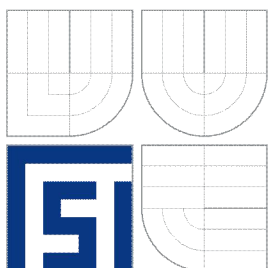


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## 3D VODNÍ PAPERSEK

3D WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MICHAL KUČERA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Kučera

který/která studuje v magisterském navazujícím studijním programu

obor: Strojírenská technologie (23031002)

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

### **3D vodní paprsek**

v anglickém jazyce:

### **3D water jet**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aplikace technologie řezání 3D abrazivní řezací hlavou u technologie vodního paprsku. Ověření technologických možností při obrábění tvarových vzorků ve 3D.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Rozbor technologie abrazivního vodního paprsku.

Technologické možnosti abrazivního vodního paprsku se 3D vybavením.

Experimentální porovnání vlivu parametrů nastavení pro aplikaci 3D řezací hlavy pro jednotlivé materiály.

Vyhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti vzorků obráběných ve 3D.

Diskuze.

Závěr.



Seznam odborné literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildiké. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.

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

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 25.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá využitím a technologickými možnostmi abrazivního vodního paprsku při aplikaci 3D řezací hlavy. Součástí práce je popis technologie vodního paprsku a jeho další aplikace. Experimentální porovnání vlivu parametrů bylo provedeno pro různé materiály na zařízení řady Mach 4 společnosti Flow International Corporation ve firmě AWAC, spol. s r.o. a následně byly obrobky podrobeny vyhodnocení tvarové a rozměrové přesnosti.

### Klíčová slova

vodní paprsek, 3D řezací hlava, abrazivo, parametry nastavení, přesnost

## ABSTRACT

This master thesis deals with the use and technological capabilities of abrasive water jet in the application of 3D cutting head. One part of this thesis is the description of waterjet technology and its other applications. The experimental comparison of the effect of the parameters was carried out for different materials Mach 4 equipment Flow International Corporation in company AWAC, spol. s r.o. and subsequently the workpieces were subjected to evaluation of the shape and dimensional accuracy.

### Keywords

water jet, 3D cutting head, abrasive, setting parameters, accuracy

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUČERA, M. *3D vodní paprsek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 90 s. 13 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

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

-----  
Datum

-----  
Bc. Michal Kučera

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Karlu Osičkovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při jejím vypracování. Děkuji zaměstnancům firmy AWAC, spol. s r.o. za umožnění provedených experimentů a doplnění dalších poznatků o řezání abrazivním vodním paprskem. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Knoblochovi, MSc za pomoc při měření rozměrových a geometrických parametrů vzorků. Největší dík patří mé rodině za to, že mi studium umožnila a po celou dobu mě v něm podporovala.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
<b>1 ROZBOR TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU .....</b>	<b>11</b>
1.1 Součástková základna zařízení pro abrazivní vodní paprsek.....	11
1.1.1 Zdroj tlakové technologické kapaliny.....	12
1.1.2 Akumulátor tlaku .....	15
1.1.3 Hydraulické rozvody tlakových kapalin .....	16
1.1.4 Řezací hlavy .....	16
1.2 Pracovní kapalina .....	18
1.2.1 Úprava vody .....	18
1.3 Abrazivo.....	21
1.3.1 Recyklace abraziva .....	23
1.4 Druhy kapalinových paprsků .....	24
1.4.1 Čistý vodní paprsek – WJM .....	25
1.4.2 Abrazivní vodní paprsek – AWJ.....	26
1.4.3 Méně využívané typy vodního paprsku .....	29
1.5 Fenomén rýh.....	31
1.6 Rozšíření řezné mezery.....	33
1.7 Odchylka kolmosti.....	34
1.8 Porovnání vlastností abrazivního vodního paprsku s dalšími typy nekonvenčních technologí.....	35
1.9 Výhody a nevýhody abrazivního vodního paprsku .....	36
1.10 Možnosti využití abrazivního vodního paprsku v praxi .....	37
1.10.1 Řezání.....	37
1.10.2 Soustružení .....	38
1.10.3 Frézování .....	39
1.10.4 Vrtání.....	40
1.10.5 Využití WJM a AWJ v průmyslu .....	40
<b>2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU SE 3D   VYBAVENÍM .....</b>	<b>42</b>
2.1 Technologie podporující 3D abrazivní vodní paprsek.....	42
2.1.1 Dynamic Waterjet .....	42

2.1.2 Dynamic Waterjet XD.....	43
2.1.3 ProgressJet 5AX Systém .....	44
2.1.4 ProgressJet 60dg Systém.....	45
2.1.5 Hyperpressure.....	45
2.2 Příslušenství k zařízení .....	46
2.2.1 Výškový senzor .....	46
2.2.2 Laserový zaměřovací kříž .....	47
2.2.3 Dynamic contour follower.....	47
2.2.4 Ultrapierce vacuum assist.....	48
2.2.5 Pure waterjet.....	48
2.2.6 Flowteach .....	48
2.3 Zařízení společnosti Flow Mach 4c.....	49
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ VLIVU PARAMETRŮ NASTAVENÍ PRO APLIKACI 3D ŘEZACÍ HLAVY PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLY.....</b>	<b>52</b>
3.1 Vytvoření 3D modelu a jeho transformace.....	52
3.1.1 Program SpaceClaim.....	54
3.2 Nastavení parametrů pro jednotlivé vzorky .....	55
3.2.1 Program FlowCUT.....	55
3.2.2 Nastavení parametrů v programu FlowCUT .....	56
3.3 Parametry řezu.....	59
3.4 Ustavení polotovaru v zařízení Mach 4c a výsledné výřezky.....	61
<b>4 VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ PŘESNOSTI VZORKŮ OBRÁBĚNÝCH VE 3D .....</b>	<b>63</b>
4.1 Stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544 .....	63
4.2 Postup měření a vyhodnocení vzorků na stroji Mitutoyo Crysta-Plus M544 .....	65
4.2.1 Výsledky měření vzorku kolečko .....	66
4.2.2 Výsledky měření vzorku obdélník AWAC .....	67
4.2.3 Výsledky měření vzorku turbína .....	72
4.3 Zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM .....	78
4.4 Postup měření a vyhodnocení vzorků na zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM.....	79
<b>5 DISKUZE.....</b>	<b>81</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>82</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>83</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>87</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>90</b>



## ÚVOD

Potenciál síly vody je známý již od nepaměti a je natolik fascinující, že se autor rozhodl podrobněji věnovat této problematice a zkoumat zařízení, jež ji využívají.

Snad nejznámější přírodní scénérií je Grand Canyon vytvořený silou vody v podobě eroze. Nejen příroda, ale i lidé využívali silový potenciál vody. Egypťané oddělovali zlato od hlušiny, sloužila jako pohon mlýnských kol a pod.<sup>1</sup>

V minulém století došlo k velkému rozmachu využití technologie vodního paprsku, kdy byl využíván především k těžbě nerostných surovin a poté k dělení materiálů jako je dřevo, nebo plast. Největší posun vpřed zapříčinil podnět americké organizace pro letectvo a kosmonautiku NASA, která požadovala vyřešit problematiku technologie řezání keramických destiček využívaných jako tepelný štít u raketoplánů. Tento impulz napomohl odstartovat r. 1980, průmyslovou výrobu zařízení využívající technologii hydroabrazivního dělení materiálů<sup>1</sup>.

Dnes, v třetím tisíciletí máme možnost pozorovat široké spektrum aplikací vodního paprsku, mezi které patří čištění, řezání, soustružení, frézování, vrtání nebo hydrodemolice. Každá z těchto aplikací vyžaduje rozdílné technické vybavení a provozní parametry.

Mezi hlavní země podílející se na vývoji a produkci vysokotlakých zařízení patří Spojené státy americké, Německo a Japonsko. Nejznámější světové firmy v této oblasti jsou FLOW SYSTEMS Inc., INGERSOLL RAND, HAMMELMANN, SUGINO MACHINE LIMITED, Mc CARTNEY, URACA PUMPENFABRIK GmbH & Co.KG, KAMAT, WAMA, UHDE atd.

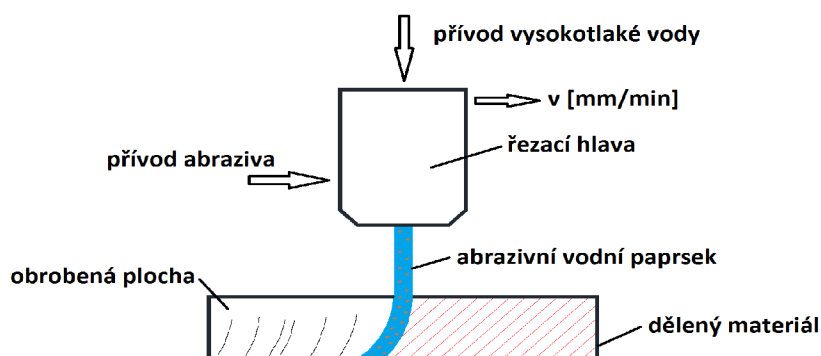
Firma AWAC, spol. s.r.o. (dále jen AWAC) byla založena v říjnu 1990. Její hlavní činností je poskytování služeb v oblasti dělení materiálu za pomoci vysokotlakého vodního paprsku. Firma sídlí v Praze a má další dvě pracoviště v Plzni a Brně. Společnost AWAC nyní nově disponuje i technologií 3D řezání vodním paprskem<sup>2</sup>.



## 1 ROZBOR TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Abrazivní obrábění vodním paprskem patří mezi nekonvenční metody obrábění, což znamená, že k úběru materiálu nedochází za pomoci nástroje s definovanou geometrií.

Technologie řezání vodním paprskem je mechanicko-fyzikální metoda, jejíž princip je zobrazen na obr. 1.1 a spočívá v postupném odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu proudu vody o velmi malém průměru s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy. Abrazivo jako aditivum znásobuje efektivitu řezu. Tlak vody je generován hydromotorem a poté je vysokotlaká voda transformována pomocí vodní dýzy o průměru 0,1 mm - 0,3 mm na vysokorychlostní. Ve směšovací komoře je přidáváno do paprsku abrazivum. Výsledný paprsek vycházející z abrazivní dýzy dopadá na povrch děleného materiálu a dochází ke ztrátě kinetické energie, což vede k postupnému vychýlení paprsku<sup>3</sup>.



Obr. 1.1 Řezání abrazivním vodním paprskem<sup>3</sup>.

### 1.1 Součástková základna zařízení pro abrazivní vodní paprsek

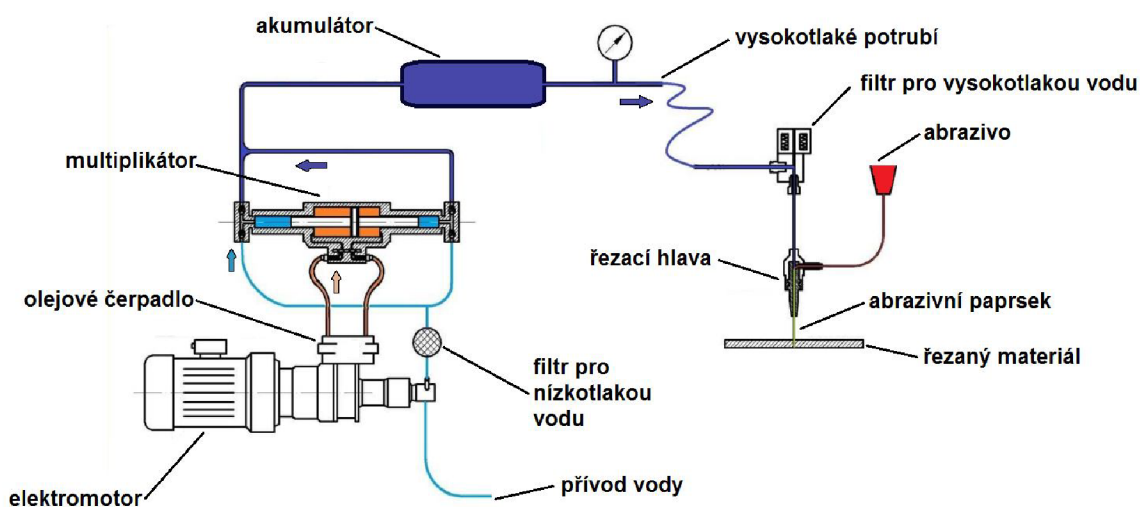
Zařízení pro řezání abrazivním vodním paprskem, které je zobrazeno na obr. 1.2, je složeno z řady komponent, které musí být schopny odolávat vysokému tlaku. Zařízení se skládá ze dvou základních okruhů<sup>1</sup>:

- nízkotlaký okruh,
- vysokotlaký okruh.

Vysokotlaký okruh je řízený nízkotlakým okruhem prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvozeným hydraulickou jednotkou<sup>1</sup>.

Hlavními částmi vysokotlakého okruhu jsou<sup>1</sup>:

- zdroj (generátor) tlakové technologické kapaliny,
- filtrační jednotka – separuje z kapaliny nečistoty již od velikosti 1  $\mu\text{m}$ ,
- akumulátor tlaku – vysokotlaká nádoba tlumící rázy v technologické kapalině,
- uzavírací ventil – reguluje průtok kapaliny,
- rozváděcí elementy – umožňují transport kapaliny prostřednictvím hadic, potrubí, otočných elementů apod.,
- řezací hlava.



Obr. 1.2 Schématické znázornění zařízení pro řezání vodním paprskem<sup>1</sup>.

### 1.1.1 Zdroj tlakové technologické kapaliny

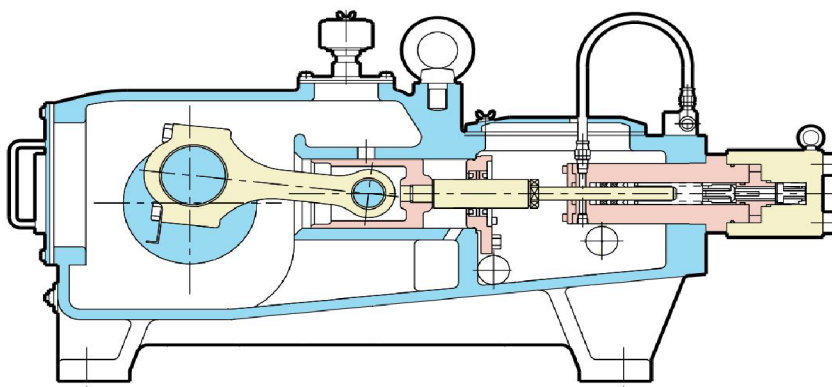
V praxi jsou používány dva druhy zařízení sloužící jako generátory vysokotlakého vodního paprsku<sup>1</sup>:

- zařízení s triplexovým plunžrovým čerpadlem,
- zařízení s multiplikátorem.

#### Triplexové plunžrové čerpadlo

Na obr 1.3 je zobrazen řez plunžrovým čerpadlem firmy SUGINO. Plunžrová čerpadla jsou používána do tlaku 300 MPa a výkonu 750 kW. Jedná se o alternativu pístových čerpadel s tím rozdílem, že plunžr vznikne spojením pístní tyče a pístu v jednu součást.

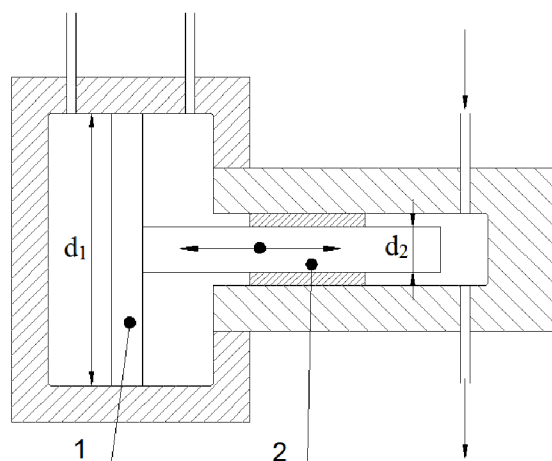
Princip činnosti spočívá v tom, že v momentu, kdy se začne píst pohybovat směrem ke své dolní úvrti, dochází ke vzniku podtlaku a do pracovního prostoru je nasávána kapalina. Při pohybu k horní úvrti v kapalině vzniká tlak. V momentu, kdy tlak v kapalině dosáhne požadované úrovně, je kapalina přes ventil vytačena ven z pracovního prostoru<sup>1,4,5,6</sup>.



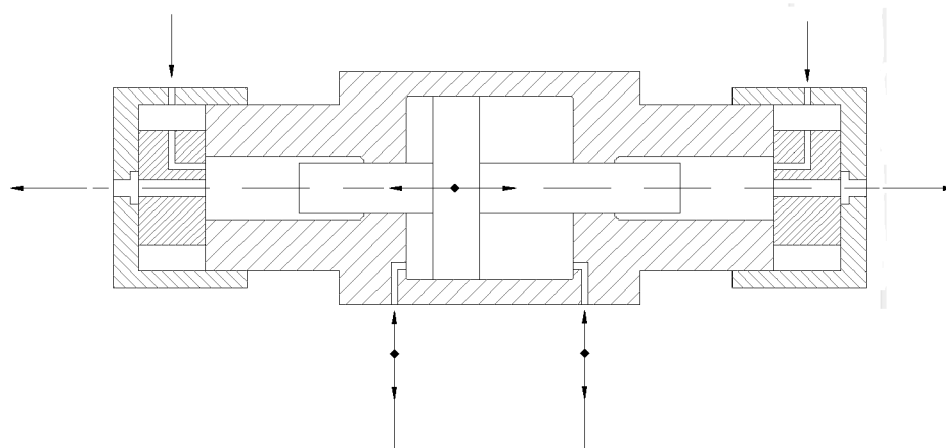
Obr. 1.3 Schéma triplexového plunžrového čerpadla firmy SUGINO<sup>4</sup>.

### Multiplikátor

U většiny zařízení na řezání vodním paprskem je generován tlak v pracovní kapalině za pomoci multiplikátoru. Schéma jednočinného multiplikátoru je zobrazeno na obr. 1.4 a schéma dvojčinného multiplikátoru je zobrazeno na obr. 1.5. Princip generování vysokých tlaků spočívá v rozdílu velikosti ploch dvou vzájemně propojených pístů. V případě, že píst 1 působí tlak  $P_1$ , potom bude podle Pascalova zákona platit, že tlak  $P_2$  bude tolikrát větší, kolikrát menší je plocha  $S_2$  vůči ploše  $S_1$ . Tuto závislost popisuje rovnice 1.1. Vlivem změny pracovní polohy pístu dochází na výstupu k pulzaci tlaku kapaliny, a proto je nutné zařadit do obvodu akumulátor tlakových rázů<sup>1</sup>.



Obr. 1.4 Schéma jednočinného multiplikátoru<sup>1</sup>.



Obr. 1.5 Schéma dvojčinného multiplikátoru<sup>1</sup>.

$$P_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot P_1 \quad [Pa] \quad (1.1)$$

Z důvodu zabezpečení kontinuálního proudu jsou používány dvojčinné multiplikátory, kde pro tlak  $P_2$  platí rovnice 1.2<sup>1</sup>.

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \quad [Pa] \quad (1.2)$$

Z rovnice 1.2 vyplývá pro poměr tlaků  $P_2$  a  $P_1$  rovnice 1.3<sup>1</sup>.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{S_1 - S_2}{S_2} = i \quad [-] \quad (1.3)$$

Písmeno  $i$  je koeficient zesílení tlaku  $P_1$  na tlak  $P_2$ . Jedná se o výchozí parametr při návrhu multiplikátoru.

Činností multiplikátoru dochází ke ztrátám, jako je tření, netěsnosti apod. Tyto ztráty jsou zohledněny v rovnici 1.4 jako hodnota  $\eta_m$ . Hodnota nabývá ve většině případů velikost  $\eta_m = 0,95$ <sup>1</sup>.

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \quad [Pa] \quad (1.4)$$

Využitím Bernouliho rovnice pro výtok z nádoby a rovnice kontinuity pro ústí dýzy je možné vypočítat objem protékající kapaliny v závislosti na tlakovém spádu dle rovnice 1.5<sup>1</sup>.

$$Q = s \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_2}{\rho}} \quad [m^3] \quad (1.5)$$

kde:

- $s$  - plocha průřezu otvoru,
- $\mu$  - 0,7 – 0,95; výtokový součinitel,
- $\rho$  - hustota vody,
- $P_2$  - tlak v otvoru.

Pro rychlost pístu a průtokové množství hydrogenerátoru platí rovnice 1.6 a 1.7<sup>1</sup>.

$$v = \frac{Q_c}{S} \cdot \eta_r \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (1.6)$$

$$Q_c = \frac{P}{P_1} \quad [m^3] \quad (1.7)$$

kde:

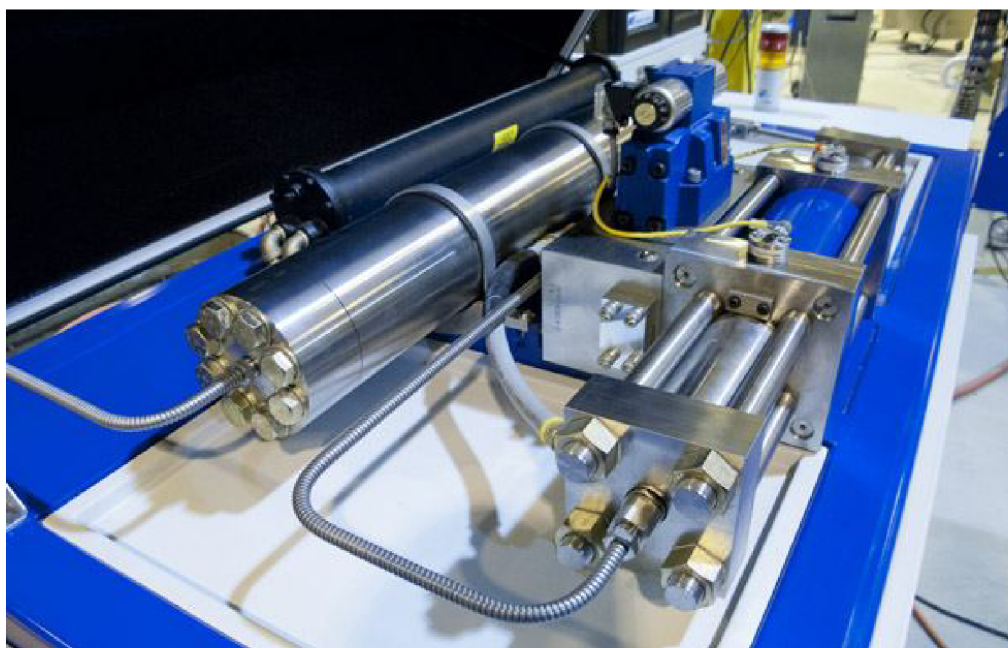
- $Q_c$  - průtokové množství hydrogenerátoru,
- $P$  - výkon hydrogenerátoru,
- $\eta_r$  - objemová účinnost  $\eta_r \approx 0,9$ .

Množství kapaliny dodávané na jeden zdvih se vypočítá ze vztahu 1.8<sup>1</sup>.

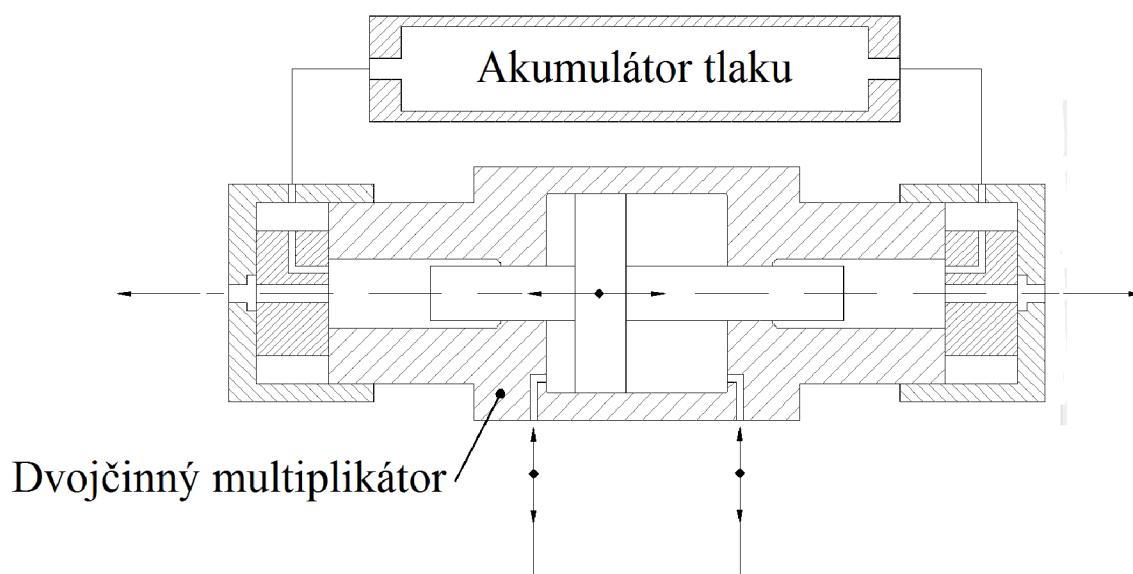
$$Q_m = S_2 \cdot v \quad [m^3] \quad (1.8)$$

### 1.1.2 Akumulátor tlaku

Akumulátor tlaku, zobrazený na obr. 1.6 a obr. 1.7, je vysokotlaká nádoba, která je umístěna v obvodu ihned za multiplikátorem. Slouží k utlumení rázů v kapalině vyvolané pulzací paprsku jako následek stlačení kapaliny. Hlavní funkcí akumulátoru tlaku je udržovat konstantní tlak a rychlost proudění kapaliny. Aby svoji funkci plnil správně, je nutné, aby velikost objemu kapaliny byla v korelaci k multiplikátoru nebo čerpadlu<sup>7,8</sup>.



Obr. 1.6 Multiplikátor s akumulátorem firmy WARDJet<sup>9</sup>.



Obr. 1.7 Schématické znázornění dvojitýho multiplikátor s akumulátorem<sup>8</sup>.

### 1.1.3 Hydraulické rozvody tlakových kapalin

Tlaková kapalina je vedena potrubím, které se skládá z různých druhů armatur a spojovacích ventilů. U všech těchto komponent je požadováno, aby odolávali korozi a vysokému tlaku. Tyto komponenty jsou normalizované zejména z důvodů jejich celosvětové zaměnitelnosti a dostupnosti. Normalizace má však i negativní dopad, protože je nutné provádět do určité míry kompromisy (materiál, tolerance, sortiment), které znemožňují optimální použití pro všechny aplikace. Průměr rozvodů se běžně pohybuje v rozmezí 6 mm - 14 mm<sup>7</sup>. Konkrétní parametry rozvodů závisí na konstrukčních aplikacích, pro které platí následující rozhodovací kritéria<sup>1</sup>:

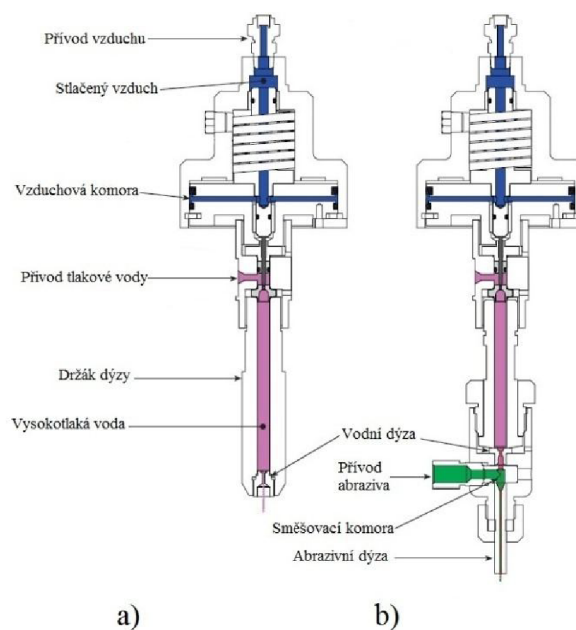
- maximální hydraulický tlak,
- dynamické zatížení systému,
- druh hydraulického média,
- požadavky na montáž, údržbu, spolehlivost.

### 1.1.4 Řezací hlavy

Řezací hlavy jsou prvkem, ve kterém je vodní paprsek tvarován a usměrňován do přesného místa na obráběném povrchu. Nejpoužívanějšími metodami jsou<sup>1</sup>:

- čistý vodní paprsek (WJM),
- abrazivní vodní paprsek (AWJ).

Na obr 1.8 jsou zobrazeny konstrukce řezacích hlav firmy JET EDGE pro metodu WJM a AWJ. Obě metody jsou popsány v kapitole 1.4.1 a 1.4.2.



Obr. 1.8 Schématické znázornění konstrukce řezacích hlav firmy JET EDGE<sup>10</sup>.

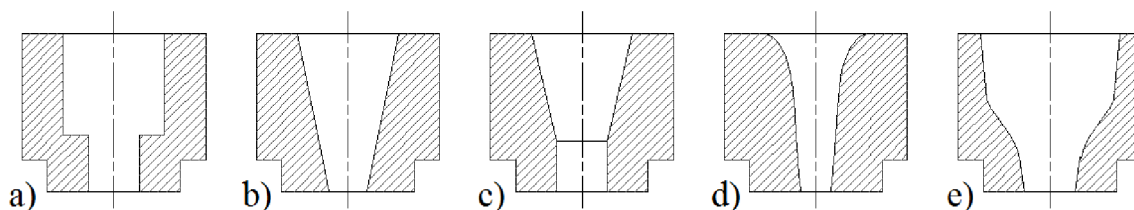
- řezací hlava pro čistý vodní paprsek,
- řezací hlava pro abrazivní vodní paprsek.



Hlavním prvkem každé řezací hlavy je dýza, která má dva základní typy<sup>1</sup>:

- dýza na řezání čistým vodním paprskem,
- dýza na řezání abrazivním vodním paprskem.

Vodní dýzy jsou využívány v obou typech řezacích hlav a příklady jejich konstrukce jsou zobrazeny na obr. 1.9.



Obr. 1.9 Tvary vyráběných a používaných vodních dýz<sup>1</sup>.

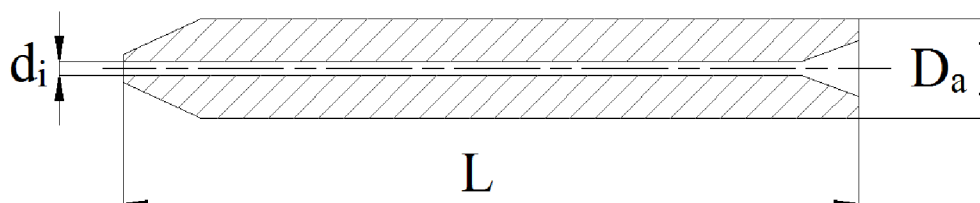
- válcová,
- kuželová,
- kombinovaná (kuželová s přechodem do válcové),
- kónická,
- složená – bikubická.

Vodní dýzy jsou vyráběny z materiálu, který je volen dle pracovního tlaku<sup>1</sup>:

- velmi nízké a nízké tlaky (slnuté karbidy),
- vysoké tlaky (safír, rubín a syntetický diamant).

Diamantové dýzy mohou dosáhnout životnosti pětinasobku až desetinásobku životnosti dýzy vyrobené z rubínu, přičemž je jejich cena až desetinásobně vyšší. Celková životnost však nezávisí pouze na zvoleném materiálu, ale i na technologických parametrech či kvalitě pracovního média.

Abrazivní dýza slouží k vedení a usměrnění vysokorychlostního proudu vody smíchaného s abrazivem. Na obr. 1.10 je zobrazen řez abrazivní dýzou firmy QUICK-OHM. Na internetových stránkách jsou udávány hodnotu průměru  $d_i$  v rozsahu od 0,76 mm do 1,27 mm, Krajný (1998) uvádí rozsah průměru  $d_i$  od 0,8 mm do 2,2 mm<sup>1</sup>, hodnota průměru  $D_a$  je uvedena v rozsahu od 6,35 mm do 9,45 mm a hodnota celkové délky  $L$  je uváděna v rozsahu od 70 mm do 89 mm<sup>11</sup>.



Obr. 1.10 Řez abrazivní dýzou firmy QUICK-OHM<sup>11</sup>.

## 1.2 Pracovní kapalina

Pracovní kapalina využívaná technologií abrazivního vodního paprsku musí disponovat těmito vlastnostmi<sup>1</sup>:

- malá viskozita, umožňující proudění potrubím a následně dýzou s malými ztrátami výkonu,
- zdravotní nezávadnost,
- běžná dostupnost,
- nízká cena,
- minimální vliv na kovové součásti zařízení,
- schopnost zabezpečit maximální produktivitu,
- schopnost zabezpečit vysokou jakost povrchu při nízkých energetických ztrátách,
- minimální ovlivnění obráběných součástí korozí.

Vlastnosti, které by měla splňovat pracovní kapalina, jsou v některých případech protichůdné, a proto bylo nutné zvolit takovou kapalinu, která nejvíce odpovídá těmto parametrům z globálního hlediska. Pro svoji dostupnost, nízkou cenu, zdravotní nezávadnost atd. stala optimální pracovní kapalinou voda.

V potravinářském průmyslu se pro řezání masa, čokolády, zákusků apod. používají mimo vody i jiné pracovní kapaliny<sup>1</sup>:

- kakao,
- mléko,
- máslo,
- glycerin,
- rostlinné oleje.

Dalším typickým případem využití jiných alternativních pracovních kapalin je oblast medicíny, kde se při operacích, řezání léků apod. využívá<sup>1</sup>:

- líh,
- alkoholy.

### 1.2.1 Úprava vody

Při použití vody je nutné vzít v úvahu, že může v sobě obsahovat různé rozpuštěné látky, které mohou mít za následek zanesení důležitých součástí zařízení, nebo jejich úplné zničení. V USA vznikají z důvodů využití vody s neadekvátní kvalitou škody 20000 USD - 30000 USD za jediný den<sup>1</sup>. Součástí, u které hrozí největší riziko zanesení je dýza, jejíž průměr se pohybuje v rozmezí od 0,08 mm ÷ 0,5 mm do 0,18 mm ÷ 3,8 mm. Případný vznik usazenin bude mít negativní vliv na správnou funkci vodního paprsku<sup>7</sup>.

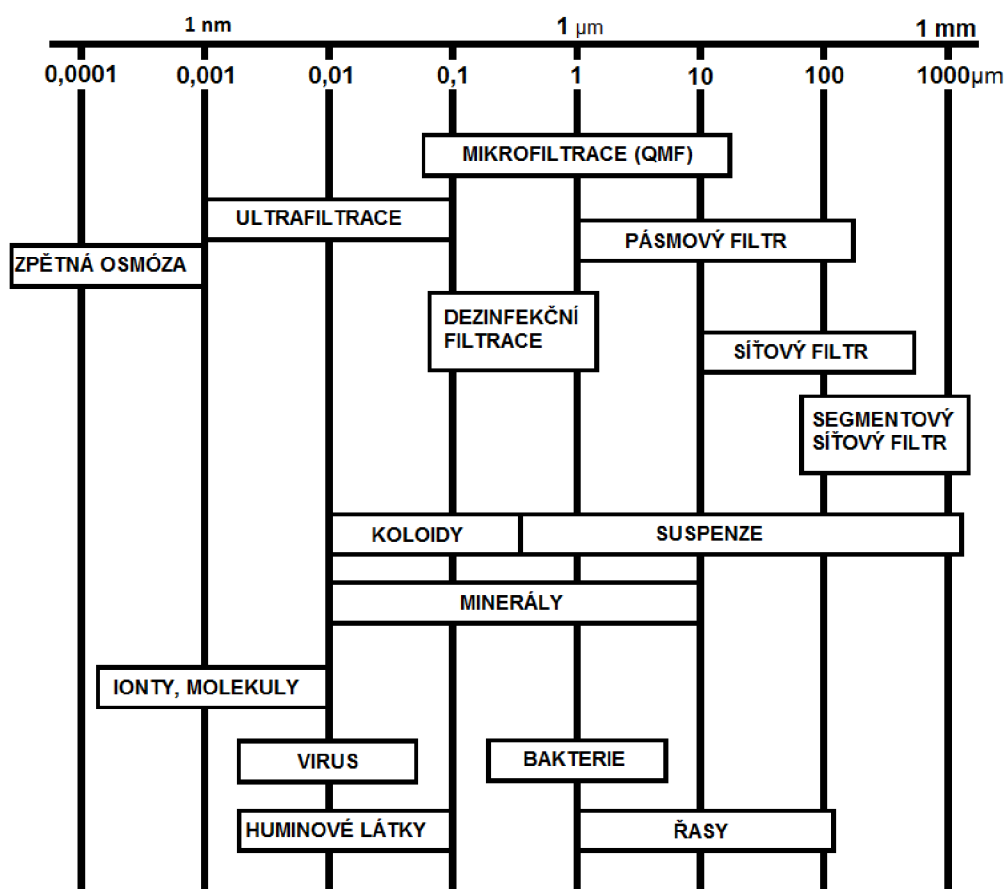


Dle Krajného<sup>1</sup> se způsoby úpravy vody dělí do tří základních skupin:

- mechanická úprava vody (filtrace),
- fyzikálně – chemická úprava vody,
- biologická úprava vody.

U technologie řezání vodním paprskem je doporučeno využívat filtraci, změkčování, deionizaci a zpětnou osmózu<sup>1</sup>.

**Filtrace** je mechanická operace sloužící k separaci pevných látek z kapaliny. Pro filtr jsou typické 4 vrstvy, které jsou uzpůsobeny tak, že vrchní vrstva zachytává větší částice, až poslední vrstva, která má síto nejjemnější a je tak schopna zachytit částice dosahující velikosti 10 mikrometrů. Efektivitu filtru je možné zvýšit například přidáním srážedel. Poté je možné zachytit i částice o velikosti 1 mikrometr. Při zanesení filtru stačí pouze odpojit filtr od zařízení a zpětně propláchnout. Vyplaví se všechny částice z nádrže a filtr je připraven k dalšímu použití<sup>1</sup>.



Obr. 1.11 Oblast velikostí filtračních postupů<sup>1</sup>.

**Změkčování** je pouze jednou z doporučených úprav vody pro vodní paprsek. Je tak s výhodou využíváno před deionizací nebo zpětnou osmózou. Přítomnost většího množství vápníku, hořčíku a jejich sloučenin způsobuje tzv. tvrdost vody, která je dle velikosti podílu nečistot specifikovaná v tab. 1.1. Změkčovače nebo také změkčovací filtry pracují na principu chemické reakce. Při této chemické reakci je zachytáván v tlakové nádrži vápník a hořčík. Principem metody je aktivita prvků a výměna iontů. Jsou zde využívány speciální pryskyřice obsahující skupiny iontů, které jsou schopny absorbovat vápníkové a hořčíkové ionty a nahrazovat je ionty sodíku. Ionty sodíku jsou do reakce doplňovány z chloridu sodného<sup>1,12</sup>.

Tab. 1.1 Klasifikace tvrdosti vody<sup>1</sup>.

Podíl nečistot ve vodě [mg/l]	Klasifikace vody
< 17,1	Měkká
17,1 ÷ 59,85	Mírně tvrdá
59,85 ÷ 119,7	Tvrdá
119,7 ÷ 179,55	Velmi tvrdá
> 179,55	Extrémně tvrdá

**Deionizace** je proces odstraňování solí rozpuštěných ve vodě iontovou výměnou uskutečňovanou pomocí iontoměničů. Ionтомěniče (katexy a anexy) zachycují ionty solí a vyměňují je za vodíkové a hydroxilové ionty. Katexy odstraňují kationty solí a anexy anionty solí. Existují dva typy možných typů zařízení. První typ je tvořen dvěma vzájemně oddělenými náplněmi zapojenými do série, z nichž jedna je katexová a druhá anexová. Druhý typ je tvořen jednou katexo-anexovou náplní. Po vyčerpání výměnné kapacity iontoměničů je katex regenerován kyselinou chlorovodíkovou HCl a anex hydroxidem sodným NaOH. Voda vystupující z deionizátoru má vlastnosti určené dle síly náplně. V případě slabé báze náplně má voda specifický odpor 50 000 W a pH faktor pod 7. U silné báze je specifický odpor 200 000 W a hodnota pH 7,5 ÷ 9,5<sup>1,13</sup>.

**Zpětná osmóza** je tlakový membránový proces využívaný k oddělování částic. Molekulární hmotnost separovaných částic je menší než 200 g.mol<sup>-1</sup>. Separací mechanismus a jeho kvalita je založena na rozdílech v rozpustnosti a difuzi rozpouštědla a rozpouštěných látek v membráně. Ideální případ nastává tehdy, jestliže membrána rozpouští pouze rozpouštědlo. Zpětná osmóza odstraňuje veškeré částice, mikrobiální život a organické látky. Výsledkem je ultračistá voda, ze které bylo odstraněno 96% – 99% rozpouštěných látek. Její nevýhodou je, že není schopna odstraňovat plyny. Její praktické využití je zejména při odsolování mořské vody při výrobě vody pitné, čištění odpadních vod apod.<sup>14,15,16</sup>

V tab. 1.2 jsou zobrazeny doporučené hodnoty úrovně obsahu nečistot obsažených ve vodě společností Flow International Corporation.

Tab. 1.2 Doporučené hodnoty úrovně obsahu nečistot obsažených ve vodě<sup>13,17</sup>.

Parametr	Minimální požadovaná úroveň	Dobrá úroveň	Nejlepší úroveň
Zásaditost	0,5 mmol/l	0,25 mmol/l	0,1 mmol/l
Bakterie	-	-	-
Chlór	0,05 mg/l	0,05 mg/l	0,05 mg/l
Tvrlost (ve formě CaCO <sub>3</sub> )	0,95 °dH	0,84 °dH	0,056 °dH
Železo (Fe)	0,2 mg/l	0,1 mg/l	0,01 mg/l
Mangan (Mn)	0,1 mg/l	0,05 mg/l	0,025 mg/l
Hořčík (Mg)	0,5 mg/l	0,1 mg/l	0,1 mg/l
Křemík (SiO <sub>2</sub> )	15 mg/l	10 mg/l	1 mg/l
pH	6,5 – 9,5	6,5 – 9,5	6,5 – 9,5
Celkový objem rozpuštěných pevných látek (TDS)	200 mg/l	100 mg/l	5 mg/l

### 1.3 Abrazivo

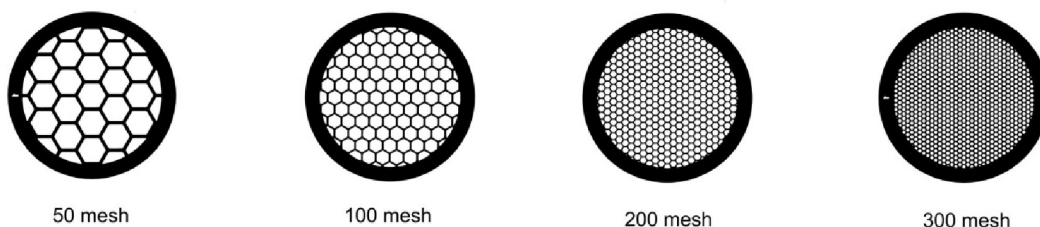
Vodní paprsek bez příměsí abraziva je efektivní pouze pro velmi měkké materiály, jako jsou např. pryže nebo potravinářské výrobky. Přidáním abraziva se výrazně zvyšuje řezací schopnost paprsku a umožňuje proniknout i velmi tvrdými materiály, mezi které patří např. keramika<sup>18</sup>.

Jako velmi často využívané abrazivo je používán granát. Jedná se o drahokam, který je znám a lidmi používán po mnoho tisíc let. Typ používaný při obrábění abrazivním vodním paprskem je granát červený. Má relativně velkou hustotu a při lámání tvoří ostré hrany. Obě tyto vlastnosti mají vliv na zvýšení efektivity řezu. Je chemicky inertní čímž nebude docházet k chemické reakci s obráběným materiálem<sup>18</sup>.

Faktory zohledňované při výběru abraziva<sup>19</sup>:

- **tvrdost abraziva** - vysoká tvrdost napomáhá efektivitě řezu, ale dochází k rychlému opotřebení trysky,

- **velikost abrazivních zrn** - čím je zrno menší, tím je dosaženo kvalitnějších povrchů, ale i delšího času potřebného pro řezání materiálu. Velikost zrna se udává v jednotkách MESH, což označuje počet ok síta na délce jednoho palce. Na obr. 1.12 je zobrazen příklad vyhodnocení jednotky MESH,
- **tvar abrazivních zrn** - vyznačuje se kruhovostí a kulatostí. Kulatější zrna mají vliv na vyšší jakost povrchu na úkor hloubky řezu,
- **hmotnostní tok abraziva** - se zvyšujícím se tokem dochází ke zvýšení dosahované hloubky řezu. Při překročení kritického hmotnostního toku abraziva hloubka řezu klesá,
- **ekologičnost abraziva** - splnění bezpečnostních požadavků a požadavků na zdravotní nezávadnost,
- **cena abraziva.**

Obr. 1.12 Příklad vyhodnocení jednotky MESH<sup>20</sup>.

Jako příklad typu abraziva slouží tab. 1.3, ve které jsou informace o produktu od firmy PTV, spol, s.r.o.<sup>21</sup>

Tab. 1.3 Příklad složení abraziva firmy PTV, spol, s.r.o.<sup>21</sup>

Chemické složení								
Prvek	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO
Obsah [%]	36	20	30	2	1	1	2	6
Minerální složení								
Minerál	Granát	Ilmenit	Zirkon	Křemen	Ostatní			
Obsah [%]	97-98	1-2	< 0,5	< 0,5	< 0,25			

Dle dodavatele je granát GMA vhodný pro všechny aplikace řezání včetně<sup>21</sup>:

- uhlíkové oceli,
- mědi,

- žuly,
- hliníku,
- gumy,
- skla,
- korozivzdorné oceli,
- mramoru,
- dřeva a dalších materiálů.

Tab. 1.4 Fyzikální charakteristika granátu GMA<sup>21</sup>:

<b>Sypká hmotnost</b>	2,38 t/m <sup>3</sup>
<b>Měrná hmotnost</b>	4,10 t/m <sup>3</sup>
<b>Tvrдость (dle Mohra)</b>	7,5 - 8
<b>Bod tavení</b>	1250 °C
<b>Tvar přírodních zrn</b>	kubický

Abrazivo je dodáváno buď v tzv. big bagu, jehož kapacita je 1 t, nebo v baleních po 25 kg.

### 1.3.1 Recyklace abraziva

Použité abrazivo je možné recyklovat a použít jej znovu. Před samotnou recyklací je nutné vzít v úvahu cenu abraziva a rentabilitu jeho recyklace. V případě, že je recyklace ekonomicky výhodná, je na trhu několik výrobců poskytujících zařízení pro recyklaci abraziva.

Jedním z těchto výrobců je firma PTV, spol. s r.o. nabízející recyklační a odkalovací jednotku WARD zobrazenou obr. 1.13.

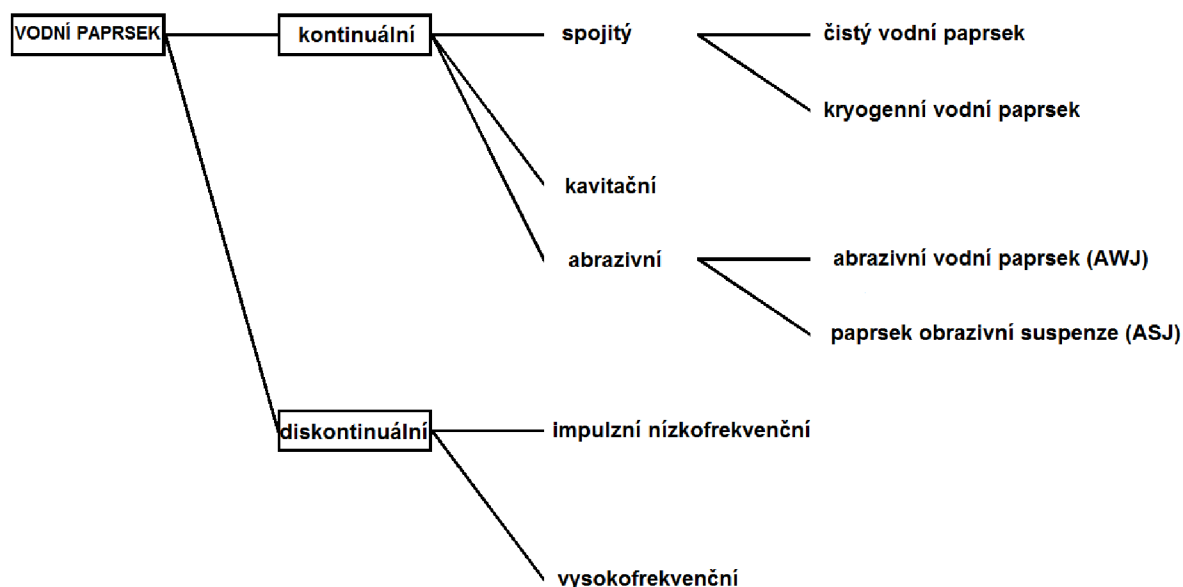
Obr. 1.13 Recyklační a odkalovací jednotka WARD<sup>21</sup>.

Tab. 1.5 Technické parametry recyklační a odkalovací jednotky WARD<sup>21</sup>:

<b>Recyklační výkon</b>	60 – 90 kg recyklovaného granátu za hodinu
<b>Výtěžnost</b>	50 – 70 %
<b>El. energie</b>	3x400V, 50Hz, 63A
<b>El. příkon</b>	25 kW/h
<b>Spotřeba vody</b>	3,5 l/min čisté vody
<b>Spotřeba vzduchu</b>	27 l/min při 1,5-2 bar
<b>Hmotnost</b>	cca 850 kg

#### 1.4 Druhy kapalinových paprsků

V praxi jsou předně využívány dva základní způsoby řezání za pomoci vodního paprsku. Prvním je spojitě řezání čistým vodním paprskem a spojitě řezání abrazivním vodním paprskem. Jejich použití závisí na typu operace a vlastnostem materiálu. Ostatní způsoby, které Krajný uvádí na obr. 1.14, jako je diskontinuální vodní paprsek, kavitační a kryogenní vodní paprsek, nebo paprsek abrazivní suspenze jsou zpracované teoreticky, nebo zkoušené laboratorně<sup>1</sup>.

Obr. 1.14 Rozdělení vodních paprsků<sup>1</sup>.

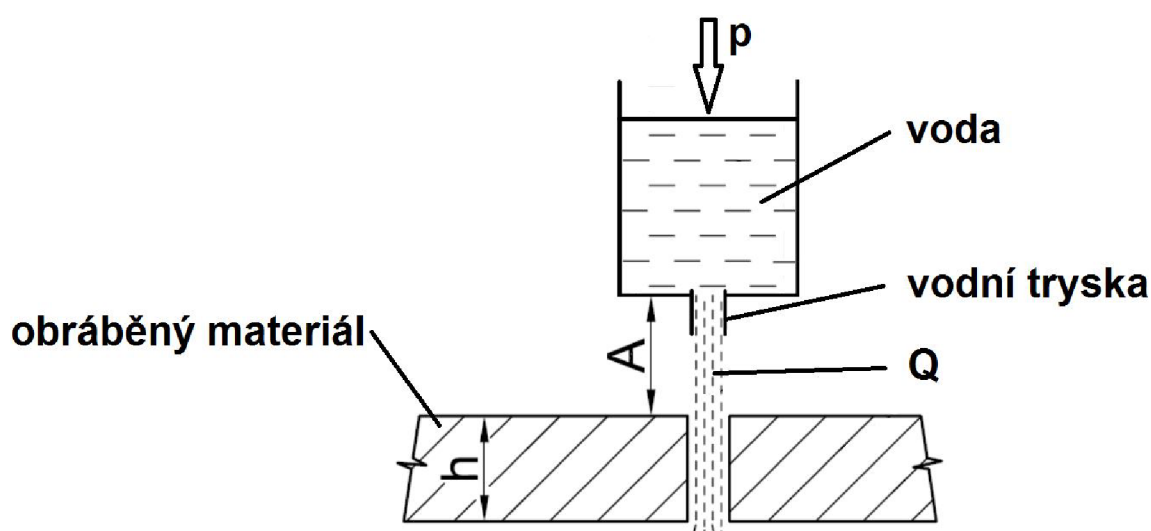
### 1.4.1 Čistý vodní paprsek – WJM

Čistý vodní paprsek, jehož schéma je zobrazeno na obr. 1.15, stál na začátku všech alternativ této technologie. Dnes je využíván zejména pro dělení materiálů, jako jsou plasty, papír, guma, textil, dřevo, mražené výrobky, čokoláda, léky apod.<sup>1</sup>

Paprsek vody vycházející z trysky dosahuje až trojnásobku rychlosti zvuku a tak při dopadu na povrch mechanicky rozrušuje materiál. Velmi zajímavý je také fakt, že při řezání hedvábného papíru, nebo jednorázových plen se na materiálu uchytí méně vlhkosti, než v případě, že by se jej dotkla lidská ruka<sup>22</sup>.

Charakteristické znaky řezání čistým vodním paprskem<sup>22</sup>:

- velmi tenký paprsek – průměr je běžně v rozmezí 0,1016 mm - 0,254 mm,
- velmi detailní geometrie,
- velmi malý odpad materiálu,
- řezání bez vývinu tepla,
- nízké řezné síly,
- jednoduché upnutí,
- nepřetržitý provoz,
- řezání velmi silných materiálů,
- řezání velmi tenkých materiálů,
- možno řezat měkké a lehké materiály.



Obr. 1.15 Schéma řezání čistým vodním paprskem<sup>23</sup>.

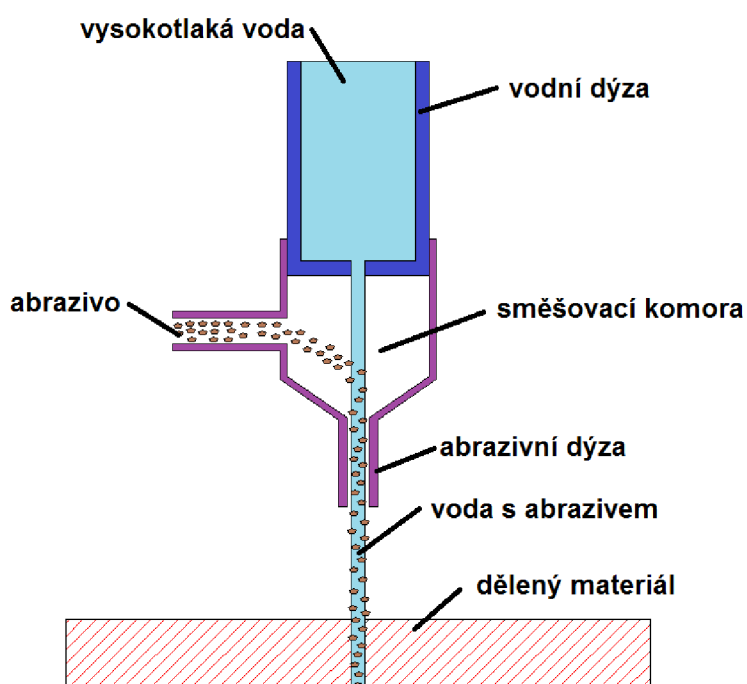
Vzdálenost trysky od materiálu (A) se může pohybovat v rozmezí od 2 do 70 mm<sup>23</sup>. Další technické parametry jsou pro jednotlivé materiály vypsány v tab. 1.6.

Tab. 1.6 Technické parametry vodního paprsku pro vybrané materiály<sup>24</sup>:

Materiál	Hloubka materiálu h [mm]	Průměr trysky [mm]	Pracovní tlak p [Mpa]	Průtokové množství Q [l.min <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost [m.min <sup>-1</sup> ]
Vlnitá lepenka	7	0,2	260	1,1	200
Lisovaná lepenka	3	0,2	300	1,2	5
Koberec	4	0,2	300	1,2	3
Sklovitá vlnitá látka	1,4	0,2	400	1,4	2
Kůže	7	0,2	400	1,4	15
Guma	50	0,2	400	1,4	0,5
Dřevo	12	0,2	400	1,4	0,5
Plst'	22	0,2	100	0,7	200

#### 1.4.2 Abrazivní vodní paprsek – AWJ

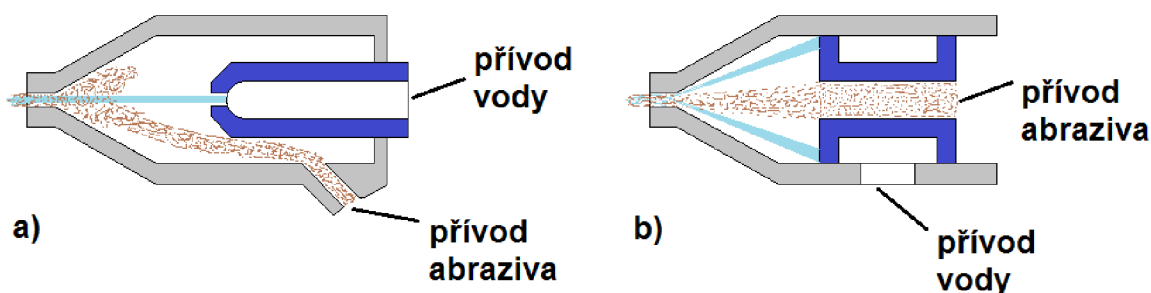
Abrazivní vodní paprsek, jehož schéma je zobrazeno na obr. 1.16, pracuje na takovém principu, že proud vody urychluje pohyb abrazivních částic a na rozdíl od čistého vodního paprsku zde rozrušují materiál abrazivní částice a nikoli voda<sup>1,22</sup>.

Obr. 1.16 Schéma řezání abrazivním vodním paprskem<sup>1,25</sup>.



Abrazivní vodní paprsek je vytvářen následujícími způsoby<sup>1</sup>:

- abrazivo je vedeno do směšovací komory, odkud je strháváno vysokou rychlostí vody a vzniklá směs je urychlována přes abrazivní dýzu,
- abrazivo je smíchané s vysokotlakou vodou v tlakové nádobě a výsledná směs je přiváděna do speciální dýzy. Tento způsob je označován jako systém s přímým vstřikováním.



Obr. 1.17. Způsoby vytváření abrazivního vodního paprsku<sup>7</sup>.

- a) dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem abraziva,  
 b) dýza se smíšeným paprskem a axiálním přívodem abraziva.

Případ, kdy je abrazivo strháváno, je využíván při tlacích 7 MPa – 400 MPa, množství abraziva se pohybuje v rozmezí 0,5 kg/min – 20 kg/min<sup>1</sup>.

System přímého vstřikování pracuje s tlaky pod 100 MPa a množství využitého abraziva může přesáhnout 20 kg/min. Při přesném řezání se množství abraziva pohybuje přibližně mezi 1 kg/min – 3 kg/min<sup>1</sup>.

K přimíchávání abraziva se využívá podtlaku, který vzniká tím, že se vodní paprsek, poté co opustí vodní dýzu, rozšiřuje a dochází ke změně laminárního proudění na turbulentní. Zásadní vliv na promíchání a výslednou efektivitu obrábění má tvar abrazivní dýzy<sup>1</sup>.

Výkon abrazivního vodního paprsku je mnohonásobně vyšší, než v případě čistého vodního paprsku a je proto využíván k dělení tvrdých materiálů, jako jsou<sup>22</sup>:

- kovy,
- kámen,
- kompozity,
- keramika.

Je nezbytné, aby abrazivní dýza byla otěruvzdorná. Je proto vyráběna z materiálů, jako je<sup>1</sup>:

- karbid wolframu,
- karbid boru,
- nitrid boru.



Obr. 1.18 Příklad výrobku vytvořeného pomocí abrazivního vodního paprsku.

Abrazivní vodní paprsek využívá k postupnému odebrání materiálu abrazivum. Popis tohoto mechanismu úběru materiálu popisuje Finnieho model. Je dán vztahem (1.1) a je založený na odstranění určitého množství materiálu pomocí jedné abrazivní částice pohybující se po určité trajektorii<sup>3</sup>:

$$V_M = \frac{m_p \cdot v_p^2}{\sigma_f \cdot K \cdot \psi} \cdot f(\varphi) \quad [m^3] \quad (1.1)$$

kde:

- $K$  - poměr vertikální a horizontální síly,
- $\psi$  - funkce úhlu, pod kterým se abrazivní částice zaryje do cílového materiálu,
- $f(\varphi)$  - funkce úhlu, pod kterým abrazivní částice zasáhne cílový materiál,
- $\sigma_f$  - napětí cílového materiálu [Pa],
- $m_p$  - hmotnost částice [kg],
- $v_p$  - rychlost částice [ $m \cdot s^{-1}$ ].

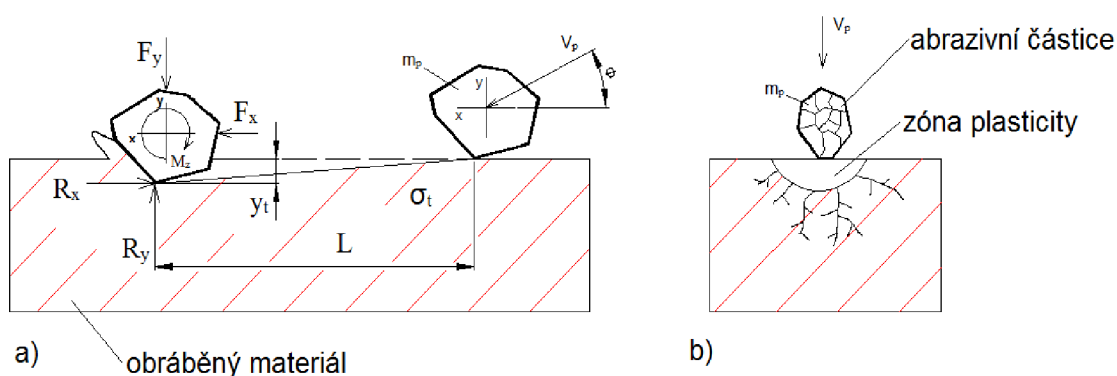
$$f(\varphi) = \sin(2 \cdot \varphi) - \frac{6}{K} \sin^2 \varphi \quad \text{pro } \tan \varphi < K/6 \quad (1.2)$$

$$f(\varphi) = \frac{K \cdot \cos^2 \varphi}{6} \quad \text{pro } \tan \varphi > K/6 \quad (1.3)$$

$$K = \frac{F_Y}{F_X} \cong 2 \quad (1.4)$$

Rovnice vyjadřuje práci vykonanou při odstranění určitého objemu materiálu erozí a je zlomkem kinetické energie abrazivní částice. Rovnice (1.2) se liší od rovnice (1.1) tím, že práce při obrábění je vypočtena jako výsledek množství odstraněného materiálu a napětím materiálu. Proto v rovnici (1.1) kinetická energie částice je dělena napětím materiálu  $\sigma_f$ <sup>3</sup>.

V rovnici (1.1) je  $K$  poměrem vertikální a horizontální síly,  $\psi=L/y_t$  je funkce úhlu, pod kterým se abrazivní částice zaryje do materiálu a  $f(\varphi)$  je funkce úhlu, pod kterým abrazivní částice zasáhne cílový materiál. Výzkum prokázal, že poměr  $L$  ku  $y_t$  se nemění a obvykle je roven 2<sup>3</sup>.



Obr. 1.19 Charakteristika odstraňování materiálu abrazivní částicí<sup>3</sup>.

- a) mikrodělení,  
b) laterální šíření trhlin.

Druhý tzv. zářezový deformační model vyvinul Hutchings pro množství odstraněného materiálu působením hydroabrazivního proudu. Zářezový způsob deformace je vytvořen abrazivními částicemi s ostrými hranami, které působí na materiál a vytváří žlábk. Všechny částice do materiálu však nevniknou. Některé mohou rotovat v opačném směru. Při pozorování povrchu obrobeného abrazivním vodním paprskem byly nalezeny stopy opotřebení typické pro abrazivní částice vytvářející povrch rýhováním, vrypy a prohlubněmi<sup>3</sup>.

### 1.4.3 Méně využívané typy vodního paprsku

V technické praxi jsou v drtivé většině využívány již zmíněné metody WJM a AWJ. Existují i další typy vodního paprsku, které jsou svými specifiky využívány v případech, kdy by použití metod WJM a AWJ bylo nevýhodné či nemožné. Mezi další typy vodního paprsku patří<sup>1</sup>:

- Kryogenní vodní paprsek,
- Kavitační vodní paprsek,
- Pulzní vodní paprsek,
- Modulovaný vodní paprsek.

**Kryogenní vodní paprsek** je využíván v případech, kdy není možné použít klasická abrasiva. Jsou to zejména aplikace zpracování hygroskopických a chemických reaktivních materiálů, práce v blízkosti vysokého napětí, toxických a radioaktivních zdrojů. Svým principem odpovídá metodě WJM s tím rozdílem, že jako pracovní médium je použit tekutý dusík, jehož teplota klesá pod  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato metoda má však svá omezení. Nákladné zařízení kapalného dusíku a nízké pracovní tlaky jsou hlavním důvodem použití pouze v ojedinělých případech<sup>26,27</sup>.

**Kavitační vodní paprsek** využívá jevu, kdy kavitační bubliny mohou způsobit porušení materiálu. Zvýšení rychlosti eroze způsobují lokální vysoké rázy tlak, což vede ke vzniku kavitačních bublin, které následně implodují. Bubliny jsou nejprve vyplněny vakuem, ale později do nich mohou difundovat plyny okolní kapaliny. Lokální pokles tlaku není stálý

a při jeho vymizení dochází ke kolapsu bublin. Dojde tak ke vzniku rázové vlny, která má destruktivní účinek na materiál. Rázový tlak se může zvýšit osmi až deseti násobně. Kavitační paprsky jsou používány při nízkých tlacích (pod 100 MPa) tam, kde není požadována přesnost řezu<sup>1</sup>.

Intenzitu kavitace charakterizuje kavitační číslo  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot (P_a - P_v)}{v^2} \quad [Pa \cdot m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1.5)$$

kde:

- $v$  - rychlost paprsku,
- $P_a$  - okolní tlak,
- $P_v$  - tlak par.

$\sigma_0 > \sigma_1$  kavitace se nevyskytuje,

$\sigma_0 = \sigma_1$  počátek kavitace,

$\sigma_0 < \sigma_1$  síla kavitace roste.

Využití kavitačních vodních paprsků v praxi je pouze omezené a to zejména vzhledem ke složitosti dýzy nutné k vytvoření správného paprsku a omezené pracovní vzdálenosti.

**Pulzní a modulovaný vodní paprsek** patří do skupiny diskontinuálních paprsků. Jejich základním principem je rozdělení kontinuálního paprsku na krátkodobé pulzy jdoucí za sebou. Je snahou, aby čelní plocha paprsku měla sférický tvar. Takový paprsek by měl mít díky opakovanému generování nárazového tlaku vyšší potenciál na rozrušování materiálů v porovnání s kontinuálními paprsky. Jednotlivé pulzy vyvolávají při dopadu na povrch rozrušovaného materiálu impaktní tlak, který klesne na tlak stagnační. Po dokončení dopadu pulzu klesne tlak v místě dopadu paprsku na nulu. Tento cyklus zatěžování se poté opakuje s frekvencí generování pulzů<sup>1</sup>.

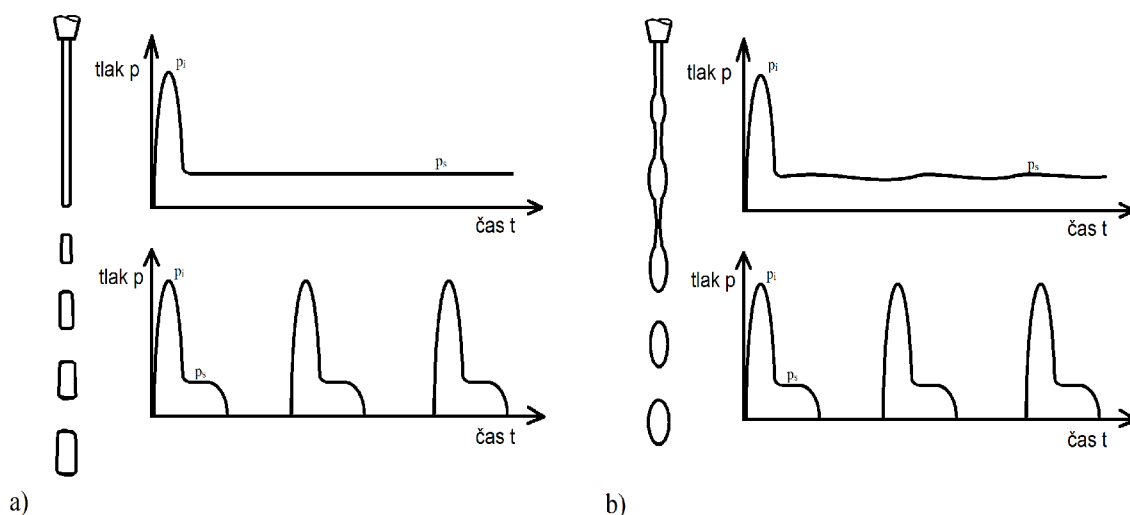
$$\frac{p_i}{p_s} = \frac{2 \cdot C_0}{V_0} \quad (1.6)$$

kde:

- $p_i$  - impaktní tlak,
- $p_s$  - stagnační tlak,
- $C_0$  - rychlost zvuku v příslušné kapalině,
- $V_0$  - rychlost nárazu paprsku.

Modulovaný vodní paprsek vychází z dýzy jako kontinuální proud vody s proměnnou axiální rychlostí, což má za následek, že rychlejší a pomalejší části každého cyklu mají tendenci se spojovat. Je tak vytvořen paprsek obsahující shluky kapaliny. Paprsek se stává řadou za sebou jdoucích shluků, které se v určité vzdálenosti od dýzy vzájemně oddělují a s rostoucí vzdáleností od dýzy zvětšují svůj průměr. Je důležité, aby paprsek dopadl

na materiál až v okamžiku, kdy je rozdělen na jednotlivé shluky. V případě, že by byla vzdálenost menší, tak by po odeznění impaktního tlaku poklesl tlak na hodnotu tlaku stagnačního. Pokud dopadá modulovaný paprsek na materiál ve vzdálenosti větší, než je rozpadová vzdálenost, tak se cyklus chová stejně, jako je tomu u pulzního paprsku<sup>1</sup>.



Obr. 1.20 Znáornění průběhů tlaku pulzních paprsků<sup>1</sup>.

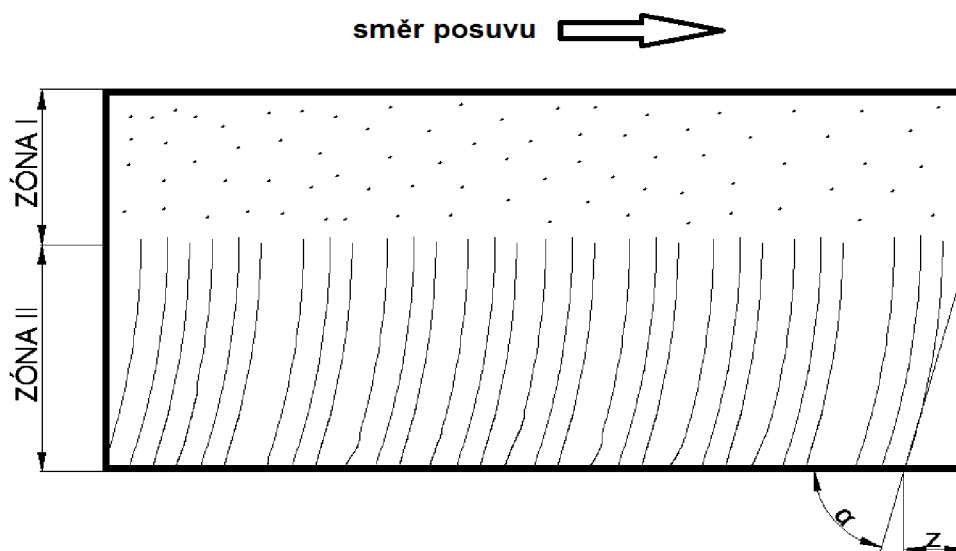
a) pulzní – přerušovaný,

b) pulzní – modulovaný.

### 1.5 Fenomén rýh

Když vodní paprsek proniká materiálem, postupně ztrácí svoji kinetickou energii, což má za následek vznik dvou typických zón. Horní hladké s nízkou drsností povrchu a spodní zvrásněné zóny s délkou vlny 1 mm - 2 mm, zpravidla vykazuje vyšší drsnost. Experimenty prokázaly, že tvorba rýh je způsobena vlnitým rozdělením kinetické energie abrazivní částice vztáhnuté k obráběnému materiálu. Pokud je požadována u výrobku vysoká jakost povrchu, musí být splněna podmínka, aby tloušťka obráběného materiálu byla menší než výška zóny I. Jednotlivé stupně kvality povrchu jsou označovány Q5 jako nejlepší řez až po Q1 který vykazují povrchy dosažené prostým dělením. Kvalita povrchu je ovlivněna optimální velikostí následujících parametrů<sup>5,7,28</sup>:

- průměr dýzy,
- tlak vody,
- rychlost proudění,
- vzdálenost dýzy od obrobku,
- úhel sklonu paprsku,
- aditiva ve vodě,
- druh abraziva.

Obr. 1.21 Zóny vzniklé při řezu vodním paprskem<sup>28</sup>.

V tab. 1.7 jsou shrnuty jednotlivé kvalitativní stupně povrchů při řezání vodním paprskem a jejich charakteristické vlastnosti. Některé hodnoty nejsou přesně určeny, protože závisí na typu obráběného materiálu.

Tab. 1.7 Kvalitativní stupně povrchu po vodním paprsku<sup>29</sup>.

Kvalitativní stupeň	Charakteristika	Ra v horní kontuře [mm]	Ra v dolní kontuře [mm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost v dolní kontuře [mm]	Úkos
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	± 0,1	± 0,1	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,2	± 0,1	± 0,1	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	cca 12,5	± 0,15	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	± 0,2	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0 – 6,3	do 40	± 0,2	dle typu a síly materiálu	výrazný úkos do +



Na obr. 1.22. jsou pro názornost zobrazeny jednotlivé kvalitativní stupně povrchu. Z obrázku je patrné, že v řezu Q5 nedochází ke vzniku rýh a na druhou stranu v řezu Q1 rýhy celé ploše řezu naprosto dominují. Pro úplnost této charakteristiky jakosti povrchu je nutné doplnit, že v programu FlowCUT, jehož účel a charakteristika je popsána v kap. 3.2.1, je zadávána jakost povrchu v hodnotách Q20, Q40, Q60, Q80 a Q100 z nichž hodnota Q20 je řez nejvyšší jakosti a hodnota Q100 je hraniční hodnotou, kdy paprsek projde celou tloušťkou polotovaru.

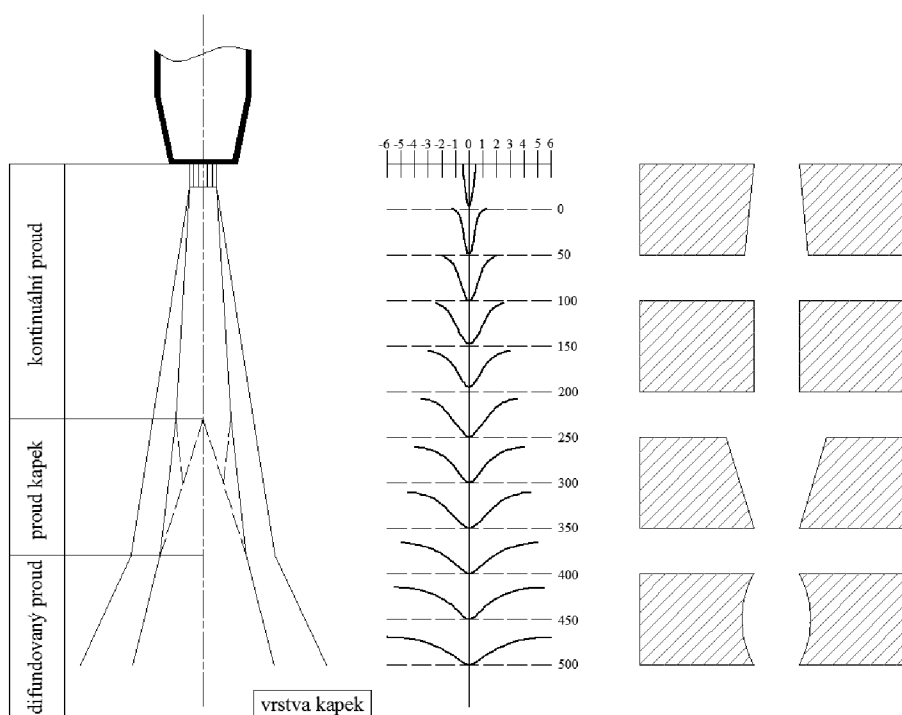


Obr. 1.22 Vizualní zobrazení stupňů kvality řezu<sup>9</sup>.

### 1.6 Rozšíření řezné mezery

Po výstupu z dýzy dojde k prudkému uvolnění energie do okolního prostředí. Původně koherentní proud se s narůstající vzdáleností od ústí dýzy rozpadává. Výsledkem je narůstající šířka proudu a pokles erozního výkonu spodní části proudu v důsledku postupné ztráty kinetické energie a odporu jako důsledek reakce proudu s řezaným materiálem<sup>3</sup>.

Obrysový tvar je výsledek práce proudu, jehož charakteristika je zobrazena na obr. 1.23. Konečný tvar řezaných dílů vzniká působením koherentního proudu na jedné straně a částečně rozptýleného proudu na straně druhé<sup>3</sup>.

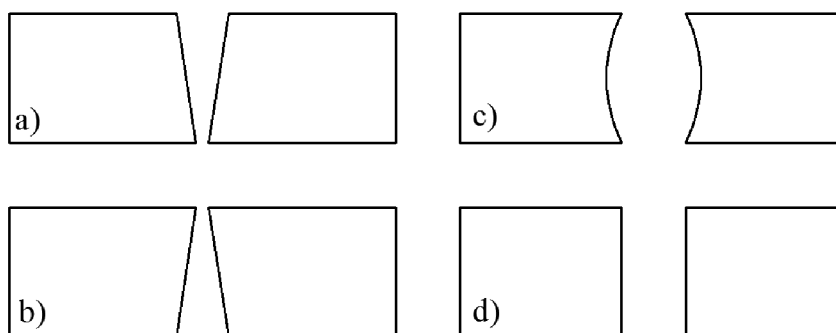


Obr. 1.23 Struktura kapalinového proudu a geometrie řezné mezery<sup>3</sup>.

### 1.7 Odchylka kolmosti

Odchylka kolmosti je zúžení stěn řezné plochy. Základní odchylky kolmosti jsou<sup>3</sup>:

- odchylka tvaru V – je zobrazena na obr. 1.24. Vzniká v důsledku působení proudu po delší dobu, čímž dochází k erozi zejména v horní části. Jedná se o nejčastější typ odchylky kolmosti,
- reverzní odchylka kolmosti - je zobrazena na obr. 1.24. Vzniká u měkkých materiálů nebo když je dělení velmi pomalé. Protože dochází se zvětšující vzdáleností proudu od dýzy k rozšiřování proudu, je obráběn více materiál ve spodní části,
- soudečková odchylka kolmosti - je zobrazena na obr. 1.24. Vzniká při obrábění velmi tlustých obrobků,
- kosodelníková, nebo lichoběžníková odchylka kolmosti – jedná se v podstatě o klasickou odchylku tvaru V, která je nakloněna v důsledku špatného úhlu řezné hlavice.



Obr. 1.24 Druhy odchylek kolmosti<sup>3</sup>.

- odchylka kolmosti typu V,
- reverzní odchylka,
- soudečková odchylka kolmosti,
- ideální řez.

Druh a velikost odchylky kolmosti je ovlivněn tloušťkou materiálu, tvrdostí nebo obrobitelností. Odchylku kolmosti je možné minimalizovat následující způsoby<sup>3</sup>:

- použitím kvalitnějšího abraziva,
- menším průměrem dýzy,
- nakloněním řezné hlavy,
- menším zdvihem,
- snížením rychlosti posuvu.

Jedná se o základní makrogeometrický znak obrobeneho povrchu. Velikost odchylky předurčuje nutnost dalšího opracování obrobeneho povrchu a tím i celkové využití materiálu<sup>3</sup>.



### 1.8 Porovnání vlastností abrazivního vodního paprsku s dalšími typy nekonvenčních technologií

V tab. 1.8 je srovnána technologie vodního paprsku s plasmou, laserem a elektrojiskrovým obráběním. Jednotlivé metody jsou zde porovnány v některých základních vlastnostech a možnostech využití.

Tab. 1.8 Srovnání jednotlivých nekonvenčních technologií <sup>7,22</sup>.

	Vodní paprsek	Plasma	Laser	Elektrojiskrové obrábění
Proces / Postup	<b>Eroze</b> za použití tekutého vysokorychlostního papíru	<b>Hoření/Tavení</b> za použití vysoké teploty ionizovaného obloukového plynu	<b>Tavení</b> za použití koncentrovaného laserového paprsku	<b>Eroze</b> za použití elektrického výboje
Materiál	jakýkoliv materiál	ocel, nerezová ocel a hliník	různé materiály, primárně ale ocel, nerezová ocel a hliník	pouze vodivé materiály
Tloušťka	až 600 mm (omezení Z-osy je jediným limitem tloušťky)	do 50 – 75 mm v závislosti na materiálu	do 25 mm v závislosti na materiálu	do 300 mm
Přesnost	až ± 0,1 mm	až ± 0,2 mm	až ± 0,1 mm	až ± 0,003 mm
Investice	\$ 60.000 - 300.000+	\$ 60.000 – 300.000+	\$ 200.000 – 1.000.000+	\$ 100.000 – 400.000+
Nastavení stroje	stejné nastavení pro všechny materiály	různé nastavení pro různé práce	různé plyny a parametry pro různé práce	různé typy vodičů pro různé úlohy
Dosahovaná drsnost povrchu Ra	1 μm - 10 μm	bez údajů	0,8 μm – 6,3 μm	1 μm – 10 μm
Intenzita úběru materiálu	50 – 200 mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	1000 mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	různé pro jednotlivé materiály	7 mm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
Požadavky na výkon	10 kW – 50 kW	200 kW	4000 V 3000 J.ms <sup>-1</sup>	20 A / 400 V

### 1.9 Výhody a nevýhody abrazivního vodního paprsku

Výhody technologie abrazivního vodního paprsku<sup>7,28,30</sup>:

- vysoká energetická účinnost (až 80%),
- možnost řezat téměř jakýkoliv materiál,
- studený řez umožňující řez materiálů citlivých na teplo,
- obrobené hrany nevykazují tepelnou ani mechanickou deformaci,
- v obrobené ploše nejsou zbytková napětí, ani mikrotrhliny,
- proces je bezprašný,
- malé ztráty materiálu prořezem,
- jedno vysokotlaké čerpadlo může současně napájet až 70 trysek bez abraziva nebo 8 trysek paprsku s abrazivem,
- vysoká životnost trysek,
- možnost řezání pod hladinou vody,
- řezání bez omezení směru, obrysů, tvarů nebo úkosů,
- spolehlivost a jednoduchost,
- možnost řezání vlnitých materiálů,
- možnost řezání ve výbušném prostředí,
- vysoká flexibilita i při složité geometrii,
- přesné čištění a leštění povrchů těžkoobrobitelných materiálů,
- šetrnost k životnímu prostředí,
- možnost využití i jiných pracovních médií než je voda (např. potravinářský průmysl – tuky apod.),
- možnost recyklace odpadu,
- obrobek nemusí být pevně upnut,
- možnost CNC řízení.

Nevýhody technologie abrazivního vodního paprsku<sup>31</sup>:

- vysoké pořizovací náklady na zařízení,
- kontakt materiálu s vodou (povrchová koroze, u nasákavých materiálů delší vysoušení, možnost změny barvy, znečištění apod.),
- omezení výroby drobných výrobků – je řešeno můstky, které jsou zobrazeny na obr. 1.25,
- u silnějších materiálů může docházet k deformaci kontury řezu ve spodní hraně vlivem tzv. výběhu paprsku,
- vysoká hlučnost.



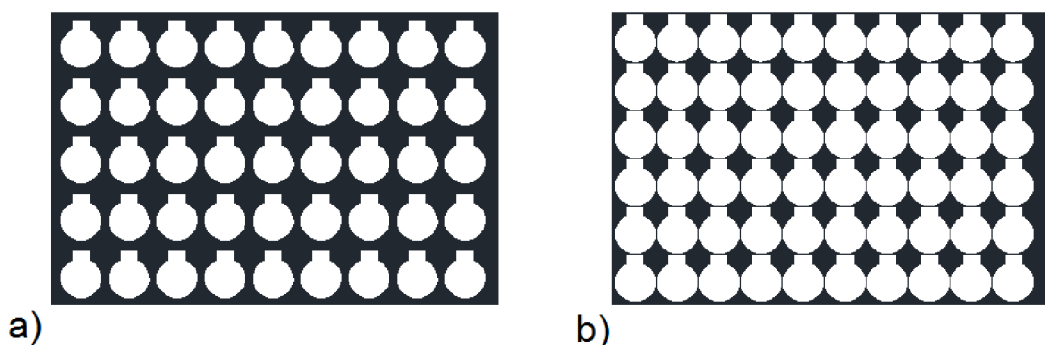
Obr. 1.25 Využití místků u malých součástí<sup>31</sup>.

### 1.10 Možnosti využití abrazivního vodního paprsku v praxi

Ve vzdálenější historii nacházel vodní paprsek využití zejména při dobývání nerostných surovin. V dnešní době nachází stále širší využití v průmyslových odvětvích. Je využíván zejména k dělení plochých, ale i tvarových materiálů jako je sklo, hliník, ocel, litina, titan, kompozitní a keramické materiály, až po využití abrazivního vodního paprsku jako řezného nástroje při soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů<sup>1,7</sup>.

#### 1.10.1 Řezání

Základní aplikaci, kterou abrazivní vodní paprsek umožňuje je řezání. Tímto způsobem je možné vytvořit produkt, u kterého nejsou nutné žádné další úpravy. Výsledná kvalita produktu také nezávisí na složitosti tvaru nebo zvoleném materiálu. Výjimkou je kalené sklo, které není možné tímto způsobem dělit, protože vlivem vnitřního pnutí dojde krátce po najetí do materiálu k roztržení skla. Na obr. 1.26 je zobrazen rozdíl ve využití polotovaru při výrobě klasickým vystřihováním a řezání vodním paprskem. Z obrázku je patrné, že u stříhání je vzhledem k větším mezerám mezi jednotlivými výstřižky nižší procentuální využití materiálu. Při různorodosti tvarů vyřezávaných součástí jsou k optimálnímu využití polotovaru používány softwary<sup>1,29</sup>.



Obr. 1.26 Příklad využití polotovaru firmou SATRA<sup>1</sup>.

- a) klasické vystřihování – ražením,
- b) řezání vodním paprskem.

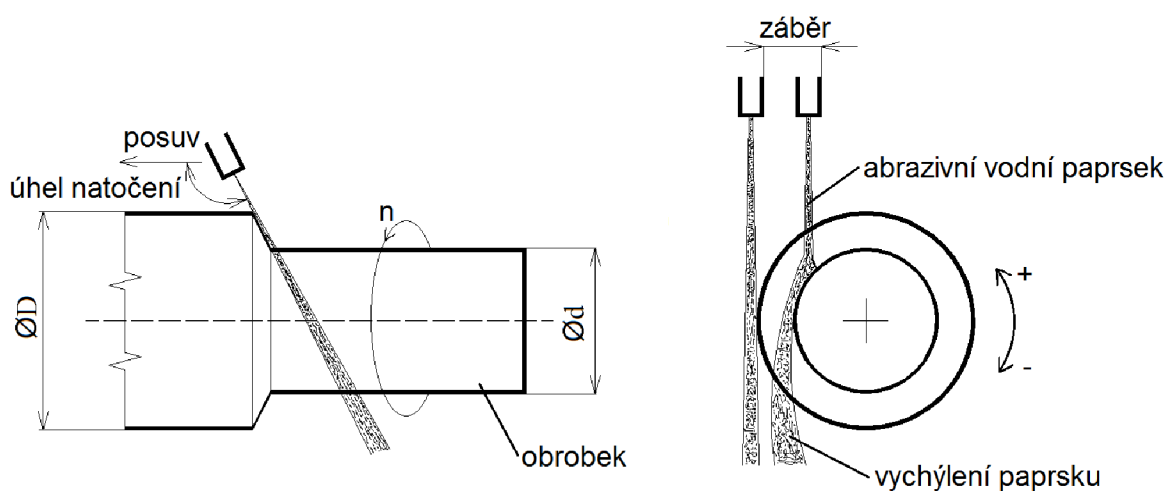


Obr. 1.27 Řez duralem tloušťky 160 mm – firma AWAC<sup>2</sup>.

### 1.10.2 Soustružení

První studie o možnosti využití abrazivního vodního paprsku při soustružení sahají až do roku 1987. Novější studie se zaměřují zejména na vliv provozních parametrů (průtok a zrnitost abraziva, rychlost rotace obrobku, rychlost řezání, úhel dopadu paprsku na obrobek apod.) na rychlost úběru materiálu, kvalitu, rozměrovou a tvarovou přesnost soustružených materiálů. Bylo nalezeno několik aplikací, kde je možné nahradit stávající metody soustružení. Využití bylo nalezeno v lékařství, kdy byly vysoustruženy šrouby z hovězí kostní tkáně, které byly použity při rekonstrukci předního křížového vazy kolenního kloubu a dále ke tvarování brusných kotoučů, kde bylo zjištěno, že brusné kotouče byly takto vytvarovány levněji a rychleji, než klasickým způsobem využívajícím diamantových noží<sup>32</sup>.

Na obr. 1.28 je zobrazen základní princip soustružení abrazivním vodním paprskem, kdy je úběr materiálu zabezpečený radiální posuvem paprsku do požadované hloubky řezu<sup>7</sup>.

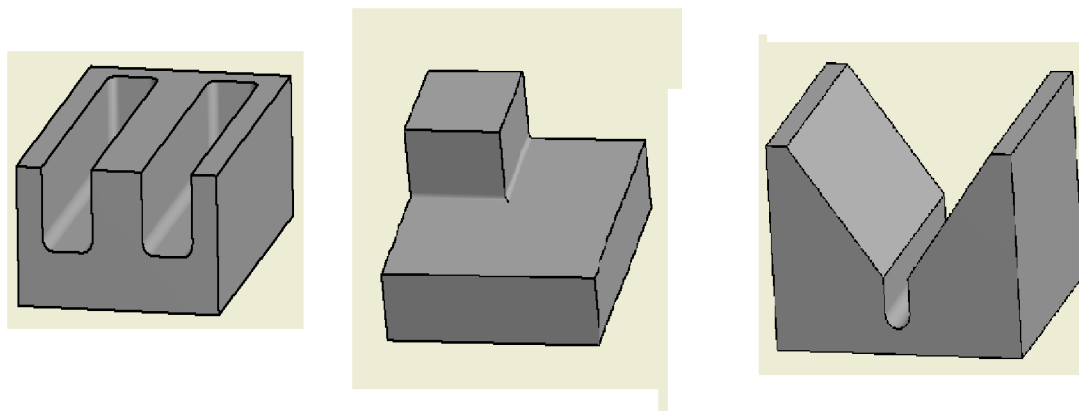


Obr. 1.28 Soustružení abrazivním vodním paprskem<sup>7</sup>.

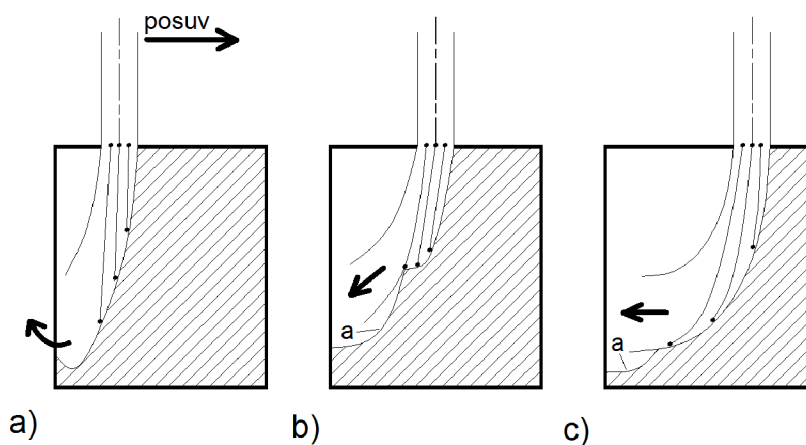
### 1.10.3 Frézování

Frézování abrazivním vodním paprskem je využíváno pro tvarově složité obrobky. Příklady možných obrobků jsou zobrazeny na obr. 1.29. Při frézování se jedná o řezání, při kterém nedochází k dělení materiálu. Řezný cyklus je znázorněn na obr. 1.30, kde jsou jasně viditelné řezné stupně. Jedná se o proces, při kterém paprsek vícenásobně prochází přes obráběné plochy a postupným odebráním materiálu tvoří tvar blízko konečnému tvaru. Při obrábění je využíván vysokorychlostní vodní paprsek s rychlostí  $300 \text{ m.s}^{-1} - 600 \text{ m.s}^{-1}$  a přítok abraziva  $10 \text{ g.s}^{-1}$ <sup>7</sup>.

Využití bylo nalezeno při výrobě tvarových nástrojů, kdy dochází k obrábění jinak těžkoobrobitelného materiálu<sup>7</sup>.



Obr. 1.29 Příklady frézování různých geometrických tvarů abrazivním vodním paprskem<sup>7</sup>.



Obr. 1.30 Řezný cyklus při frézování abrazivním vodním paprskem<sup>7</sup>.

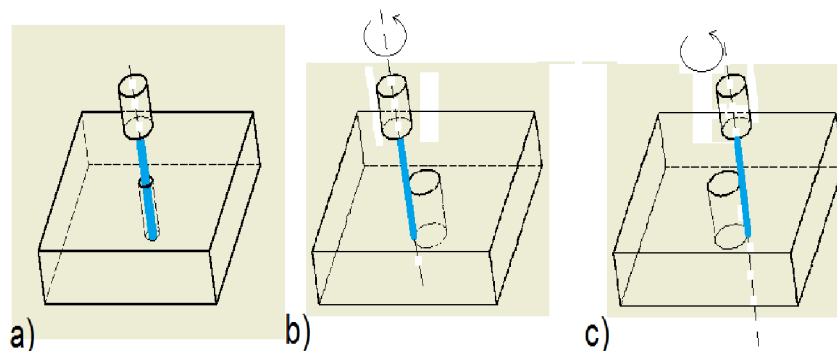
- počátek tvoření stopy řezu,
- stabilizovaná stopa řezu s viditelnými stupni posuvu paprsku,
- pokračující posuv paprsku a vyrovnání stupňovitosti řezu.

#### 1.10.4 Vrtání

Uplatnění našlo vrtání vodním paprskem při realizaci naftových a plynových vrtů. Při těžbě bylo poprvé využito roku 1939, kdy byl abrazivní vodní paprsek použit na perforaci trubek zatlačovaných do země s cílem zvýšit těžbu ropy. V polovině roku 1961 byla tato metoda s úspěchem aplikovaná na přibližně 5000 vrtech<sup>1</sup>.

Vrtání těžkoobrobitelných materiálů jako je keramika, sklo, slitiny niklu používané pro plynové turbíny využitím abrazivního vodního paprsku se postupně dostává mezi perspektivní technologie. Bylo vyvinuto několik způsobů vrtání otvorů, pro které je charakteristický vzájemný pohyb paprsku a obrobku. Nejpoužívanějšími způsoby jsou<sup>7</sup>:

- vrtání stacionárním paprskem a obrobkem,
- vrtání rotujícím paprskem,
- vrtání vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem.



Obr. 1.31 Způsoby vrtání pomocí abrazivního vodního paprsku<sup>7</sup>.

a) provrtávání, b) vyřezávání, c) frézování otvorů.

#### 1.10.5 Využití WJM a AWJ v průmyslu

Technologie WJM a AWJ našli nepřeborné množství uplatnění v různých průmyslových odvětvích, zejména díky své jednoduchosti, efektivnosti a v některých případech i nenahraditelnosti. V tab. 1.9 jsou vypsány zástupci průmyslů s největším podílem využití technologie WJM a AWJ a k nim konkrétní pole využití.

Tab. 1.9 Průmyslové využití WJM a AWJ<sup>7</sup>.

Průmysl	Využití
Chemický	dělení výbušných látek
Potravinářský	dělení ovoce a zeleniny, ve zmraženém stavu dělení masa, dortů, čokolády, sýrů atd.
Elektrotechnický a elektronický	řezání a dělení keramiky, skla, amorfních látek, permanentních magnetů, plošných spojů
Strojírenský	dělení titanu, wolframu, tantalu, uranu, extrémně tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, kompozitů, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástí, výroba lopatek turbín a kompresorů
Stavební	dělení plastů jako je polyuretan, polystyrén, čedičová vata, azbest, plastbeton, keramika, dlaždice
Gumárenský	řezání gumy, plastů, vláken kevlaru
Papírenský	papír, fólie, buničina
Obuvnický	řezání pravé a umělé kůže, plastické hmoty
Sklářský	řezání, matnění a dělení skla až do hloubky 200 mm, tvarové řezy, vrzání do skla
Jaderný	dekontaminace a odstranění ochranných železobetonových vrstev v zařízeních jaderné elektrárny, čištění a odstraňování usazenin



## 2 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU SE 3D VYBAVENÍM

Technologické možnosti abrazivního vodního paprsku se 3D vybavením jsou oproti běžnému zařízení rozšířeny o následující schopnosti:

- minimalizace ohybu vodního paprsku,
- minimalizace úkosu řezné hrany,
- možnost naklopení řezné hlavy o úhel až  $55^\circ$ .

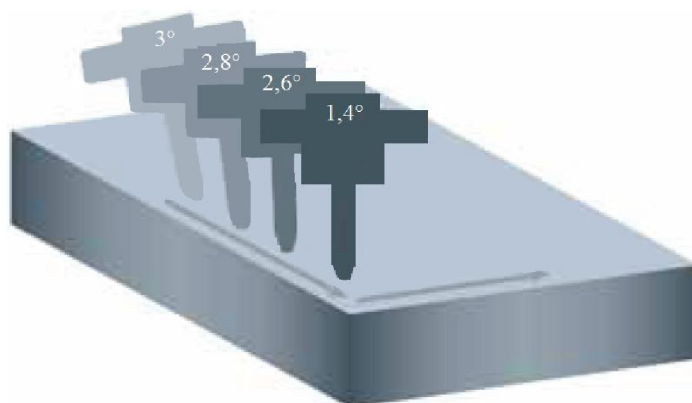
### 2.1 Technologie podporující 3D abrazivní vodní paprsek

Následující technologie byly vyvinuty z důvodů zvýšení rychlosti a přesnosti řezání, snížení výrobních nákladů, zvýšení využitelnosti technologie abrazivního vodního paprsku apod. Umožňuje tak uživatelům stát se více konkurenceschopným.

#### 2.1.1 Dynamic Waterjet

Vzhledem k faktu, že vodní paprsek není tuhý nástroj, dochází ke ztrátě kinetické energie a tím vzniká kónická hrana řezu a v rozích se tvoří typická zahloubenina.

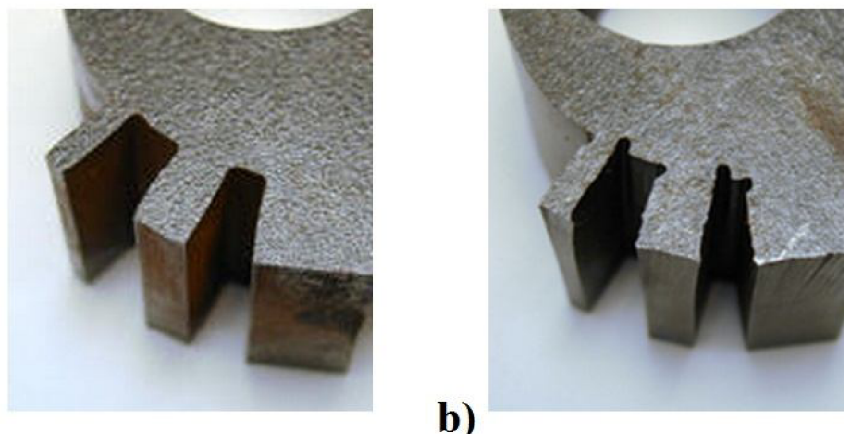
Dynamic Waterjet je technologie vyvinutá a patentovaná společností Flow v roce 2001. Srdcem systému je vysoce sofistikovaný matematický model SmartStream, který propočítává odchylku paprsku, výstupní bod paprsku ve vztahu ke vstupnímu atd. Na obr. 2.1 je zobrazen příklad korekce úkosů pomocí naklápěcí abrazivní hlavičky<sup>33</sup>.



Obr. 2.1 Korekce úkosů pomocí naklápěcí abrazivní hlavičky<sup>33</sup>.

Chyby vzniklé při řezu bez využití technologie Dynamic Waterjet je možné redukovat nižšími posuvovými rychlostmi. Tato alternativa vede k prodloužení výrobních časů a tím vyšším nákladům na výrobu jedné součásti. Proto při stejných požadavcích na přesnost a jakost povrchu je rychlost řezu při využití technologie Dynamix Waterjet až o 400% vyšší, než při běžném řezání abrazivním vodním paprskem. Na obr. 2.2 je zobrazen rozdíl ve kvalitě řezu s a bez využití technologie Dynamix Waterjet při stejných technologických parametrech<sup>33</sup>.





Obr. 2.2 Ukázka jakosti řezu při stejných technologických parametrech<sup>34</sup>.  
a) s využitím technologie Dynamic Waterjet,  
b) běžný abrazivní vodní paprsek.

### 2.1.2 Dynamic Waterjet XD

Technologie Dynamic Waterjet XD skrývá propojení 3D funkce a systému Dynamic Waterjet. Jsou zde obsaženy stejné vlastnosti systému Dynamic Waterjet s tou výhodou, že součástí zařízení je řezací hlava umožňující náklon až o 60°. Díky tomu je možné vytvářet i složité součástky, nebo zefektivnit výrobu například tím, že budou zkoseny hrany tak, aby bylo díl možné svařit např. V svarem bez dalších úprav. Na Obr. 2.3 je zobrazen příklad řezací hlavy od společnosti Flow, která umožňuje využití technologie Dynamic Waterjet XD<sup>35</sup>.



Obr. 2.3 Příklad řezací hlavy od společnosti Flow<sup>36</sup>.

Na obr. 2.4 jsou zobrazeny příklady součástí vytvořené technologií Dynamix Waterjet XD.



Obr. 2.4 Ukázka výrobků vytvořených za pomoci technologie Dynamic Waterjet XD<sup>37</sup>.

Technologie Dynamix Waterjet XD zahrnuje tyto vlastnosti<sup>35</sup>:

- provoz pod i nad vodní hladinou,
- svislý zdvih 152 mm,
- možnost pohybu pod úhlem až 60°,
- rychlý zdvih a pokles díky přesnému elektrickému pohonu,
- polohová zpětná vazba poskytuje ovládání uzavřeného pohybu osy Z,
- snadno přístupný kryt chrání kritické přesné součásti,
- vyrovnaní řezací hlavy za použití laseru zaručuje vysokou přesnost.

### 2.1.3 ProgressJet 5AX Systém

Technologie ProgressJet 5AX Systém umožňuje vytvářet 3D výřezy z deskových polotovarů. Jeho vlastnosti jsou následující<sup>38</sup>:

- vysoká tvarová přesnost,
- umožňuje vertikální řezy,
- možnost naklonění osy rotace až o 45°,
- eliminuje chyby vzniklé energetickým úbytkem paprsku,
- je plně řízen systémem CNC stolu,
- 3D režim vyžaduje program vygenerovaný 3D CAD-CAM (CAM 5X – Bevel Cutting),
- funkci zajišťuje přídavná 3D mechanika stolu řízená systémem CNC stolu na základě materiálové a technologické databáze.

### 2.1.4 ProgressJet 60dg Systém

Technologie je založena na principu předchozího systému ProgressJet 5AX a je jeho rozšířením o tyto funkce<sup>38</sup>:

- možnost rotace řezné hlavy až o 60°,
- obsahuje integrovaný laserový snímač,
- bezpečnostní systém, který monitoruje a analyzuje pomocí senzorů polohu řezné hlavy a eliminuje tak možnost potenciálního zranění obsluhy,
- komplexnější ochrana komponentů.

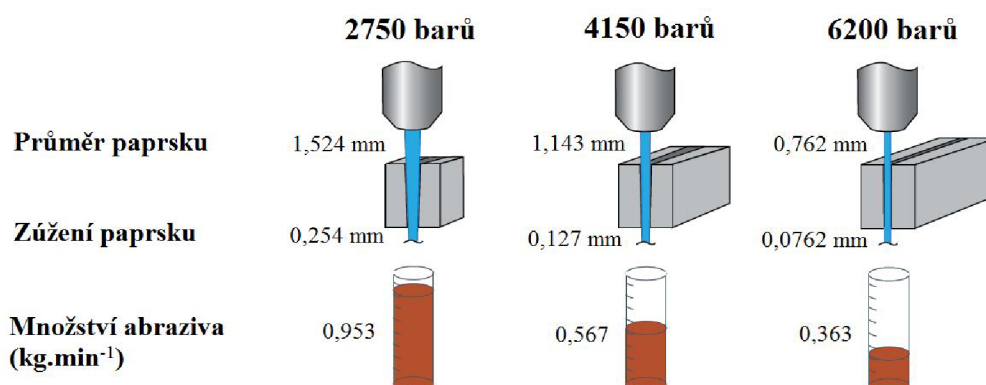
Na obr. 2.5 je zobrazen příklad použití technologie ProgressJet 60dg systém.



Obr. 2.5 Příklad použití technologie Progressjet 60dg System<sup>39</sup>.

### 2.1.5 Hyperpressure

Od 70. let minulého století je snahou dosáhnout v technologii vodního paprsku co nejvyšších tlaků. Dnes vývoj přináší čerpadla, která disponují jmenovitým tlakem až 6500 barů. Velikost tlaku má vliv na celý proces řezání. Změnu některých parametrů popisuje obr. 2.6<sup>33</sup>.



Obr. 2.6 Porovnání základních parametrů v závislosti na tlaku<sup>33</sup>.

Z obr. 2.6 vyplývá, že při zvýšení tlaku dochází k<sup>33, 35</sup>:

- zmenšení průměru paprsku,
- klesá hodnota postupného zúžení paprsku,
- výrazně se snižuje potřebné množství abraziva.

Vzhledem k faktu, že cena abraziva tvoří až 67% provozních nákladů čerpadla, je díky jeho nižší spotřebě řez ekonomičtější. Další výhodou je vyšší rychlost řezu, z čehož pramení i vyšší produktivita. Společnost Flow porovnal některé výsledné parametry čerpadla se jmenovitým tlakem 6 481 barů s čerpadlem o jmenovitém tlaku 4100 barů. Bylo dosaženo následujících výsledků<sup>35</sup>:

- vyšší rychlost řezu o 30% - 50%,
- nižší spotřeba abraziva o 30% - 50%,
- nižší cena součásti o 20% - 30%.

## 2.2 Příslušenství k zařízení

Mimo standardních komponent je možné zařízení vybavit řadou dalších prvků určených ke zvýšení produktivity práce, specifickým operacím či zjednodušení práce.

### 2.2.1 Výškový senzor

Výškový senzor slouží k přesnému bezdotykovému měření výšky řezací hlavy a využívá k tomu laserových senzorů. Výška řezací hlavy nad řezaným materiálem je automaticky upravována systémem. Jsou zde možné tři režimy řezání<sup>40</sup>:

- před průstřelem - měří výšku před průstřelem,
- periodické měření - měří výšku před průstřelem a každý daný časový okamžik,
- kontinuální měření - měří po celou dobu řezacího cyklu.

Příklad výškového senzoru je zobrazen na obr. 2.7.

**Výškový senzor**



Obr. 2.7 Výškový senzor<sup>41</sup>.

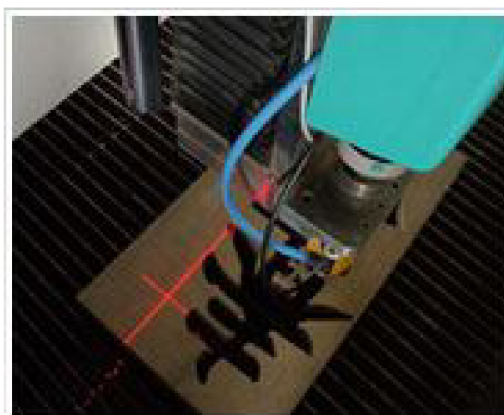
### 2.2.2 Laserový zaměřovací kříž

Jedná se o příslušenství sloužící k přesnému nastavení polohy řezací hlavy vůči obrobku.

Použití tohoto zařízení je možné shrnout do několika bodů<sup>41</sup>:

- ručním posuvem se najede řezací hlavou do nulového bodu,
- uložení tohoto bodu jako uživatelskou pozici,
- na počátku řezného procesu zařízení automaticky přejede do této pozice.

Na obr. 2.8 je zobrazen příklad laserového zaměřovacího kříže



Obr. 2.8 Laserový zaměřovací kříž<sup>41</sup>.

### 2.2.3 Dynamic contour follower

Dynamic contour follower zobrazený na obr. 2.9 umožňuje automatické sledování vzdálenosti odstupu mezi řezací hlavou a obráběným materiálem. Je tak dosaženo efektivnějšího a přesného řezání materiálu. Pomocí tří nezávislých nohou jsou měřeny výškové rozdíly v rozsahu 360° v rovině XY. Informace o vzdálenostech jsou předávány na osu Z, která mění polohu řezací hlavy tak, aby bylo dosaženo stejné vzdálenosti mezi řezací hlavou a obráběným materiálem v celém rozsahu řezání. Tím je tak dosaženo optimálního řezného prostředí. Pracuje s konvenčními systémy na řezání vodním paprskem a systémy Low Dynamic Waterjet. Dynamic contour follower je možné také použít v kombinaci s kolizním snímačem k zabránění kolize s překážkami, které by mohly poškodit řeznou hlavu<sup>41</sup>.



Obr. 2.9 Dynamic contour follower<sup>42</sup>.



### 2.2.4 Ultrapierce vacuum assist

Technologie patentovaná společností Flow, jejíž přípravek je zobrazen na obr. 2.10, je určena především pro řezání křehkých a laminovaných materiálů jako je mramor, kámen, sklo a kompozitní materiál. Děrování křehkých materiálů je jednodušší a ekonomičtější, protože dochází k úspoře času a zvyšuje se kvalita řezného povrchu<sup>41</sup>.



Obr. 2.10 Přípravek technologie Ultrapierce vacuum assist<sup>41</sup>.

### 2.2.5 Pure waterjet

Pure waterjet je příslušenství, které je dodáváno podobě řezací hlavy, jež dělí materiál pouze čistou vodou. Princip a materiály, pro které je tato technologie určena, je detailně popsán v kap. 1.4.1. Průměr paprsku je výjimečně malý a minimalizuje tak množství vody, která se zavádí do řezaných oblastí<sup>41</sup>.



Obr. 2.11 Pure waterjet<sup>41</sup>.

### 2.2.6 Flowteach

Flowteach je softwarový nástroj pracující se vzory nebo obrobky, které je nutno digitalizovat. Vzory nebo obrobky mohou být umístěny v jakémkoli směru na opěrné plošině. Poté je sledován obrys pomocí řezné hlavy nebo pro vyšší přesnost zaměřovacím křížem. Po vytvoření obrysu je možné soubor uložit a dále upravovat. Flowteach lze ovládat z počítačové klávesnice nebo s pomocí dálkového ovládání<sup>41</sup>.

### 2.3 Zařízení společnosti Flow Mach 4c

Společnost Flow International Corporation patří mezi světovou špičku ve výrobě zařízení pro řezání vodním paprskem. Společnost byla založena na počátku 70. let a sídlí v Kentu, ve státě Washington (USA). Od roku 1974 společnost Flow dodala do více než 100 zemí po celém světě téměř 9500 systémů pro řezání vodním paprskem. Posledním typem produktů společnosti Flow jsou zařízení řady Mach 4<sup>33</sup>.

Brněnská pobočka firmy AWAC si pořídila zařízení Mach 4c zobrazené na obr. 2.12, na kterém byly vyříznuty zkušební vzorky. Zařízení disponuje nejnovějšími dostupnými technologiemi v řezání vodním paprskem jako je např. technologie Dynamic Waterjet XD a SmartStream. Spojením všech vlastností samotného zařízení a vysokotlakého čerpadla s tlakem až 6000 barů tak vzniká zařízení s velkým potenciálem. Součástí zařízení je také 3D naklápěcí hlava, která umožňuje odklon až o 60°. V praxi je používán maximální odklon pouze 55° zejména z bezpečnostních důvodů, kdy by při větším naklonění řezné hlavy mohlo dojít k odrazu paprsku od materiálu a potenciálnímu zranění obsluhy zařízení.



Obr. 2.12 Mach 4c<sup>33</sup>.

Standardní vlastnosti<sup>33</sup>:

- zlepšení viditelnosti obráběného kusu,
- přístup ze čtyř stran po zabudovaném schodu,
- dostupné vzduchové a vodní přípojky,
- ergonomický výklenek pro nohy,
- pohyblivý ovládací panel,
- automatické mazání.

Volitelná výbava a příslušenství<sup>33</sup>:

- dálkový ovladač,
- záchytná vana z nerezové nebo běžné oceli,
- řízení výšky vodní hladiny,
- více řezacích hlav,
- odkalovací systém pro abrazivo Hydroclean,
- navrtávací pomůcka Ultrapiece,
- vysokotlaká čerpadla až do 6500 barů,
- velkokapacitní zásobník abraziva,
- nástroj pro vyjímání součástí,
- výškový senzor,
- vakuový asistent,
- laserový zaměřovač.

K zařízení Mach 4c byl firmou AWAC zakoupen z volitelného příslušenství vakuový asistent a laserový zaměřovač.

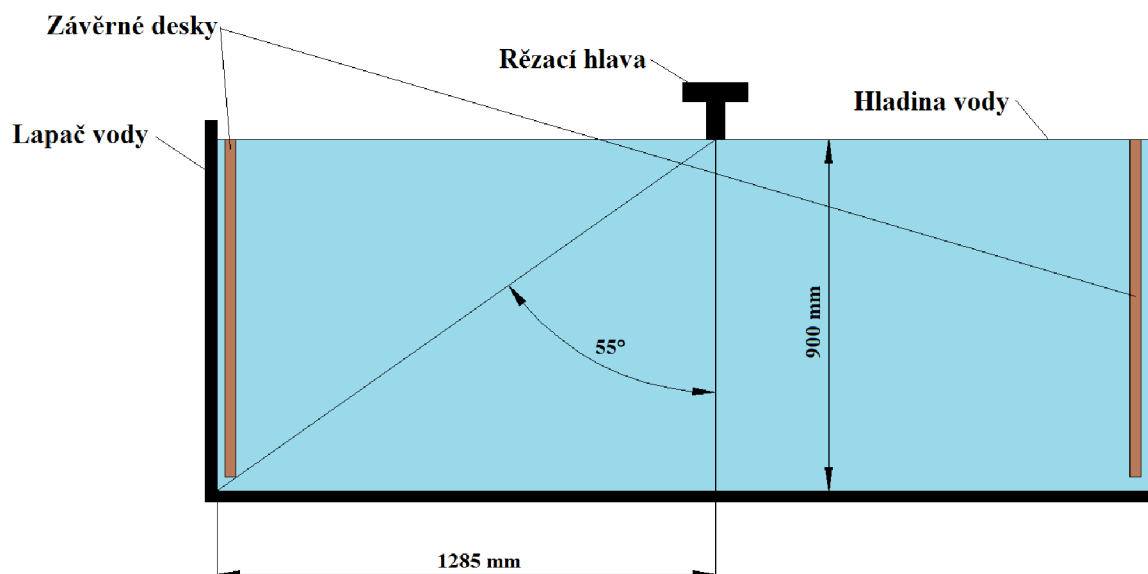
V tab. 2.1 jsou vypsány specifické vlastnosti zařízení Mach 4c zakoupené firmou AWAC.

Tab. 2.1 Specifikace zařízení Mach 4c zakoupené firmou AWAC<sup>33</sup>.

Šířka stolu	2000 mm
Délka stolu	4000 mm
Pracovní zdvih	do 305 mm
Vzdálenost trysky od materiálu	2,5 mm
Pracovní tlak	6000 barů
Počet řezacích hlav	1 (3D)
Rychloposuv	36 m.min <sup>-1</sup>
Rychlost řezání	25 m.min <sup>-1</sup>
Lineární přesnost polohování	±0,025 mm



Zjevná výhoda, že zařízení disponuje 3D řezací hlavou, se může stát i nevýhodnou. Naklonění řezné hlavy v blízkosti okraje pracovního prostoru je nebezpečné proto, že paprsek může narážet do stěn lapače vody a dokonce jej i proříznout. Proto musí být pracovní prostor omezen tak, aby k tomuto jevu nedocházelo. Stěny lapače jsou proto vyztuženy závěrnými deskami, které mají zabránit proříznutí lapače vody v případě najetí řezné hlavy do kritické vzdálenosti od okraje. Na obr. 2.13 je zobrazena minimální vzdálenost trysky od stěny lapače při maximálním naklonění řezné hlavy.



Obr. 2.13 Minimální vzdálenost trysky od stěny lapače při maximálním naklonění trysky<sup>44</sup>.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ VLIVU PARAMETRŮ NASTAVENÍ PRO APLIKACI 3D ŘEZACÍ HLAVY PRO JEDNOTLIVÉ MATERIÁLY

V této kapitole bude rozebráno vytvoření 3D modelu, jeho další transformace a následné nastavení rezných parametrů pro vyříznutí vzorků na zařízení společnosti Flow Mach 4c.

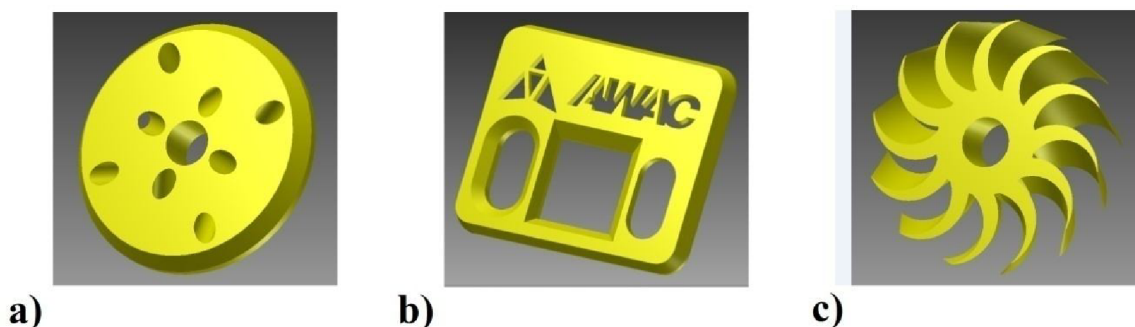
#### 3.1 Vytvoření 3D modelu a jeho transformace

Základní 3D model je možné vytvořit v některém z běžně dostupných softwarů, jako jsou:

- SolidWorks,
- Autodesk Inventor,
- Catia,
- SpaceClaim,
- VariCAD,
- Pro/ENGINEER,
- Parasolid.

Další možností je např. vytvoření 2D kontury v programu AutoCAD. Kontura je následně převedena do programu SpaceClaim, který umožňuje touto cestou vytvořit 3D model, nebo jeho úpravu.

Pro experiment byly vybrány následující tři modely zobrazené na obr. 3.1. Každý z těchto tří modelů byl vyříznut v počtu dvou kusů, z nichž první je z oceli X5CrNi18-10 (17 240) a druhý je z hliníku ENAW 5083 (AW-ALMg4).



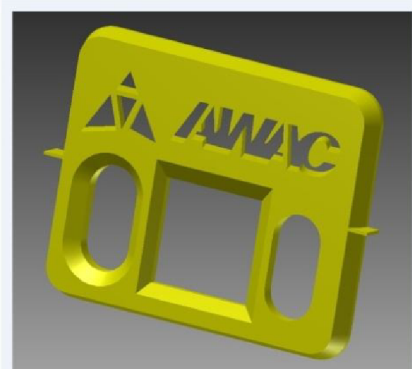
Obr. 3.1 Modely výřezků.

- a) kolečko,
- b) obdélník AWAC,
- c) turbína.

U modelů a) a b) byly vytvořeny můstky, které slouží k tomu, aby součást zůstala přichycena k základnímu polotovaru a nepropadla do lapače vody. Vzorek c) nebylo vzhledem k jeho tvaru nutné opatřit můstky a ani s ním provádět žádné další úpravy. Modely s můstky jsou zobrazeny na obr. 3.2.



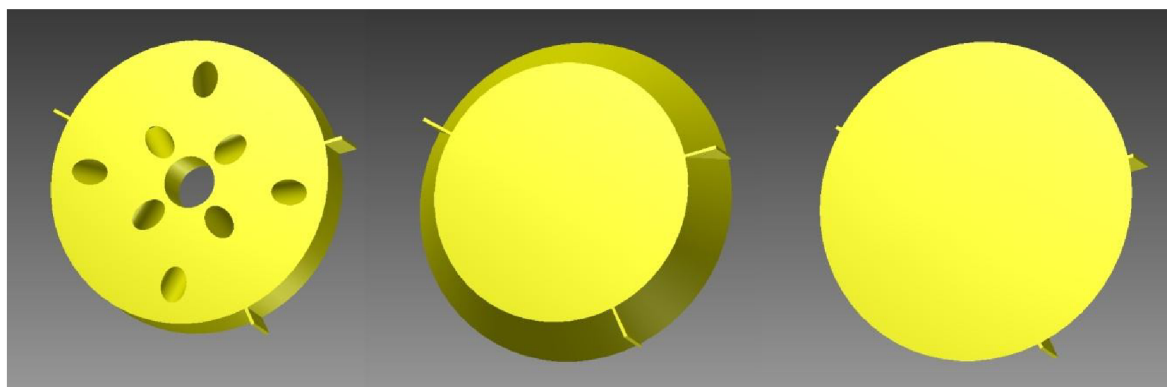
a)



b)

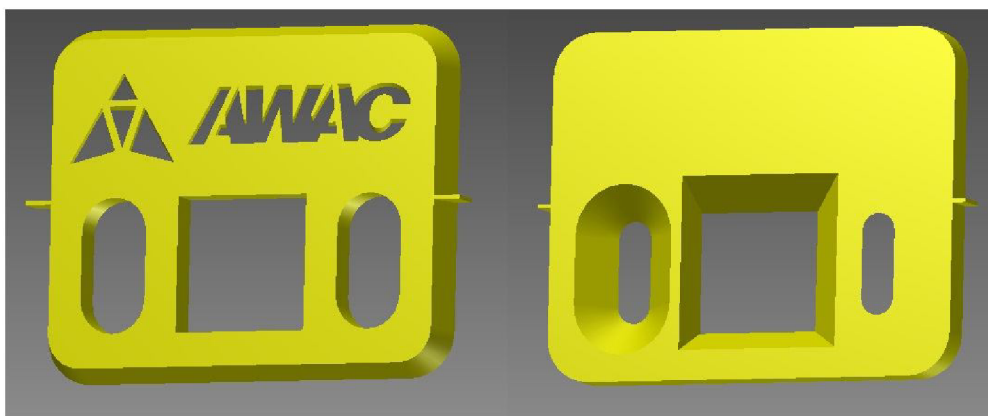
Obr. 3.2 Modely výřezků s můstky.

V následujícím kroku byl model exportován do programu SpaceClaim. Zde byly v případě modelů a) a b) provedeny transformace jejich tvarů tak, aby je bylo možné efektivně vyříznout. Na obr. 3.3 je zobrazen model a), který byl rozložen do tří jednodušších těles, jež byly složeny v jedno soustředné, překrývající se těleso. S ohledem na kvalitu řezu bylo nejprve vytvořeno zkosení spodní hrany. Dále byly vytvořeny kolmé řezy a díry pod úhlem  $45^\circ$  a až nakonec zkosení horní hrany.



Obr. 3.3 Rozložení modelu a) do tří jednodušších těles.

Na obr. 3.4 je zobrazeno rozložení modelu b) do dvou jednodušších těles, které byly stejně jako u modelu a) složeny do jednoho tělesa. Zde byly nejprve řezány kolmé stěny spolu s celkovým řezem pod úhlem a až poté jsou řezány úkosy.



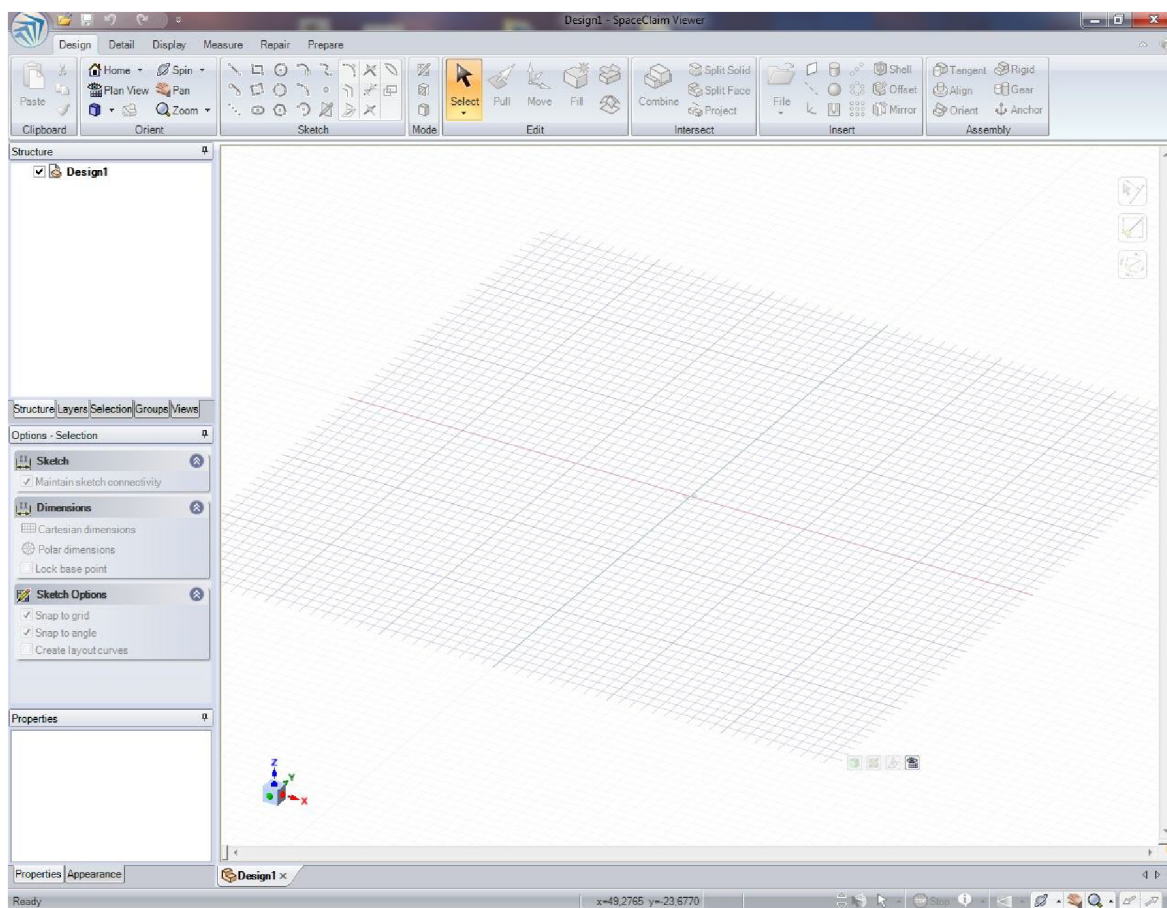
Obr. 3.4 Rozložení modelu b) do dvou jednodušších těles.

### 3.1.1 Program SpaceClaim

SpaceClaim Engineer je 3D CAD software, který umožňuje vytvářet vlastní 3D modely, provádět změny u již vytvořených 3D modelů či měnit koncepty. Mezi základní vlastnosti programu SpaceClaim patří<sup>45</sup>:

- práce s formáty ACIS, STEP, IGES, Rhinoceros, CGR, DWG, DXF, STL, OBJ, XAML, VRML a 3D PDF,
- možnost precizního fotorealistického rendrování,
- obsahuje modul plug-in pro přímou integraci do softwaru Rhinoceros,
- obsahuje moduly pro čtení dalších nativních CAD dat,
- integrace s CAE a CAM nástroji.

Obsahuje také speciální nástroje pro práci s plechy. Tyto nástroje umožňují automatické složení a rozložení plechu a také mají možnost s nimi pracovat jak v rovině, tak i ve 3D. Pohled na základní obrazovku programu SpaceClaim je zobrazen na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Pohled na základní obrazovku programu SpaceClaim.

### 3.2 Nastavení parametrů pro jednotlivé vzorky

Po úpravách modelů v programu SpaceClaim je následně model převeden do programu FlowCUT společnosti Flow. Zde jsou nastavovány a generovány veškeré parametry pro daný řez.

#### 3.2.1 Program FlowCUT

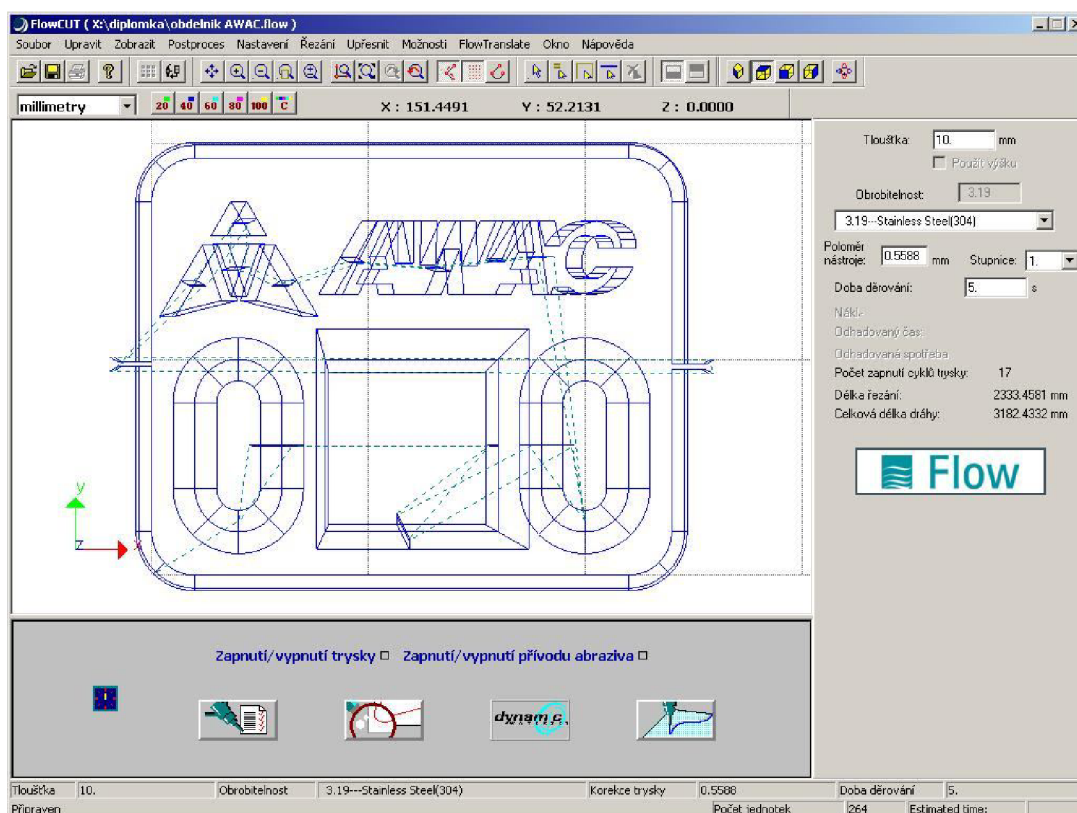
Jedná se o jeden z nejpokročilejších programů pro řezání abrazivním vodním paprskem. V následujících bodech jsou shrnuty jeho schopnosti, funkce či výhody<sup>46</sup>:

- jedná se o 32-bitovou aplikaci, která vyžaduje systém Windows XP,
- jednoduché a logické rozhraní,
- podpora 2D a 3D režimů,
- zadává se pouze tloušťka polotovaru, typ materiálu a požadovaná kvalita povrchu,
- součástí je integrovaná databáze parametrů řezání pro téměř všechny materiály a tloušťky,
- řezná dráha a řezná rychlost je plně optimalizována automaticky pro téměř všechny materiály,
- integrovaná kontrola vysokotlakého čerpadla, vody a abraziva,
- odstraněno omezení rychlosti řezu v místech s četnými malými otvory,
- zlepšení přesnosti a rychlosti díky automatickému nastavení ovládání rohu,
- schopnost řezat tenké materiály rychlostí až  $3810 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- zobrazení polohy nástroje v reálném čase,
- vypočtení délky posuvů a řezané kontury,
- vypočtení délky doby řezání,
- restart řezu z jakéhokoli bodu na dráze posuvu,
- automatické nastavení průstřelů při nižším tlaku a poté řez vysokým tlakem,
- diagnostika řezu pro jednodušší řešení problémů,
- možnost nastavení až deseti uživatelských nulových bodů,
- podpora zobrazení 3D dílu,
- možnost měnit mřížku a barvu pozadí.

### 3.2.2 Nastavení parametrů v programu FlowCUT

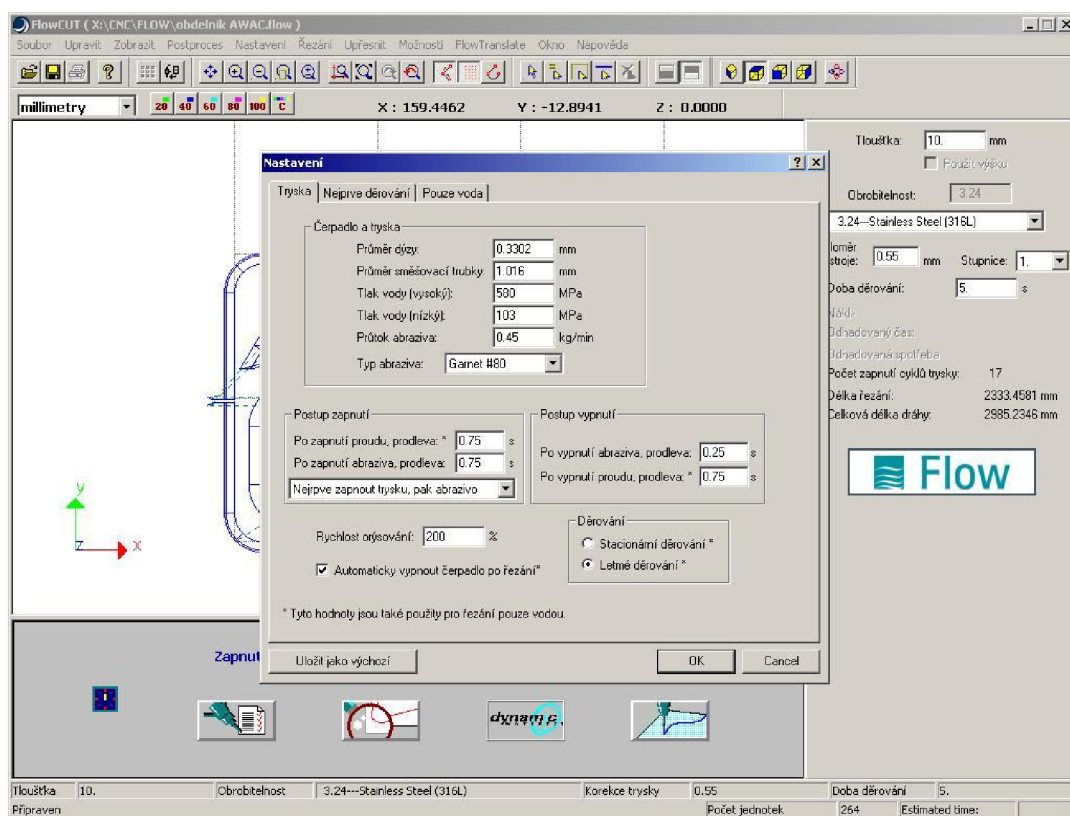
Úplné nastavení a vypočtení všech parametrů v programu FlowCUT probíhá v několika krocích:

- import souboru do programu FlowCUT a následné nastavení tloušťky polotovaru, typu materiálu, požadované jakosti povrchu, poloměru nástroje a doby děrování je zobrazeno na obr. 3.6,
- nastavení trysky, mezi jejíž parametry patří průměr dýzy a směšovací trubice, vysoký a nízký tlak vody, průtok abraziva, typ abraziva, postup zapnutí a vypnutí je zobrazeno na obr. 3.7,
- nastavení modelu řezání, do kterého patří parametry, jako je typ řezání nebo aktivace některých funkcí je zobrazeno na obr. 3.8,
- spuštění výpočtu je zobrazeno na obr. 3.10,
- zobrazení výsledků výpočtů a dokončení průběhu nastavení je zobrazeno na obr. 3.10.

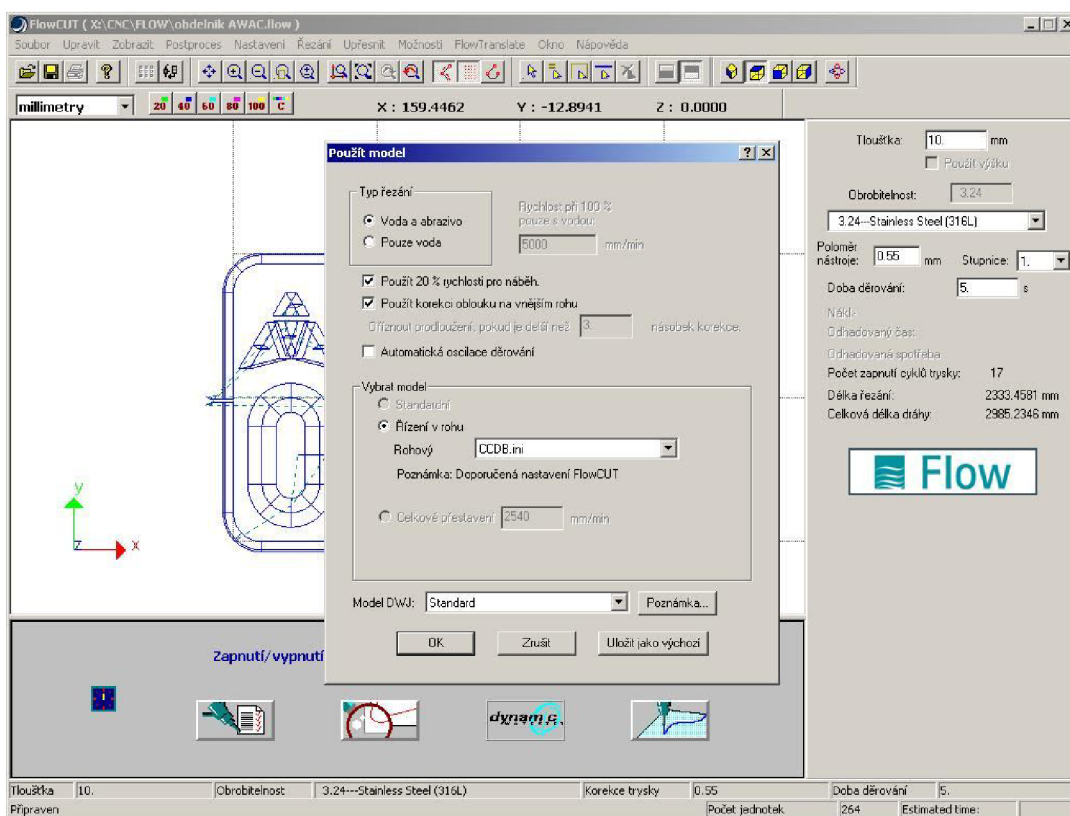


Obr. 3.6 Nastavení základních parametrů.

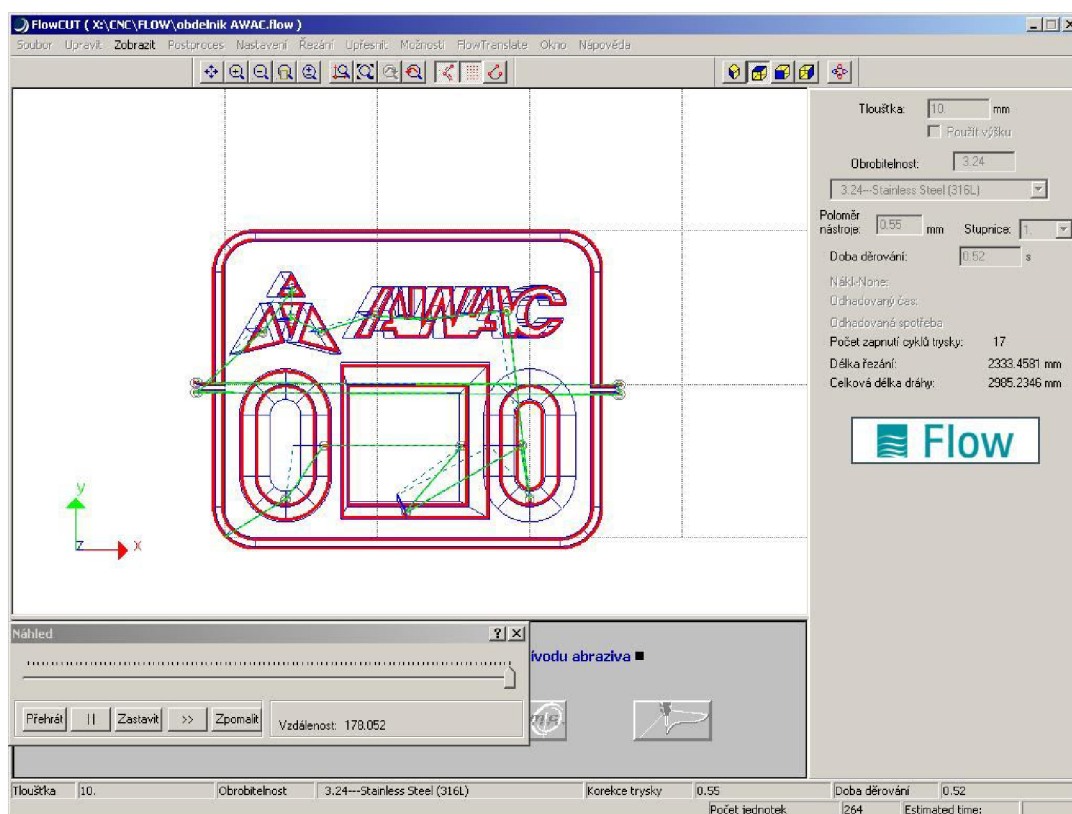




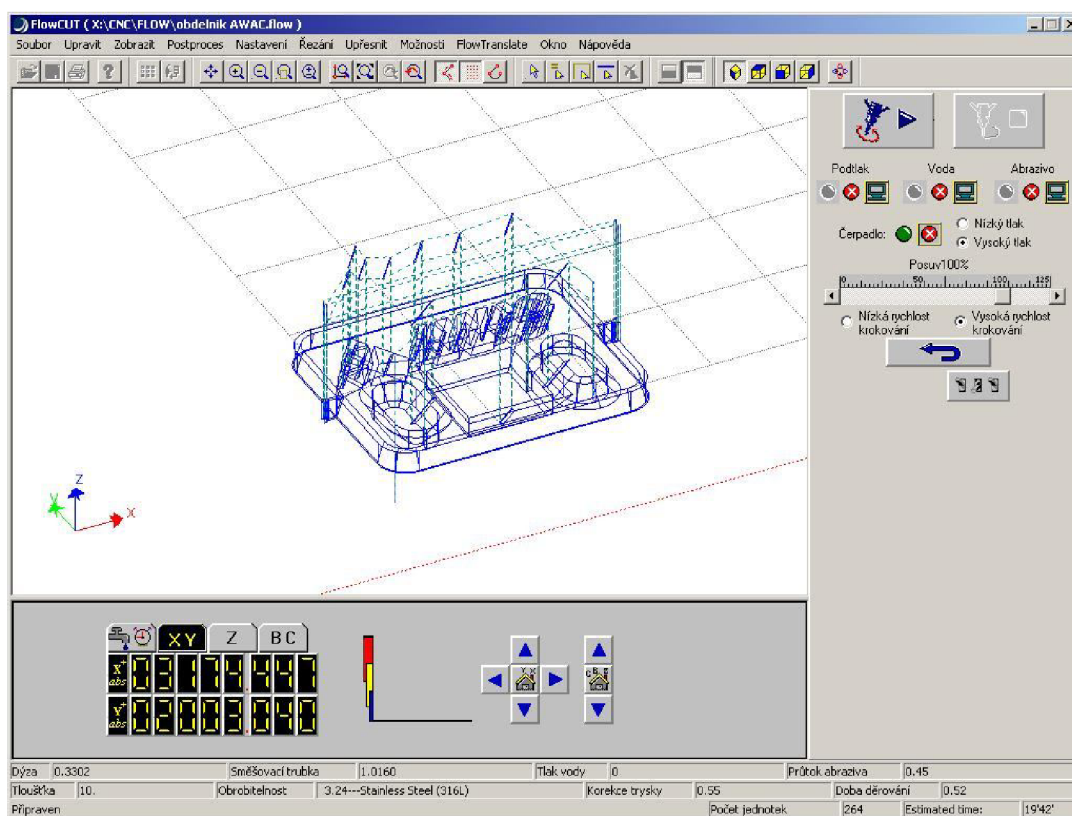
Obr. 3.7 Nastavení trysky.



Obr. 3.8 Nastavení modelu řezání.



Obr. 3.9 Výpočet parametrů řezu dle zvoleného nastavení.



Obr. 3.10 Dokončený výpočet rychlosti a pojezdů.



### 3.3 Parametry řezu

Pro jednotlivé vzorky byly nastavovány parametry individuálně, ale vzhledem k tomu, že většina parametrů byla pro všech 6 vzorků stejná, jsou všechny společné parametry vypsány v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Společné parametry všech vzorků.

Parametr	Hodnota
Průměr dýzy	0,3302 mm
Průměr směšovací trubky	1,016 mm
Tlak vody (vysoký)	580 MPa
Tlak vody (nízký)	103 MPa
Průtok abraziva	0,45 kg·min <sup>-1</sup>
Typ abraziva	granát, 80 MESH
Prodleva proudu po zapnutí	0,75 s
Prodleva abraziva po zapnutí	0,75 s
Prodleva abraziva po vypnutí	0,25 s
Prodleva proudu po vypnutí	0,75 s
Rychlost orýsování	200 %
Typ děrování	letmé děrování
Typ řezání	voda a abrazivo
Požadovaná jakost povrchu	Q20

V tab. 3.2 až tab. 3.4 jsou vypsány individuální parametry řezu pro jednotlivé vzorky. Přesné hodnoty řezných rychlostí zde nejsou udávány, protože se jedná o proměnné hodnoty řízené pomocí programu FlowCUT, který díky sofistikovanému matematickému modelu SmartStream umožňuje řídit a regulovat řezné rychlosti v reálném čase. Tabulky obsahují parametr s názvem průměrná rychlost řezu, který slouží pouze jako orientační a srovnávací hodnota. Nejedná se však o hodnotu generovanou pomocí programu FlowCUT, ale jde pouze o podíl hodnot délky řezu a délky trvání řezu.

Tab. 3.2 Individuální parametry řezu pro vzorek a) kolečko.

Parametr	Varianta 1	Varianta 2
Materiál	X5CrNi18-10	ENAW 5083
Tloušťka polotovaru	20 mm	20 mm
Délka řezu	1752 mm	1752 mm
Počet nástřelů	18	18
Délka trvání řezu	43 min	17,32 min
Průměrná rychlost řezu	40,74 mm · min <sup>-1</sup>	101,15 mm · min <sup>-1</sup>

Tab. 3.3 Individuální parametry řezu pro vzorek b) obdélník AWAC.

Parametr	Varianta 1	Varianta 2
Materiál	X5CrNi18-10	ENAW 5083
Tloušťka polotovaru	10 mm	10 mm
Délka řezu	2334 mm	2334 mm
Počet nástřelů	17	17
Délka trvání řezu	26,48 min	10,83 min
Průměrná rychlost řezu	88,14 mm · min <sup>-1</sup>	215,51 mm · min <sup>-1</sup>

Tab. 3.4 Individuální parametry řezu pro vzorek c) turbína.

Parametr	Varianta 1	Varianta 2
Materiál	X5CrNi18-10	ENAW 5083
Tloušťka polotovaru	20 mm	20 mm
Délka řezu	998 mm	998 mm
Počet nástřelů	2	2
Délka trvání řezu	24,23 min	9,38 min
Průměrná rychlost řezu	41,19 mm · min <sup>-1</sup>	106,4 mm · min <sup>-1</sup>

Ze vstupních a výstupních hodnot nastavení a výpočtu řezu jednotlivých vzorků bylo dospěno k následujícím závěrům:

- typ materiálu má zásadní vliv na čas, po který bude součást řezána. U materiálů X5CrNi18-10 vůči ENAW 5083 je poměr těchto časů roven hodnotě blíží se 2,5,
- složitost tvaru součásti nemá vliv na průměrnou hodnotu rychlost řezu,
- se zvyšující se tloušťkou materiálu se zvyšuje čas potřebný pro vyříznutí součásti téměř lineárně.

### 3.4 Ustavení polotovaru v zařízení Mach 4c a výsledné výřezky

Po nastavení všech parametrů řezu zbývá pouze ustavit polotovaru do zařízení Mach 4c a spustit proces řezání. Polotovaru je na ocelový rošt pouze položen, nebo je možné jej zatížit například pomocí závaží. Příklad ustavení polotovaru je zobrazen na obr. 3.11.



Obr. 3.11 Ustavení polotovaru na zařízení Mach 4c.

Po dokončení řezného procesu a manuálním oddělení výřezku od polotovaru bylo u vzorků kolečko a obdélník AWAC nutné odstranit pozůstatek po můstcích. Třetí typ výřezku s názvem turbína můstky neobsahoval. Výřezky jsou zobrazeny na obr. 3.12 až obr. 3.13.



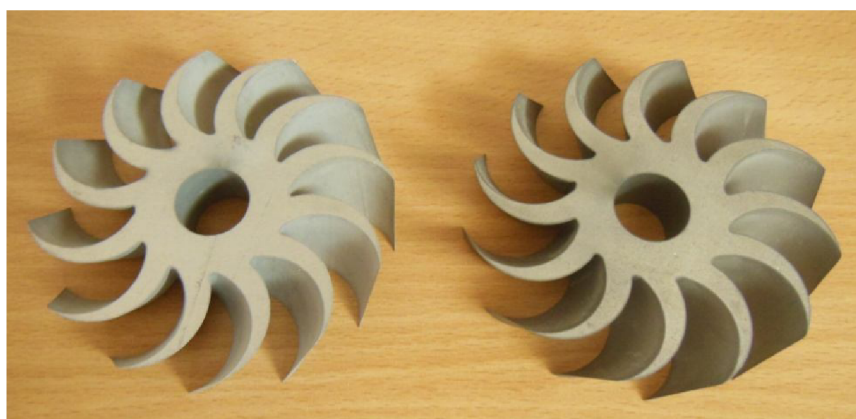
Obr. 3.12 Vzorek kolečko s pozůstatky můstků.



Obr. 3.13 Vzorek kolečko po manuálním odstranění můstků.



Obr. 3.14 Vzorek obdélník AWAC po manuálním odstranění můstků.



Obr. 3.15 Vzorek turbína.

## 4 VYHODNOCENÍ ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ PŘESNOSTI VZORKŮ OBRÁBĚNÝCH VE 3D

V této kapitole budou detailně rozebrány vyřezané vzorky z hlediska rozměrové a tvarové přesnosti. Měření byla provedena na stroji Mitutoyo Crysta-Plus M544, na kterém byla vyhodnocována rozměrová a geometrická přesnost. Hodnoty drsnosti Ra a Rz byly měřeny na zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM.

### 4.1 Stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544

Stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544, který je zobrazen na obr. 4.1, je výkonný manuální 3-D souřadnicový měřicí stroj. Ve spolupráci se softwarem, kterým je aktuálně MCOSMOS MiCAT, jež je standardním vybavením stroje, je možné měřit jakýkoliv 3D tvar bez ohledu na jeho tvarovou složitost. Jediným omezujícím faktorem se tak stává pouze velikost snímacího doteku. Mezi základní obecné vlastnosti stroje patří<sup>47</sup>:

- odchylka při délkovém měření 3,5  $\mu\text{m}$ ,
- přesná, proti prachu chráněná skleněná odměřovací pravítka s rozlišením 0,5  $\mu\text{m}$ ,
- bílé LED osvětlení pracovní plochy,
- navádění uživatele v podobě mluveného výstupu z programu,
- samoseřizovací vzduchová ložiska na všech osách,
- integrovaná čidla teplotní kompenzace pro stroj a dílec v rozsahu od 16°C do 26°C,
- design stroje vyvinut s ohledem na tlumení chvění.



Obr. 4.1 Stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544<sup>48</sup>.



V tab. 4.1 jsou vypsány rozsahy stroje Mitutoyo Crysta-Plus M544.

Tab. 4.1 Rozsahy stroje Mitutoyo Crysta-Plus M544<sup>47</sup>.

<b>Měřicí rozsah</b>	Osa X	500 mm
	Osa Y	400 mm
	Osa Z	400 mm
<b>Měřený dílec</b>	Max. výška	510 mm
	Max. váha	180 kg
<b>Možnost upnutí dílce</b>	Počet závitů M8	9
<b>Délková odchylka měření</b>	ISO 10360-2 (20°C±1°C)	$MPE_E = (3,5 + 0,45L/100) \mu\text{m}$
<b>Chyba sondy</b>	ISO 10360-2	$MPE_p = 4 \mu\text{m}$
<b>Přípustná okolní teplota</b>		16°C - 26°C
<b>Kolísání teploty</b>		max. 2,0 K/h
	vertikálně a horizontálně	max 1,0 K/m
<b>Měřicí systém</b>	Rozlišení	0,5 $\mu\text{m}$
<b>Vodítka</b>		Vzduchová ložiska ve všech osách
<b>Aretace os</b>		Vzduchová rychloaretace na všech osách
<b>Měřicí stůl</b>	Materiál	Granit
	Rozměry	638 mm x 860 mm
<b>Požadavky na vzduch</b>	Spotřeba/Tlak vzduchu	12,5 l/min.; 0,4 MPa
	Dodávaný vzduch	25 l/min.; 0,5MPa - 0,9 MPa
<b>Rozměry</b>	Šířka	1082 mm
	Délka	1078 mm
	Výška	2285 mm
<b>Hmotnost stroje</b>	Včetně podstavce	495 kg

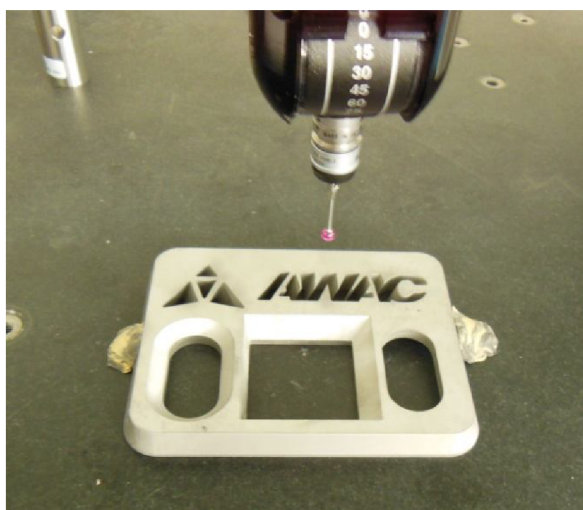
Uvedená přesnost stroje je založena na použití měřicího systému TP20 s dotekem.

#### 4.2 Postup měření a vyhodnocení vzorků na stroji Mitutoyo Crysta-Plus M544

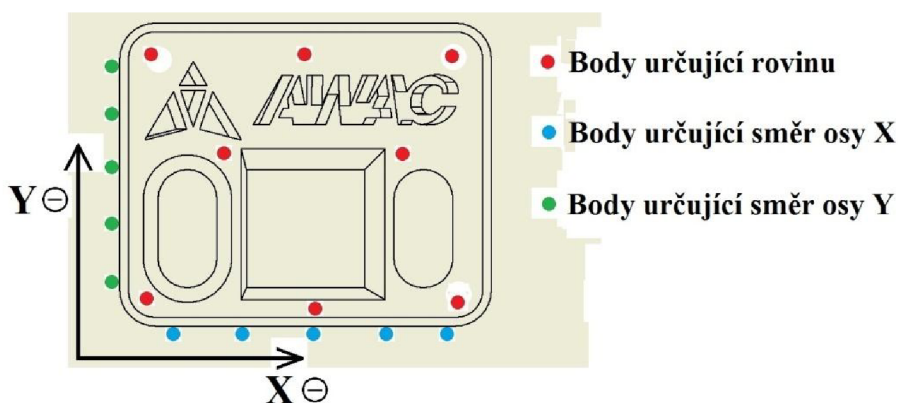
Stroj Mitutoyo Crysta-Plus M544, kterým je škola vybavena obsahuje starší verzi softwaru, který umožňuje měřit pouze ve 2D a je tak možné měřit jen omezený počet tvarů. U každé součásti byly změřeny pouze některé rozměry, které v měřítku rozšířeném na všechny měřené vzorky dávají dostatečné množství informací o dosahované rozměrové a geometrické přesnosti.

Před samotným měřením jednotlivých vzorků bylo nutné provést několik úkonů:

- vytvořit v softwaru program pro měření jednotlivých parametrů,
- ustavit vzorek na základní desku. Vzhledem k tomu, že při měření působí na vzorek jen minimální síly, stačila k zafixování modelína. Zobrazení ustaveného vzorku na základní desce je zobrazeno na obr. 4.2,
- definovat souřadný systém XY, který vzhledem k faktu, že jde pouze o 2D měření byl definován tak, že byla nejprve pomocí 8 bodů libovolně umístěných na vrchní straně vzorku vytvořena rovina a poté vždy pomocí 5 bodů určena orientace osy X a osy Y. Příklad polohy bodů určujících souřadný systém je zobrazený na obr. 4.3,
- posledním krokem bylo již samotné měření dle individuálního programu.



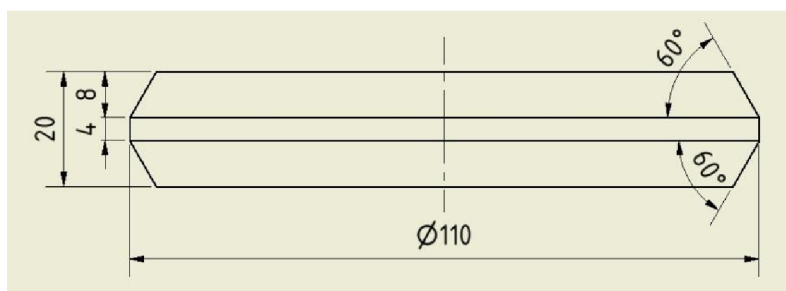
Obr. 4.2 Ustavení vzorku na základní desce.



Obr. 4.3 Příklad polohy bodů určujících souřadný systém.

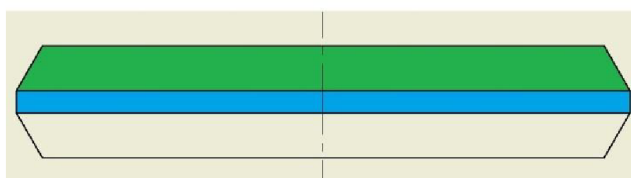
#### 4.2.1 Výsledky měření vzorku kolečko

Na obrázku 4.4 je zobrazen bokorys vzorku kolečko doplněný o základní kóty.



Obr. 4.4 Vzorek kolečko doplněný o základní kóty.

Na obr. 4.5 jsou zvýrazněny plochy, které byly podrobeny měření rozměrové a tvarové přesnosti.



Obr. 4.5 Zvýraznění měřených ploch.

Modrá plocha byla podrobena měření rozměrové přesnosti a velikosti úchytky kruhovitosti.

Zelená a bílá plocha byly podrobena měření kruhovitosti a měření velikosti úhlu, který svírá se základní rovinou.

V tab. 4.2 jsou vypsány výsledky měření vzorku kolečko pro oba materiály.

Tab. 4.2 Výsledky měření vzorku kolečko.

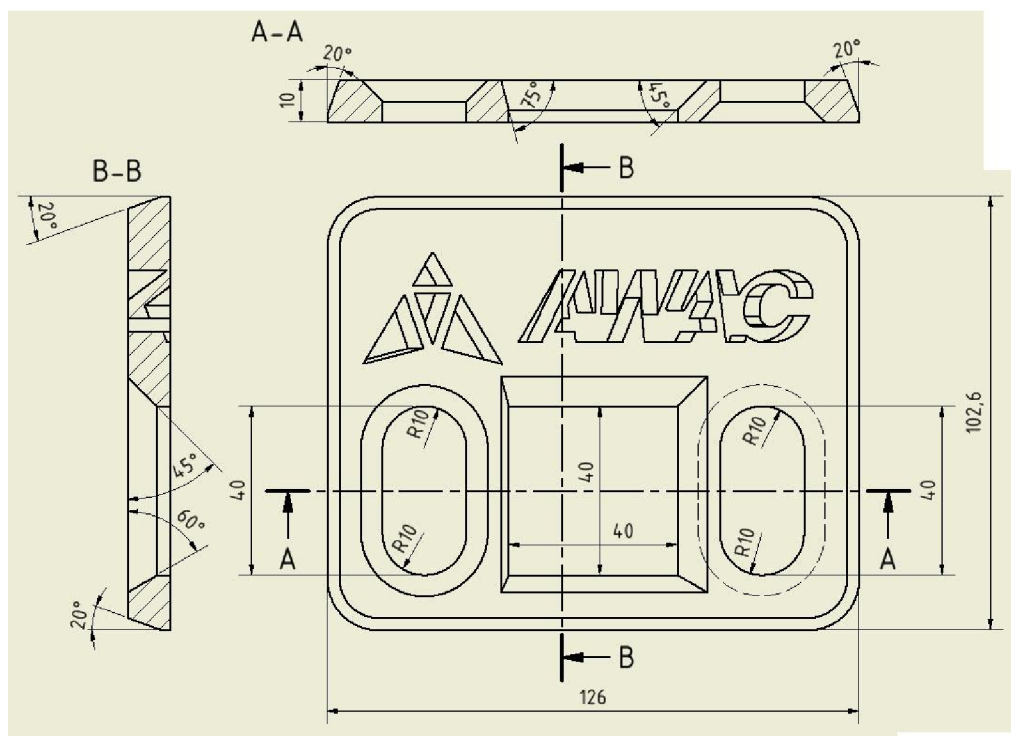
Vzorek kolečko	Materiál	
	Ocel X5CrNi18-10	ENAW 5083
Velikost Ø110	109,835 mm	109,760 mm
Kruhovitost Ø110	0,133 mm	0,063 mm
Kuželovitost (zelená)	0,145 mm	0,052 mm
Velikost úhlu 60° (zelená)	59,827°	59,475°
Kuželovitost (bílá)	0,092 mm	0,111 mm
Velikost úhlu 60° (bílá)	61,793°	61,036°

Protokoly z měření vzorku kolečko jsou vloženy do práce jako příloha 1, příloha 2, příloha 3, příloha 4, příloha 5 a příloha 6.



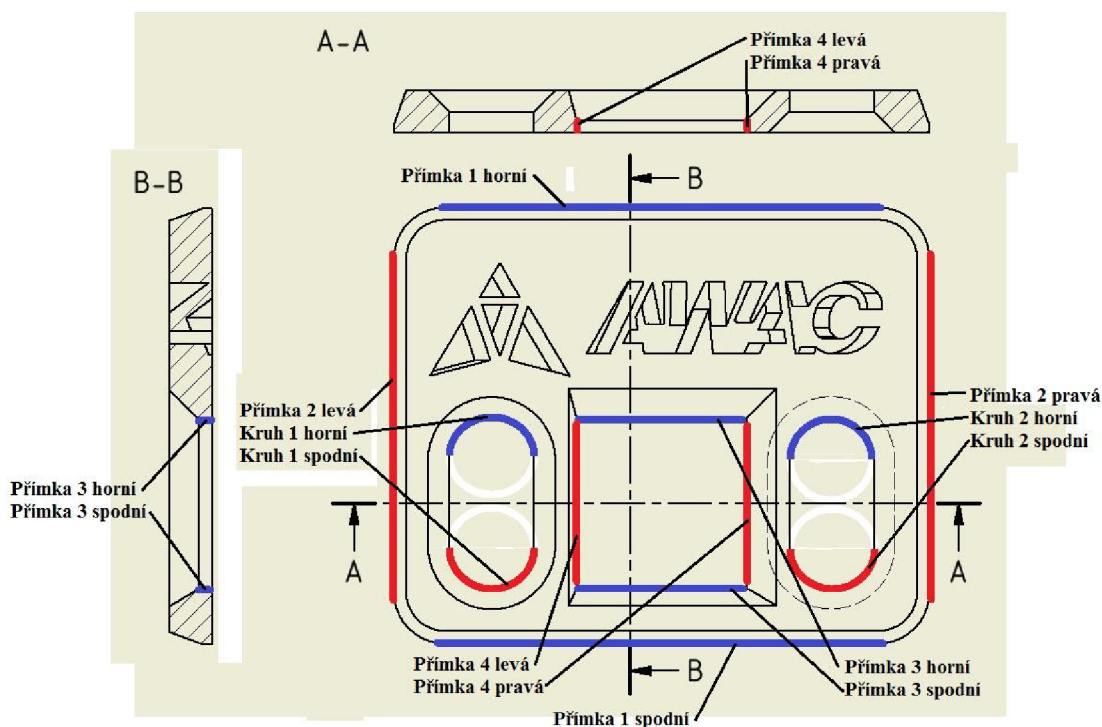
#### 4.2.2 Výsledky měření vzorku obdélník AWAC

Na obr. 4.6 jsou zakótované měřené rozměry vzorku obdélník AWAC.



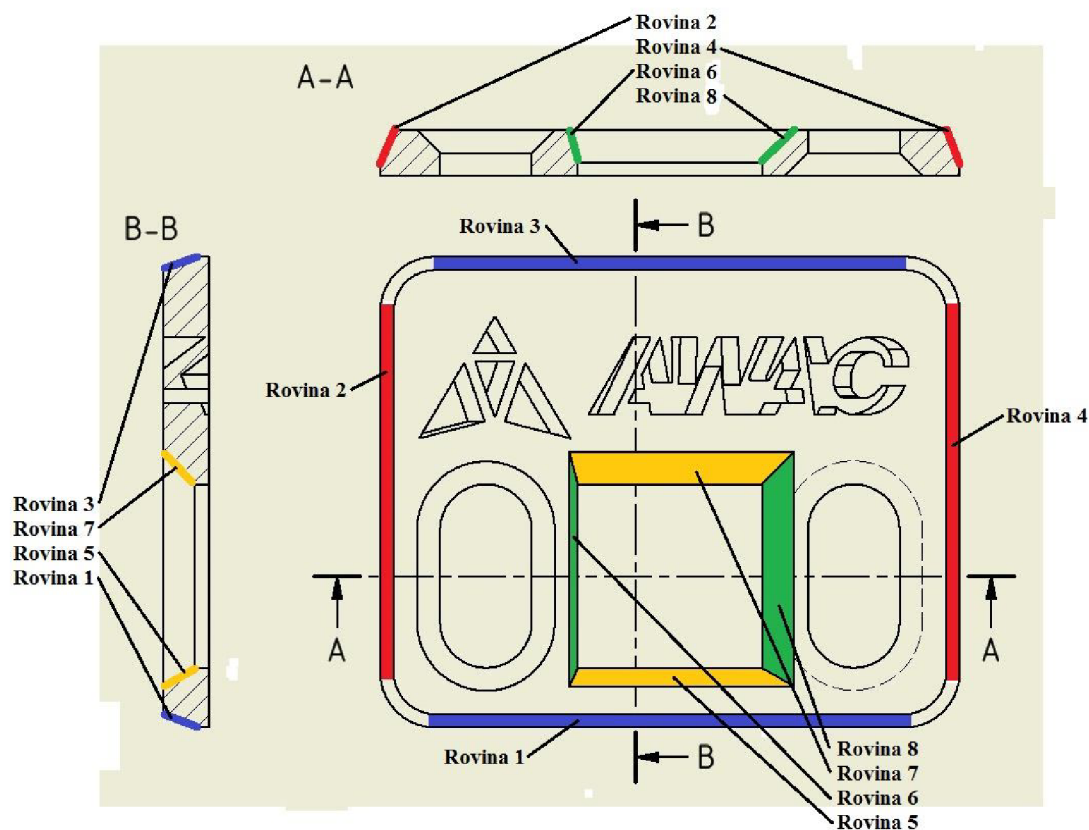
Obr. 4.6 Zakótované měřené rozměry vzorku obdélník AWAC.

Na obr. 4.7 jsou zvýrazněny a popsány jednotlivé elementy, které byly podrobeny měření rozměrové přesnosti a geometrických úchylek kruovitosti a přímosti.



Obr. 4.7 Zvýraznění a popis jednotlivých elementů.

Na obr. 4.8 jsou zvýrazněny a popsány plochy, které byly podrobeny měření úhlů a rovinnosti.



Obr. 4.8 Zvýraznění a popis rovin, které byly podrobeny měření úhlů a rovinnosti.

V tab. 4.3 jsou vypsány výsledky měření vzorku obdélník AWAC, které se vztahují k parametrům označeným na obr. 4.7. Jedná se o rozměry délek a rádiusů, úchylky kruhovitosti a přímosti.

V tab. 4.4 jsou vypsány výsledky měření vzorku obdélníku AWAC, které se vztahují k parametrům označeným na obr. 4.8. Jedná se o velikosti úhlů a úchylek rovinnosti.

Tab. 4.3 Výsledky měření vzorku obdélník AWAC zaměřené na rozměry dělek a poloměrů, úchytky kruhovitosti a přímosti.

Vzorek obdélník AWAC	Materiál	
	Ocel X5CrNi18-10	ENAW 5083
Kruh 1 horní - velikost	Ø 20,054 mm	Ø 20,288 mm
Kruh 1 horní - kruhovitost	0,006 mm	0,009 mm
Kruh 1 spodní - velikost	Ø 20,008 mm	Ø 20,316 mm
Kruh 1 spodní - kruhovitost	0,052 mm	0,023 mm
Délka drážky s rádiusy levá	40,062 mm	40,281 mm
Kruh 2 horní - velikost	Ø 20,100 mm	Ø 20,117 mm
Kruh 2 horní - kruhovitost	0,022 mm	0,007 mm
Kruh 2 spodní - velikost	Ø 20,080 mm	Ø 20,152 mm
Kruh 2 spodní - kruhovitost	0,021 mm	0,016 mm
Délka drážky s rádiusy pravá	40,075 mm	40,152 mm
Přímka 1 spodní – přímost	0,032 mm	0,002 mm
Přímka 1 horní – přímost	0,020 mm	0,006 mm
Délka 102,6 – velikost	102,525 mm	102,447 mm
Přímka 2 pravá – přímost	0,064 mm	0,019 mm
Přímka 2 levá – přímost	0,007 mm	0,032 mm
Délka 126 – velikost	125,903 mm	125,749 mm
Přímka 3 horní – přímost	0,014 mm	0,015 mm
Přímka 3 spodní – přímost	0,006 mm	0,005 mm
Vzdálenost přímek 3	40,057 mm	40,142 mm
Přímka 4 pravá – přímost	0,012 mm	0,027 mm
Přímka 4 levá – přímost	0,002 mm	0,025 mm
Vzdálenost přímek 4	40,078 mm	40,136 mm

Tab. 4.4 Výsledky měření vzorku obdélník AWAC zaměřené na velikosti úhlů a úchylek rovinnosti.

Vzorek obdélník AWAC	Materiál	
	Ocel X5CrNi18-10	ENAW 5083
Rovina 1 – úhel	20,067°	19,935°
Rovina 1 - rovinnost	0,004 mm	0,023 mm
Rovina 2 – úhel	20,043°	19,693°
Rovina 2 - rovinnost	0,044 mm	0,017 mm
Rovina 3 – úhel	20,651°	19,670°
Rovina 3 - rovinnost	0,074 mm	0,024 mm
Rovina 4 – úhel	20,344°	20,033°
Rovina 4 - rovinnost	0,020 mm	0,012 mm
Rovina 5 – úhel	59,870°	60,316°
Rovina 5 - rovinnost	0,019 mm	0,038 mm
Rovina 6 – úhel	74,939°	75,191°
Rovina 6 - rovinnost	0,047 mm	0,044 mm
Rovina 7 – úhel	44,947°	45,283°
Rovina 7 - rovinnost	0,055 mm	0,033 mm
Rovina 8 – úhel	44,848°	45,407°
Rovina 8 - rovinnost	0,032 mm	0,036 mm

Protokoly z měření vzorku obdélník AWAC jsou vloženy do práce jako příloha 7, příloha 8, příloha 9, příloha 10 a příloha 11.

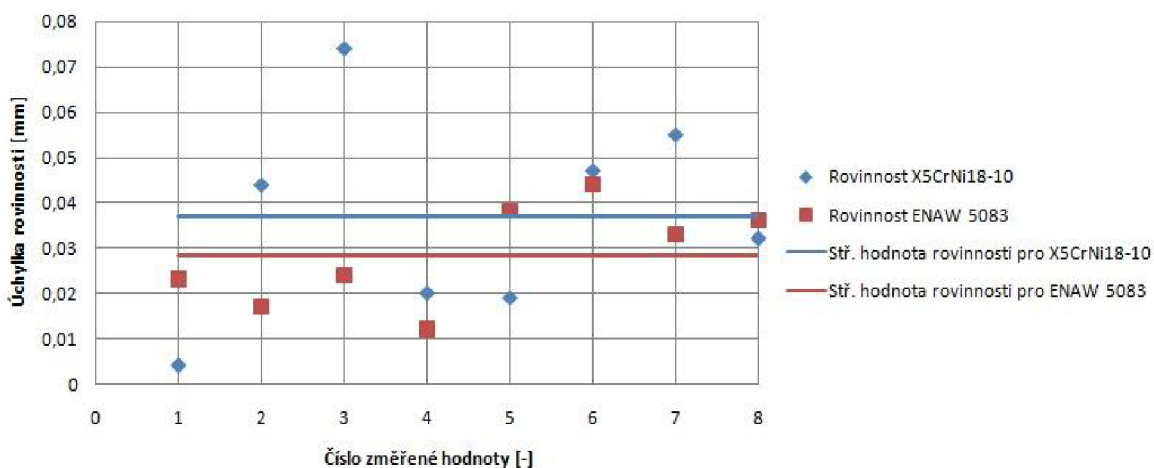
Na obr. 4.9 až 4.11 jsou zobrazeny grafy, ve kterých jsou porovnávány úchyly rovinnosti, přímosti a kruhovitosti pro jednotlivé materiály. V každém grafu jsou vypočítány střední hodnoty jednotlivých úchylek dle vztahu 4.1.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

kde:

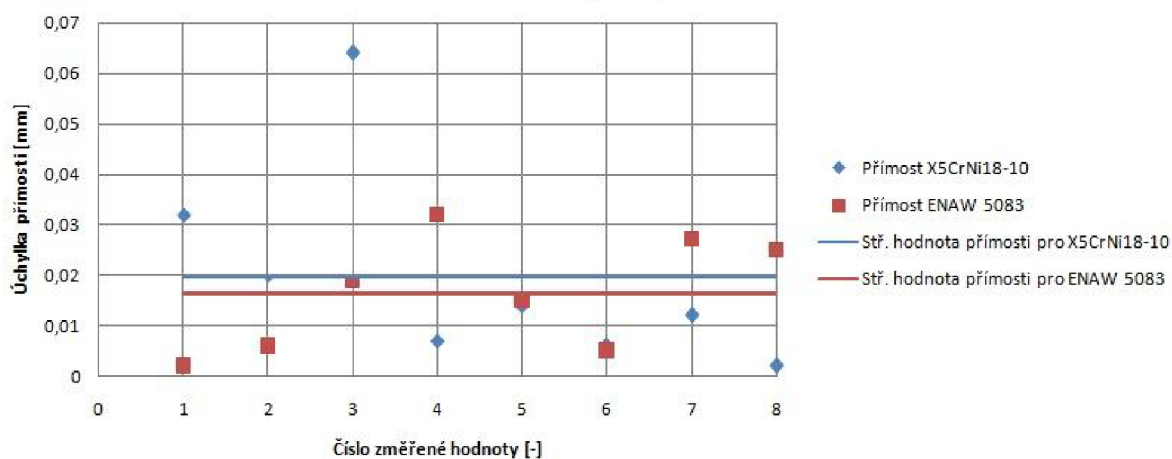
- n - celkový počet prvků,
- $x_i$  - hodnota jednotlivých prvků.

### Porovnání úchylek rovinnosti



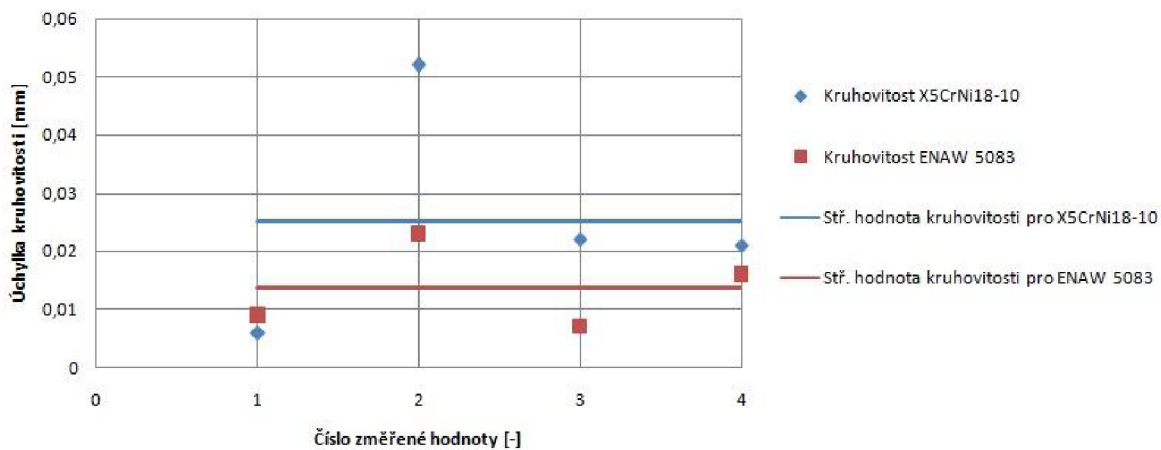
Obr. 4.9 Graf porovnání úchylek rovinnosti pro vzorek obdélník AWAC.

### Porovnání úchylek přímosti



Obr. 4.10 Graf porovnání úchylek přímosti pro vzorek obdélník AWAC.

### Porovnání úchylek kruhovitosti



Obr. 4.11 Graf porovnání úchylek kruhovitosti pro vzorek obdélník AWAC.

Grafy byly vytvořeny dle výsledků měření z tab. 4.3 a tab. 4.4 selekcí jednotlivých úchylek. Pro každou úchylku a materiál byla vypočtena dle vzorce 4.1 velikost střední hodnoty, která poslouží jako srovnávací parametr při výsledném porovnání.

Výpočet středních hodnot úchylek rovinnosti:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} \times (0,004 + 0,044 + 0,074 + 0,020 + 0,019 + 0,047 + 0,055 + 0,032) = 0,037 \text{ mm} \quad (4.2)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} \times (0,023 + 0,017 + 0,024 + 0,012 + 0,038 + 0,044 + 0,033 + 0,036) = 0,028 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Výpočet středních hodnot úchylek přímosti:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} \times (0,032 + 0,020 + 0,064 + 0,007 + 0,014 + 0,006 + 0,012 + 0,002) = 0,020 \text{ mm} \quad (4.4)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{8} \times (0,002 + 0,006 + 0,019 + 0,032 + 0,015 + 0,005 + 0,027 + 0,025) = 0,016 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Výpočet středních hodnot úchylek kruhovitosti:

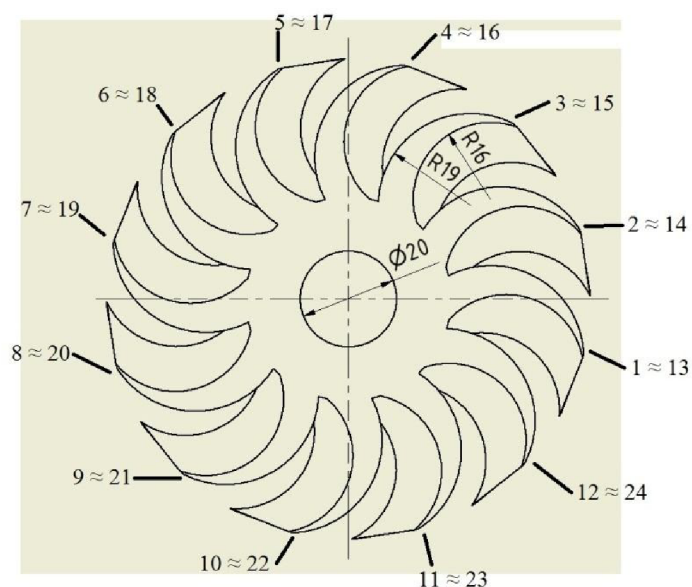
$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{4} \times (0,006 + 0,052 + 0,022 + 0,021) = 0,025 \text{ mm} \quad (4.6)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{4} \times (0,009 + 0,023 + 0,007 + 0,016) = 0,014 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Z grafů a vypočtených hodnot je zřejmé, že lepších hodnot geometrických přesností je dosahováno u materiálu ENAW 5083.

#### 4.2.3 Výsledky měření vzorku turbína

Vzhledem k charakteru vzorku turbína a možnostem měřicího zařízení bylo možno změřit pouze průměr středové díry, úchylku její válcovitosti a kruhovitosti profilu jednotlivých lopatek. Na obr. 4.12 je zobrazen vzorek turbína se zakótovanými měřenými hodnotami. Byly zde také očíslovány jednotlivé lopatky a to čísla od 1 do 24. Hodnoty 1 až 12 odpovídají R16 a čísla 13 až 24 odpovídají R19.



Obr. 4.12 Vzorek turbína s kótami měřených elementů.

V tab. 4.5 jsou vypsány výsledky měření vzorku turbína.

Tab. 4.5 Výsledky měření vzorku turbína.

Vzorek turbína	Materiál	
	Ocel X5CrNi18-10	ENAW 5083
Lopatka č. 1 - velikost	Ø 32,321 mm	Ø 32,305 mm
Lopatka č. 2 - velikost	Ø 32,237 mm	Ø 32,271 mm
Lopatka č. 3 - velikost	Ø 32,344 mm	Ø 32,281 mm
Lopatka č. 4 - velikost	Ø 32,319 mm	Ø 32,281 mm
Lopatka č. 5 - velikost	Ø 32,286 mm	-----
Lopatka č. 6 - velikost	Ø 32,376 mm	Ø 32,427 mm
Lopatka č. 7 - velikost	Ø 32,267 mm	Ø 32,360 mm
Lopatka č. 8 - velikost	Ø 32,007 mm	Ø 32,156 mm
Lopatka č. 9 - velikost	Ø 32,300 mm	Ø 32,413 mm
Lopatka č. 10 - velikost	Ø 32,327 mm	Ø 32,178 mm
Lopatka č. 11 - velikost	Ø 32,300 mm	Ø 32,181 mm
Lopatka č. 12 - velikost	Ø 32,311 mm	Ø 32,311 mm



Lopatka č. 1 - kruhovitost	0,030 mm	0,021 mm
Lopatka č. 2 - kruhovitost	0,017 mm	0,021 mm
Lopatka č. 3 - kruhovitost	0,017 mm	0,017 mm
Lopatka č. 4 - kruhovitost	0,030 mm	0,010 mm
Lopatka č. 5 - kruhovitost	0,014 mm	-----
Lopatka č. 6 - kruhovitost	0,029 mm	0,027 mm
Lopatka č. 7 - kruhovitost	0,033 mm	0,019 mm
Lopatka č. 8 - kruhovitost	0,045 mm	0,022 mm
Lopatka č. 9 - kruhovitost	0,024 mm	0,038 mm
Lopatka č. 10 - kruhovitost	0,030 mm	0,025 mm
Lopatka č. 11 - kruhovitost	0,011 mm	0,036 mm
Lopatka č. 12 - kruhovitost	0,015 mm	0,023 mm
Lopatka č. 13 - velikost	Ø 37,942 mm	Ø 37,789 mm
Lopatka č. 14 - velikost	Ø 37,959 mm	Ø 38,002 mm
Lopatka č. 15 - velikost	Ø 37,915 mm	Ø 37,899 mm
Lopatka č. 16 - velikost	Ø 38,126 mm	Ø 37,982 mm
Lopatka č. 17 - velikost	Ø 38,230 mm	Ø 37,975 mm
Lopatka č. 18 - velikost	Ø 37, 956 mm	Ø 37,775 mm
Lopatka č. 19 - velikost	Ø 38,043 mm	Ø 37,825 mm
Lopatka č. 20 - velikost	Ø 38,081 mm	Ø 37,888 mm
Lopatka č. 21 - velikost	Ø 38,112 mm	Ø 37,115 mm
Lopatka č. 22 - velikost	Ø 38,135 mm	Ø 37,998 mm
Lopatka č. 23 - velikost	Ø 37,887 mm	Ø 37,899 mm
Lopatka č. 24 - velikost	Ø 37,954 mm	Ø 37,869 mm
Lopatka č. 13 - kruhovitost	0,015 mm	0,021 mm

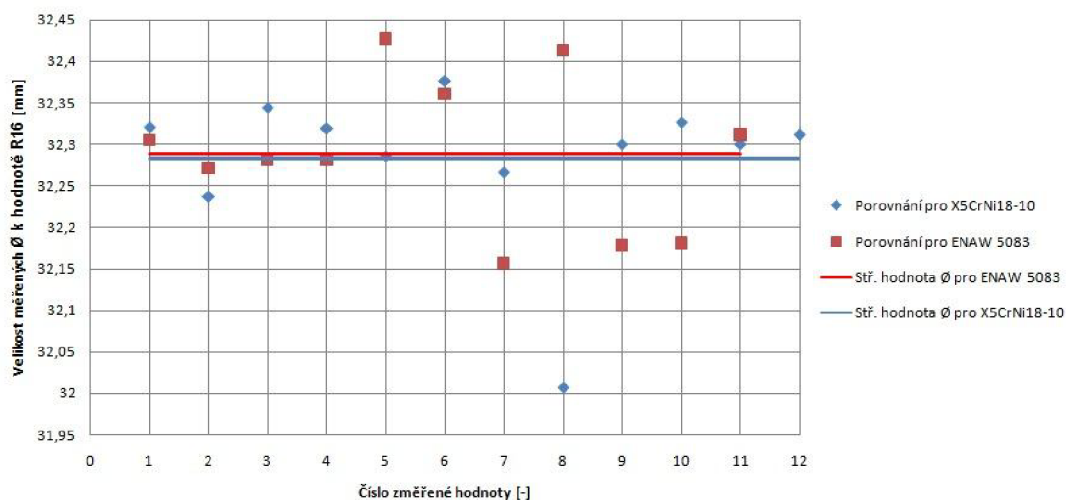


Lopatka č. 14 - kruhovitost	0,002 mm	0,045 mm
Lopatka č. 15 - kruhovitost	0,021 mm	0,018 mm
Lopatka č. 16 - kruhovitost	0,028 mm	0,007 mm
Lopatka č. 17 - kruhovitost	0,021 mm	0,015 mm
Lopatka č. 18 - kruhovitost	0,010 mm	0,012 mm
Lopatka č. 19 - kruhovitost	0,015 mm	0,031 mm
Lopatka č. 20 - kruhovitost	0,028 mm	0,031 mm
Lopatka č. 21 - kruhovitost	0,022 mm	0,022 mm
Lopatka č. 22 - kruhovitost	0,015 mm	0,022 mm
Lopatka č. 23 - kruhovitost	0,018 mm	0,015 mm
Lopatka č. 24 - kruhovitost	0,020 mm	0,018 mm
Ø 20 – velikost	Ø 20,098 mm	Ø 20,125 mm
Ø 20 - válcovitost	0,090 mm	0,038 mm

Protokoly z měření vzorku turbína jsou vloženy do práce jako příloha 12 a příloha 13.

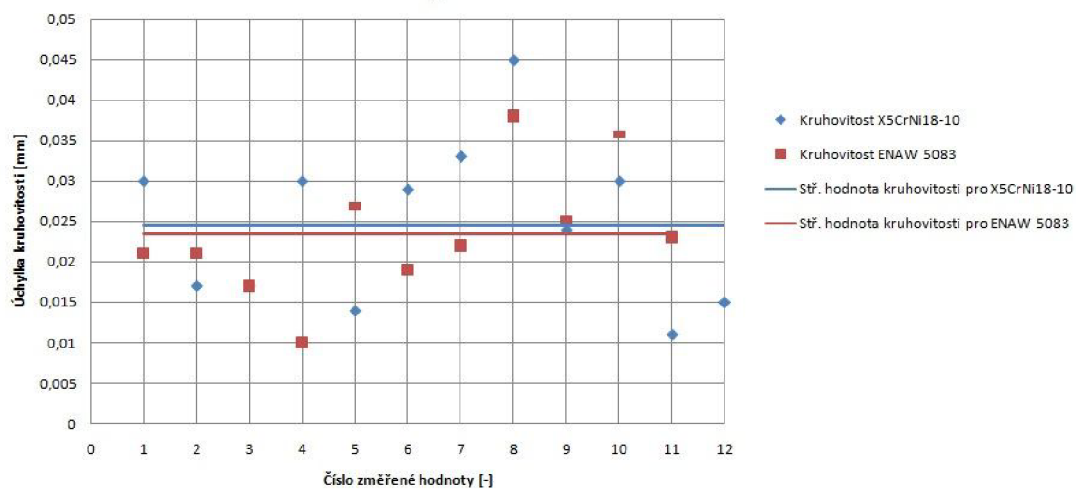
Na obr. 4.13 až 4.16 jsou zobrazeny grafy, ve kterých jsou porovnávány rozměrové přesnosti a úchytky kruhovitosti pro jednotlivé hodnoty rádiusů a pro jednotlivé materiály. V každém grafu jsou vypočítány střední hodnoty úchytky kruhovitosti a rozměrové přesnosti dle vztahu 4.1, které poslouží jako srovnávací parametr při výsledném porovnání.

**Porovnání velikosti měřených Ø k hodnotě R16**

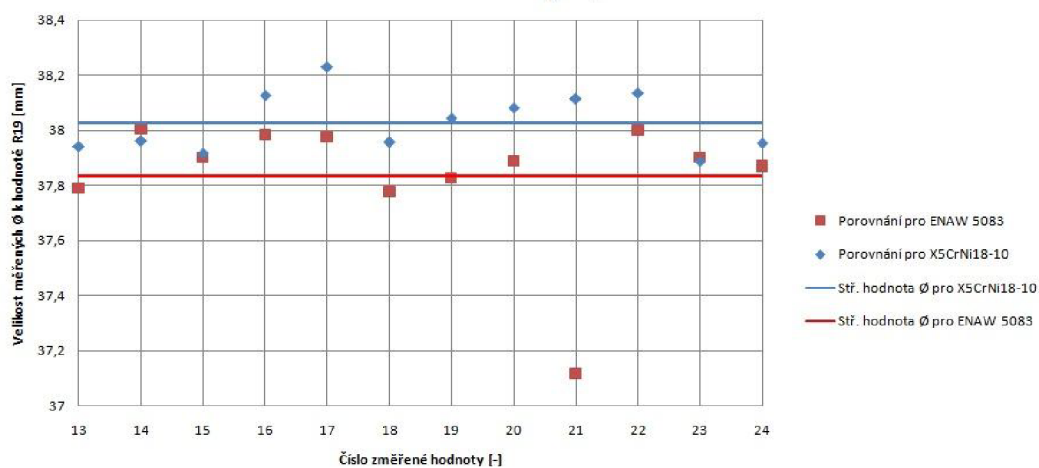


Obr. 4.13 Graf porovnání velikosti měřených Ø k hodnotě R16.

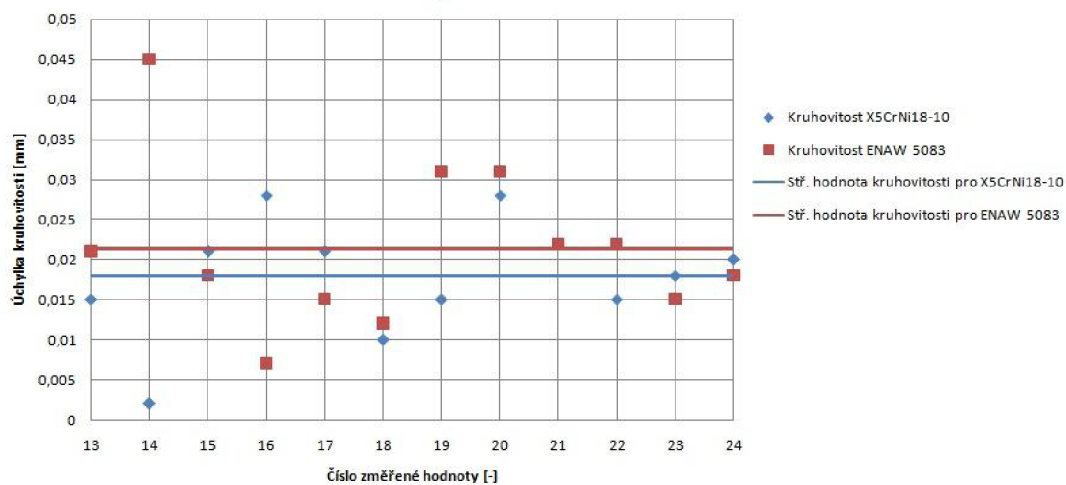
Porovnání úchylek kruhovitosti k hodnotě R16



Obr. 4.14 Graf porovnání úchylek kruhovitosti k hodnotě R16.

Porovnání velikosti měřených  $\varnothing$  k hodnotě R19Obr. 4.15 Graf porovnání velikosti měřených  $\varnothing$  k hodnotě R19.

Porovnání úchylek kruhovitosti k hodnotě R19



Obr. 4.16 Graf porovnání úchylek kruhovitosti k hodnotě R19.

Výpočet středních hodnot měřených  $\bar{O}$  k hodnotě R16:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (32,321 + 32,237 + 32,344 + 32,319 + 32,286 + 32,376 + 32,267 + 32,007 + 32,300 + 32,327 + 32,300 + 32,311) = 32,283 \text{ mm} \quad (4.8)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (32,305 + 32,271 + 32,281 + 32,281 + 32,427 + 32,360 + 32,156 + 32,413 + 32,178 + 32,181 + 32,311) = 32,388 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Výpočet středních hodnot úchylek kruhovitosti k hodnotě R16:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (0,030 + 0,017 + 0,017 + 0,030 + 0,014 + 0,029 + 0,033 + 0,045 + 0,024 + 0,030 + 0,011 + 0,015) = 0,025 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{11} \times (0,021 + 0,021 + 0,017 + 0,010 + 0,027 + 0,019 + 0,022 + 0,038 + 0,025 + 0,036 + 0,023) = 0,024 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Výpočet středních hodnot měřených  $\bar{O}$  k hodnotě R19:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (37,942 + 37,959 + 37,915 + 38,126 + 38,23 + 37,956 + 38,043 + 38,081 + 38,112 + 38,135 + 37,887 + 37,954) = 38,028 \text{ mm} \quad (4.12)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (37,789 + 38,002 + 37,899 + 37,982 + 37,975 + 37,775 + 37,825 + 37,888 + 37,115 + 37,998 + 37,899 + 37,869) = 37,835 \text{ mm} \quad (4.13)$$

Výpočet středních hodnot úchylek kruhovitosti k hodnotě R19:

$$\bullet \quad \overline{x_{X5CrNi18-10}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (0,015 + 0,002 + 0,021 + 0,028 + 0,021 + 0,010 + 0,015 + 0,028 + 0,022 + 0,015 + 0,018 + 0,020) = 0,018 \text{ mm} \quad (4.14)$$

$$\bullet \quad \overline{x_{ENAW 5083}} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{12} \times (0,021 + 0,045 + 0,018 + 0,007 + 0,015 + 0,012 + 0,031 + 0,031 + 0,022 + 0,022 + 0,015 + 0,018) = 0,021 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Z grafů a vypočtených hodnot bylo dosaženo následujících výsledků:

- u hodnoty R16 je rozměrová přesnost pouze nepatrně přesnější u vzorku z materiálu X5CrNi18-10,
- u hodnoty R16 je hodnota kruhovitosti přesnější u vzorku z materiálu ENAW 5083,
- u hodnoty R19 je rozměrová přesnost přesnější u vzorku z materiálu X5CrNi18-10,
- u hodnoty R19 je hodnota kruhovitosti přesnější u vzorku z materiálu X5CrNi18-10.

### 4.3 Zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM

Pomocí zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM, které je zobrazeno na obr. 4.17 byly měřeny hodnoty drsnosti vnějších rovinných ploch, které byly řezány abrazivním vodním paprskem. Zařízení disponuje následujícími vlastnostmi a parametry<sup>49,50</sup>:

- měřicí rozsah do 150  $\mu\text{m}$ ,
- jednotky  $\mu\text{m}/\mu\text{inch}$  volitelně,
- normy: DIN/ISO/JIS a ASME volitelně,
- délka měřicí dráhy dle DIN EN ISO 4288: 1,75 mm; 5,6 mm; 17,5 mm,
- délka měřicí dráhy dle EN ISO 12085: 1 mm; 2 mm; 4 mm; 8 mm; 12 mm; 16 mm,
- počet měřených drah: volitelně 1 až 5,
- automatická volba filtru a měřené dráhy,
- vyhodnocované parametry dle DIN/ISO/SER: Ra, Rz, Rmax, Rp, Rq, Rt, R3z, Rk, Rvk, Rpk, Mr1, Mr2, Mr, Sm,
- znázornění překročené tolerance na displeji včetně záznamu měření,
- automatické nebo manuální nastavení stupnice,
- tisk R-profilu (ISO/JIS) P-profilu a záznam měření,
- integrovaná paměť pro 200 měření,
- dynamické fce pro kalibraci,
- možnost uzamčení nastavení přístroje s možností použití hesla,
- možnost výběru jazyka: angličtina, němčina, francouzština, italština, španělština, portugalština, švédština, čeština, polština, ruština, japonština, čínština, korejšťina a holandsťina,
- rychlost pojezdu: 0,5 mm/s,
- měřicí rozsah teplot: 5°C - 40°C,
- relativní vlhkost: 30% - 85%,
- hmotnost: 0,9kg,
- rozměry: délka x šířka x výška – 190 mm x 170 mm x 75mm,
- směr měření: podélný.



Obr. 4.17 Zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM.

#### 4.4 Postup měření a vyhodnocení vzorků na zařízení MAHR Perthometr M2 s posuvovou jednotkou PFM

Postup měření na zařízení MAHR Perthrometer M2 s posuvovou jednotkou PFM je možné shrnout do několika bodů:

- zapnout přístroj do el. sítě a stisknout tlačítko „START“ na Perthometru M2,
- umístit měřený vzorek pod snímač posuvového přístroje PFM a sjet snímačem na takovou vzdálenost, aby byl dotek zatížen přibližně na 50%,
- tlačítkem „Lt/Lc“ nastavit vhodnou hodnotu cut-off dle ČSN EN ISO 4287, jejíž hodnoty jsou vypsány v tab. 4.6,
- k provedení měření stisknout tlačítko „START“.

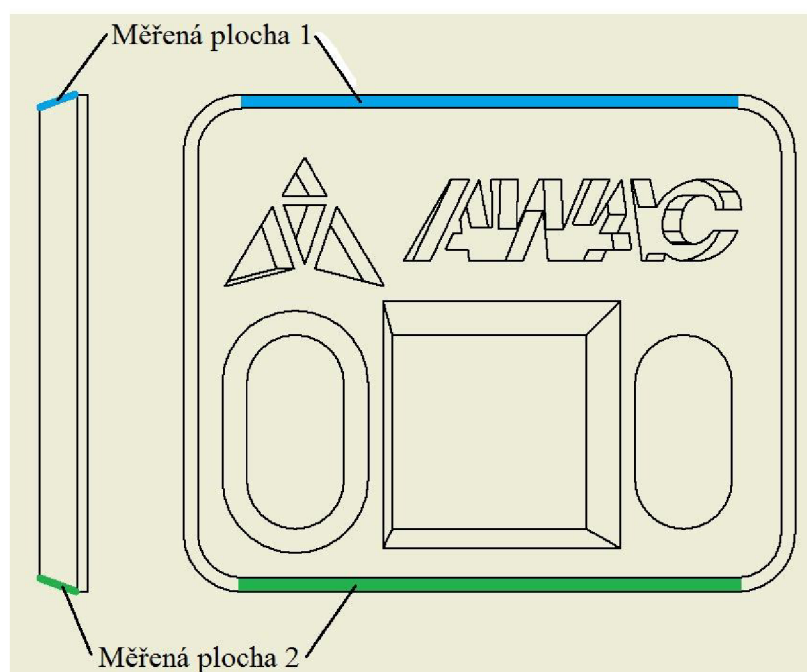
Tab. 4.6 Určení hodnoty cutoff dle normy DIN EN ISO 4288<sup>51</sup>.

Periodické profily	Aperiodické profily		Cutoff	Dílčí měřicí délka
	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Celková měřicí délka
Sm [mm]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda_C$ [mm]	Ir [mm] Im [mm] (při n=5)
$Sm \leq 0,13$	$Rz \leq 0,5$	$Ra \leq 0,1$	0,25	0,25 1,25
$0,13 < Sm \leq 0,4$	$0,5 < Rz \leq 10$	$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	0,8 4
$0,4 < Sm$	$10 < Rz$	$2 < Ra$	2,5	2,5 12,5

Jako první byla odhadnuta velikost průměrné aritmetické úchylky Ra. Protože byla hodnota odhadu vyšší než 2, byla určena celková měřicí délka  $l_m = 12,5$  mm, která se skládá z 5 dílčích měření, ze kterých se vypočítá průměrná hodnota. Celková délka pojezdu je složena ze 7 dílčích kroků, z nichž 5 je měřících a 2 slouží pro nájezd a výjezd. Do přístroje byla zadávána celková hodnota pojezdu 17,5 mm.

Na obr. 4.18 je zobrazen vzorek obdélník AWAC, na kterém byly měřeny hodnoty drsností. Konkrétní plochy, na kterých byla drsnost měřena, jsou zvýrazněny.

Vzhledem k možnostem měřicího přístroje bylo nutné, aby vybrané plochy, na kterých bylo provedeno měření, byly vnější a rovinné. Z tohoto důvodu byly jako reprezentativní vybrány právě tyto dvě plochy na vzorku obdélník AWAC.



Obr. 4.18 Znárodnění vybraných ploch, na kterých bylo provedeno měření drsnosti.

V tab. 4.7 jsou vypsány změřené hodnoty Ra a Rz pro vybrané plochy.

Tab. 4.7 Hodnoty drsnosti Ra a Rz.

Vzorek obdélník AWAC	Materiál	
	Ocel X5CrNi18-10	ENAW 5083
Měřený parametr		
Plocha 1 - Ra	4,925 $\mu\text{m}$	6,178 $\mu\text{m}$
Plocha 1 - Rz	31,5 $\mu\text{m}$	43,2 $\mu\text{m}$
Plocha 2 - Ra	3,317 $\mu\text{m}$	5,236 $\mu\text{m}$
Plocha 2 - Rz	22,9 $\mu\text{m}$	37,5 $\mu\text{m}$

Z tab. 4.7 je patrné, že lepších hodnot drsnosti povrchu Ra a Rz je dosaženo u materiálu X5CrNi18-10.

## 5 DISKUZE

Experiment provedený v diplomové práci byl uskutečněn na zařízení Mach 4c a výřezky byly následně podrobeny měření rozměrové a geometrické přesnosti a také bylo provedeno na vybraných plochách měření drsnosti povrchu Ra a Rz.

Rozsah provedeného měření byl omezený z důvodů staršího typu softwaru u měřicího přístroje Mitutoyo Crysta-Plus M544 a použití drsnoměru, který umožňuje měření drsnosti na nerovinných a vnitřních plochách. Proto byly výsledky měření všech vzorků brány z globálního hlediska a výsledky tak postačili k vyvození závěrů o dosahovaných rozměrových přesnostech a velikostech úchylek geometrických parametrů. Pro rozsáhlejší měření tvarů by bylo možné provést za pomoci některého 3D scanneru např. 3D scanner ATOS, který umožňuje velmi přesně definovat 3D souřadnice měřeného vzorku a porovnat je s digitálním 3D modelem, čímž by byly vyhodnoceny jednotlivé odchylky.

Je několik alternativních možností způsobu výroby stejných součástí, které byly vyřezány v experimentu. Jednotlivé konkrétní alternativy výroby jsou určeny zejména požadavky na přesnost součásti, drsnost povrchu a produktivitu. Součásti je tedy možné vyrobit některým z následujících způsobů či kombinací několika způsobů dohromady:

- řezání laserem,
- řezání plazmou,
- třískovým obráběním,
- elektroerozivním obráběním,
- metodou Rapid prototyping (SLS, DMLS),
- broušením,
- vystřihováním.

Ne všechny z těchto metod by byly použitelné pro oba dva materiály, jejich tloušťky a tvary. Jako příklad poslouží varianta řezání laserem, která by umožňovala vytvoření součástí pouze z oceli, protože pro hliník je běžně dosahovaná tloušťka řezu 7 mm.



## ZÁVĚR

Technologie abrazivního vodního paprsku s 3D vybavením je ve spojení s vysokotlakým čerpadlem, které je schopno vyvinout tlak až 600 MPa, aktuálním vrcholem evoluce vývoje této technologie. Je tak možné řezat nepřeborné množství tvarů a materiálů efektivním způsobem.

V diplomové práci byly jako vzorky použity tři různé tvarové součásti. Každá součást byla vyrobena v počtu dvou kusů ze dvou různých materiálů. Jedním z použitých materiálů na výrobu vzorků byla ocel s označením X5CrNi18-10 a druhým materiálem byl hliník s označením ENAW 5083.

Diplomová práce se skládá z části teoretické, kde byla podrobně rozebrána technologie abrazivního vodního paprsku i její alternativy a části praktické, která se zabývá vstupními a výstupními parametry nastavení stroje a rozměrovou a geometrickou přesností vytvořených součástí.

Při vypracování této práce bylo dosaženo následujících výsledků a závěrů:

- typ materiálu má zásadní vliv na čas, po který bude součást řezána. U materiálů X5CrNi18-10 vůči ENAW 5083 je poměr těchto časů roven hodnotě blízké se 2,5,
- složitost tvaru součásti nemá vliv na průměrnou hodnotu rychlosti řezu,
- přesnost měřených úhlů je pro běžné aplikace (příprava hrany pro svařování) naprosto dostačující,
- vyšší přesnosti měřených rozměrů je pro většinu měření dosahováno pro materiál X5CrNi18-10,
- střední hodnoty úchylek rovinnosti, přímosti, kruhovitosti a válcovitosti dosahují u materiálu ENAW 5083 ve většině případů lepších hodnot, než je tomu u materiálu X5CrNi18-10,
- parametry drsnosti povrchu Ra a Rz jsou výrazně lepší u vzorků z materiálu X5CrNi18-10,
- řezání materiálu ENAW 5083 na stroji Mach 4c není optimální vzhledem k nižším hodnotám rozměrové přesnosti a výrazně vyšším hodnotám drsnosti povrchu Ra a Rz,
- deklarovaná přesnost vyřezaných rozměrů s tolerancí  $\pm 0,1$  mm byla až na výjimky dodržena,
- při porovnání jednotlivých kuželovitostí u vzorku kolečko vychází u materiálu X5CrNi18-10 pro přední stranu horší geometrická tolerance, ale vyšší přesnost úhlu, než pro zadní stranu a pro materiál ENAW 5083 byly oba porovnávané parametry přesnější na přední straně.

V závěru lze konstatovat, že byly splněny všechny vytyčené cíle diplomové práce, mezi které patřil rozbor technologie abrazivního vodního paprsku a jeho technologické možnosti s 3D vybavením, experimentální porovnání vlivu vstupních a výstupních parametrů nastavení při aplikaci 3D řezací hlavy pro materiály X5CrNi18-10 a ENAW 5083 a následné vyhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti vyřezaných vzorků.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1. vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
2. AWAC. Systémy dělení materiálu. [online]. [vid. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/cz>
3. HÍREŠ, Ondřej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Jiří pustina: Ostrava – Poruba, 2007, 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
4. SUGINO. Řezání vodním paprskem. [online]. [vid. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.sugino.cz/index.php?page=water-jet.htm>
5. HAMMELMANN. Pumpentypen. [online]. [vid. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.hammelmann-process.de/wDeutsch/produkte/pumpentypen.shtml>
6. PETAL. Triplex Plunger pump. [online]. [vid. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.petal.ro/produse-sub-piese-id-48-lang-en.html>
7. MAŇKOVÁ, Ildikó. progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
8. SMU LYLE. Pressure generation systém. [online]. [vid. 2014-03-24]. Dostupné z: <http://www.lyle.smu.edu/rcam/research/waterjet/par3.html>
9. WARDJet. Cutting Characteristics. [online]. [vid. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/01-waterjet-cutting-characteristics.html>
10. JET EDGE. Water jet systems. Waterjet cutting head. [online]. [vid. 2014-03-26]. Dostupné z: [http://www.jetedge.com/includes/show\\_image.cfm?image=/images/product/83/waterjet-cutting-head-omnijet-drawing.jpg](http://www.jetedge.com/includes/show_image.cfm?image=/images/product/83/waterjet-cutting-head-omnijet-drawing.jpg)
11. QUICK-OHM. Abrasive nozzles. [online]. [vid. 2014-03-29]. Dostupné z: [http://www.water-jet-nozzle.com/water-jet-nozzle/focusing\\_nozzle.html](http://www.water-jet-nozzle.com/water-jet-nozzle/focusing_nozzle.html)
12. TZB. Změkčování vody. [online]. [vid. 2014-03-09]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2705-zmekcovani-vody>
13. CULLIGAN. Deionizace vody. [online]. [vid. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.culligan.cz/deionizace-ionizator-vody/>
14. MALÝ, Josef a Petr HLAVÍNEK. *Čištění průmyslových odpadních vod*. Vyd. 1. Brno: NOEL 2000, 1996, ix, 255 s. ISBN 80-86020-05-3.
15. HÜBNER, Pavel. *Úprava vody pro průmyslové účely*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 132 s. ISBN 80-7080-624-9.
16. JELÍNEK, Luděk. Desalinační a separační metody v úpravě vody. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2008, 171 s. ISBN 978-80-7080-705-7.
17. Prospekt: Flow International Corporation. Kvalita přírodní vody. 2012, SB-0265.
18. WATERJETS. Waterjet abrasives. [online]. [vid. 2014-03-05]. Dostupné z: [http://waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=85&Itemid=55](http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=view&id=85&Itemid=55)

19. VALIČEK, Jan a Sergej HLOCH. Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
20. AGARSCIENTIFIC. Hexagonal mesh grid. [online]. [vid. 2014-03-07]. Dostupné z:  
<http://www.agarscientific.com/hexagonal-mesh-grids-7485.html>
21. PTV, spol. s.r.o. Vysokotlaký vodní paprsek - abrazivo. [online]. [vid. 2014-03-02]. Dostupné z:  
<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>
22. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Čistý vodní paprsek. [online]. [vid. 2014-03-11]. Dostupné z:  
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/pure-waterjet.aspx>
23. MORÁVEK, R. Nekonenční metody obrábění. Západočeská universita, 101 s. ISBN 80-7082-518-9.
24. KRAJNÝ, Z. – JAVORČÍK L. – GERTHOFFER, A.: The High Pressure Water Jet Erosion Effect. In: 5-th Conference MMA-94. Flexible Technologie, Juni 94, Novi Sad, Jugoslavia.
25. BHDT. Waterjet Cutting General Information. [online]. [vid. 2014-03-13]. Dostupné z:  
[http://en.bhdt.at/produkte/hochdruckpumpen/wasserstrahlschneiden/allgemeine\\_informationen](http://en.bhdt.at/produkte/hochdruckpumpen/wasserstrahlschneiden/allgemeine_informationen)
26. ICEJET. Description of the technology. [online]. [vid. 2014-03-15]. Dostupné z:  
<http://www.icejet.eu/descriptionTechnology.php>
27. ZSCHEMIE. Dusík. [online]. [vid. 2014-03-15]. Dostupné z:  
<http://www.zscheme.euweb.cz/dusik/dusik2.html>
28. BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989. 122 s.
29. OSIČKA, K., KALIVODA, M. Nekonenční technologie obrábění. 2012. Brno, 96 s. OPUS, CZ.1.07/2.4.00/12.0029.
30. HUMÁR, Antonín. Technologie I – Technologie obrábění – 3. část. [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2005 [vid. 2014-03-05]. Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
31. CHPS. Vodní paprsek. Technologie. [online]. [vid. 2014-03-05]. Dostupné z:  
<http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie>
32. VODNÍ PAPERSEK : sborník abstraktů : konference o technologii vodního paprsku. Ostrava : ústav geoniky AV ČR, 2009.

33. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Brožura Mach 4. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
[http://www.flowwaterjet.com/~media/pdfs/Brochure/Cutting/Mach-4/Mach\\_4\\_Brochure\\_2012\\_02.ashx](http://www.flowwaterjet.com/~media/pdfs/Brochure/Cutting/Mach-4/Mach_4_Brochure_2012_02.ashx)
34. DYNAMICWATERJET. Dynamic Waterjet. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
<http://www.dynamicwaterjet.com/DynamicVsAbrasive/DynamicVsAbrasive.htm>
35. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Technologie vodního paprsku. [online]. [vid. 2014-03-11]. Dostupné z:  
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology.aspx>
36. FOXMACHINERY. Dynamic 3D cutting. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
<http://www.foxmachinery.com/public/product.aspx?ProductID=10121>
37. SAWATERJET. Waterjet cutting. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
<http://www.sawaterjet.co.za>
38. FIRST MACHINERY GROUP SWEDEN AB. ProgressJet 60dg Systém. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
<http://www.fmgab.se/userfiles/Maskinprospekt/PTV.pdf>
39. LOMUSA. Aqua Progress Jet. [online]. [vid. 2014-04-28]. Dostupné z:  
<http://www.lomusa.com/productos/corte-por-agua/#!prettyPhoto>
40. RYCHLÝ TOM. Stroje pro řezání vodním paprskem. [online]. [vid. 2014-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.rychlytom.cz/cs/prislusenstvi/stroje-pro-rezani-vodnim-paprskem/prislusenstvi>
41. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Stroje pro řezání vodním paprskem. [online]. [vid. 2014-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-cutting/accessories.aspx>
42. MINDTRIBE. Dynamic contour follower. [online]. [vid. 2014-05-02]. Dostupné z:  
<http://www.mindtribe.com/portfolio/>
43. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. Společnost. [online]. [vid. 2014-05-03]. Dostupné z:  
<http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/company.aspx>
44. MAŘÍKOVÁ, Petra. 3D abrazivní vodní paprsek. brno, 2013. 91 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění, Vedoucí práce Ing. karel Osička, Ph.D.
45. KEAM s.r.o. SpaceClaim. [online]. [vid. 2014-05-17]. Dostupné z:  
<http://www.cadcam.sk/spaceclaim>

46. FLOWASIA. FlowCUT. [online]. [vid. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.flowasia.com/waterjet-products.cfm-id=140.htm>
47. KOVO-PRO. Mitutoyo CRYSTA PLUS – M544. [online]. [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: [http://www.kovo-pro.cz/stroj\\_park\\_mereni\\_cz/Crysta%20Plus%20M\\_CZ\\_new.pdf](http://www.kovo-pro.cz/stroj_park_mereni_cz/Crysta%20Plus%20M_CZ_new.pdf)
48. IVANMETAL. Mitutoyo CRYSTA PLUS – M544. [online]. [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.ivanmetal.sk/us/machinepool.htm>
49. RAPP INDUSTRIAL SALES SURFACE FINISH EQUIPMENT. Perthometer M2. [online]. [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://surfacefinishequipment.com/mahr%20M2.htm>
50. MICROTES. Drsnoměr Perthometer M2. [online]. [vid. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.microtes.cz/Mahr/drsnomery-Ma.pdf>
51. Návod k obsluze: Perthometer M2 a M3 s posuvovým přístrojem PFM. Norma ČSN EN ISO 4287. Sériové číslo 3755343.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>2D</b>	[-]	Dvoudimenzionální
<b>3D</b>	[-]	Trojdimenzionální
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	[-]	Oxid hlinitý
<b>AWJ</b>	[-]	Abrasive Water Jet
<b>CAD</b>	[-]	Computer Aided Design
<b>CaO</b>	[-]	Oxid vápenatý
<b>CNC</b>	[-]	Computer Numeric Control
<b>DMLS</b>	[-]	Direct Metal Laser Sintering
<b>FeO</b>	[-]	Oxid železnatý
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	[-]	Oxid železitý
<b>MnO</b>	[-]	Oxid manganatý
<b>MgO</b>	[-]	Oxid hořečnatý
<b>SiO<sub>2</sub></b>	[-]	Oxid křemičitý
<b>SLS</b>	[-]	Selective Laser Sintering
<b>TiO<sub>2</sub></b>	[-]	Oxid titaničitý
<b>USA</b>	[-]	United States of Amerika
<b>USD</b>	[-]	United States Dollar
<b>WJM</b>	[-]	Water Jet Machining
<b>apod.</b>	[-]	A podobně
<b>atd.</b>	[-]	A tak dále
<b>např.</b>	[-]	Například
<b>obr.</b>	[-]	Obrázek
<b>spol. s r.o.</b>	[-]	Společnost s ručením omezeným
<b>tab.</b>	[-]	Tabulka
<b>tzv.</b>	[-]	Takzvaně

Symbol	Jednotka	Popis
$C_0$	[m/s]	Rychlost zvuku
$D_a$	[mm]	Vnější průměr abrazivní dýzy
$l_m$	[-]	Celková měřicí délka
$K$	[-]	Poměr vertikální a horizontální síly
$L$	[mm]	Délka abrazivní dýzy
$P$	[W]	Výkon hydromotoru
$P_1$	[Pa]	Tlak na 1 straně pístu
$P_2$	[Pa]	Tlak na druhé straně pístu
$P_a$	[Pa]	Okolní tlak
$P_p$	[Pa]	Tlak par
$Q$	[m <sup>3</sup> ]	Objem protékající kapaliny
$Q_c$	[m <sup>3</sup> ]	Průtokové množství hydrogenerátoru
$R_v$	[μm]	Největší hloubka prohlubní
$R_a$	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka
$R_p$	[μm]	Největší výška výstupku profilu
$R_z$	[μm]	Největší výška profilu
$S_1$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha jedné stany pístu
$S_2$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha druhé strany pístu
$V_0$	[m/s]	Rychlost nárazu paprsku
$V_n$	[m <sup>3</sup> ]	Odstraněné množství materiálu pomocí jedné abrazivní částice
$d_i$	[mm]	Vnitřní průměr abrazivní dýzy
$f(\varphi)$	[-]	Funce úhlu pod kterým zasáhne abrazivní částice cílová materiál
$h$	[mm]	Hloubka materiálu
$i$	[-]	Koeficient zesílení tlaku
$m_p$	[kg]	Hmotnost částice
$n$	[-]	Počet prvků
$p$	[MPa]	Pracovní tlak
$p_i$	[Pa]	Impaktní tlak



$p_s$	[Pa]	Stagnační tlak
$s$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha průměru otvoru
$v$	[m/s]	Rychlost paprsku
$v_p$	[m/s]	Rychlost částice
$\bar{x}$	[mm]	Střední hodnota
$x_i$	[mm]	Hodnota jednotlivých prvků
$\psi$	[-]	Funkce úhlu, pod kterým se abrazivní částice zaryje do cílového materiálu
$\eta_i$	[-]	Objemová účinnost
$\mu$	[-]	Výtokový součinitel
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota materiálu
$\sigma_f$	[Pa]	Napětí cílového materiálu
$\sigma_0$	[pa*m <sup>2</sup> *s <sup>-1</sup> ]	Kavitační číslo

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Protokol o měření vzorku kolečko - X5CrNi18-10
Příloha 2	Znázornění tolerančního pole vzorku kolečko - X5CrNi18-10
Příloha 3	Protokol o měření vzorku kolečko - ENAW 5083
Příloha 4	Znázornění tolerančního pole vzorku kolečko - ENAW 5083
Příloha 5	Protokol o měření vzorku kolečko - kuželovitost - X5CrNi18-10
Příloha 6	Protokol o měření vzorku kolečko - kuželovitost - ENAW 5083
Příloha 7	Protokol o měření vzorku obdélník - X5CrNi18-10
Příloha 8	Protokol o měření vzorku obdélník - ENAW 5083
Příloha 9	Protokol o měření vzorku obdélník - úhly - X5CrNi18-10
Příloha 10	Protokol o měření vzorku obdélník – úhly - ENAW 5083
Příloha 11	Grafika elementů vzorku obdélník
Příloha 12	Protokol o měření vzorku turbína - X5CrNi18-10
Příloha 13	Protokol o měření vzorku turbína - ENAW 5083

# PŘÍLOHA 1



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 13:51

Jméno dílu

XMT

1

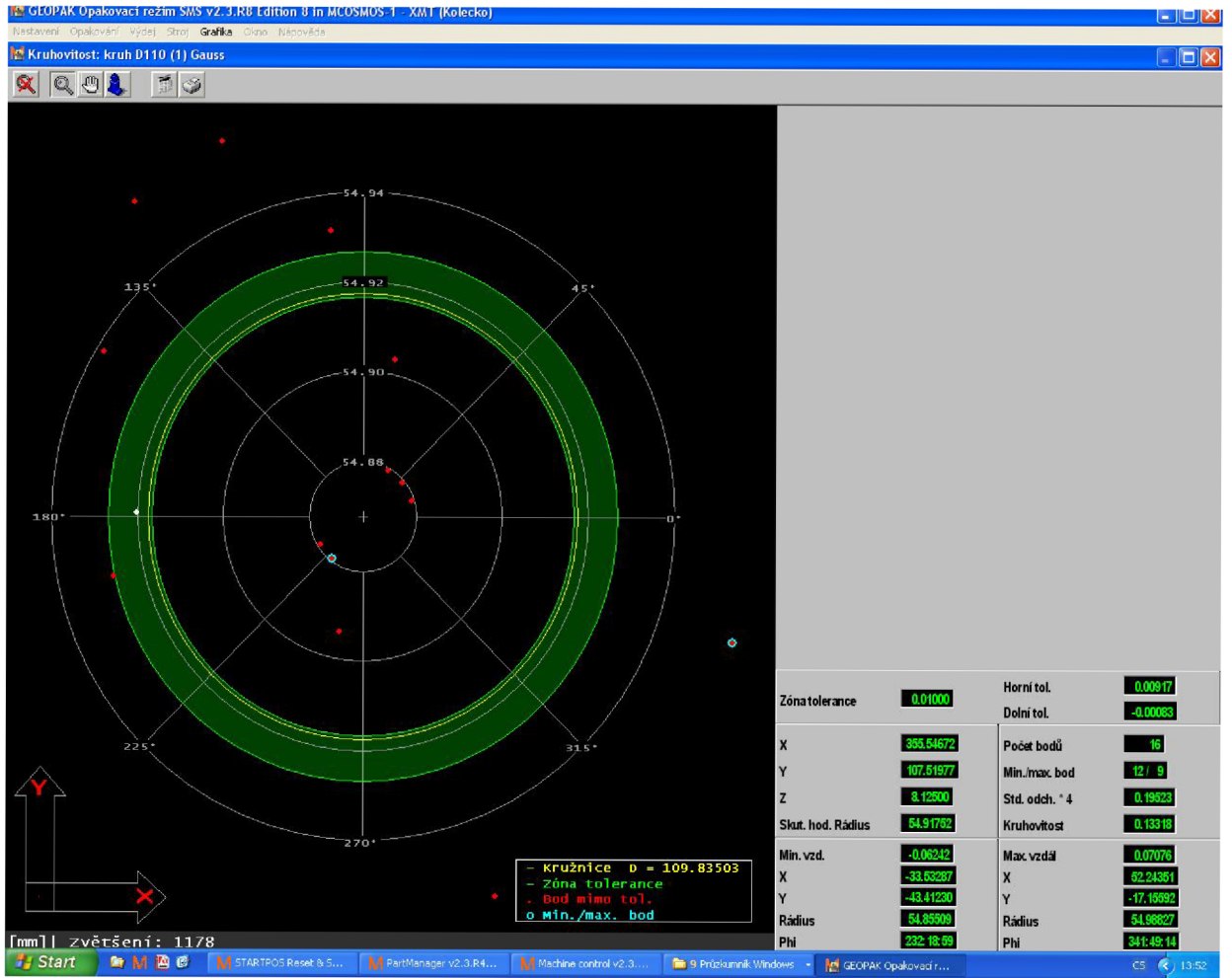
2

3

4

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	kruh D110 Gauss	18	355.54671	107.51977	8.12500	109.83503	0.13318
1	7	kruh D110 Kruhovitost			0.01000		0.13318	0.12318  --->>
1	8	Kužel Gauss	12	355.44090	107.60903	16.13073	59:25:23	0.14409
				89:31:15	90:09:10	179:29:49		
1	11	Kužel Úhel kužele/2		0:10:00	0:30:00	29:42:41	29:32:41	29:02:41 ----->>
					-0:30:00			

# PŘÍLOHA 2



# PŘÍLOHA 3



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 13:57

Jméno dílu

XMT

1

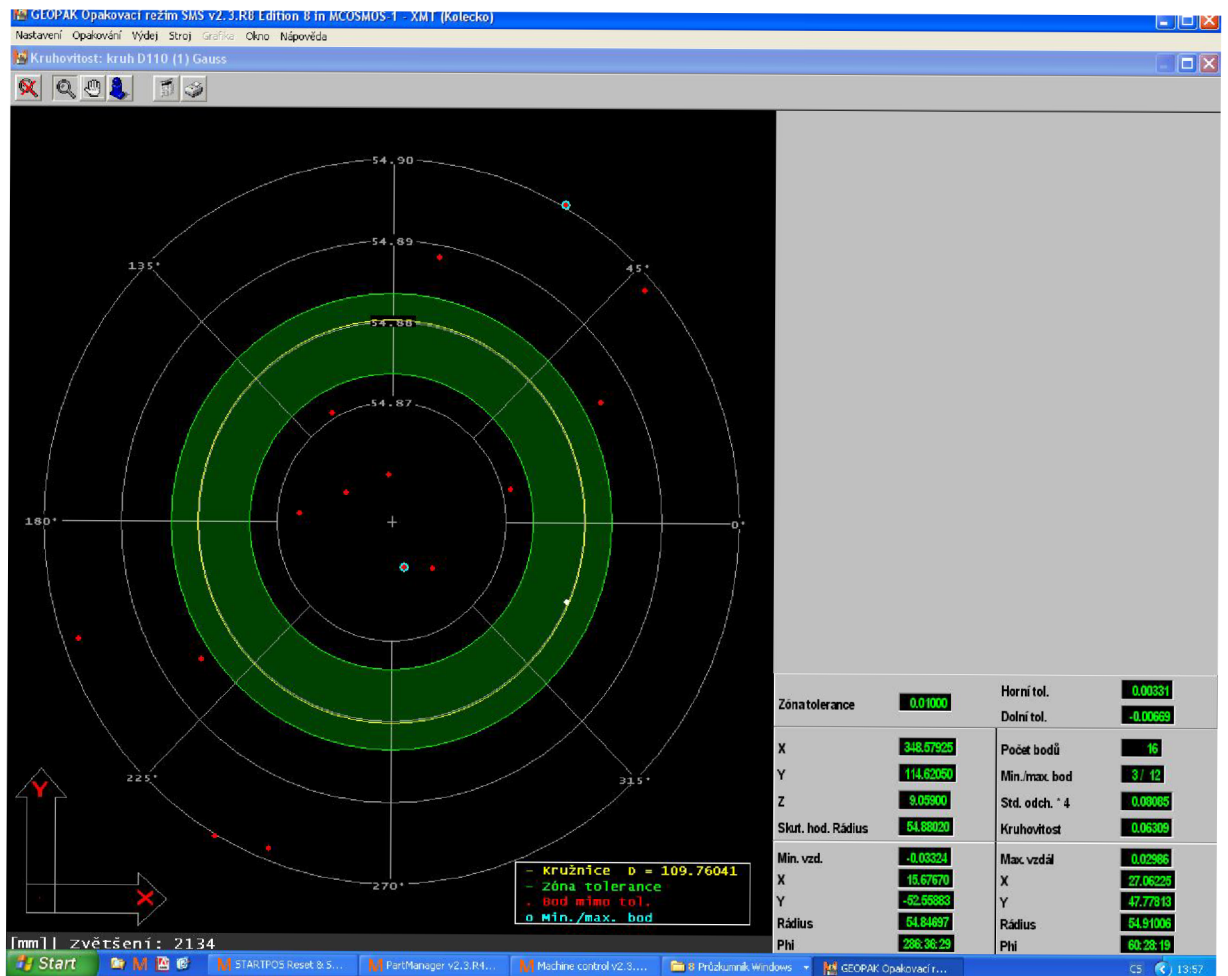
2

3

4

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	kruh D110 Gauss	16	348.57926	114.62050	9.05900	109.78041	0.06309
1	7	kruh D110 Kruhovitost						0.05309  --->>
1	8	Kužel Gauss	12	348.67514	114.65544	16.48285	59:28:07	0.08002
1	11	Kužel Úhel kužele/2		0:10:00	0:30:00 -0:30:00	29:44:03	29:34:04	29:04:04 ----->>

# PŘÍLOHA 4



# PŘÍLOHA 5



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele  
Admin  
27.05.2014 10:39

Jméno dílu  
XMT

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	Kužel Gauss	12	254.84534 89:57:17	185.21307 89:38:12	15.73977 179:38:02	59:49:38	0.14533
1	7	Kužel Úhel kužele/2		0:10:00	0:30:00 -0:30:00	29:54:47	29:44:48	29:14:48 ←---+--->>
2	8	Kužel Gauss	12	254.78884 90:09:42	189.51050 89:43:42	15.49748 179:41:01	61:47:35	0.09239



# PŘÍLOHA 6



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele  
Admin  
27.05.2014 10:44

Jméno dílu  
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
1	4	Kužel Gauss	12	255.51535 89:56:08	192.25481 89:56:50	16.12532 179:55:00	59:28:30	0.05223
1	7	Kužel Úhel kužele/2		0:10:00	0:30:00 -0:30:00	29:44:14	29:34:15	29:04:15 ←→→→
2	8	Kužel Gauss	12	255.29723 89:50:06	192.29684 90:12:07	15.57784 179:44:21	61:01:59	0.11062

# PŘÍLOHA 7



Jméno uživatele  
Admin  
21.05.2014 13:37

Číslo protokolu (1)

Jméno dílu  
XMT

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	5	kruh R10 Gauss	6	-103.13967	-42.79302	-1.66129	20.05436	0.00645
2	8	kruh R10 Gauss	6	-103.10521	-22.76261	-1.67314	20.00781	0.05156
1	11	Délka 1 Pøièíst rádus		0.06893	40.06147	0.00000	40.06153	
3	12	kruh R10 Gauss	6	-23.08652	-42.88052	-6.42818	20.10045	0.02220
4	15	kruh R10 Gauss	6	-23.04745	-22.89571	-6.43583	20.08033	0.02095
2	18	Délka 1 Pøièíst rádus		0.07834	40.07516	0.00000	40.07523	
3	19	Primka 1 Gauss	3	0.00000	-0.00056	0.00000	0.00056	0.03224
				0:01:56	90:01:56	90:00:00		
4	22	Primka 1 Gauss	3	-0.13436	-102.57460	0.00000	102.57469	0.01959
				179:55:30	89:55:30	90:00:00		
3	25	Delka 102.6 Pøièíst rádus		-0.05786	-102.52515	0.00000	102.52517	
5	26	Primka 2 Gauss	3	-125.94073	0.10709	0.00000	125.94078	0.08373
				89:57:05	0:02:55	90:00:00		
6	29	Primka 2 Gauss	3	0.01170	-0.00002	0.00000	0.01170	0.00690
				89:53:58	0:06:02	90:00:00		
4	32	Delka 126 Pøièíst rádus		125.90337	-0.10705	0.00000	125.90342	
7	33	Primka 3 Gauss	3	-0.00891	-52.90507	0.00000	52.90507	0.01370
				179:59:33	89:59:33	90:00:00		
8	36	Primka 3 Gauss	3	-0.02049	-12.93937	0.00000	12.93939	0.00568
				0:05:27	90:05:27	90:00:00		
5	39	Delka 126 Pøièíst rádus		0.00523	40.05685	0.00000	40.05685	
9	40	Primka 4 Gauss	3	-43.02238	0.04127	0.00000	43.02240	0.01155
				89:56:42	0:03:18	90:00:00		
10	43	Primka 4 Gauss	3	-83.07339	0.14779	0.00000	83.07352	0.00238
				90:06:07	179:53:53	90:00:00		
6	46	Delka 126 Pøièíst rádus		-40.07772	0.03844	0.00000	40.07774	

# PŘÍLOHA 8



Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 13:26

Číslo protokolu (1)

Jméno dílu

XMT

1

2

3

4

El. No.	Line No.	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	5	kruh R 10 Gauss	6	-102.90439	-42.84220	-0.97895	20.28778	0.00925
2	8	kruh R 10 Gauss	6	-102.87505	-22.86273	-0.93043	20.31592	0.02290
1	11	Délka 1 Pøièíst rádus		0.05917	40.28130	0.00000	40.28134	
3	12	kruh R 10 Gauss	6	-22.92147	-42.89991	-6.26164	20.11699	0.00745
4	15	kruh R 10 Gauss	6	-22.86855	-22.88229	-6.21055	20.15195	0.01633
2	18	Délka 1 Pøièíst rádus		0.10414	40.15202	0.00000	40.15215	
3	19	Primka 1 Gauss	3	0.00000	0.01325	0.00000	0.01325	0.00164
				0:00:08	90:00:08	90:00:00		
4	22	Primka 1 Gauss	3	-0.03534	-102.45335	0.00000	102.45336	0.00557
				0:01:11	90:01:11	90:00:00		
3	25	Delka 102.6 Pøièíst rádus		-0.03534	-102.44707	0.00000	102.44708	
5	26	Primka 2 Gauss	3	0.01475	-0.00001	0.00000	0.01475	0.01900
				89:58:09	0:01:51	90:00:00		
6	29	Primka 2 Gauss	3	-125.73230	0.07170	0.00000	125.73232	0.03188
				90:01:58	179:58:02	90:00:00		
4	32	Delka 126 Pøièíst rádus		-125.74861	0.07171	0.00000	125.74863	
7	33	Primka 3 Gauss	3	-0.02011	-53.00595	0.00000	53.00595	0.01500
				179:58:42	89:58:42	90:00:00		
8	36	Primka 3 Gauss	3	-0.01665	-12.92050	0.00000	12.92051	0.00549
				0:04:26	90:04:26	90:00:00		
5	39	Delka 126 Pøièíst rádus		0.01523	40.14235	0.00000	40.14235	
9	40	Primka 4 Gauss	3	-42.79276	0.02812	0.00000	42.79277	0.02656
				89:57:44	0:02:16	90:00:00		
10	43	Primka 4 Gauss	3	-82.92682	0.05930	0.00000	82.92684	0.02485
				90:02:28	179:57:32	90:00:00		
6	46	Delka 126 Pøièíst rádus		-40.13594	0.02870	0.00000	40.13595	

# PŘÍLOHA 9



Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 16:33

Číslo protokolu (1)

Jméno dílu

XMT

1

2

3

4

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
2	5	Rovina 1 Gauss	6	-0.00035 89:58:18	-0.65994 20:04:00	-0.24107 89:58:00		0.00431
3	8	Rovina 1 Gauss	6	-0.59971 20:02:33	0.00001 90:00:03	-0.21878 89:57:27		0.04382
4	11	Rovina 1 Gauss	6	0.04143 89:58:28	-84.98161 159:20:58	32.02885 89:20:58		0.07364
5	14	Rovina 1 Gauss	6	-105.86908 159:39:20	0.05995 89:58:10	39.25565 89:39:20		0.02019
6	17	Rovina 1 Gauss	6	0.00804 89:54:59	-4.76249 149:52:11	2.76406 59:52:12		0.01855
7	20	Rovina 1 Gauss	6	-35.90808 164:56:21	-0.05109 90:04:43	9.66170 74:56:22		0.04656
8	23	Rovina 1 Gauss	6	0.03235 90:02:44	-28.71112 45:03:11	-28.76429 44:56:49		0.05488
9	26	Rovina 1 Gauss	6	-43.53979 45:09:09	-0.13347 89:52:34	-43.77218 44:50:52		0.03249

# PŘÍLOHA 10



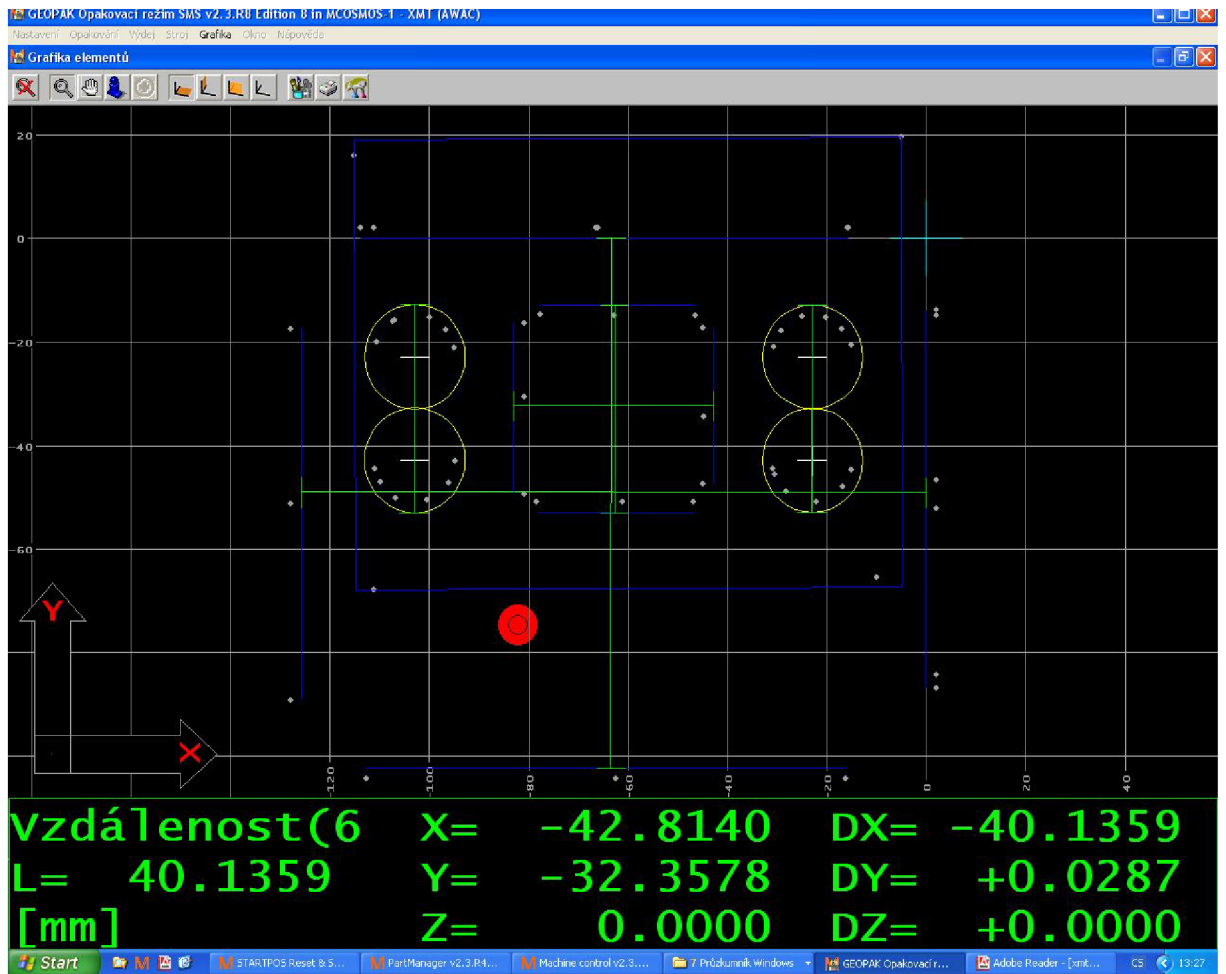
Jméno uživatele  
Admin  
21.05.2014 16:43

Číslo protokolu (1)

Jméno dílu  
XMT

1	2	3	4					
El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
2	5	Rovina 1 Gauss	6	0.00007	-0.30081	-0.10910		0.02316
				90:00:45	19:56:06	70:03:54		
3	8	Rovina 1 Gauss	6	-0.29392	-0.00011	-0.10520		0.01720
				19:41:35	89:58:48	70:18:25		
4	11	Rovina 1 Gauss	6	0.09813	-85.93850	30.71973		0.02445
				89:56:18	160:19:48	70:19:48		
5	14	Rovina 1 Gauss	6	-106.24415	-0.13346	38.73772		0.01181
				159:58:03	90:04:03	69:58:03		
6	17	Rovina 1 Gauss	6	0.00835	-4.80199	2.73720		0.03766
				89:54:48	150:18:58	60:18:59		
7	20	Rovina 1 Gauss	6	-36.00504	-0.08306	9.51891		0.04375
				165:11:26	90:07:40	75:11:28		
8	23	Rovina 1 Gauss	6	0.01998	-28.83086	-28.54777		0.03310
				90:01:42	44:43:02	45:16:58		
9	26	Rovina 1 Gauss	6	-44.16405	-0.08914	-43.54137		0.03596
				44:35:36	89:55:04	45:24:25		

# PŘÍLOHA 11





## PŘÍLOHA 12



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 12:42

Jméno dílu

XMT

1

2

3

4

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	Kruh 2 Gauss	6	368.77136	32.34077	17.91950	32.32113	0.03039
2	7	Kruh 2 Gauss	6	375.00802	49.93792	17.92600	32.23715	0.01666
3	10	Kruh 2 Gauss	6	371.61921	68.18830	17.93800	32.34411	0.01675
4	13	Kruh 2 Gauss	6	359.53353	82.33635	17.92350	32.31908	0.02963
5	16	Kruh 2 Gauss	6	341.99249	88.52746	17.91550	32.28595	0.01433
6	19	Kruh 2 Gauss	6	323.83972	85.09360	17.91650	32.37579	0.02914
7	22	Kruh 2 Gauss	6	309.68125	73.01150	17.91150	32.26740	0.03343
8	25	Kruh 2 Gauss	6	303.44275	55.38763	17.90500	32.00748	0.04497
9	28	Kruh 2 Gauss	6	306.80947	37.31373	17.91050	32.29965	0.02404
10	31	Kruh 2 Gauss	6	318.89977	23.15266	17.91950	32.32729	0.02971
11	34	Kruh 2 Gauss	6	336.40080	16.93584	17.92650	32.29974	0.01065
12	37	Kruh 2 Gauss	6	354.65081	20.29013	17.93200	32.31068	0.01534
13	40	Kruh R19 Gauss	6	366.47184	36.13027	17.92300	37.94152	0.01451
14	43	Kruh R19 Gauss	6	371.11017	52.01639	17.92500	37.94925	0.00244
15	46	Kruh R19 Gauss	6	367.19729	68.10614	17.91200	37.91484	0.02090
16	49	Kruh R19 Gauss	6	355.87472	79.95846	17.91400	38.12573	0.02845
17	52	Kruh R19 Gauss	6	340.09194	84.61965	17.91950	38.23014	0.02129
18	55	Kruh R19 Gauss	6	323.94419	80.71637	17.90900	37.95619	0.00999
19	58	Kruh R19 Gauss	6	312.04366	69.36891	17.91200	38.04298	0.01508
20	61	Kruh R19 Gauss	6	307.37420	53.57183	17.90150	38.08123	0.02781
21	64	Kruh R19 Gauss	6	311.26556	37.48902	17.91200	38.11238	0.02159
22	67	Kruh R19 Gauss	6	322.56959	25.56226	17.91200	38.13457	0.01469
23	70	Kruh R19 Gauss	6	338.52811	20.80719	17.91350	37.88685	0.01779
24	73	Kruh R19 Gauss	6	354.51734	24.71559	17.91450	37.95367	0.01968
1	76	Válec D20 Gauss	12	339.27809	52.69457	11.76947	20.09830	0.08984
				89:52:41	89:50:12	179:47:46		



# PŘÍLOHA 13



Číslo protokolu (1)

Jméno uživatele

Admin

21.05.2014 12:57

Jméno dílu

XMT

1

2

3

4

El. No.	Line No.	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. X-Angle Nominal	Y-Coord. Y-Angle Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	Kruh 2 Gauss	6	343.66848	46.79738	17.53200	32.30491	0.02129
2	7	Kruh 2 Gauss	6	348.67791	64.69134	17.52450	32.27129	0.02050
3	10	Kruh 2 Gauss	6	344.08558	82.66844	17.52200	32.28071	0.01719
4	13	Kruh 2 Gauss	6	331.10323	95.94009	17.51800	32.28105	0.00951
5	16	Kruh 2 Gauss	6	331.44080	101.46621	17.51450	62.89963	8.88133
6	19	Kruh 2 Gauss	6	295.35234	96.38064	17.52350	32.42735	0.02735
7	22	Kruh 2 Gauss	6	282.06817	83.43052	17.52650	32.35958	0.01938
8	25	Kruh 2 Gauss	6	277.00497	65.51480	17.52100	32.15573	0.02230
9	28	Kruh 2 Gauss	6	281.49017	47.68216	17.52550	32.41344	0.03766
10	31	Kruh 2 Gauss	6	294.56039	34.32396	17.51750	32.17832	0.02476
11	34	Kruh 2 Gauss	6	312.46542	29.28182	17.51900	32.18088	0.03600
12	37	Kruh 2 Gauss	6	330.39901	33.85469	17.52750	32.31096	0.02332
13	40	Kruh R19 Gauss	6	330.07373	38.30107	17.52500	37.78854	0.02111
14	43	Kruh R19 Gauss	6	341.12081	50.39260	17.52350	38.00236	0.04545
15	46	Kruh R19 Gauss	6	344.69006	66.56326	17.52600	37.89930	0.01838
16	49	Kruh R19 Gauss	6	339.68310	82.25628	17.52650	37.98164	0.00746
17	52	Kruh R19 Gauss	6	327.48379	93.34733	17.53100	37.97469	0.01502
18	55	Kruh R19 Gauss	6	311.26899	96.89860	17.52550	37.77503	0.01246
19	58	Kruh R19 Gauss	6	295.59907	91.92648	17.52900	37.82528	0.03051
20	61	Kruh R19 Gauss	6	284.51934	79.79120	17.52050	37.88780	0.03087
21	64	Kruh R19 Gauss	6	280.99674	63.81866	17.51350	38.11508	0.02247
22	67	Kruh R19 Gauss	6	285.96310	48.04055	17.50900	37.99753	0.02162
23	70	Kruh R19 Gauss	6	298.17034	36.86104	17.52000	37.89919	0.01530
24	73	Kruh R19 Gauss	6	314.31644	33.30179	17.51700	37.86953	0.01787
1	76	Válec D20 Gauss	12	312.81738	65.10869	11.59142	20.13529	0.03777
				90:04:12	89:57:05	179:54:53		