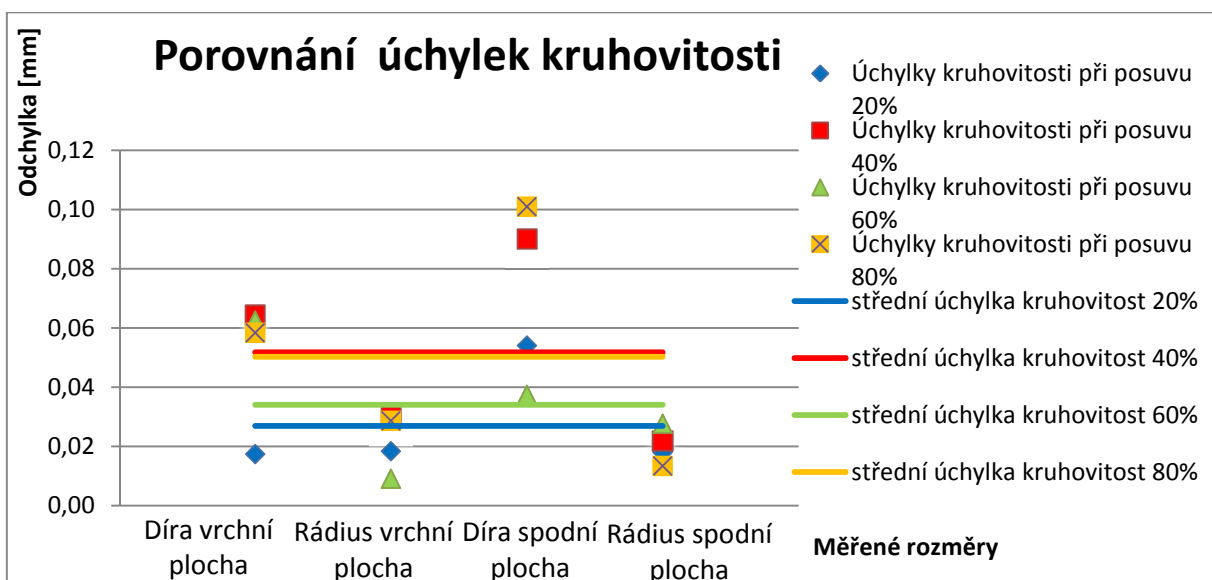
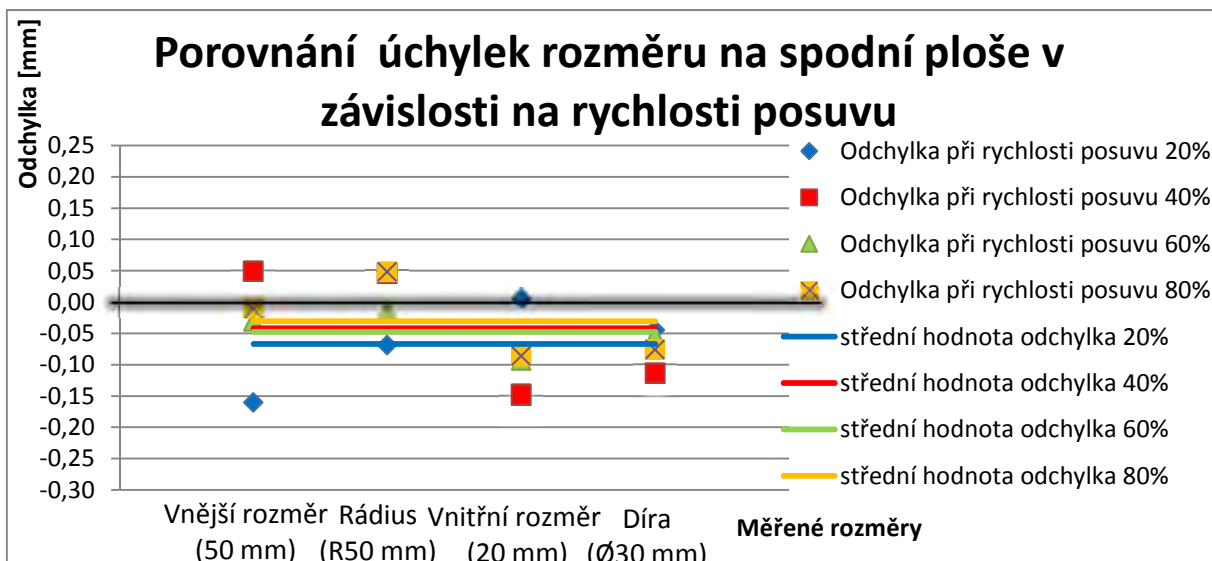


PŘÍLOHA 6

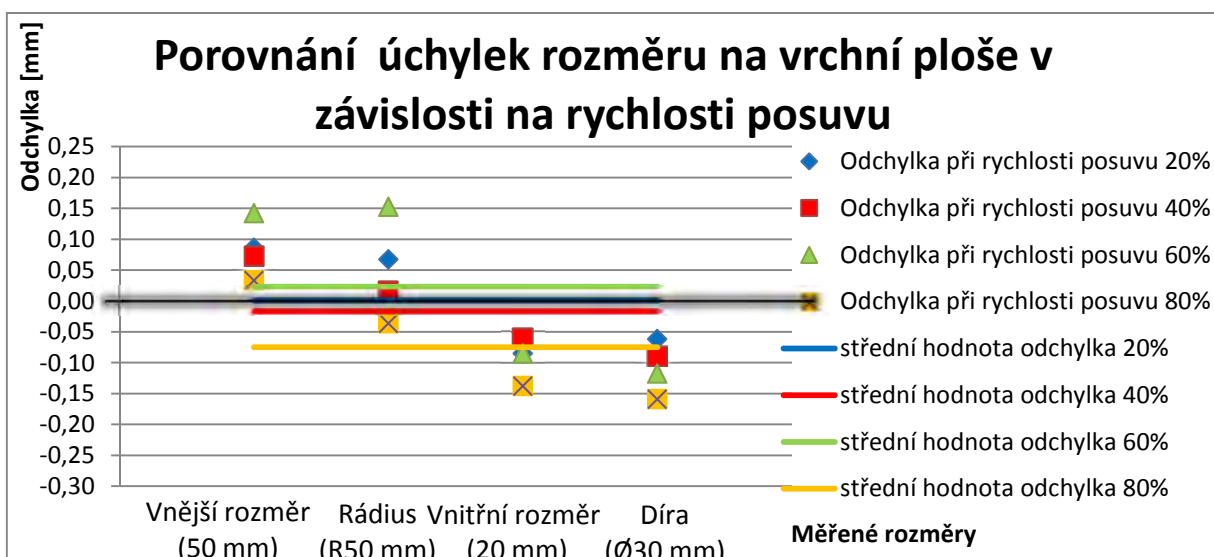
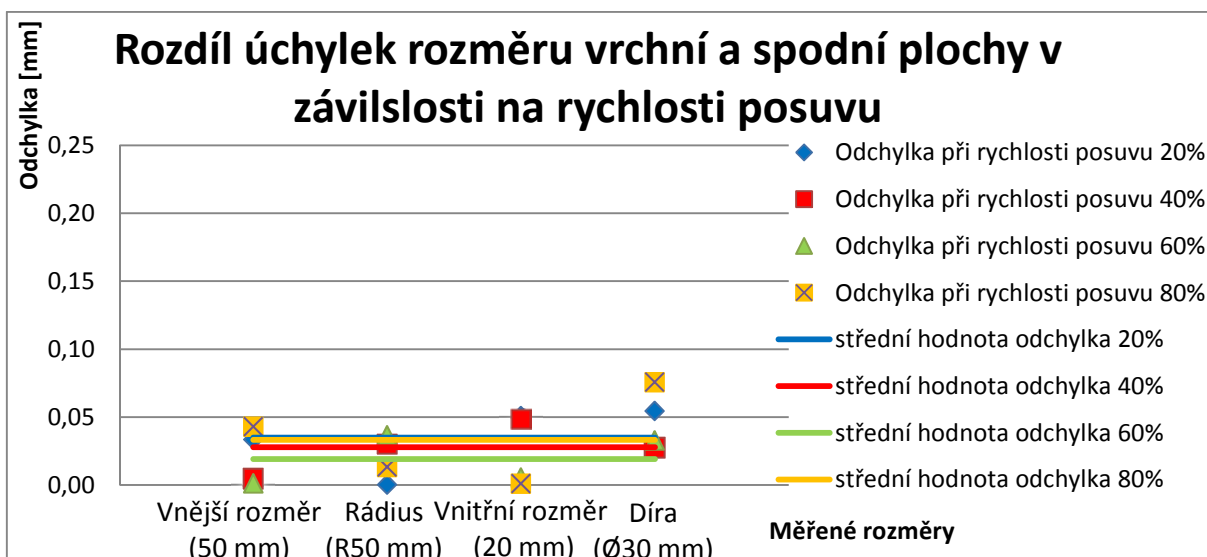


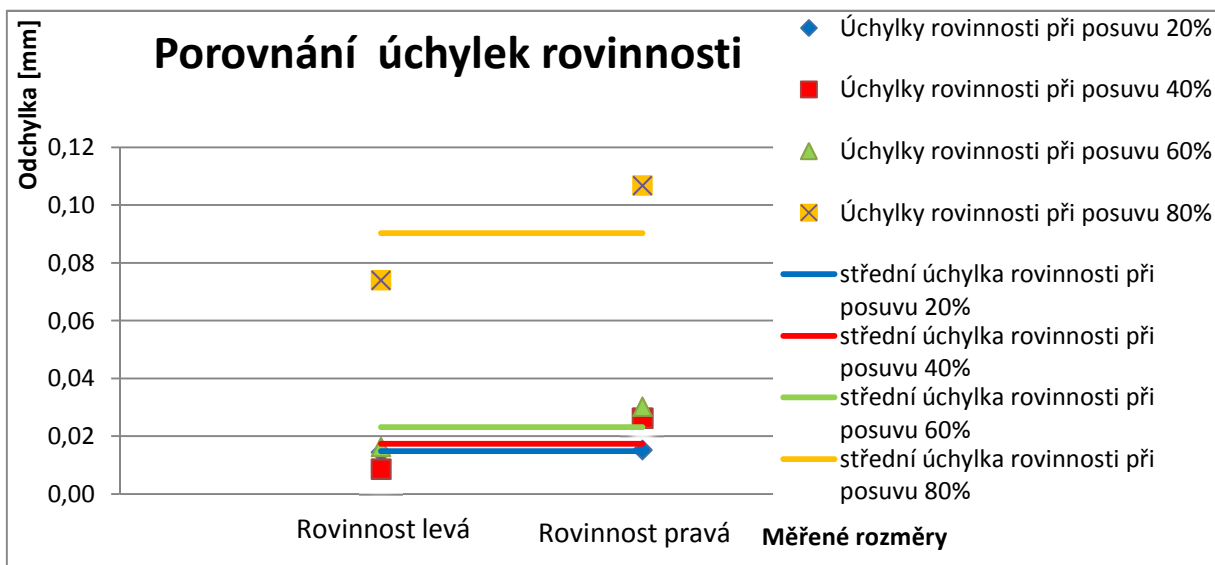
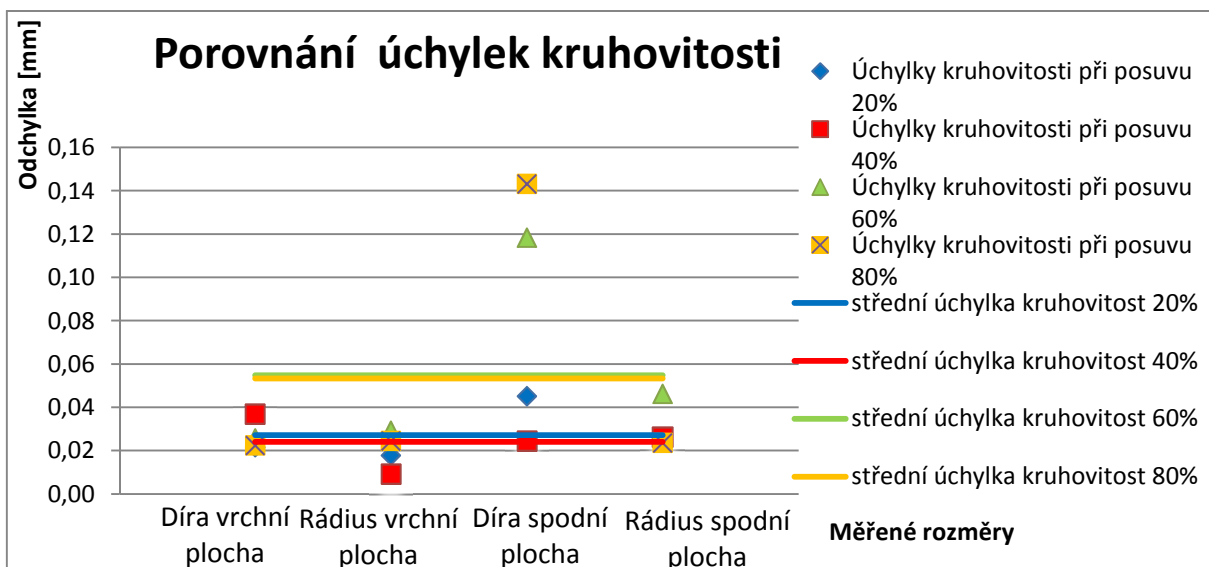
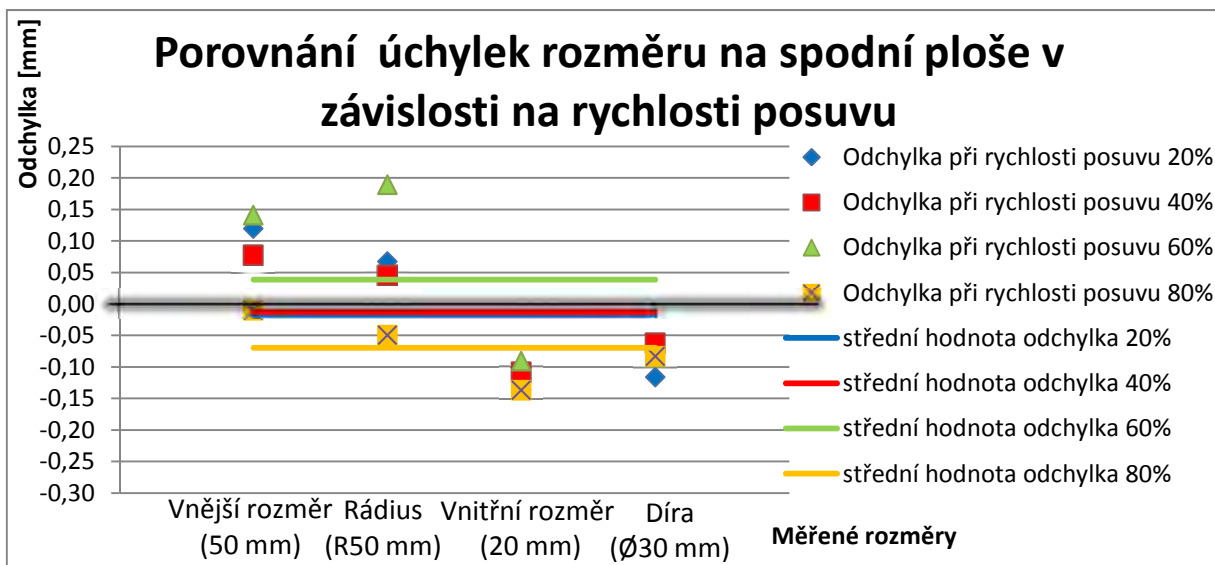
PŘÍLOHA 7



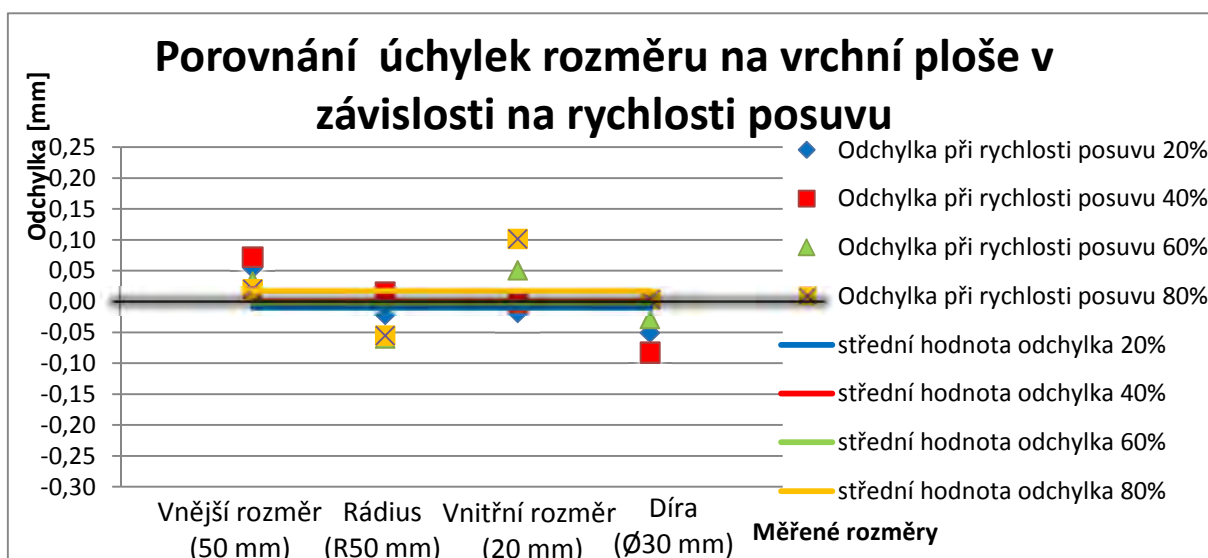
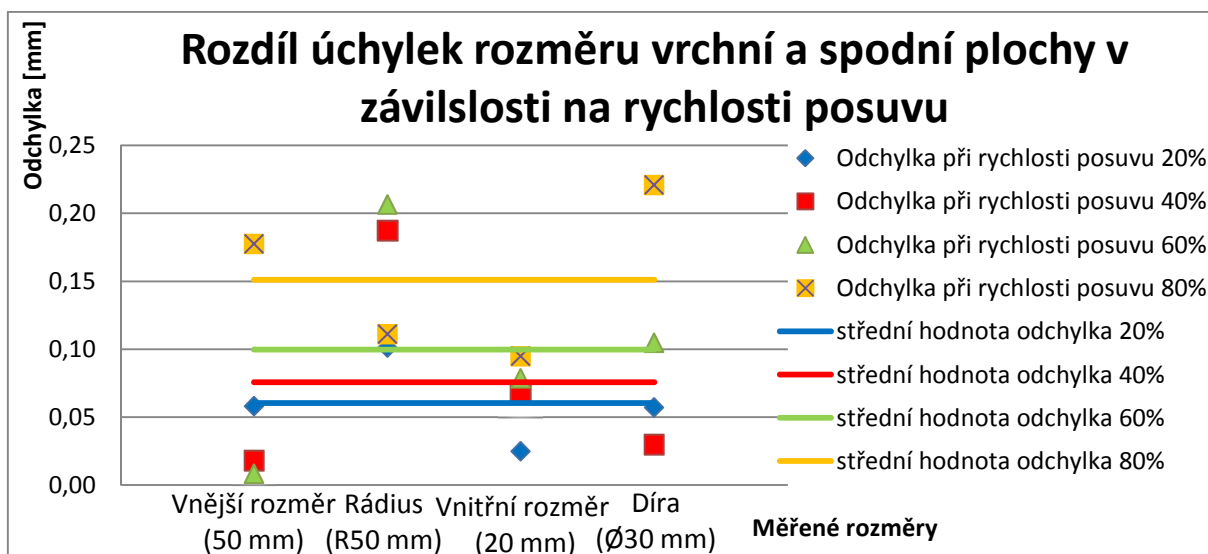


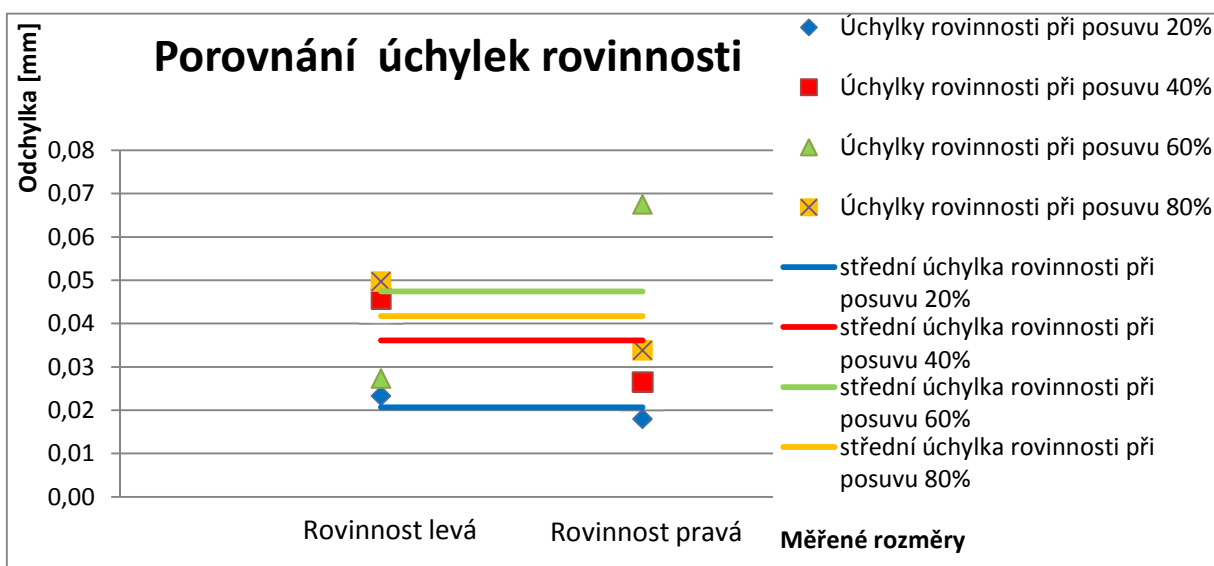
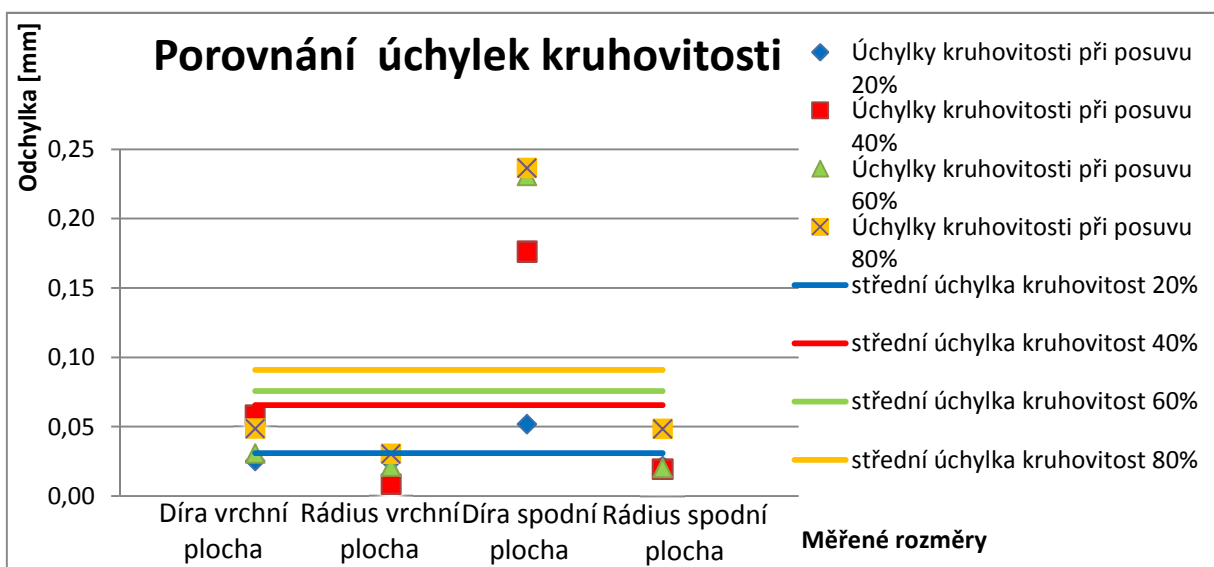
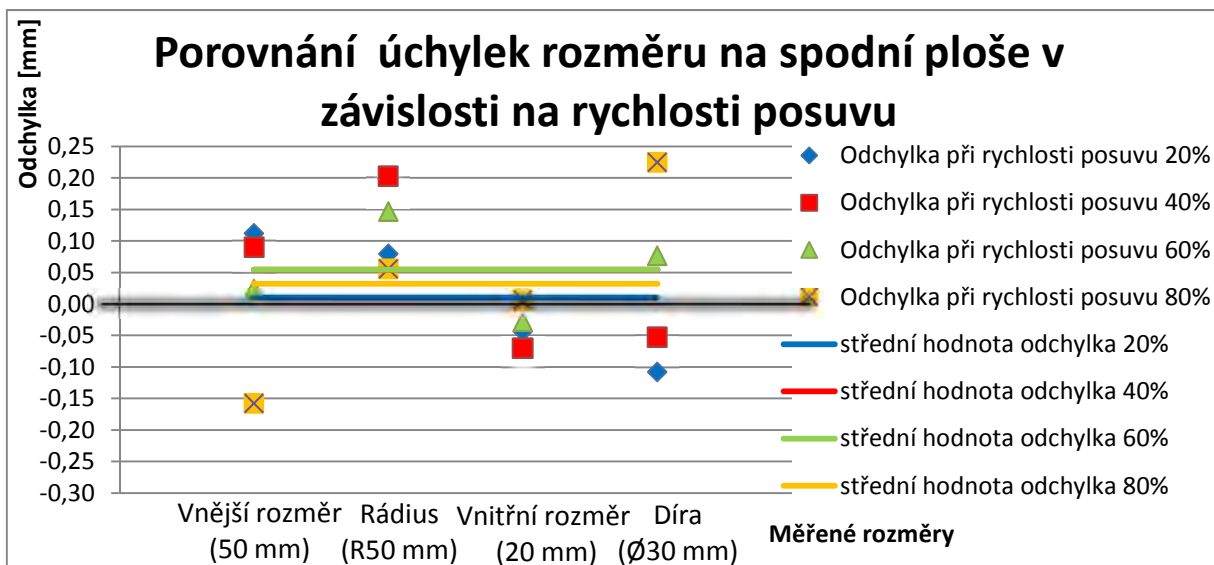
PŘÍLOHA 8



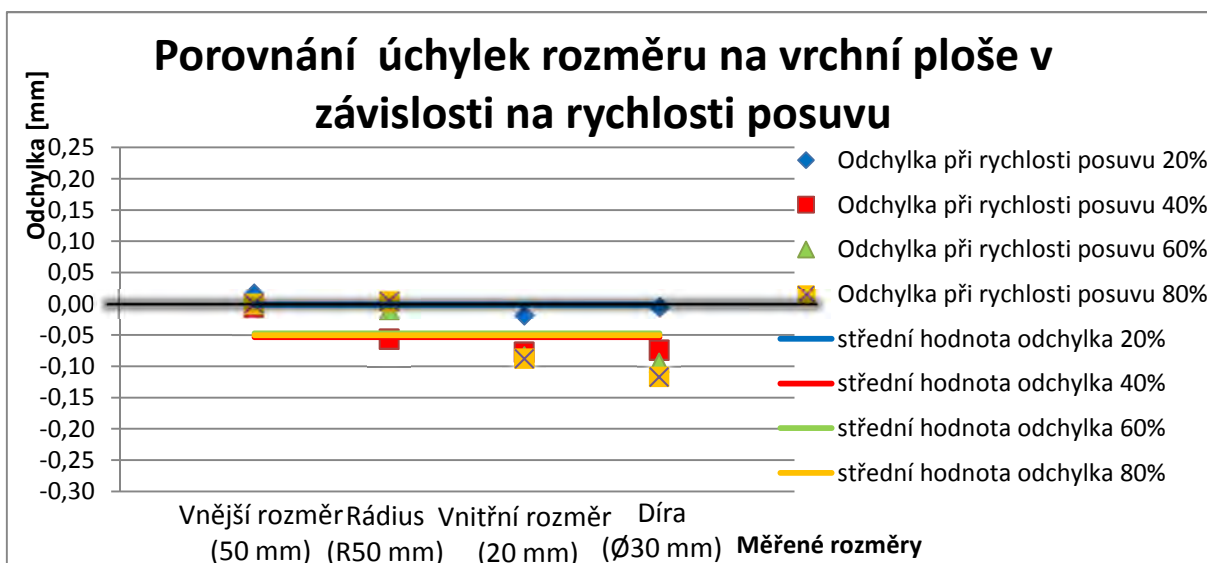
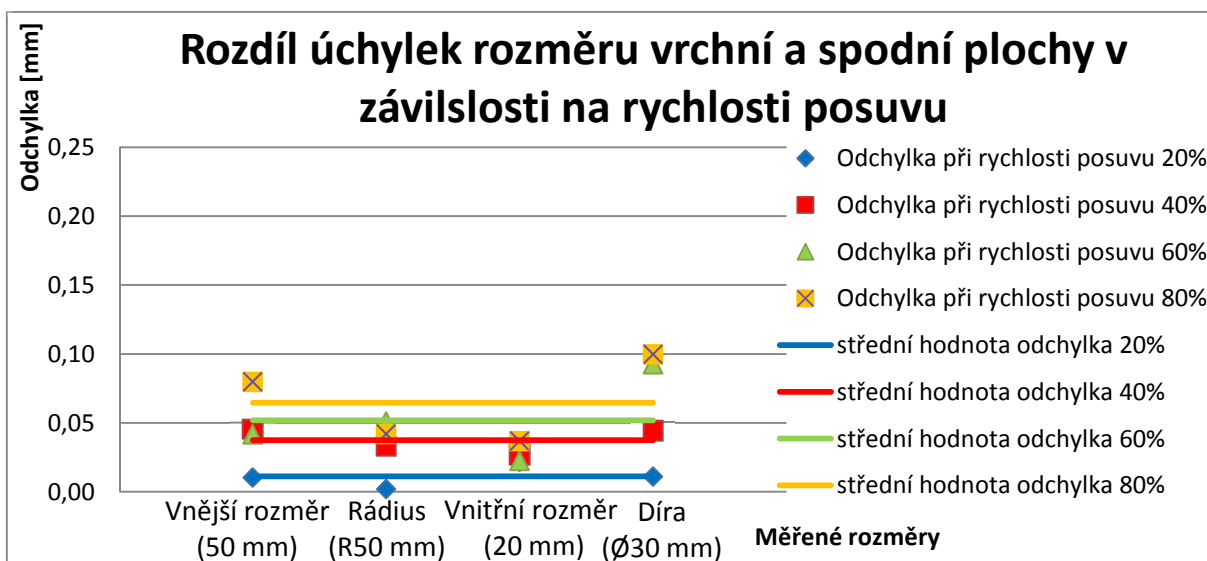


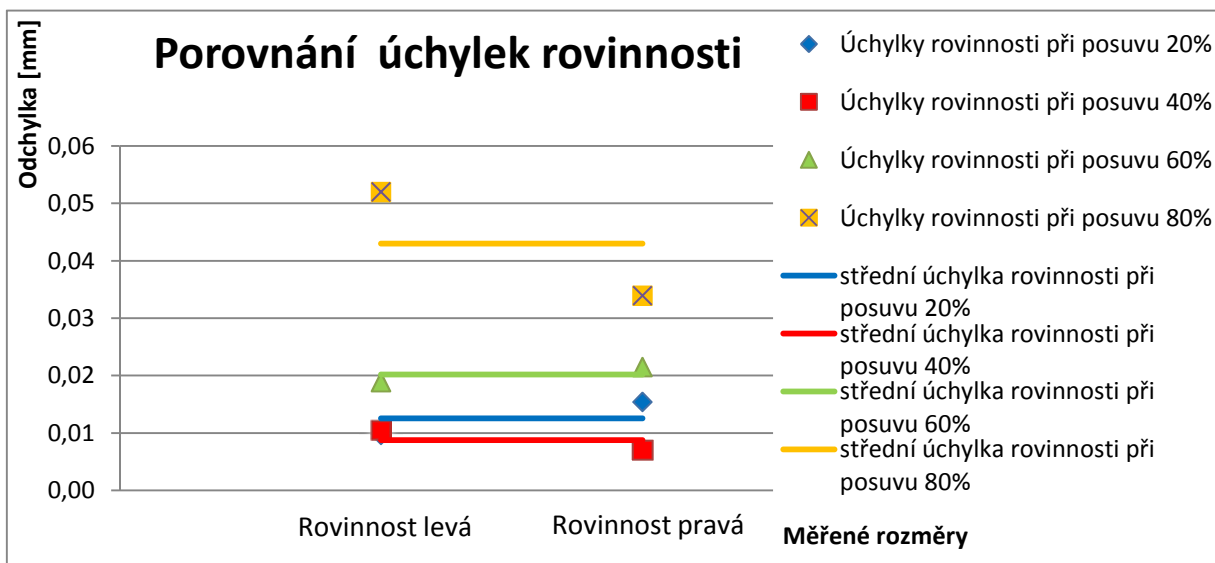
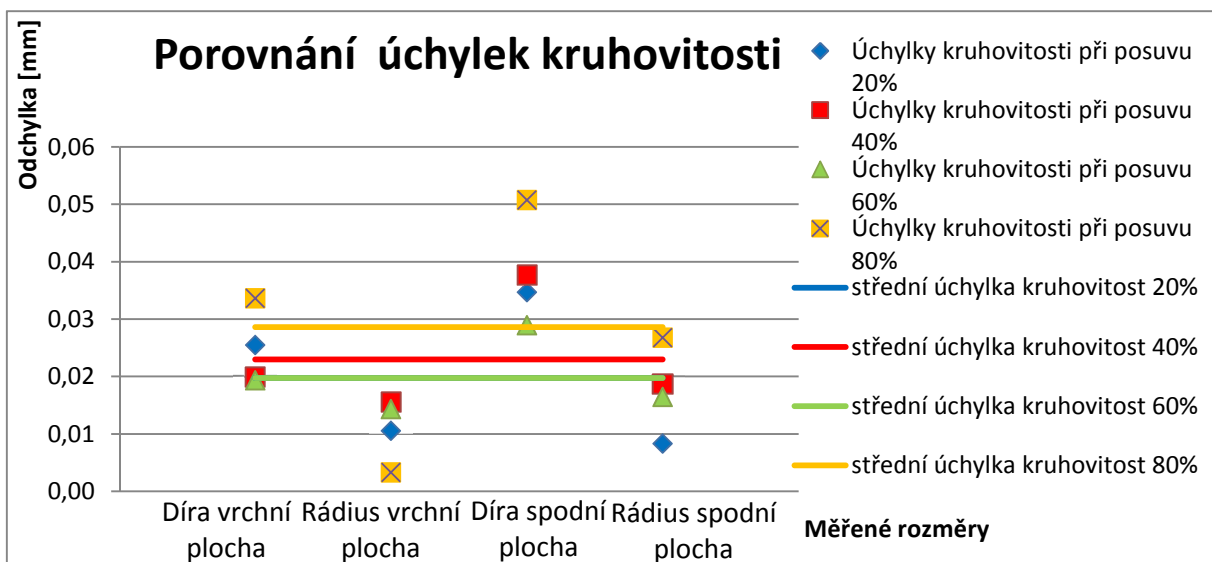
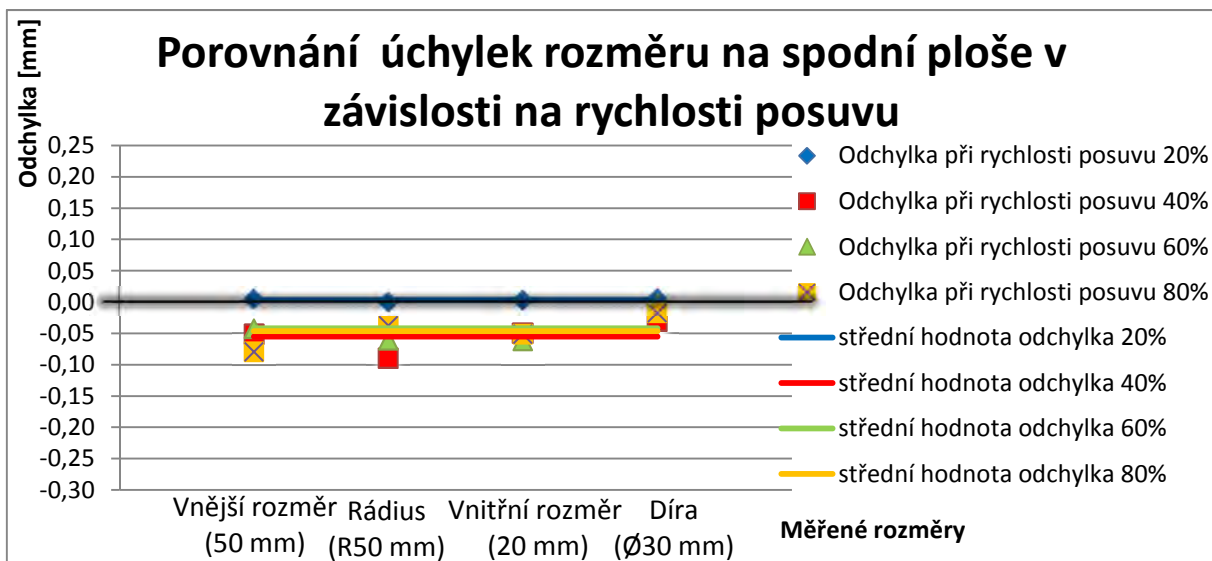
PŘÍLOHA 9



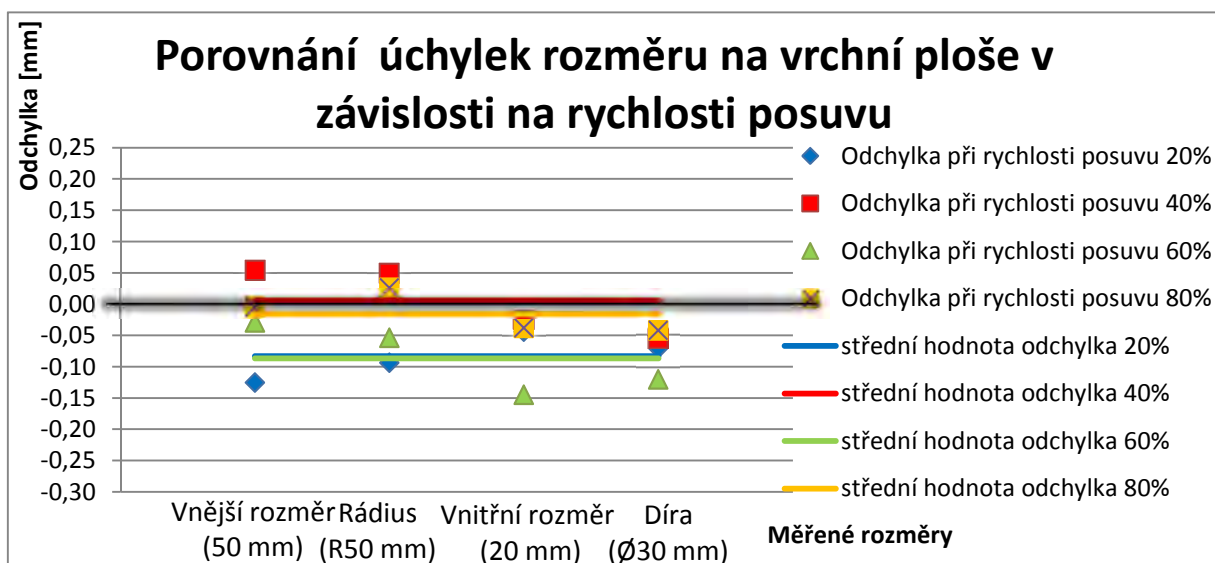
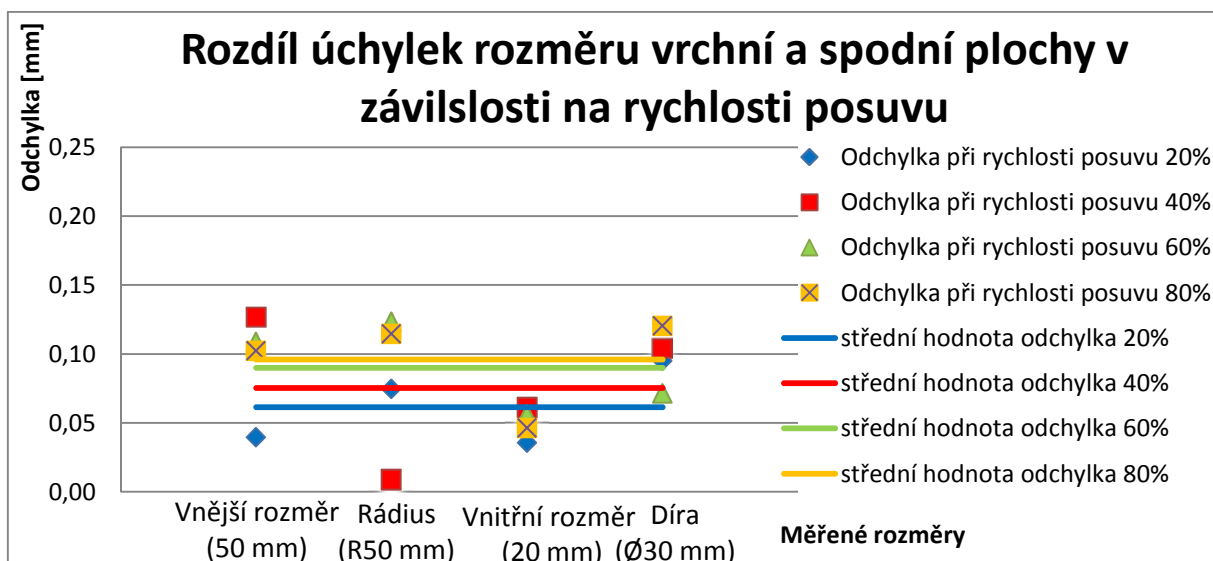


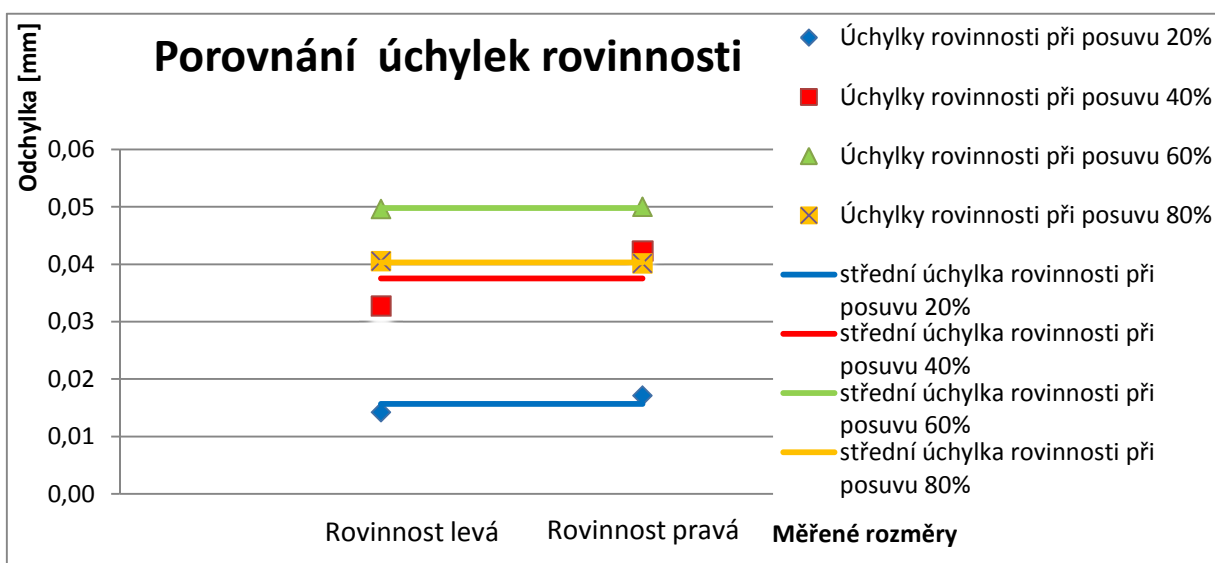
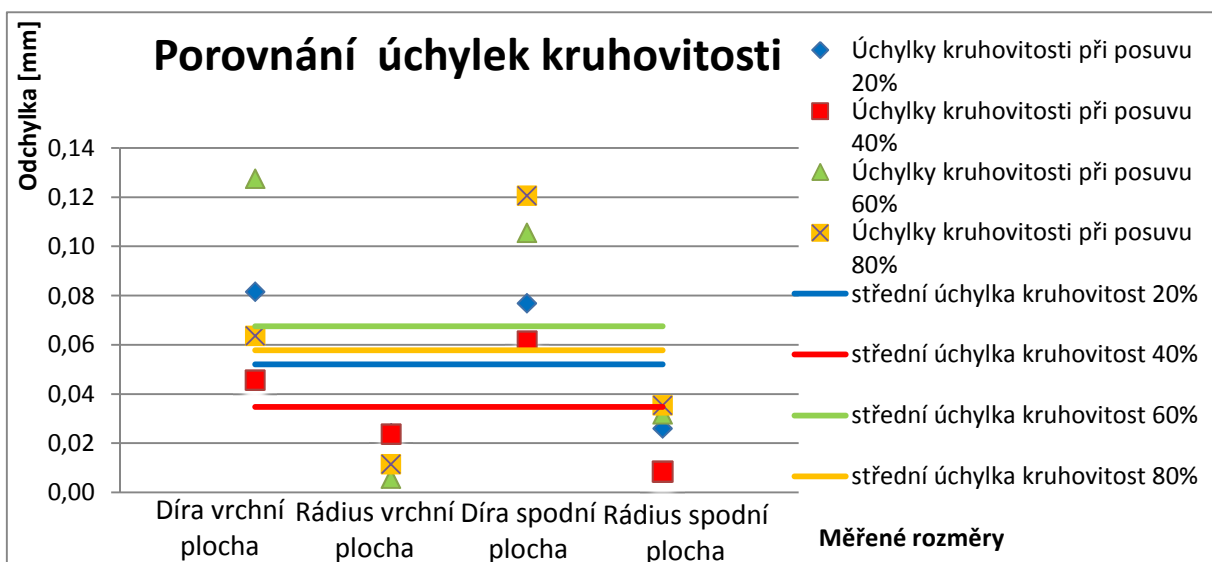
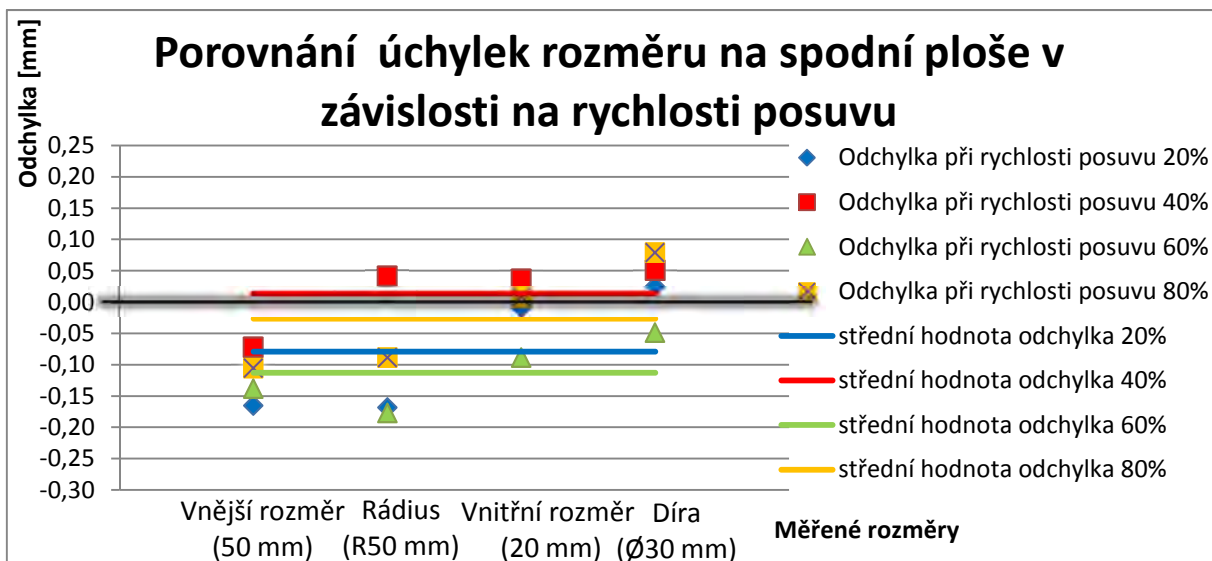
PŘÍLOHA 10



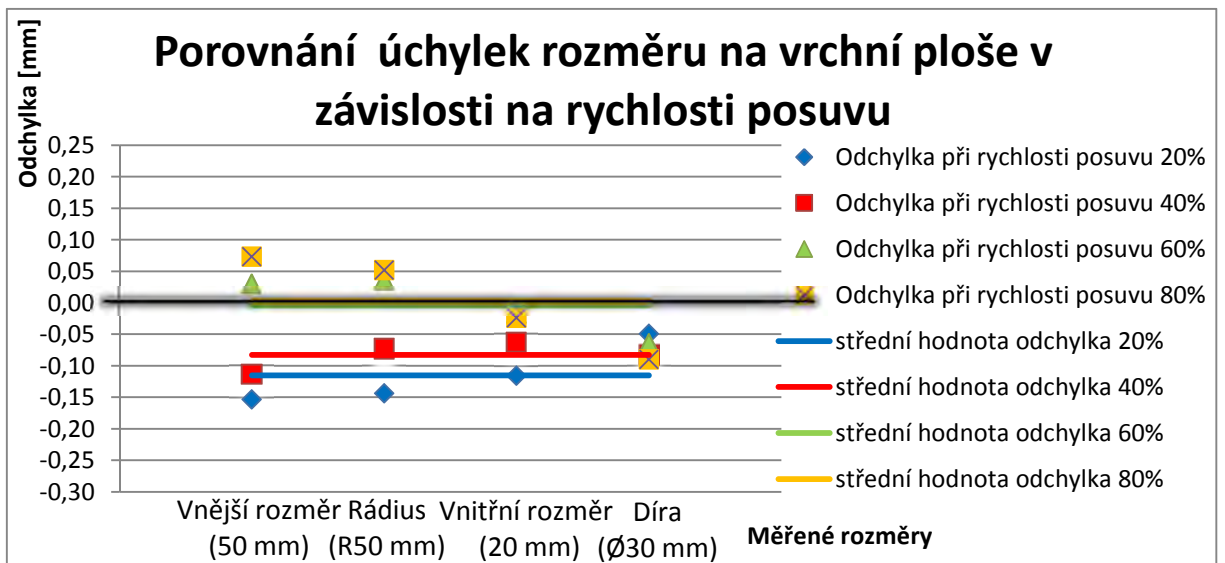
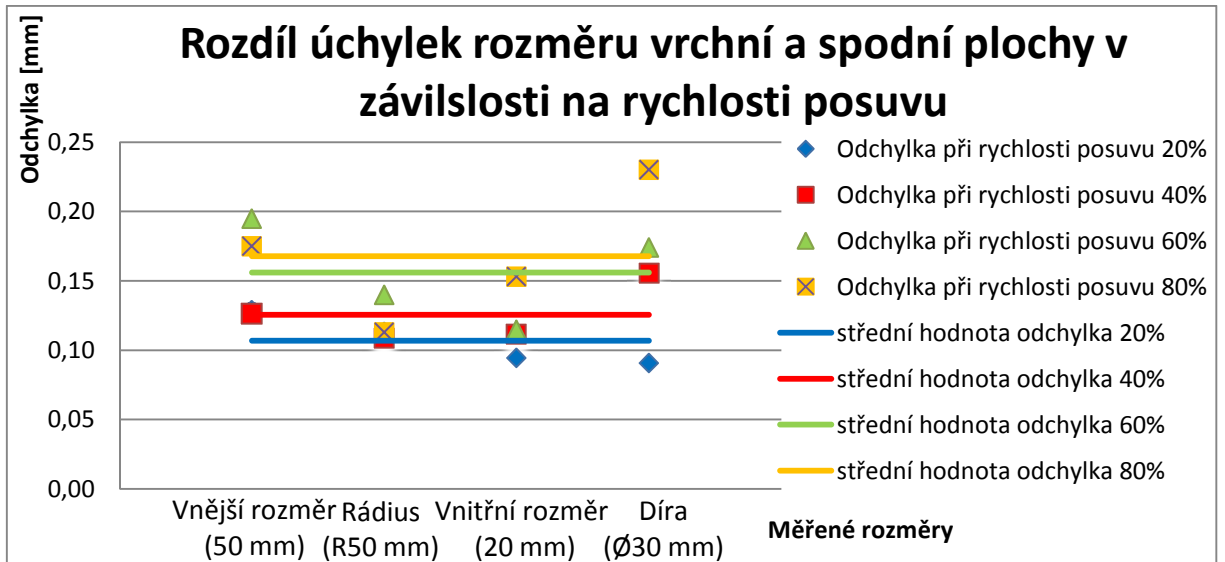


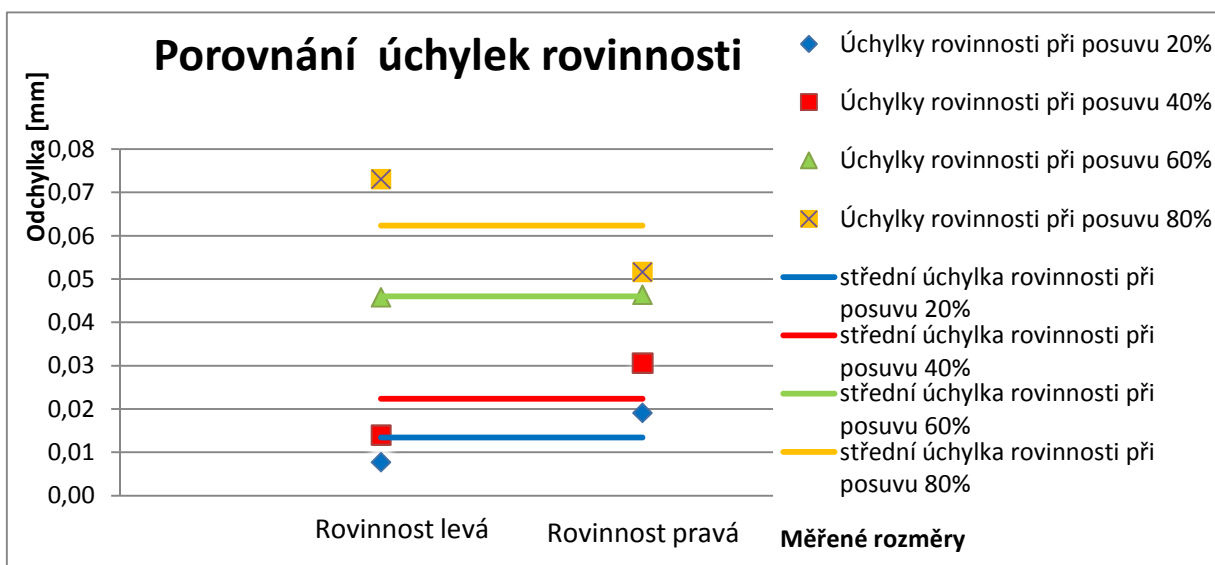
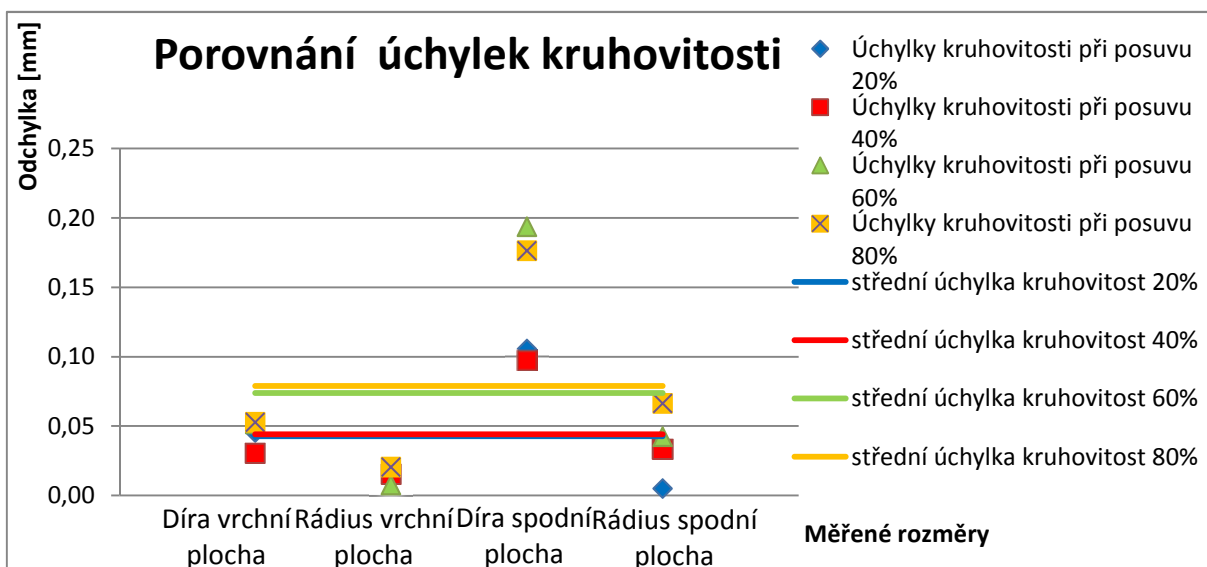
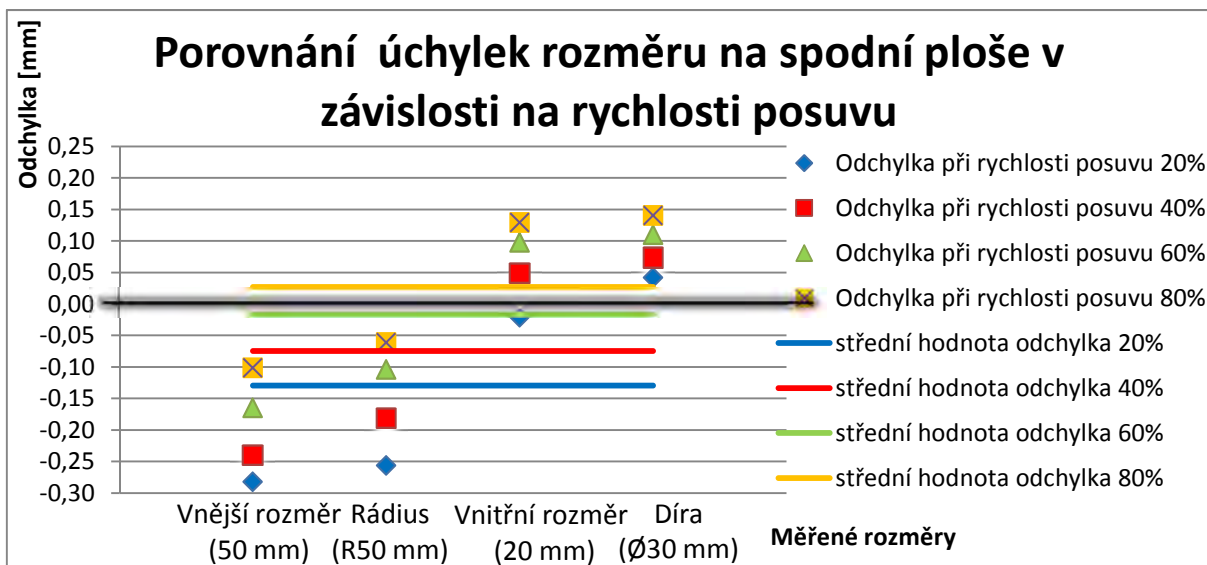
PŘÍLOHA 11



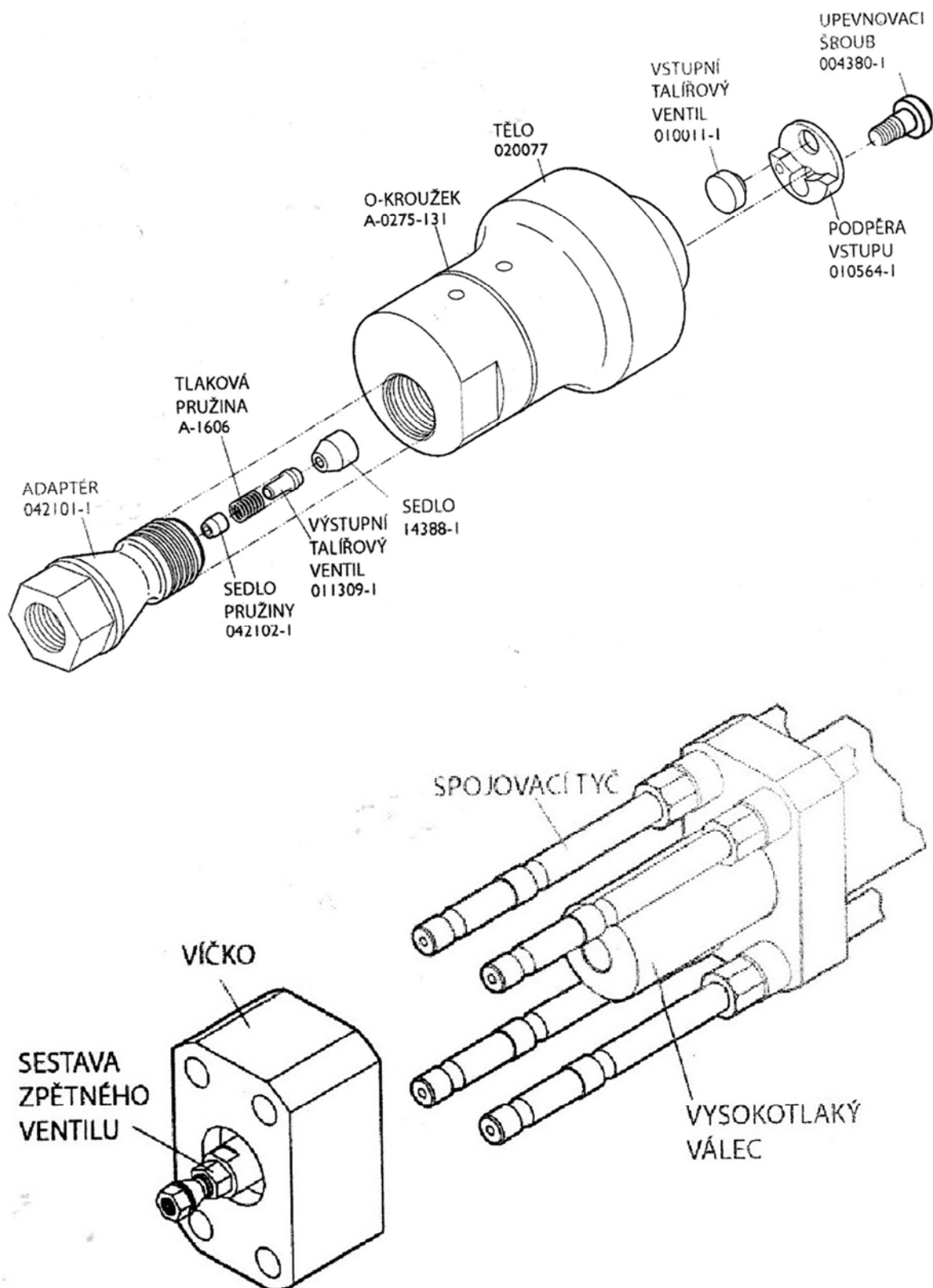


PŘÍLOHA 12





PŘÍLOHA 13



PŘÍLOHA 14

Tab. Jednotlivé výměny hydroabrazivní trysky

Počet motohodin stroje při výměně trysky [Mth]	875	939	1109	1261	1401	1467	1507	1603
Životnost jednotlivých trysek [Mth]	64	170	152	140	66	40	96	131
Počet motohodin stroje při výměně trysky [Mth]	1734	1895	2048	2115	2353	2437	2583	2748
Životnost jednotlivých trysek [Mth]	161	153	67	238	84	146	165	
Průměrná životnost abrazivní trysky [Mth]	124,9							

Tab. Jednotlivé výměny směšovací trysky

Počet motohodin stroje při výměně trysky [Mth]	1023	1315	1760	2530	2755
Životnost jednotlivých trysek [Mth]	292	445	770	225	
Průměrná životnost abrazivní trysky [Mth]	433				