



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## 3D ABRAZIVNÍ VODNÍ PAPERSEK

3D ABRASIVE WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. PETRA MAŘÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/13

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petra Maříková

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

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

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

### **3D abrazivní vodní paprsek**

v anglickém jazyce:

### **3D abrasive water jet**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení technologie řezání 3D abrazivním vodním paprskem v podmínkách střední firmy pružně reagující na požadavky odběratelů.

Cíle diplomové práce:

Úvod.

Princip technologie abrazivního vodního paprsku.

Stávající technologické a kapacitní možnosti firmy.

Technologické možnosti 3D abrazivního vodního paprsku.

Návrh rámcového uspořádání provozu.

Rozbor potenciální součástkové základny.

Návrh technologie na vzorovou součástku.

Ekonomické zhodnocení.

Diskuze.

Závěr.

Seznam odborné literatury:

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

MAŇKOVÁ, Ildikó. 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  
pílou, 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.

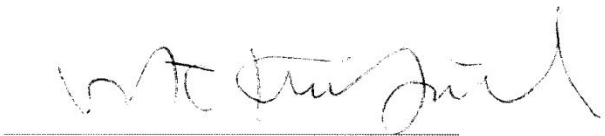
Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osíčka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se v úvodu zabývá problematikou řezání abrazivním vodním paprskem. Další část je zaměřena na nasazení technologie řezání 3D abrazivním vodním paprskem v podmínkách středně velké firmy. Tato technologie umožňuje eliminaci úkosů a úhlové řezání. Následující části se zabývají technologickými možnostmi konkrétního stroje a experimentálním porovnáním vzorků řezaných pomocí technologií AWJ a DWJ. Součástí práce je i ukázka rozmístění strojů ve stávající provozovně, návrh na potenciální součástkovou základnu a ekonomické zhodnocení.

### **Klíčová slova**

Abrazivní vodní paprsek, kvalita řezu, úhlové řezání, eliminace úkosů, vysokotlaké čerpadlo.

## **ABSTRACT**

This master's thesis deals with abrasive water jet cutting in the introduction. Another part is focused on deploying technology 3D cutting with abrasive water jet in conditions of a medium-sized company. This technology allows the elimination of bevels, and angel cutting. The following sections deal with technological capabilities of the specific machine and experimental comparison of samples cut by AWJ and DWJ technology. The work also includes a sample layout of machines on existing premises, the proposal for a potential component base and economic evaluation.

### **Key words**

Abrasive water jet, cutting quality, cutting angle, eliminating bevels, high pressure pump.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

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.

## PROHLÁŠENÍ

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

---

Datum

---

Bc. Petra Maříková

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Dušanu Lukšovi a celému kolektivu firmy AWAC, spol. s r. o. (pobočka Brno), za poskytnutí technické podpory, cenných poznatků a umožnění provedení experimentu. Můj dík patří i panu Milanu Rusiňákovi, který byl ochoten mi pomoci při měření. V neposlední řadě děkuji svým rodičům za velkou podporu při celém studiu na vysoké škole.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD.....	9
1 PRINCIP TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU .....	10
1.1 Historie .....	10
1.1.1 Historie využití vodní energie .....	10
1.1.2 Historie využití vodního paprsku .....	10
1.2 Možnosti dělení materiálů .....	11
1.3 Aplikace řezání vodním paprskem.....	13
1.4 Princip řezání vodním paprskem .....	15
1.5 Konstrukce zařízení .....	16
1.5.1 Zdroj vysokotlaké kapaliny .....	17
1.5.2 Filtrační jednotka a způsoby úpravy vody .....	18
1.5.3 Akumulátor tlaku .....	19
1.5.4 Rozváděcí elementy.....	19
1.5.5 Těsnění .....	20
1.5.5 Dýzy .....	21
1.5.6 Lapač vody.....	22
1.5.7 Řezací stoly .....	23
1.6 Abrazivo.....	24
1.6.1 Recyklace abraziva .....	25
1.7 Faktory ovlivňující řezání vodním paprskem.....	26
1.7.1 Hydraulické faktory.....	27
1.7.2 Abrazivní faktory .....	28
1.7.3 Technologické faktory .....	29
1.8 Vlastnosti obrobeného povrchu .....	32
1.8.1 Drsnost povrchu.....	32
1.8.2 Vady po dělení abrazivním vodním paprskem .....	32
1.9 Dělené materiály.....	35
1.10 Automatizace a robotizace procesu řezání vodním paprskem .....	37
1.10.1 Softwary hydroabrazivních řezacích strojů.....	37
2 STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGICKÉ A KAPACITNÍ MOŽNOSTI FIRMY.....	40

2.1	Provozovna Brno – technologické možnosti firmy .....	40
2.2	Provozovna Brno – kapacitní možnosti firmy .....	43
3	TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI 3D ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPERU..	44
3.1	Inovace technologií podporující 3D řezání vodním paprskem .....	44
3.1.1	Technologie Dynamic Waterjet firmy FLOW .....	45
3.1.2	Systém Dynamic Waterjet XD firmy FLOW .....	46
3.1.3	Technologie SmartStream .....	47
3.1.4	Technologie Hyperpressure firmy FLOW .....	48
3.1.5	Systém ProgressJet 5AX systém .....	49
3.1.6	Systém ProgressJet II 60° .....	50
3.2	Příslušenství .....	50
3.2.1	Řezací hlava PASER ECL Plus .....	51
3.2.2	Laser pointer .....	51
3.2.3	Height senzor .....	52
3.2.4	Kolizní senzor .....	52
3.2.5	Vakuový asistent .....	53
3.3	Mach 4C .....	53
3.4	Experimentální srovnání řezu při řezání na strojích s technologiemi AWJ a DWJ.....	56
4	NÁVRH RÁMCOVÉHO USPOŘADÁNÍ PROVOZU.....	75
5	ROZBOR POTENCIÁLNÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY .....	77
6	NÁVRH TECHNOLOGIE NA VZOROVOU SOUČÁSTKU .....	79
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	84
8	DISKUZE .....	89
	ZÁVĚR .....	91
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	97



## ÚVOD

Voda je po chemické stránce sloučenina vodíku a kyslíku a naší planetě pokrývá většinu povrchu. Společně se zemskou atmosférou tvoří základní podmínky pro život na Zemi. V přírodě se voda vyskytuje v plynném, kapalném a pevném skupenství.

Každý den voda utváří a ovlivňuje chod na celé planetě. Člověk její účinky může pozorovat všude kolem sebe. Samotná síla vody je známá odedávna. Její nepředstavitelná energie nemusí být vždy jen prospěšná. Při různých živelních katastrofách dokáže brát i životy.

Ohromná síla vody však může být i prospěšná, pokud se využije účelně. V dnešním technicky vyspělém světě se voda hojně využívá téměř ve všech odvětvích průmyslu. Uplatnění nachází především v zemědělství, potravinářství, lékařství, stavitelství, v hornictví, v energetice a samozřejmě i ve strojírenství. Často je voda využívána například pro chlazení a oplachování.

Další uplatnění vody bylo nalezeno díky zjištění faktu, že pokud se voda přivede pod tlakem do úzké trubice, vzniká obrovská výstupní energie. Této síly se začalo využívat pro čištění a zejména pro řezání. Kombinací této technologie s vhodnými řeznými podmínkami dostáváme velmi účinný nástroj, který se při používání nikdy neotupí.

Řezání vodním paprskem se v poslední době začíná užívat čím dál častěji, což má hned několik příčin. Jednou z nejvýznamnějších předností je možnost dělit téměř každý materiál nejrůznějších tloušťek. Touto technologií je možno dělit jak materiály velmi tvrdé, houževnaté (ocel, hliník, dural, nerostné materiály, plast), tak i měkké materiály, jako je pryž, guma atd. Další významnou předností tohoto dělení je to, že obrobek není nijak tepelně ovlivněn a je dosahováno relativně vysokých přesností. Díky moderním zařízením dnes často odpadá nutnost dalšího opracování.

Od objevení technologie řezání vodním paprskem uplynula už řada let a technologie prošla značným vývojem. Do nedávných let bylo toto dělení materiálu omezeno pouze na řezání pod úhlem 90°. Nyní je technologie na takové úrovni, že moderní stroje umožňují úhlové řezání pomocí 3D abrazivní řezací hlavice.

Tato diplomová práce je zaměřena především na nasazení 3D řezacího stroje do provozu. Jedná se o unikátní stroj zejména díky jeho kombinaci s vysokotlakým čerpadlem. V diplomové práci je uvedeno experimentální srovnání technologie AWJ a DWJ. Z teoretického hlediska se očekává, že vzorky řezané pomocí technologie DWJ budou dosahovat lepší kvality. Díky stroji s takovouto technologií se rozšiřuje okruh potenciálních zákazníků, jelikož firma vlastní tento moderní stroj již není omezena jen na provádění kolmých řezů.

# 1 PRINCIP TECHNOLOGIE ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

## 1.1 Historie

### 1.1.1 Historie využití vodní energie

Využití vody se v poslední době neustále zvyšuje. Už dávno se voda nevyužívá jen jako pitný zdroj, ale také jako prostředek na mytí, zavlažování a v průmyslu. V neposlední řadě se voda využívá k výrobě energie. (Příklad výroby energie v přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé Stráně je na obrázku 1.1.)

Historie využití vodní energie sahá až do starověku, kde se jí nejprve využívalo v dopravě, později pro chod mechanismů, jako jsou mlýny (obr. 1.2), hamry, čerpadla.



Obr. 1.1 Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně [1].



Obr. 1.2 Vodní mlýn ve Slupi [2].

### 1.1.2 Historie využití vodního paprsku

Působení vody a její erozní účinky na pevné látky v přírodě jsou známy již dlouhou řadu let (obr. 1.3). Bylo zjištěno, že pokud se voda dovede pod tlakem do dýzy s malým otvorem, zvýší se erozní působení vody a zároveň se dosáhne vyšší erozní účinnosti při odstraňování materiálu. V USA byl díky těmto poznatkům v roce 1853-1886 v důlním průmyslu zaveden erozní úběr horniny pomocí vodního proudu, čehož se využívalo také při těžbě zlata, jak je znázorněno na obrázku 1.4 [3].



Obr. 1.3 Erozní účinek vody v přírodě.



Obr. 1.4 Těžba zlata vodním proudem [4].

Již roku 1961 bylo v USA patentováno řezání oceli a niklu pomocí olejového paprsku [5]. Vodního proudu se pro dělení materiálu začalo využívat v sedmdesátých letech, a to pro řezání dřeva a plastů. Velmi intenzivně se vodní paprsek začal využívat od roku 1974, kdy organizace pro letectví a kosmonautiku NASA zadala požadavek na vyřešení technologie řezání keramických obkladů pro raketoplány. (Ukázka keramické tepelné ochrany raketoplánu, která je řezaná vodním paprskem, je na obrázku 1.5 a 1.6.) V 80. letech bylo zahájeno komerční využívání této technologie. Řezání vodním paprskem se začalo uplatňovat téměř ve všech odvětvích, neboť se jedná o metodu, která je vhodná pro řezání téměř všech známých materiálů [6, 7].



Obr. 1.5 Nanášení dlaždic tepelného štítu raketoplánu [8].



Obr. 1.6 Spodní strana raketoplánu s keramickými dlaždicemi [8].

Nejvýznamněji se na rozvoji a vývoji řezání vodním paprskem podíleli techničtí velicí, jako jsou USA, Německo a Japonsko.

## 1.2 Možnosti dělení materiálů

Je známo mnoho způsobů dělení materiálu – klasickým řezným nástrojem nebo pomocí nekonvenčních technologií.

Nekonvenční metody obrábění se dělí na:

- **mechanické** - obrábění ultrazvukem (USM),  
- vodním paprskem (WJM),  
- abrazivním vodním paprskem (AWJ),
- **chemické** - chemické leptání,
- **elektro-chemické** - tyto metody využívají principů elektrolýzy,
- **elektro-tepelné** - obrábění laserem (LBM),  
- obrábění plazmou (PAM),  
- elektroerozivní obrábění (EDM),  
- obrábění elektronovým paprskem (EBM).

Řezání vodním paprskem se řadí mezi **ekologicky přijatelné technologie** („zelené technologie“). Při porovnání technologie vodního paprsku s ostatními technologiemi je zřejmé, že při řezání vodním paprskem nedochází k produkci žádného nebezpečného odpadu (snižování nákladů na likvidaci odpadu). Dále je

možno oddělit odpadový materiál ve velkých kusech a následně ho využít (při jiných metodách - konvenčních – by byl odpadový materiál ztracen ve formě třísek). Je zde výhoda maximálního využití materiálu díky vytváření minimálních prořezů. Při řezání vodním paprskem se spotřebuje malé množství vody, kterou je ještě možno recyklovat pomocí uzavřené smyčky systému. Odpadní voda je obvykle dostatečně přefiltrována. Také abrazivo je přírodní látka a může být recyklováno. Při použití vodního paprsku nevznikají prachové částice, kouř, výpary ani nehrozí kontaminace při řezání například azbestu nebo sklolaminátu. Tyto aspekty tak příznivě ovlivňují pracovní prostředí [9].

Technologické přednosti dělení materiálů vodním paprskem: [3,10]

- vysoká energetická účinnost (ve srovnání např. s řezáním laserem) při relativně nízké energetické náročnosti;
- nedochází k přímému kontaktu s obrobkem;
- proud vody nevytváří jiskry nebo prach, tudíž se jedná o vysoce hygienický a ekologický způsob dělení materiálů;
- nevzniká tepelně ovlivněná oblast povrchu a zbytková pnutí v obrobené ploše;
- není potřebné vyvozování velkých sil na dělený materiál (nevznikají deformace materiálu při dělení);
- lze aplikovat na soustružení, frézování, vrtání, děrování, odjehlování,
- možnost obrábění tvrdých i měkkých materiálů;
- možnost dělení vícesložkových kompozitních materiálů,
- není potřebné upevnění obrobku;
- tvarová různorodost;
- malé ztráty v řezu (prořezem);
- možnost řezání ve výbušném prostředí a také pod vodou;
- možnost použití jiných pracovních médií (potravinářský průmysl – tuky apod.);
- vysoká spolehlivost a jednoduchá obsluha.

V tabulce 1.1 je uvedeno porovnání jednotlivých nekonvenčních paprskových technologií.

Tab. 1.1 Srovnání paprskových technologií [11].

Posuzovaný parametr	Typ paprskové metody		
	LASER (LBM)	PLASMA (PAM)	VODA (AWJ)
<b>Dělitelné materiály</b>	Všechny kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí	Železné a neželezné kovy	Téměř všechny materiály
<b>Teplota řezu</b>	Teplý řez	Horký řez	Studený řez
<b>Vliv teploty řezu na materiál</b>	Malý	Velký	Žádný
<b>Kolmost řezu</b>	Mírný sklon	Velký nepravidelný sklon	Mírný sklon
<b>Výronek na řezné spáře</b>	Většinou bez výronku	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
<b>Kvalita řezané plochy</b>	Malá drsnost	Výrazné vlny (striace)	Malá drsnost nahoře, dole vlny (dle řezné rychlosti)
<b>Závislost tvrdosti řezaného mat. na rychlosti</b>	Žádná	Žádná	Tvrdost mírně snižuje řeznou rychlost
<b>Řezání plastů</b>	Omezeně	Nelze	Vhodné
<b>Řezání kompozitních materiálů</b>	Možno (pokud mají složky stejnou teplotu tav.)	Možno (pokud jsou na bázi kovů)	Vhodné
<b>Řezání keramiky, skla, kamene</b>	Omezeně	Nelze	Vhodné
<b>Reliéfni obrábění</b>	Možné	Nelze	Omezeně
<b>Velikost mat.</b>	Velké i malé dílce	Velké dílce	Velké i malé dílce
<b>Tloušťka materiálu standardní</b>	Malé a střední polotovary do 25 mm	Střední a silné polotovary	Veškeré tloušťky
<b>Vliv na pracovní prostředí</b>	Malé exhalace, hluk	Velké exhalace, hluk	Hluk
<b>Jakost povrchu Ra (cca, měřitelné u malých tlouštěk)</b>	Až 3,2	12,4	Až 3,2
<b>Běžné tolerance rozměrů (cca, u malých tlouštěk)</b>	Až $\pm 0,1$	Velký rozptyl až $\pm 0,25$	$\pm 0,1$

### 1.3 Aplikace řezání vodním paprskem

Dříve byla technologie řezání vodním paprskem přiřazována spíše k leteckému, kosmickému a hutnickému průmyslu. V dnešní době se řezání vodním paprskem využívá v mnoha jiných odvětvích (tab. 1.2).

Tab. 1.2 Aplikace vodního paprsku v průmyslu [3].

PRŮMYSL	APLIKACE
<b>Automobilový</b>	Dělení 3D součástí (např: nádrže, nárazníky, karosérie, přístrojové desky, opěrky hlavy a rukou, čalounění a interiérové materiály na bázi PVC, kompozity, polyuretáty, fólie, gumy, koberce, keramické materiály, těsnění a další mechanické součástky).
<b>Důlní</b>	Stavební a důlní aplikace, vrtné soustavy pro vrty v horninách, vrty pro uložení kabelů systém FLOW-MOLE.
<b>Elektrotechnický</b>	Dělení plošných spojů, elektroizolačních materiálů, skla a keramiky.
<b>Chemický</b>	Obrábění výbušných látek, plastických hmot, těžkoobrobitelných materiálů, kompozitů.
<b>Kamenický</b>	Dělení různých druhů kamene, mozaiky, dlaždice, dekorace.
<b>Kosmický a letecký</b>	Dělení keramiky, kompozitů, titanu, interiérových panelů, hliníkových částí skeletu letadel.
<b>Medicína</b>	Operace mozkových nádorů, klinické a experimentální aplikace.
<b>Metalurgický</b>	Metalografické rozbory, čištění odlitků.
<b>Obuvnický</b>	Dělení kůží, plastických hmot.
<b>Papírenský</b>	Řezání papíru, buničiny, novinového papíru, papírových plen.
<b>Potravinářský</b>	Dělení ryb, hub, tabáku, ovoce, zeleniny, čokolády, zákusků a sýra.
<b>Sklářský</b>	Dělení skla, plexiskla, matování skla.
<b>Stavební</b>	Dělení izolačních materiálů, polystyrénu, sklovitých materiálů, azbestu, plastbetonu, keramiky.
<b>Strojní</b>	Výroba metalografických vzorků, obrábění rotačních součástí, čištění povrchů, soustružení, frézování.
<b>Textilní</b>	Dělení jemných textilií s maximální úsporou vysokokvalitního polovýrobku.
<b>Vojenský</b>	Odminování, demilitarizace (zneškodňování raketových municí, binárních chemických zbraní, a jednosložkových chemických zbraní), dělení pancéřů pro obrněná vozidla.
<b>Mobilní aplikace</b>	<u>Dělení:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dělení železobetonu do hloubky 600 mm včetně ocelové výztuže,</li> <li>• dělení ocelových desek pancíře a ušlechtilých ocelí do hloubky 400 mm,</li> <li>• dělení ocelových nádob a potrubí,</li> <li>• vyřezávání otvorů do ocelových nádob a betonových konstrukcí.</li> </ul>
	<u>Úpravy povrchu:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• odstraňování rzi a barev z ocelových konstrukcí,</li> <li>• odstraňování barev a ochranných nátěrů z betonových konstrukcí,</li> <li>• odstraňování degradovaných vrstev betonu,</li> <li>• čištění povrchů - fasády, omítky, studně, kulturní památky,</li> <li>• předsanační úpravy komínů, chladicích věží, pilířů mostů.</li> </ul>

Hydrodemolice:

- odstraňování narušeného betonu a očišťování armatur od hloubkové koroze v rámci přípravných prací pro sanaci,
- odstraňování plastbetonu až na zdravý poklad.

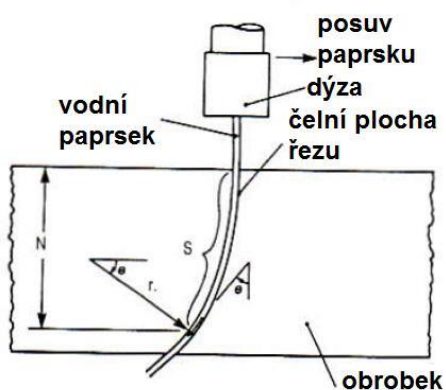
Technologické čištění:

- čištění tepelných elektrárenských výměníků,
- čištění chladičů a filtrů,
- čištění provozů v sladovnách, v maloprůmyslu,
- čištění lakoven - odstraňování nánosů barev.

## 1.4 Princip řezání vodním paprskem

Podstata řezání vodním paprskem spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadajícího úzkého vodního paprsku o vysoké rychlosti (od  $300 \text{ m.s}^{-1}$  při tlaku 70 MPa, do  $1000 \text{ m.s}^{-1}$  při tlaku vyšším než 400 MPa). Vodní paprsek je vytvářen díky vysokému tlaku vody a jeho průchodu dýzou. Šířka řezu se pohybuje okolo 0,3 mm, což zaručuje velmi malé ztráty materiálu.

Při řezání dochází k vychylování (zakřivování) a zpomalování proudu, což je důsledek tření mezi povrchem vodního proudu a povrchem materiálu obrobku. Na obr. 1.7 je znázorněn průběh dráhy vodního paprsku a jeho vychylování. Dráha vodního paprsku je zaoblená a její poloměr se mění podle předcházející délky oblouku. Tyto vlastnosti ovlivňují výsledný tvar povrchu a topografii obrobenej součásti [6].

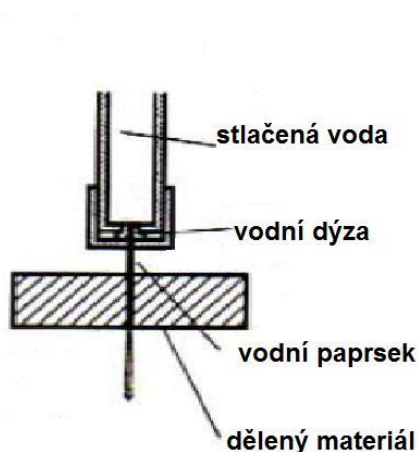


N – dráha ve svislém směru, kterou projde paprsek za čas  $t$   
 r – poloměr zaoblení paprsku  
 S – délka stopy paprsku podle čelní polohy řezu  
 $\theta$  - úhel vychýlení paprsku mezi skutečným a výchozím směrem paprsku v řezu

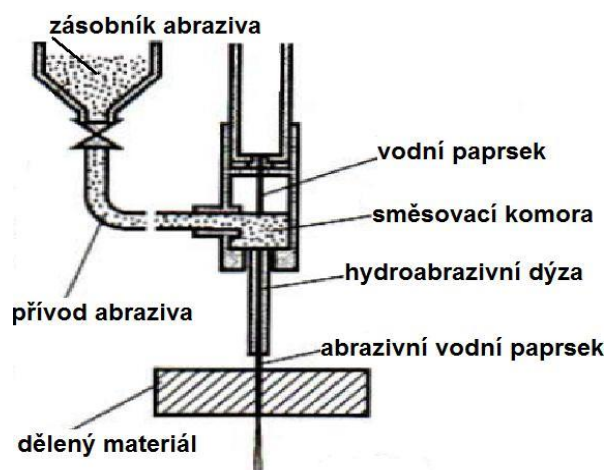
Obr. 1.7 Schéma řezání vodním paprskem a znázornění dráhy paprsku [6].

Řezání vodním paprskem se dělí na dva základní typy:

- Řezání čistým vodním paprskem (WATERNIFE) – schéma je na obr. 1.8,
- Řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí – schéma je na obr. 1.9 (metoda PASER – PArticle Stream ERosion).



Obr. 1.8 Schéma čistého vodního paprsku [6].



Obr. 1.9 Schéma abrazivního vodního paprsku [6].

**Řezání čistým vodním paprskem** se využívá při řezání jednorázových plen, hedvábného papíru a také při řezání vybavení interiéru automobilů. Používá se velmi tenký proud ( $\varnothing 0,1016-0,254$  mm). Dalšími výhodami jsou možnost vytváření detailní geometrie, velmi malý odpad při řezání, řezání bez vývinu tepla, rychlé řezání, možnost řezání měkkých, lehkých a velmi tenkých materiálů. Dále jsou vyvíjeny nízké řezné síly a dostačující je pouze jednoduché upnutí řezaného materiálu. Podstatnou předností řezání čistým vodním paprskem je i jeho rychlost [12].

**U hydroabrazivního paprsku** se jedná o technologický proces odstraňování částic obrobku stykem abraziva unášeného proudem vody. Výsledný tvar vodního proudu je vytvářen ve směšovací trubici a je závislý na jejím průměru, hmotnostním toku abraziva a na velikosti a tvaru abrazivních částí.

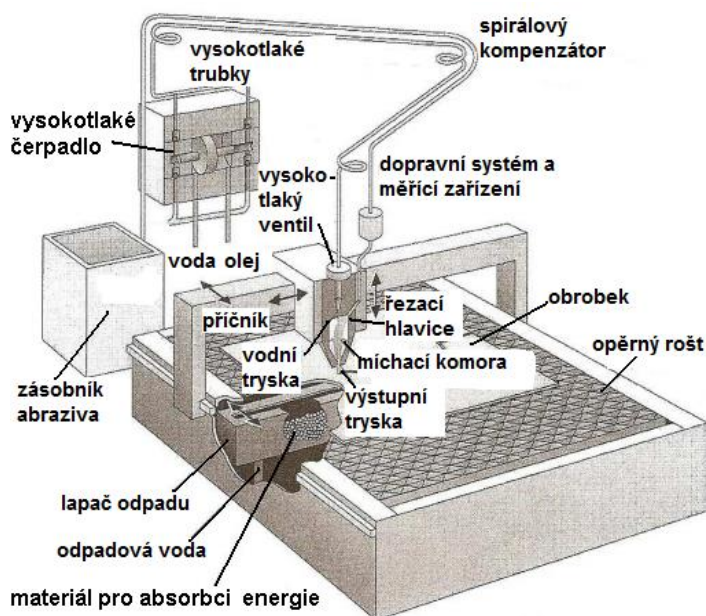
Celková energie vysokotlaké vody se dělí na kinetickou energii vodního proudu, abraziva a proudu vzduchu. Část energie je spotřebována na rozštěpení abraziva, opotřebení řezací hlavy a další ztráty. Důležitou energií je kinetická energie abraziva v posuvném a rotačním pohybu.

Kapalná a pevná složka vysokorychlostního abrazivního paprsku způsobuje erozní opotřebení, tzn. úběr materiálu.

## 1.5 Konstrukce zařízení

Zařízení pro řezání vodním paprskem je složeno z vysokotlakého čerpadla, rozváděcích elementů, ze zásobníku abraziva, příčnicku, dopravního a měřicího systému, řezací hlavy a výstupní trysky, obrobku, lapače vody, opěrného roštu. (Schéma celého zařízení pro řezání vodním paprskem je na obrázku 1.10.) Zařízení se skládá ze dvou okruhů, primárního (nízkotlaký) a ze sekundárního (vysokotlaký). Vysokotlaký okruh je řízen nízkotlakým okruhem, a to prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvozeného hydraulickou jednotkou.





Obr. 1.10 Schéma zařízení pro řezání vodním paprskem [13].

Vysokotlaký okruh se skládá z těchto hlavních částí: [7]

- zdroj (generátor) tlakové technologické kapaliny,
- filtrační jednotka,
- akumulátor tlaku,
- uzavírací ventil,
- rozváděcí elementy (hadice, potrubí, otočné elementy apod.),
- výstupní dýza (nejdůležitější část).

### 1.5.1 Zdroj vysokotlaké kapaliny

Pro generování vysokotlakého vodního paprsku se využívají dva druhy zařízení, které generují vysokotlaký vodní paprsek - zařízení s multiplikátorem a zařízení s triplexovým plunžrem.

**Zařízení s multiplikátorem** (obr. 1.11) využívá hydraulického řízení posouvání pístu. Díky změně polohy pístu nastává na výstupu z multiplikátoru pulzace kapaliny, a proto se v obvodu používá akumulátor tlakových razů. Ten udržuje konstantní hodnotu tlaku kapaliny, která vstupuje do dýzy [7].



Obr. 1.11 Zařízení s multiplikátorem [12].

**Multiplikátor** se využívá pro zvyšování pracovního tlaku vody. Pracuje na bázi dvou rozdílných ploch, které jsou pevně spojeny pístem. Při působení tlaku  $p_1$  na plochu  $S_1$  se bude na ploše  $S_2$  vyvíjet příslušný tlak  $p_2$ , který je odvozen podle Pascalova zákona (1.1).

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \quad (1.1)$$

kde:  $p_1$  [Pa] - vstupní tlak,  
 $p_2$  [Pa] - výstupní tlak,  
 $S_1$  [m<sup>2</sup>] - vstupní plocha,  
 $S_2$  [m<sup>2</sup>] - výstupní plocha.

Většinou jsou v zařízení umístěny nejméně dva multiplikátory z důvodu zabezpečení kontinuálního proudu kapaliny [6, 7].

**Zařízení s triplexovým plunžrem** (obr. 1.12) je charakteristické přímým řízením mechanismu, který má jednoduchou konstrukci klikového zařízení. Tlak je generován paralelně zařazenými válci s jednočinnou pístnicí. Díky snížení pulzace tlaku se zvyšuje účinnost zařízení, a proto není potřebný akumulátor. Výhodou tohoto zařízení je jeho rozměrová nenáročnost.



Obr. 1.12 Zařízení s triplexovým plunžrem [14].

### 1.5.2 Filtrační jednotka a způsoby úpravy vody

Existují 3 základní druhy úpravy vody, které by se měly provádět při obrábění vodním paprskem: [7]

- mechanická úprava vody (filtrace) - povrchová filtrace - dynamická filtrace,  
- hloubková filtrace,  
- koláčková filtrace,
- fyzikálně-chemická úprava,
- biologická úprava.

Filtry (obr. 1.13) jsou nepostradatelnou součástí celého zařízení, jelikož filtrují kapalinu a odlučují nečistoty již od rozměrů 1,2  $\mu\text{m}$  až do 0,5  $\mu\text{m}$ , čímž chrání štěrbinu v dýze před poškozením cizími částicemi. Typický hloubkový filtr se skládá ze 4 vrstev (od nejhrubší po nejjemnější) a zachytí částice o velikosti 10  $\mu\text{m}$ . Při použití srážedel se zachytí částice o velikosti 1  $\mu\text{m}$ . Filtry se mění obvykle

po určitých časových intervalech nebo při změně tlaku. Nároky na filtraci se zvyšují s požadavkem, aby bylo možno pracovat s vodou opakovaně (práce v uzavřeném cyklu) [6, 7].



Obr. 1.13 Filtry na zařízení pro řezání vodním paprskem [15].

Fyzikálně-chemická úprava a biologická úprava se provádí, aby byla zabezpečena kvalita vody odcházející do kanalizace.

Mezi další úpravy vody patří zejména změkčování, které se využívá jako přípravný krok před deionizací.

### 1.5.3 Akumulátor tlaku

Při zpětném pohybu pístu multiplikátoru tlak značně klesá a vzápětí rychle stoupá. Je zřejmé, že s měnícím se tlakem se mění také výstupní rychlost kapaliny vodního paprsku. Z tohoto důvodu se do systému řadí právě akumulátor (tlumič pulzů). Jedná se o nádobu, která tlumí rázy vody vyvolané pulzací. Jinými slovy se zbavuje tlakových extrémů, aby výstupní vodní paprsek měl stálý tlak, rychlost i řezací výkon. Ukázka akumulátoru je na obrázku 1.14 [7, 15].



Obr. 1.14 Akumulátor [15].

### 1.5.4 Rozváděcí elementy

Mezi rozváděcí elementy patří ty komponenty, které zabezpečují dodávku kapaliny do místa obrábění. Jsou to zejména vysokotlaké hadice (obr. 1.15), potrubí a otočné elementy. Tyto elementy jsou většinou vyrobeny z korozi-vzdorné oceli a mají průměr 6 mm - 14 mm (dnes se jedná o normalizované součásti). Rozváděcí elementy musí být přizpůsobeny pohybu řezací hlavy.

Při navrhování musí být brán v úvahu pokles tlaku při každém ohybu hadice a také brána v úvahu vzdálenost mezi čerpadlem a řeznou hlavou, jelikož se zvyšující se vzdáleností roste také vnitřní tření vody, které způsobí opět ztrátu tlaku [6, 15].



Obr. 1.15 Vysokotlaké hadice [15].

### 1.5.5 Těsnění

Mezi nejdůležitější požadavky kladené na vysokotlaké těsnění, které se využívá pro utěsnění vysokotlaké komory u multiplikátoru, patří zejména nízké průsaky, vysoká životnost, minimální tření, odolnost vůči pracovní kapalině, nízké opotřebení otěrem, nízké opotřebení vlivem vzrůstající teploty, stárnutí, koroze, nízká tvarová deformace a relaxace napětí, nízký koeficient tření a tepelné roztažnosti [7].

Životnost těsnění je závislá:

- na parametrech těsnění (tribologické vlast. materiálu, fyzikální a chem. slučitelnost, geometrie, stárnutí atd.),
- na parametrech stroje (mech. a tep. vlastnosti mat., tribolog. vl., drsnost povrchu, geometrie úložiště těsnění, těsněný úsek, relativní pohyb, vedení atd.),
- na parametrech kapaliny (viskozita, vlastnosti mezného mazání, vzduch, stárnutí atd.),
- na pracovních podmínkách (těsněný tlak, rychlost, délka zdvihu, pohybová frekvence, teplota,...).

Mezi světovými výrobci hydraulického těsnění jsou nejpoužívanější tyto materiály: elastomery, kůže, tkanina, kovy, plasty. (Ukázka sady vysokotlakého těsnění je na obrázku 1.16.)



Obr. 1.16 Sada vysokotlakého těsnění [16].

### 1.5.5 Dýzy

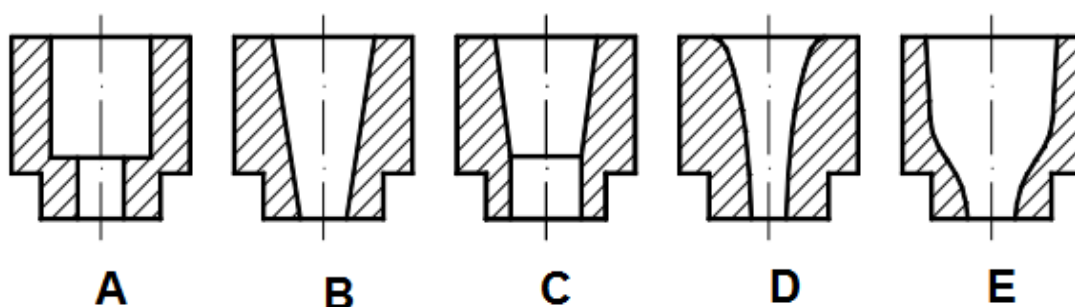
Pro jednotlivé způsoby řezání (čistým vodním paprskem, abrazivním vodním paprskem) se používají odlišné druhy dýz: [7]

- dýzy na řezání čistou vodou,
- dýzy na řezání abrazivním vodním paprskem.

Dýzy jsou základní a nejdůležitější součásti zařízení, které formují vysokorychlostní paprsek. Ovlivňují kvalitu a produktivitu řezání a řadu technologických parametrů, jako je řezný výkon, kvalita řezné plochy, kolmost řezné hrany. Drsnost vnitřního povrchu je ovlivněna technologií výroby a druhem použitého materiálu.

U kapalinových dýz je hlavním hodnotícím kritériem (z pohledu zákazníka) jejich životnost, která závisí také na materiálu dýzy, a délka soudržného proudu kapaliny při daném tlaku.

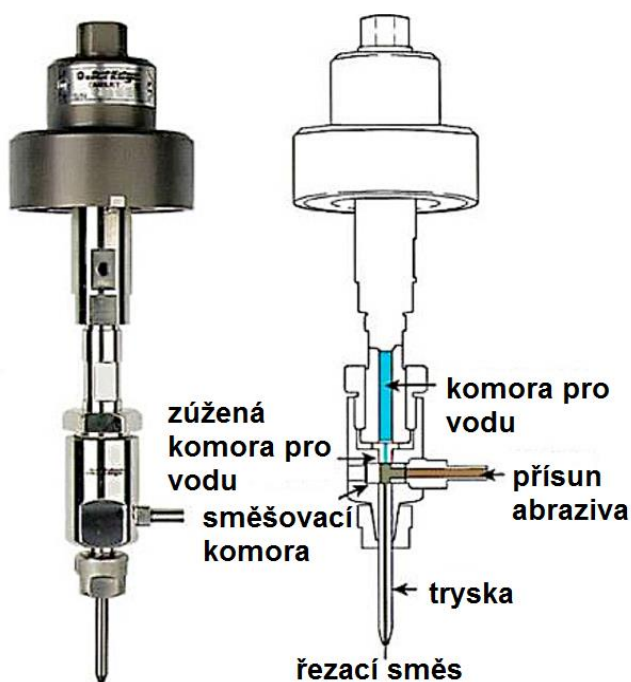
Výstupní průměr dýzy je určen parametry stroje (generátor tlaku, průtok při požadovaném tlaku). Vnitřní geometrický tvar dýzy (hydraulický profil) je nadále předmětem výzkumu. Průměry dýz se pohybují v rozmezí od 0,8 mm do 2,2 mm, mnohdy i více (v závislosti na technologické aplikaci a zdroji tlakové kapaliny). Některé používané tvary vodních dýz jsou na obr. 1.17.



A – válcová, B – kuželová, C – kombinovaná (kužel + válec), D – kónická, E – složená (bikubická)

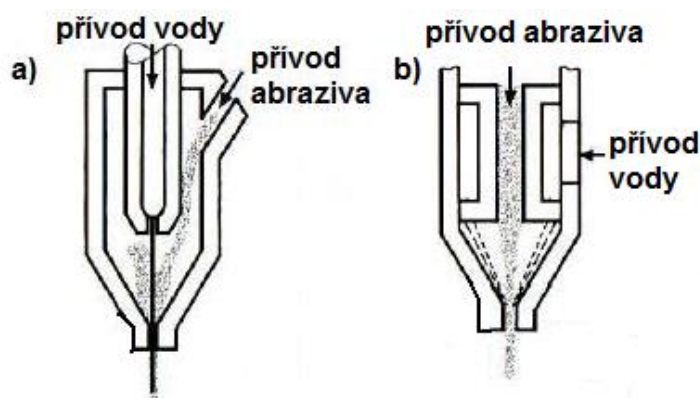
Obr. 1.17 Tvary vodních dýz [7].

Dýzy pro nízké tlaky se dříve vyráběly z tvrdokovu, ale dnes se využívá materiálů jako je safír, rubín a syntetický diamant. Diamantové dýzy mají životnost až 10x vyšší než dýzy ze safíru a rubínu, ale zároveň jsou až desetinásobně dražší. Celková životnost dýzy závisí na druhu a kvalitě pracovního média (při běžných pracovních podmínkách životnost dýzy dosahuje cca 80 pracovních hodin, safírové dýzy okolo 200 hodin), po uplynutí životnosti se štěrbina dýzy zanesou nečistotami a minerálními usazeninami z vody. Diamantová dýza je výhodná také z toho důvodu, že se její štěrbina může vícekrát pročistit a poté znovu použít. Čištění se provádí pomocí ultrazvuku [6, 12]. (Ukázka reálné hydroabrazivní dýzy v porovnání se schématem je na obrázku 1.18.)



Obr. 1.18 Ukázka hydroabrazivní dýzy [17].

Dýzy se rozdělují i podle způsobu přívodu abrasiva do dýzy. Na obr. 1.19 jsou znázorněny dva typy.

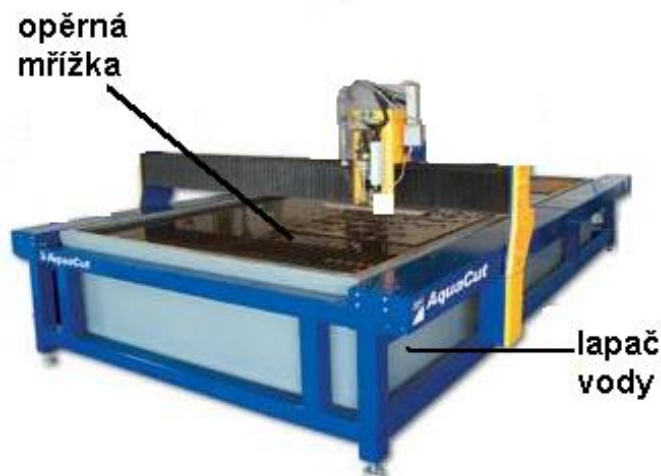


- a) Dýza s radiálním přívodem abrasiva a s jednoduchým vodním paprskem.  
 b) Dýza s axiálním přívodem abrasiva, se smíšeným vodním paprskem.

Obr. 1.19 Typy dýz podle přívodu abrasiva [6].

### 1.5.6 Lapač vody

Lapač vody (obr. 1.20) slouží k zachycení vody s abrazivem a třískou po průchodu obráběným materiálem, který je položen na opěrné mřížce. Slouží také jako tlumič hluku. Přípustný limit hluku při fyzické práci po dobu 8 hodin je 85 dB. Při AWJ může dosahovat hladina hluku více než 105 dB. Je nutno mít lapač dostatečně hluboký kvůli zabezpečení lámání vodního paprsku ještě před dosažením dna. Požadovaná minimální hloubka lapače je v rozmezí od 300 mm - 600 mm. Je-li zařízení rozměrově omezeno, je možno použít i nižší nádoby, které jsou naplněny kovovými kuličkami [6, 18].



Obr. 1.20 Ukázka lapače vody pro AWJ [19].

### 1.5.7 Řezací stoly

Podle požadavků zákazníka se řezací stoly vyrábí v rozmanitých velikostech. Nejčastější rozměry stolů jsou 1,2 m x 1,2 m, 3 m x 2 m, 4 m x 3 m a 4 m x 6 m. Stoly slouží pro upevnění řezaného materiálu a je pod nimi umístěn lapač vody. Na bocích řezacího stolu se nachází vedení pro pohybový systém stroje, které může být řešeno několika způsoby. Rozdělení a jejich určení je v tabulce 1.3 [12].

Tab. 1.3 Rozdělení pohybových systémů a jejich specifikace [12].

Vysoký výkon			↔	Nízký výkon		
Lineární motor	Dělený pastorek a čelní hřeben	Kuličkový šroub	Ozubený hřeben a pastorek	Pásový pohon	Třecí nebo tažný pohon	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• drahé</li> <li>• nevhodné pro drsné prostředí</li> <li>• extrémně rychlé</li> <li>• extrémně přesné</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• drahé</li> <li>• robustní</li> <li>• pro drsné prostředí</li> <li>• velká břemena</li> <li>• vyžaduje údržbu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• přijatelná cena</li> <li>• vysoká přesnost a rychlost</li> <li>• odolné proti drsnému prostředí</li> <li>• životnost</li> <li>• pro mnoho velikostí</li> <li>• minimální údržba</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• levné</li> <li>• vysoká rychlost</li> <li>• nízká přesnost</li> <li>• vynikající odolnost proti drsnému prostředí</li> <li>• osvědčená konstrukce</li> <li>• hlučnější provoz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• velmi levné</li> <li>• vysoká rychlost</li> <li>• nízká přesnost</li> <li>• nutnost zpětné vazby pásu pro případ prokluzu</li> <li>• hlučnější provoz</li> <li>• pro větší zátěže</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• velmi levné</li> <li>• nízká rychlost</li> <li>• nízká přesnost</li> <li>• vnější zpětná vazba</li> <li>• i velmi těžká břemena</li> <li>• nevhodné pro drsné prostředí</li> </ul>	

## 1.6 Abrazivo

Abrazivo se do vodního paprsku přivádí v tzv. abrazivní řezací trubici a díky němu se dosahuje nejvyššího výkonu vodního paprsku. Abrazivo se do vodního paprsku přidává buď ve formě prášku, mikročástic křemičitého písku, drobných syntetických granulátů, ocelových kuliček nebo ocelové drtě. Nejdůležitějšími účinky abraziva jsou maximální řezný výkon, minimální opotřebení dýzy a minimální negativní dopad na pracovní a životní prostředí. Vhodnost použití daného abraziva se posuzuje podle tzv. **zrnitosti mesh**, která udává počet ok fiktivního síta na 1“ (tab. 1.4), přes které dané abrazivo ještě propadne. Doporučená zrnitost abraziva se pohybuje v rozmezí 80 – 120, příčný rozměr zrna je přibližně 0,15 mm. [11]

Tab. 1.4 Velikost částic abraziva granátu [7].

VELIKOST OTVORU V SÍTI [mm]	MESH
1,000	16
0,417	36
0,250	60
0,188	80
0,150	100
0,106	150
0,063	250

Abrazivní materiály mohou být přírodní, ale i uměle vyrobené. V současné době se jako abrazivo nejvíce využívá granát (jehož složení je uvedeno v tab. 1.5 a ukázka je na obr. 1.21). Toto abrazivo se využívá nejhojněji, jelikož se díky němu při řezání dosahuje vysoké produktivity. Nejčastěji je využíván granát mesh 80. Dalšími možnými druhy abraziva jsou například korundový prášek, diamantový prach, ocelová drť, z přírodních brusiv lze použít granát, olivín či smirek. Je možno použít i křemičitý písek, který má ale nepříznivé účinky na pracovní podmínky. Na druhu použitého brusiva závisí převážně životnost použitých trysek [10].

Tab. 1.5 a) Chemické složení granátu [20].

Chemické složení granátu:	
SiO <sub>2</sub>	36 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 %
FeO	30 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 %
TiO <sub>2</sub>	1 %
MnO	1 %
CaO	2 %
MgO	6 %

Tab. 1.5 b) Minerální složení granátu [20].

Minerální složení granátu:	
Granát	97 – 98 %
Ilmenit	1 – 2 %
Zirkon	<0,2 %
Křemen (volný ox. křemičitý)	<0,5 %
Ostatní	<0,25 %



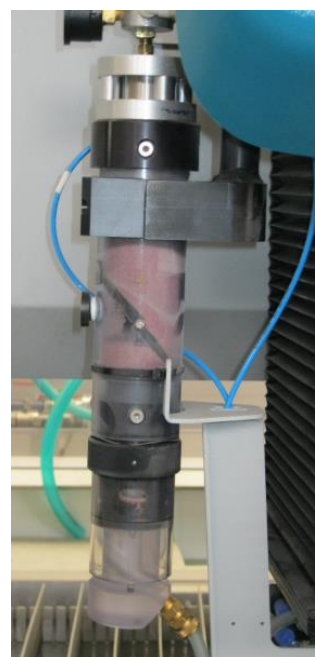


Obr. 1.21 Granát MESH 80 [21].

Podstata řezání abrazivním paprskem spočívá v průchodu kapaliny potrubím do řezací hlavice a následném průtoku vodní dýzou. Při vytékání se v rozšiřujícím prostoru mění laminární proudění na turbulentní proudění a dochází k víření kapaliny se vznikem podtlaku. Přísun abraziva do směšovací komory je rozdělen do dvou kroků pomocí tlakového zásobníku (obr. 1.22) a pomocí mini-zásobníku (obr. 1.23). Z tlakového zásobníku se brusivo přesunuje pomocí tlaku potrubím až do minizásobníku, který je situován v blízkosti řezací hlavy. Mini-zásobník je většinou stavěn pro samostatnou spádovou dopravu abraziva do řezací hlavy. V dnešní době se využívá i dálkové CNC řízení množství abraziva. Tato metoda umožňuje přesné dávkování abraziva do řezací hlavy v závislosti na tlaku kapaliny [15].



Obr. 1.22 Tlakový zásobník abraziva.



Obr. 1.23 Mini-zásobník abraziva.

### 1.6.1 Recyklace abraziva

Při řezání vodním paprskem je znečištěné abrazivo po průchodu materiálem zachyceno spolu s vodou v tzv. lapači a dále je pro řezání nepoužitelné.

Jelikož náklady na abrazivo se pohybují okolo 50 % z celkových nákladů při řezání hydroabrazivním vodním paprskem, byl vyvíjen tlak na výrobce technologie AWJ,

aby se zabývali možnostmi snížení těchto nákladů. Řešení spočívalo v recyklaci již použitého abraziva.

Aby mohlo být abrazivo recyklováno a znova využito v procesu řezání, vyvinula firma AQUAdem, spol. s r. o., zařízení pro recyklaci abraziva AQUArec PRO. Princip činnosti tohoto zařízení spočívá v odsátí znečištěného abraziva z lapače, jeho proprání, zbavení nečistot a sušení. Toto zařízení je možno připojit na libovolný odkalovací systém řezacího stolu [22].

Díky tomuto zařízení je možno po recyklaci znovu využít až 50 % abraziva. Při dalším využití zůstává hodnota 50% zachována. Výkon tohoto recyklačního zařízení je 60 kg – 90 kg recyklovaného abraziva za hodinu.

Při řezání pomocí recyklátu ovšem produktivita řezání klesá o 15 – 20 %.

## 1.7 Faktory ovlivňující řezání vodním paprskem

Na proces dělení materiálů hydroabrazivním vodním paprskem a jeho efektivnost má vliv mnoho faktorů (tab. 1.6), a to jak přímých, tak nepřímých. Mezi nepřímé faktory, které ovlivňují kvalitu nástroje, patří hydrodynamické faktory, směšovací faktory a faktory abraziva. Mezi přímé (technologické) faktory patří zejména rychlost posuvu, zdvih, úhel dopadu nástroje a směr posuvu.

Tab. 1.6 Faktory ovlivňující vysokorychlostní hydroabrazivní proud [3].

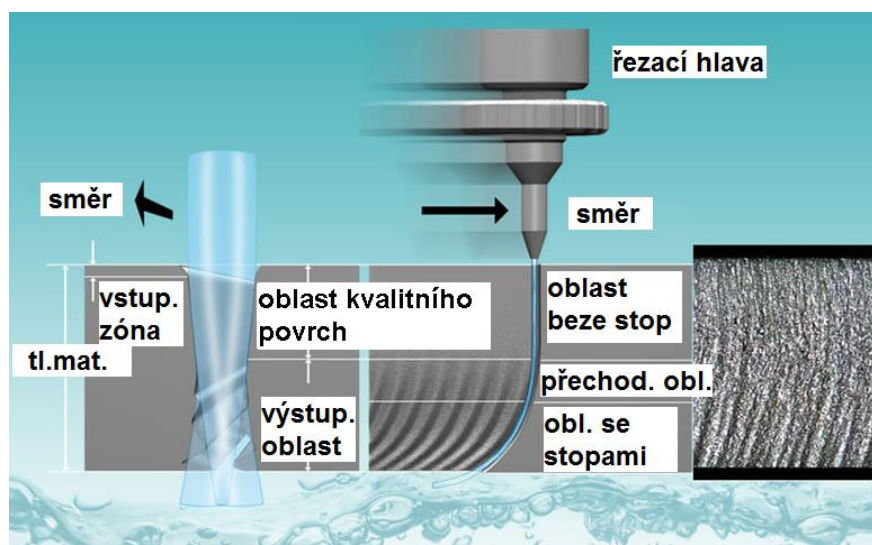
FAKTORY		DRUH	OZNAČENÍ [JEDNOTKA]
Nepřímé	Hydraulické	Tlak čerpadla	$p$ [Pa]
		Průměr vodní dýzy	$d_0$ [mm]
	Směšovací	Průměr abrazivní dýzy	$d_F$ [mm]
		Směr přívodu abraziva	$s_A$ [°]
		Délka trysky	$l_F$ [mm]
	Abrazivní	Hmotnostní tok	$m_A$ [kg.min <sup>-1</sup> ]
		Vlhkost abraziva	-
		Průměr částice	$d_p$ [mm]
		Tvar abraziva	-
		Tvrдость abraziva	$H_p$
Přímé	Technologické	Rychlost posuvu	$v$ [mm.min <sup>-1</sup> ]
		Počet přechodů	$n_p$
		Směr posuvu	$s_p$ [°]
		Zdvih	$X$ [mm]
		Úhel působení	$\Phi$ [°]

Směs ovlivněná všemi výše uvedenými faktory proudí fokusační trubicí nadzvukovou rychlostí, tím je vytvářen flexibilní řezný nástroj hydromechanického charakteru. Tento proud vytváří na obrobku studeným způsobem reliéfy.

Vodní paprsek v materiálu zanechává stopu, která se dělí na tři základní oblasti (obr. 1.24): [12]

- oblast kvalitního povrchu,
- přechodová oblast,
- oblast se stopami vodního paprsku.

Tato skladba povrchu je obdobná u všech řezaných materiálů. První oblast (oblast beze stop) je úměrná rychlosti posuvu řezací hlavy vůči obráběnému materiálu.



Obr. 1.24 Oblasti řezu [12].

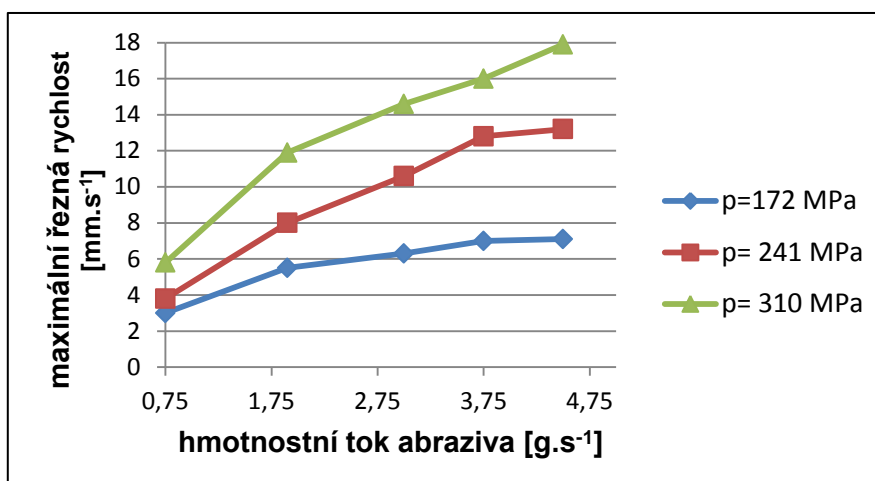
Na řezaném materiálu vzniká rýhování, a to jak z vnitřních příčin (rozdělení kinetické energie abrazivní částice), tak z vnějších příčin: [3]

- proměnlivost procesních faktorů, jako je rychlost posuvu, tlak, hmotnostní tok abraziva,
- vibrace obráběného materiálu a hlavice v průběhu dělení,
- vibrace způsobené nosičem abrazivní hlavice.

V horní erozní zóně obrobku má většina částic vyšší energii než je potřebná energie k destrukci, tudíž se může celá obrobená plocha přeřezat a může být dosaženo hladkého povrchu. S nárůstem hloubky klesá energie, tudíž se účinek proudu snižuje a vlnitý profil se rozšiřuje. Tento proces zanechává ostré výběžky a žlábký na obrobené ploše.

### 1.7.1 Hydraulické faktory

Díky zvyšujícímu se tlaku vody se zlepšuje kvalita řezných hran při řezání a dochází i ke zvyšování rychlosti proudění a tím i celkové energie v dýze, což umožňuje řezat tlustší materiály. Na obrázku 1.25 je znázorněn vliv změny tlaku na maximální řeznou rychlost při různém hmotnostním toku abraziva (dělený materiál: slitina niklu – Inconel).



Podmínky řezání: inocel, granát 150.

Obr. 1.25 Vliv změny tlaku na řeznou rychlost [7].

Ukázka používaných tlaků vody při určitých průměrech vodních trysek a dosahovaných rychlostí proudění (tab. 1.7).

Tab. 1.7 Rychlost proudění v závislosti na tlaku a průměru vodní trysky [23].

TLAK VODY [MPa]	PRŮMĚR VODNÍ TRYSKY [mm]	RYCHLOST PROUDĚNÍ [l.min <sup>-1</sup> ]
380	0,15	0,64
	0,30	2,60
275	0,15	0,17
	0,30	2,20
200	0,15	0,49
	0,30	2,00

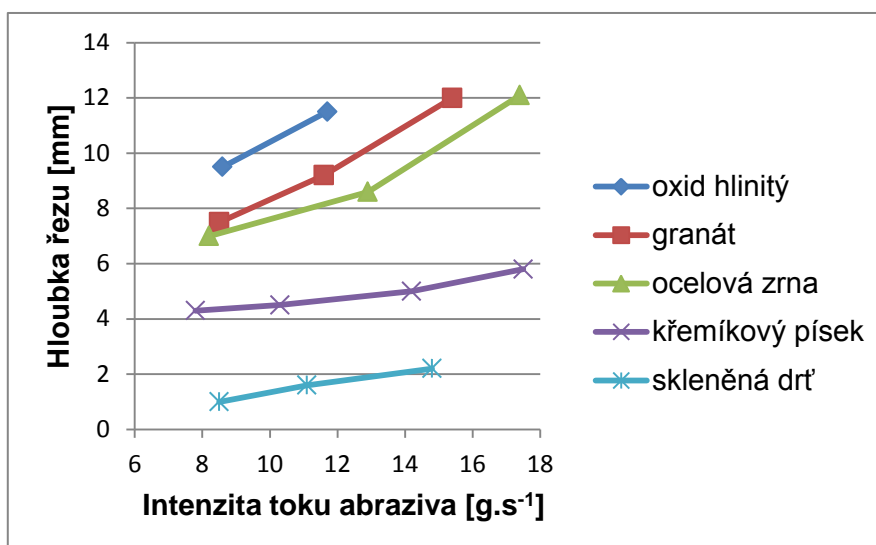
Tlak kapaliny má také spoustu jiných vlivů na činnost systému, a to například: [7]

- vliv na hydraulickou účinnost,
- vliv na rozšiřování paprsku,
- tříštění abrazivních částic uvnitř dýzy,
- opotřebení abrazivní směšovací dýzy (souvislost ekonomická).

### 1.7.2 Abrazivní faktory

Voda přispívá při použití AWJ k uvádění abraziva do vysokých rychlostí při vstupování do směšovací komory (abrazivo získává vysokou kinetickou energii a hybnost) a k odvodu použitého abraziva a mikročástic obrobku. Působí také jako tzv. otvírací klín pro zvýšení rychlosti šíření trhlin v erozním procesu.

Abrazivní faktory, které ovlivňují hloubku řezu, jsou druh použitého abraziva, jeho tvar, tvrdost a zrnitost. Nejvhodnější tvar mají abrazivní částice s vysokou kulatostí a malou kruhovitostí. Na obr. 1.27 je znázorněna hloubka řezu v závislosti na intenzitě toku jednotlivých druhů abraziva při řezání nízkolegované konstrukční oceli.



Podmínky řezání:  $p = 207 \text{ MPa}$ ,  $v = 4,1 \text{ mm.s}^{-1}$ , ocel  
DIN 35CrNiMo6.

Obr. 1.27 Grafická závislost hloubky řezu na intenzitě toku abraziva [6].

Z grafu vyplývá, že se zvyšováním hmotnostního toku abraziva do vodního paprsku se zvyšuje i dosahovaná hloubka řezu. To však platí pouze do určitého **kritického hmotnostního toku**. Při jeho překročení již hloubka řezu nenarůstá, ale naopak začíná klesat. Je to z toho důvodu, že se část energie spotřebovává při vzájemných nárazech abrazivních částic.

Mezi další faktory ovlivňující AWJ patří parametry směšování abraziva. Zde hraje nejdůležitější roli tvar a rozměr směšovací komory a abrazivní dýzy. Rozměry směšovací komory a tlak kapaliny udávají maximální hmotnostní tok abraziva. V této komoře se mění charakter proudění vrstev kapaliny z laminárního na turbulentní, vzniká podtlak a následně je umožněno nasávání abraziva ze zásobníku. Platí zde přímá úměrnost - čím je vyšší podtlak, tím větší je maximální hmotnostní tok abraziva. Ve směšovací komoře dále probíhá prvotní promísení abraziva s proudem kapaliny [3, 7].

### 1.7.3 Technologické faktory

Se zvyšujícím se posuvem se zhoršuje kvalita spodní části řezu (obr. 1.28). Moderní regulátory umožňují nastavení kvality řezu, která je stanovena mnoha požadavky. Otvory o vysoké přesnosti se musí řezat menší rychlostí pro vytvoření hladší a rovnější řezné plochy (Q5). Vyšší řezné rychlosti, které vytváří drsnější okraj (Q1), se využívají pro méně významné plochy [15].

Tabulka 1.8 udává přibližné hodnoty těchto jednotlivých stupňů přesnosti povrchů. Hodnoty skutečné mohou být rozdílné, podle typu materiálu.

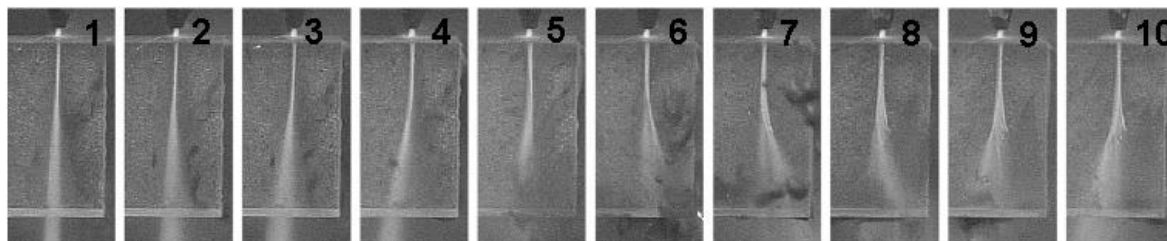
Tab. 1.8 Popis jednotlivých stupňů přesnosti [15].

Stupeň kvality	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Charakteristika řezu	Separáčn <sup>í</sup> řez	Hrubý řez	Čistý řez	Kvalitní řez	Excelentní řez
Drsnost Ra v horní části	4,0 – 6,3	cca 4,0	cca 4,0	cca 3,2	pod 3,2
Drsnost Ra v dolní části	do 40	do 25	do 12,5	cca 6,3	cca 3,2
Tvarová přesnost v horní části [mm]	±0,2	±0,2	±0,15	±0,1	±0,1
Tvarová přesnost v dolní části [mm]	Výrazné nepřesnosti	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu	±0,2	±0,1
Úkos	Výrazný kladný úkos	Dle typu a tloušťky materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu	Většinou minimální	Většinou mírný podřez

Q1 - separáčn<sup>í</sup> řez, Q2 – hrubý řez, Q3 - čistý řez, Q4 – kvalitní řez, Q5 - excelentní řez

Obr. 1.28 Závislost kvality řezu na rychlosti vodního paprsku [15].

Obrázek 1.29 znázorňuje oscilující vodní paprsek v průběhu řezání. Je zde zaznamenán vstup vodního paprsku do pracovního prostoru (začátek řezání) a jeho výstup s nejlépe patrnou oscilací vodního paprsku. Na začátku řezání paprsek prostupuje hlouběji do řezaného materiálu. Jsou zde zaznamenány sekvence vodního paprsku v rozmezí 0,04 s při řezné rychlosti  $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z obrázků lze vidět, že vodní paprsek během tohoto časového úseku změnil dvakrát směr. První změna nastala po pátém obrázku a druhá po devátém [24].



Obr. 1.29 Oscilace vodního paprsku [24].

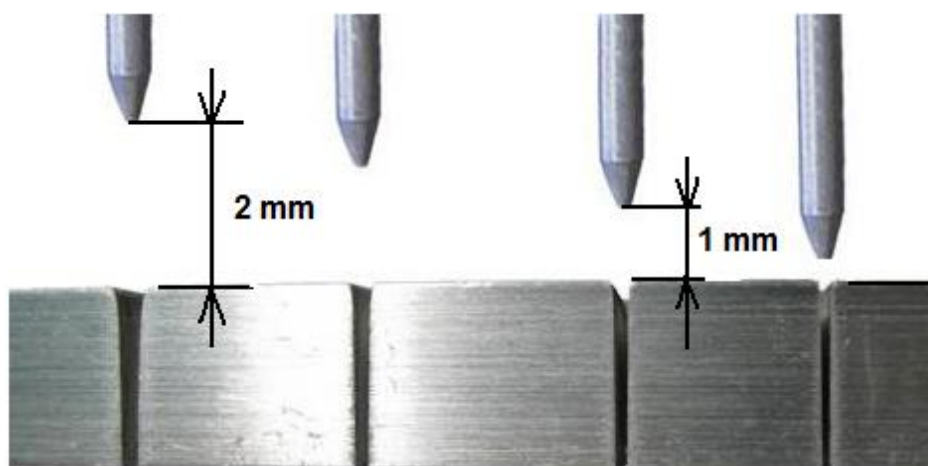
Aby byl řez nejkvalitnější, měla by zůstat zachována vzdálenost mezi tryskou a obrobkem. (Ukázka závislosti kvality řezu na vzdálenosti trysky od obráběného materiálu je na obr. 1.30.) Optimální vzdálenost mezi tryskou a obrobkem při řezání abrazivním vodním paprskem je 1–1,5 mm. Při vzdálenosti vyšší než 1,5 mm bude docházet k zaoblení horní hrany řezu. Příčinou tohoto jevu je ztráta

soudržnosti vodního paprsku při průchodu vzduchem, tzn. jeho rozšiřování a následné snížení tlaku a rychlosti kapaliny. Další příčinou této vysoké vzdálenosti může být zvýšený úhel řezu. Při velké vzdálenosti vyústění může nastat situace, že paprsek nemá dostatek energie k tomu, aby plně pronikl materiálem, a může ho jen plasticky deformovat.

Změna geometrie řezu nastává za těchto okolností: [7]

- malá vzdálenost dýzy od materiálu (vodní paprsek má vysokou kinetickou energii a rozrušování materiálu nastává nejen ve svislém, ale i v radiálním směru),
- optimální vzdálenost dýzy od materiálu (zvýšením vzdálenosti dýzy od materiálu se paprsek stabilizuje),
- velká vzdálenost vodního paprsku od materiálu (při vyšší vzdálenosti se vodní paprsek rozpadává; rozrušení materiálu nastává kvůli kompaktnímu jádru, ale i působením vodní mlhy).

Při zvýšení vyústění cca o  $\frac{1}{4}$ , se musí řezné rychlosti snížit asi o 20 %, aby se dosáhlo přibližně stejných výsledků, co se týče tolerance a kvality hrany. Nejspolehlivější dodržení vzdálenosti je automatické řízení výšky [7, 15].



Obr. 1.30 Závislost kvality řezu na vzdálenosti trysky od obráběného materiálu [15].

Větší hloubky řezu (například při nízkém tlaku nebo při vyšší řezné rychlosti) je možné dosáhnout zvýšením počtu přechodů vodního paprsku po stejné řezné dráze při nezměněných technologických parametrech. Při každém dalším přechodu je přírůstek hloubky řezu nižší, což je způsobeno odporem stěny řezané drážky. Zhoršuje se také odchod použité kapaliny, abraziva a rozrušeného materiálu z řezu v dané hloubce [7].

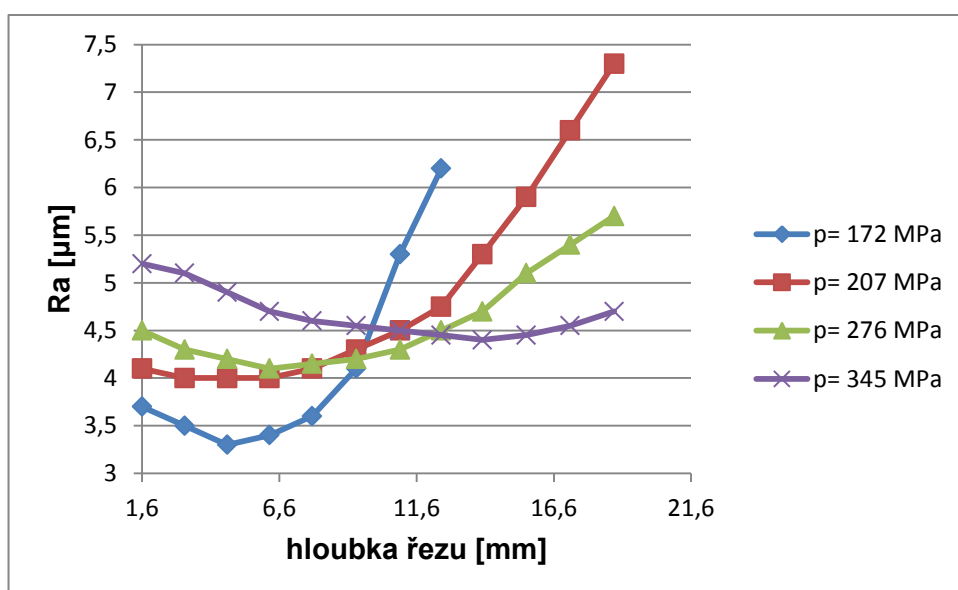
Nejefektivnější úhel řezání je  $90^\circ$  (tzn. vodní paprsek je kolmý na řezaný materiál). Při změně úhlu dopadu dochází ke změně hloubky a kvality řezu z důvodu pozměnění mechanismu rozrušování materiálu.

Všeobecně je hloubka a kvalita řezu závislá na druhu řezaného materiálu a jeho mechanických vlastnostech (tvrdost, houževnatost). Při řezání materiálů s vysokou tvrdostí (SiC) je dosahováno větší hloubky řezu než při řezání stejně tvrdých, ale houževnatých materiálů (WC).

## 1.8 Vlastnosti obrobeného povrchu

### 1.8.1 Drsnost povrchu

Hydroabrazivní paprsek vytváří na obrobeném povrchu reliéf, který se rozděluje z hlediska kvality na horní erozní zónu a dolní erozní zónu. Kvalita je zde posuzována pomocí průměrné aritmetické úchytky povrchu  $R_a$  ve svislém směru. Horní erozní zóna se vyznačuje nižšími číselnými hodnotami parametru profilu  $R_a$ . Dolní erozní zóna je specifická vyššími číselnými hodnotami parametru profilu  $R_a$ . Při snižování rychlosti posuvu abrazivní hlavice se rozšiřuje zóna s nižší drsností povrchu a prostupuje i do větších hloubek obrobeného materiálu. Zároveň platí, že se zvětšující se hloubkou řezu se vyskytují oblasti s vyšší hodnotou průměrné aritmetické úchytky profilu  $R_a$ . Velikost tlaku kapaliny má význam na kvalitu řezné plochy při měnící se hloubce řezu. Z tohoto vyplývá, že kvalitnější povrch je v horní části řezné plochy, a to i při použití nižšího tlaku vodního paprsku. Lepší kvalita povrchu v závislosti na nižším tlaku může být očekávána pouze v určitém malém rozmezí, dále je totiž kvalita řezu podmíněna i určitou výstupní rychlostí abrazivních částic, jejich počtem nebo jejich velikostí. S vyšším tlakem je i rychlejší ztráta kinetické energie částic, která je potřebná na rozrušení materiálu. Z tohoto důvodu je oblast s vyšší kvalitou řezu jen v malých hloubkách. Z obrázku 1.31 je také zřejmé, že vyšší kvalita řezné plochy do hloubky je úměrná vyššímu tlaku kapaliny. Tyto závislosti mají průběh odpovídající téměř parabolám [3, 7].



Podmínky řezání: hliník,  $m_A = 227 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $v = 127 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , granát 80.

Obr. 1.31 Vliv tlaku kapaliny na průměrnou aritmetickou úchytku profilu [7].

### 1.8.2 Vady po dělení abrazivním vodním paprskem

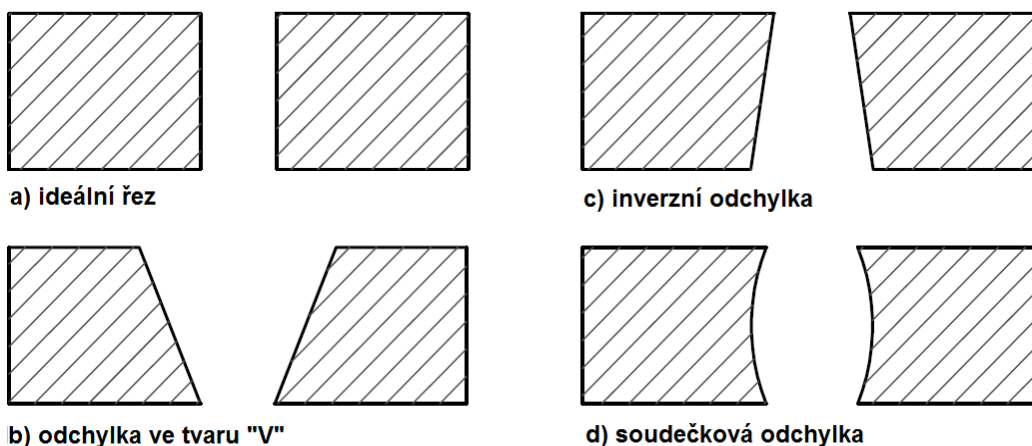
**Rozšířená řezná mezera** – geometrie řezání je negativně ovlivněna především odchýlením vodního proudu od kolmého směru (zejména při tvarovém řezání). Původní usměrněný proud se rozpadá se zvětšující se vzdáleností od ústí dýzy. Úbytek soudržnosti proudu má vliv na narůstající šířku proudu, pokles erozních a výkonnostních vlastností. K tomuto úbytku dochází kvůli ztrátě kinetické energie a



odporu, který vzniká působením proudu na řezaný materiál. Závěrečný tvar obrobku je tvořen působením pružného proudu (cca 1,2 mm) a také částečně rozptýleného proudu s proměnnou velikostí. Podle charakteristiky řezné mezery se určuje dosažená kvalita řezné plochy [3].

**Odchylka kolmosti** – znamená zúžení stěn obrobené plochy (při AWJ). Základní druhy odchylek kolmosti jsou následující: [3]

- odchylka tvaru V – případ, kdy je řez v horní části širší než v dolní. Je způsoben delším působením proudu, takže horní část materiálu je erozi více vystavována než spodní. Další příčinou vzniku odchylky může být odraz vodního paprsku od materiálu, což vede k erozi boků vodní štěrbiny. Jedná se o nejčastější typ odchylky (obr. 1.32 b);
- reverzní odchylka – nastane tehdy, když je řez v horní části užší než v dolní. Tato odchylka je běžná u měkkých materiálů (obr. 1.32 c);
- soudečková odchylka – střed řezu je širší než horní nebo dolní část. Vzniká při obrábění velmi tlustých materiálů (obr. 1.32 d);
- kosodélníková nebo lichoběžníková odchylka – jedná se o odchylku tvaru V, která je nakloněná z důvodu špatného úhlu řezné hlavice.

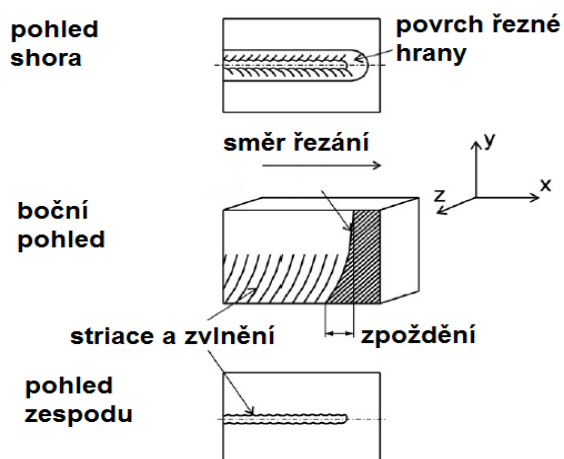


Obr. 1.32 Typy odchylek kolmosti [3].

Podle odchylky kolmosti je možno rozeznat technologii řezání hydroabrazivním paprskem. Velikost odchylky udává nutnost dalšího opracování obrobeného povrchu. Tímto je dána i velikost přídavku na další obrábění a celkové využití materiálu. Je snaha minimalizovat tento jev.

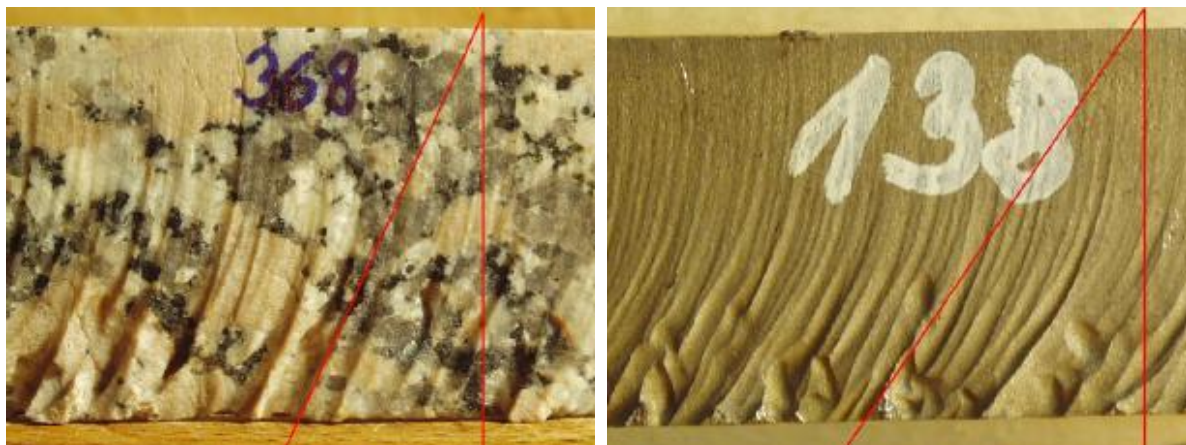
**Odklon proudu** – hydroabrazivní proud vody se od určité délky zakřivuje. Toto zakřivení je v opačném směru, než je směr dělení materiálu. Jedná se o odklonění proudu o určitý úhel. Důsledkem odklonu proudu je zhoršování kvality povrchu, čímž je myšleno zhoršování drsnosti a odchylka kolmosti řezné hrany materiálu ve směru kolmém na směr dělení [3].

**Zaostávání** - poloha vstupu paprsku do materiálu není shodná s polohou vystupujícího paprsku. Vystupující paprsek zaostává - zaostávání se pohybuje v rozmezí od desetin milimetru až do několika desítek milimetrů. Grafické znázornění zaostávání (a tím způsobené striace) je vyobrazeno na obrázku 1.33. Výskyt vysokých hodnot zaostávání je znakem ekonomického způsobu řezání [3].



Obr. 1.33 Charakteristika striací a zvlnění na řezné hraně [24].

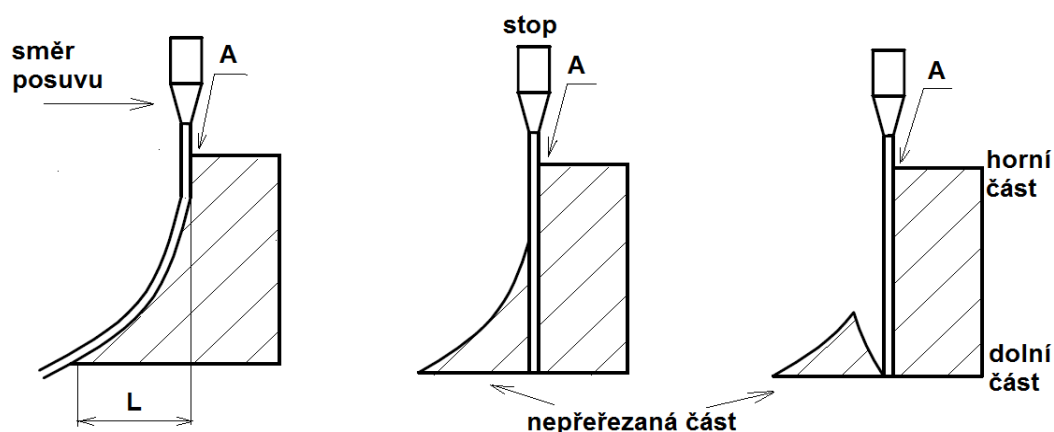
**Striace** - na řezném povrchu mají typickou strukturu, která je vyobrazena na obrázku 1.34. Tvar, velikost a hloubka striací je závislá na řezaném materiálu, na jeho tloušťce, na řezné rychlosti a na dalších faktorech. Striace mohou být zakřivené, což vede ke změně drsnosti povrchu a ke zvlnění řezné plochy. Kvůli striacím dochází ke změně tvaru řezné hrany během řezného procesu [24].



Obr. 1.34 Ukázka striací na vzorku z žuly a z oceli [25].

**Nepravidelná hloubka stopy řezu** – jedná se o kombinaci dvou odchylek (stopa řezu a nepravidelná hloubka). Je těžké posuzovat, která odchylka se projevuje více [3].

**Neúplný konec řezu** – nastává tehdy, když při řezání materiálu nedojde k přeřezání po jeho celé tloušťce. Příčinou je často tzv. přeskočení proudu, což znamená, že proud dosáhne v horní části bodu A a v dolní poloze je spodek materiálu vzdálen o délku „L“ před bodem A. Při zastavení (obr. 1.35) nebo výrazném zpomalení posuvu se proud vody s abrazivem stále pohybuje. Horní poloha je neměnná a spodní poloha proudu (zaostávající část) přeskočí materiál, který nebyl přeřezán [3].



Obr. 1.35 Princip vzniku nepřeřezané oblasti [3].

**Povrchové kazy** – jedná se o porušení povrchové vrstvy řezaného materiálu rozptýlenými částicemi kapaliny a abraziva, které mají dostatečnou energii k narušení povrchu. Tento jev je ovlivněn především vzdáleností abrazivní dýzy od materiálu. Hraniční vzdálenost je 10 mm. Při vyšší vzdálenosti již dochází k výrazným negativním projevům. Směs vody a abraziva výrazně ovlivňuje řezaný materiál, a to zejména v blízkosti řezné hrany. Především při řezání materiálů se zvláštní úpravou dochází k poškození povrchové vrstvy v blízkosti pohybujícího se nástroje, ke zdrsnění, k nepřehlednosti, ztrátě původního lesku a k otryskání povrchu. Tyto jevy ovlivňují vzhled, ale i funkčnost řezaného materiálu. K závažnému porušení funkčnosti však nedochází [3].

Mezi důležité faktory patří také ovlivnění obráběného materiálu (často nelegovaných ocelových materiálů) řezným médiem (většinou vodou), kvůli kterému může vznikat **koroz**e (oxidace kovů účinkem vzdušného kyslíku a okolního prostředí). Tento problém je především aktuální u dělení konstrukčních uhlíkových ocelí (10 - 16, 19), kde se koroze projevuje povrchovým rozrušováním [3].

## 1.9 Dělené materiály

Vodním paprskem je možno řezat téměř každý materiál. Důležitým kritériem pro volbu řezání vodním paprskem je snášenlivost obráběného materiálu s vodou, materiál nesmí být vodou znehodnocen. Dělené materiály mohou mít i povrchovou úpravu, mohou být barvené, broušené nebo leštěné.

Tvarové možnosti u řezání vodním paprskem jsou teoreticky jakékoliv. Vznikají však tvary s mírným vnitřním zaoblením, což je důsledkem zaobleného tvaru paprsku. Při řezání jednodušších tvarů se volí statický posuv po celou řezací dobu. U složitějších tvarů se řezací parametry v průběhu mění. (Ukázka tvarové různorodosti při řezání vodním paprskem je na obrázku 1.36.)



Obr. 1.36 Ukázka tvarového řezání AWJ [26].

Touto technologií lze dělit tyto materiály: [19]

- ocel konstrukční, legovaná, tepelně zpracovaná, návarová s extrémní tvrdostí,
- slitiny hliníku, titanu, mědi a niklu,
- sklolamináty, kompozity, plasty,
- mramor, žula, pískovec, dlažba, umělý kámen, slinutá keramika,
- sklo, plexisklo,
- elektroizolační a tepelně izolační kompozity,
- těsnicí a pěnové materiály, expandovaný grafit,
- podlahové krytiny, koberce, lina,
- překližka, balza.

Na obrázcích níže jsou uvedeny některé případy využití vodního paprsku pro řezání rozmanitých materiálů a tvarů. Například obrábění oceli (obr. 1.37), řezání duralu o tloušťce 160 mm (obr. 1.38), řezání plexiskla (obr. 1.39) a řezání dlažby (obr. 1.40).



Obr. 1.37 Ukázka obrábění oceli [19].



Obr. 1.38 Řez durallem o tl. 160 mm [19].



Obr. 1.39 Řezání plexiskla [19].



Obr. 1.40 Řezání dlažby [19].

### 1.10 Automatizace a robotizace procesu řezání vodním paprskem

Při řezání vodním paprskem je vhodné použití robototechnologie, a to nejen z důvodu dosažení vyšší produktivity práce, ale i z důvodu zvýšení kvality opracovaných součástí [7].

Tato technologie má oproti konvenčním metodám zejména tyto čtyři výhody:

1. Není nutný přestavovací čas na změnu nastavení na jiný produkt (uskutečňuje se v reálném pracovním čase).
2. Operátor může rychle a snadno přeprogramovat pohyby ramene robota (držícího vodní paprsek) pro nové a modifikované produkty.
3. Při použití robotizace je možno například děrovat tenké materiály vysoce kvalitně.
4. Řezání je uskutečňováno s malou tolerancí a malými průměry dýz (snížení odpadu). Povrch je čistý, ostrý, nevzniká žádné teplo a materiál není deformován, působí minimální řezné síly (snižuje se tvorba napětí v nástroji a v držáku).

Manipulační systém této technologie musí splňovat především tyto dvě funkce: vedení pracovní hlavy, nebo vedení obráběného materiálu.

#### 1.10.1 Softwarý hydroabrazivních řezacích strojů

V dnešní době moderní stroje pro řezání vodním paprskem využívají výhradně NC nebo CNC technologii řízení. Pohyby řezací hlavy jsou určeny pomocí řídicího programu, který je vytvářen softwarem. Řídicí programy mohou být aplikovány i při opakované výrobě. K řízení jsou používány CAD/CAM systémy. V CAD programech lze vyhotovit celou výkresovou dokumentaci. Konkrétní tvar řezaných součástí je do počítače nahrán prostřednictvím CAD formátu (\*.dwg, \*.dxf, \*.CNC).

Řídicí software má za úkol co nejjednodušším způsobem komunikovat mezi obsluhou a strojem, a přitom zajistit optimální chod stroje. U některých softwarů (Flow MASTER) není nutné ani znát problematiku CNC programování.

V softwaru lze nastavit potřebné parametry řezných rychlostí, děrování, funkce stroje, pumpy atd. Jinak je obsluha velmi snadná - zadá se pouze druh materiálu,

jeho tloušťka a požadovaná kvalita řezu. Na základě těchto vstupních dat nastaví software optimální řezné podmínky. Díky řídicím programům mohou být nastaveny řezné parametry před řezným procesem nebo v jeho průběhu [12].

Rozmístění výrobků na polotovaru se optimalizuje také pomocí softwaru, a to s ohledem na maximální využití materiálu. Většinou se volí mezery mezi nejbližšími body dvou dílců od 3 mm do 5 mm. Vzdálenost dílce od okraje polotovaru se volí okolo 10 mm. Co se týče upnutí obrobku, gravitační síla je všeobecně dostatečně velká, takže vystačí na udržení obrobku ve správné pozici v průběhu řezání.

Výhody kvalitního řídicího systému:

- řezné podmínky jsou nastavovány automaticky,
- přesná geometrie řezu,
- zpomalování paprsku v rozích,
- naklápění řezací hlavy,
- rychloposuvy - při přejíždění řezací hlavy,
- rozmísťování dílců na polotovaru,
- úspora abraziva,
- menší opotřebení komponentů (především abrazivní trysky).

Používané softwary:

- **AsperWin** - tento program od firmy MicroStep CDM je zaměřen i na řezání laserem a plazmou. Program si vytváří automatické nájezdy k úsekům řezaného plánu a výjezdy od nich, a to podle předem stanovených parametrů, které se dají upravovat. Program pracuje v operačním systému MS Windows [19].
- **Flow MASTER** – inteligentní řídicí program pocházející od společnosti Flow. V tomto programu jsou již předdefinované a nastavené řezné parametry pro různé materiály a rozmanité tloušťky. Program je kompatibilní s jakoukoli výkresovou dokumentací, která je vytvořena v CAD prostředí a má příponu např. dxf, gis atd. Program pracuje v operačním systému MS Windows [12].
- **FlowXpert** – nejnovější software firmy Flow. Je zde možno nakreslit obrobek přímo v jednoduchém designérském softwaru FlowXpert nebo importovat výkres z kteréhokoliv standardního formátu 2D či 3D CADu. Software si podle zvolené technologie a uživatelských parametrů (tloušťka, materiál, požadovaný povrch hrany) najde optimální rychlost řezání. V databázi je více než 100 druhů laboratorně testovaných materiálů [27].
- **iMSNC (starší verze MSNC 500)** – řídicí systém řezacího centra AQUACUT (firma Microstep) je realizován na bázi dvou počítačových jednotek. První zprostředkovává komunikaci mezi obsluhou a strojem (jednotka využívá Windows 7 Ultimate Edition) a má integrovanou síťovou kartu pro připojení řezacího stroje do podnikové počítačové sítě. Druhá jednotka se stará o řízení pohybů a dalších funkcí stroje. Tento řídicí systém obsahuje kompletní databázi řezných parametrů, v průběhu řezání

Ize přepínat mezi třemi sadami parametrů. Díky obsáhlé databázi materiálů a jejich tloušťek je možno dosáhnout vysoké kvality celého řezného procesu. Další výhodou je implementace CAM softwaru pro tvorbu řezných plánů, s kterými je možno pracovat i v průběhu řezacího procesu [19].

## 2 STÁVAJÍCÍ TECHNOLOGICKÉ A KAPACITNÍ MOŽNOSTI FIRMY



Obr. 2.1 Logo firmy [19].

Firma AWAC, spol. s r.o. (logo je na obr. 2.1), která sídlí v Praze a má další pobočky v Brně a v Plzni, provádí zakázkové řezání vysokotlakým vodním paprskem. AWAC, spol. s r. o. (dále jen AWAC), patří mezi největší komerční řezárny v České republice co do počtu řezacích strojů a vysokotlakých vodních čerpadel. Tato firma se také zabývá prodejem CNC strojů pro technologii vysokotlakého vodního paprsku, laseru, autogenu a plazmy. Další její činností je samotná montáž a servis řezacích pracovišť. K činnosti firmy patří i dodávka náhradních dílů a spotřebního materiálu pro řezací pracoviště.

Všechna tři pracoviště této firmy nabízejí zakázkový dvousměnný provoz s případnou možností rozšíření na třísměnný provoz. Maximální možné rozměry řezaného materiálu ve firmě AWAC jsou 3 000 mm x 6 000 mm. Tloušťka materiálu se může pohybovat v rozmezí od 0,1 mm do 350 mm.

Firma se snaží vyhovět požadavkům a termínům zákazníka, a proto zpracovává a realizuje zakázky během krátkého času. Tato firma se nezaměřuje na zákazníky pouze ze strojírenství, velmi často zpracovává zakázky pro stavební, reklamní, elektrotechnický nebo lehký průmysl. Dále jsou také časté zakázky, které souvisí se zařizováním interiérů a exteriérů (např. řezání obkladů, skla, dlaždic, kamene). Výjimkou pro tuto firmu ovšem nejsou ani soukromí zákazníci [19].

### 2.1 Provozovna Brno – technologické možnosti firmy

Jedno ze tří pracovišť firmy AWAC se nachází v Brně v Horních Heršpicích, na ulici Košuličova 4, v areálu, kde sídlí více firem.

Na tomto pracovišti mají nyní celkově 4 stroje pro řezání vodním paprskem. Čtvrtým, nedávno zakoupeným strojem je stroj pro řezání ve 3D od firmy Flow. Tento stroj patří mezi špičku v řezání vodním paprskem. Jednak kvůli 3D abrazivní vodní hlavě a také kvůli provoznímu tlaku, který dosahuje až 6 000 barů. S koupí tohoto stroje se této provozovně doširoka otevřely nové možnosti, jelikož další stroj s takovými parametry v České republice není.

Obecně se v této firmě šířka řezu pohybuje od 0,1 mm do 0,3 mm pro čistý vodní paprsek, pro abrazivní vodní paprsek v rozmezí od 0,8 mm do 1,5 mm. Dosahovaná přesnost řezu je až  $\pm 0,1$  mm. Standardní přesnost řezu je však  $\pm 0,2$  mm. Firma nabízí dělení materiálů o tloušťce od 0,1 mm do 250 mm. V závislosti na děleném materiálu a na jeho tloušťce se využívá rychlost posuvu od  $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  do  $20\,000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Při rozmísťování dílů na polotovaru se volí vzdálenost mezi jednotlivými díly standardně 3 mm nezávisle na tloušťce. Stejná vzdálenost se volí od okraje polotovaru.

V této firmě zpracovávají téměř všechny druhy zakázek. Jedná se o zakázky od jednoho kusu až po téměř sériovou výrobu. Firma pružně reaguje



na objednávky, což znamená, že je schopna realizovat zakázky během velmi krátké doby a za přijatelné ceny. Je možné nechat si zpracovat vlastní materiál, nebo ho firma po domluvě sama zajistí. To vše záleží na požadavcích zákazníka.

Zakázky jsou zpracovávány například pro strojírenský, stavební, elektrotechnický, reklamní nebo lehký průmysl, dále často i pro zařizování interiérů a exteriérů.

V této pobočce firmy AWAC se využívá jako abrazivo indický granát, MESH 80. Abrazivo se v této firmě po použití dále nerecykluje. Použité abrazivo usazené na dně nádrže se odsaje (obr. 2.1), uskladní se ve vacích – big bags (obr. 2.2) a dále se vyveze na skládku nebo další možností, kterou tato firma hojně využívá, je odběr použitého abraziva firmou, která recykluje použité abrazivo a dále jej využívá pro vlastní potřeby řezání.




Obr. 2.1 Odsávací zařízení abraziva z nádrže.



Obr. 2.2 Uskladněné abrazivo ve vacích (big bags).

V následující tabulce (tab. 2.1) jsou základní charakteristiky jednotlivých strojů, které vlastní firma AWAC (pobočka Brno). Stroje jsou na obrázcích 2.3 až 2.6.

Tab. 2.1 Charakteristika jednotlivých strojů.

<p><b>AquaCut 1501.20 W [19]</b></p>  <p>Obr. 2.3 Ukázka stroje AquaCut 1501.20 W.</p>	<p><i>Šířka stolu:</i>  <i>Délka stolu:</i>  <i>Pracovní zdvih:</i>  <i>Vzdálenost trysky od materiálu:</i>  <i>Pracovní tlak:</i>  <i>Počet řezacích hlav:</i>  <i>Rychlost polohování:</i>  <i>Typ vedení v ose X:</i>  <i>Typ vedení v ose Y:</i>  <i>Přenos pohybu:</i></p> <p><i>Nastavení přesnosti polohování:</i></p>	<p>1 500 mm  2 000 mm  do 150 mm  1 mm – 1,5 mm  3 800 barů  1  do 50 m.min<sup>-1</sup>  lineární vedení  lineární vedení  ozubený hřeben a dělený předepjatý pastorek v osách X a Y, kuličkový šroub v ose Z  podle DIN 28206</p>
---	---	---

**AquaCut 4001.25 [19]**

Obr. 2.4 Ukázka stroje AquaCut 4001.25.

<i>Šířka stolu:</i>	2 500 mm
<i>Délka stolu:</i>	4 000 mm
<i>Pracovní zdvih:</i>	do 150 mm
<i>Vzdálenost trysky od materiálu:</i>	1 mm – 1,5 mm
<i>Pracovní tlak:</i>	3 800 barů
<i>Počet řezacích hlav:</i>	1
<i>Rychlost polohování:</i>	do 50 m.min <sup>-1</sup>
<i>Typ vedení v ose X:</i>	lineární vedení
<i>Typ vedení v ose Y:</i>	lineární vedení
<i>Přenos pohybu:</i>	ozubený hřeben a dělený předepjatý pastorek v osách X a Y, kuličkový šroub v ose Z
<i>Nastavení přesnosti polohování:</i>	podle DIN 28206

**AquaCut 6001.25WW [19]**

Obr. 2.5 Ukázka stroje AquaCut 4001.25WW.

<i>Šířka stolu:</i>	2 500 mm
<i>Délka stolu:</i>	6 000 mm
<i>Pracovní zdvih:</i>	do 150 mm
<i>Vzdálenost trysky od materiálu:</i>	1 mm – 1,5 mm
<i>Pracovní tlak:</i>	3 800 barů
<i>Počet řezacích hlav:</i>	2
<i>Rychlost polohování:</i>	do 50 m.min <sup>-1</sup>
<i>Typ vedení v ose X:</i>	lineární vedení
<i>Typ vedení v ose Y:</i>	lineární vedení
<i>Přenos pohybu:</i>	ozubený hřeben a dělený předepjatý pastorek v osách X a Y, kuličkový šroub v ose Z
<i>Nastavení přesnosti polohování:</i>	podle DIN 28206

**Flow MN: M4C 4M XD [28]**

Obr. 2.6 Ukázka stroje Flow M4C.

<i>Šířka stolu:</i>	2 000 mm
<i>Délka stolu:</i>	4 000 mm
<i>Pracovní zdvih:</i>	do 305 mm
<i>Vzdálenost trysky od materiálu:</i>	2,5 mm
<i>Pracovní tlak:</i>	6 000 barů
<i>Počet řezacích hlav:</i>	1 (3D)
<i>Rychloposuv:</i>	36 m.min <sup>-1</sup>
<i>Rychlost řezání:</i>	25 m.min <sup>-1</sup>
<i>Přesnost:</i>	±0,02 mm v dél. 1 m
<i>Lineární přesnost polohování:</i>	±0,025 mm

S tímto technickým vybavením je možno zpracovávat téměř jakýkoliv materiál. Rozměrově jsou výrobky omezeny velikostí pracovních stolů. Maximální řezané tloušťky jsou závislé na druhu materiálu.

## 2.2 Provozovna Brno – kapacitní možnosti firmy

Kapacitní možnosti této firmy jsou omezeny řezacími časy. Na jednom stroji v této provozovně lze počítat přibližně se 170 řezacími hodinami za měsíc. Jedná se o čistý čas řezání, v němž jsou započítány dvě osmihodinové směny za den (provoz od pondělí do pátku). Dále jsou od něj již odečteny prostoje mezi jednotlivými zakázkami, manipulace s polotovarem, čištění či poruchy strojů.

V této firmě se standardní řezací rychlost pohybuje okolo  $130 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Bereme-li v úvahu nejčastější řezaný materiál (ocel, tloušťka 10 mm), tato firma si účtuje za jeden metr řezu 300 Kč.

Z předešlých informací vyplývá, že firma je za měsíc schopna na jednom stroji nařezat 1,326 km. Což znamená, že délka řezu za jeden měsíc na tomto pracovišti je 5,304 km a za celý rok se délka řezu na celém pracovišti pohybuje přibližně okolo 63,65 km.

Kapacitu této firmy nelze nijak zvlášť navyšovat. Jednou metodou mírného navýšení kapacity je zvýšení řezné rychlosti, při tomto kroku však dojde ke zhoršení kvality řezu. V tomto případě bude záležet na druhu zakázky a požadavku zákazníka na kvalitu řezu.

Další možností navýšení kapacity firmy je rozšíření dvousměnného provozu na třísměnný (případně nepřetržitý) provoz, což by znamenalo navýšení stavu zaměstnanců minimálně o 3 pracovníky.

### 3 TECHNOLOGICKÉ MOŽNOSTI 3D ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Při řezání vodním abrazivním paprskem se nově využívá abrazivní vodní hlavice. Stroj vybavený touto technologií se vyznačuje mimořádnou přesností, rychlostí, flexibilitou, extrémní všestranností a možnostmi použití ve většině vyspělých aplikací.

Existují dva typy 3D řezání vodním paprskem:

- řezání na řezacích stolech s řízenými osami X (vlevo, vpravo), Y (dopředu, dozadu) a Z (nahoru, dolů),
- řezání robotickou paží s řezací hlavou v pětiosém systému.

Do první skupiny patří stroje, které využívají 3D abrazivní vodní hlavici v kombinaci s řezacími stoly. Tato metoda se využívá především pro řezání plochých deskovitých tvarů. (Ukázka této metody řezání je na obrázku 3.1.)

Pro obrábění tvarově a geometricky složitějších součástí se využívá druhého typu 3D řezacích strojů – 5 ti osé robotické paže s řezací hlavou. V tomto případě je doprava vysokotlaké kapaliny do řezací hlavice složitější. Přívod musí být vyřešen tak, aby nebyl porušen složitou kinematikou pohybu paže. Všeobecně musí být v tomto případě i vyšší bezpečnostní opatření. (Ukázka robotické paže je na obrázku 3.2.)



Obr. 3.1 Ukázka 3D abrazivní hlavice v kombinaci s řezacím stolem.



Obr. 3.2 Ukázka robotické ruky s řezací hlavou na konci [29].

#### 3.1 Inovace technologií podporující 3D řezání vodním paprskem

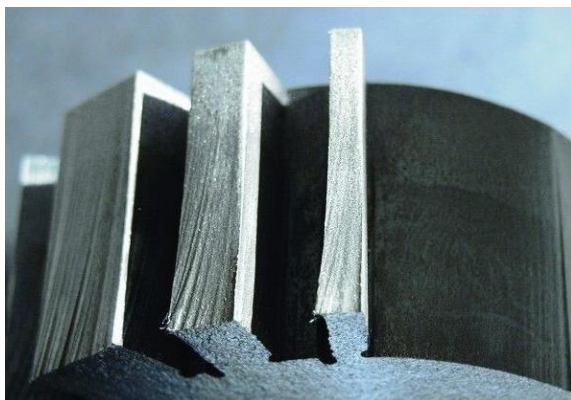
Veškeré technologie se výrobci snaží zlepšovat, zdokonalovat a inovovat. Výjimkou není ani technologie řezání vodním paprskem.

Řezání vodním paprskem proto nachází stále nová uplatnění v mnoha dalších oblastech průmyslu. Některé nové technologie, které přispívají ke zkvalitnění řezného povrchu, zvyšují produktivitu a efektivnost, ale také umožňují řezání ve 3D, jsou uvedeny níže.

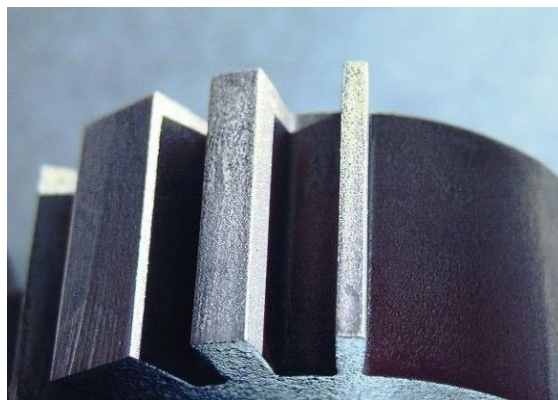
### 3.1.1 Technologie Dynamic Waterjet firmy FLOW

Ohyb vodního paprsku a úkosy lze výrazně eliminovat snížením řezné rychlosti. To ovšem znamená delší časy cyklu, a tím i zvýšení nákladů na výrobu.

Společnost Flow v roce 2001 vynalezla a patentovala technologii Dynamic Waterjet. Tato technologie slouží jako korekce ohybu vodního paprsku a úkosu řezné hrany při maximálních řezných rychlostech s vysokou přesností. Ukázka dílu řezaného vodním paprskem bez systému Dynamic Waterjet (DWJ) je na obrázku 3.3. Ta táž součást řezaná na stroji vybaveném technologií DWJ je na obrázku 3.4. Na první pohled je zde znatelný rozdíl, a to především ve výskytu úkosů a ve kvalitě řezaného povrchu [12, 27].



Obr. 3.3 Řezání bez použití DWJ [27].



Obr. 3.4 Řezání s použitím DWJ [27].

Technologie DWJ využívá matematických modelů (SmartStream™), které automaticky naklápějí řezací hlavu do stran podle potřeby eliminace úkosů řezu (obr. 3.5). Operátor pouze zadá základní řezací parametry (typ materiálu, tloušťku, požadovanou kvalitu řezné hrany). Řídicí systém (FlowMaster) se dále postará o zbytek (vypočítá potřebné pohyby, nutné pro rychlou výrobu s vysokou přesností) [12, 27].



Obr. 3.5 Korekce úkosů pomocí naklápění abrazivní hlavice [30].

Výhody spojené s použitím Dynamic Waterjet: [12, 27]

- řezání o 25 % až 400 % rychlejší než při běžném řezání vodním paprskem,
- snižování nákladů na jeden díl až o 75 %,
- i přes velmi vysoké rychlosti řezání je dosahováno velmi dobré tvarové a rozměrové přesnosti výrobků,
- úplná eliminace úkosů řezné hrany (ukázka eliminace úkosů na obr. 3.6),

- úplná eliminace chyby geometrie vnitřních rohů dílů,
- výborné řezání materiálů v několika vrstvách najednou při dosažení stejné rozměrové tolerance dílů v libovolné vrstvě (obr. 3.7),
- výrazná eliminace nutnosti potřeby dalšího mechanického opracování dílů, která je obvyklá při řezání konvenčními metodami řezání vodním paprskem,
- jednoduché ovládání díky kombinaci s řídicím systémem Flow Master.



Obr. 3.6 Ukázka řezací hlavice s technologií DWJ při eliminaci úkosů [27].



Obr. 3.7 Ukázka řezání více vrstev najednou pomocí technologie DWJ [27].

### 3.1.2 Systém Dynamic Waterjet XD firmy FLOW

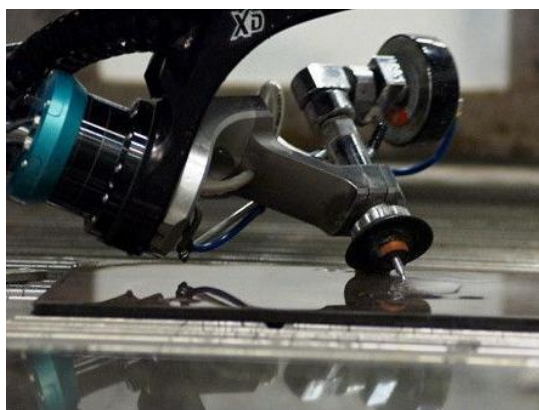
Jedná se o nejnovější technologii, která umožňuje trojrozměrné řezání vodním paprskem. Tento systém spojuje funkce pro 3D se systémem řezání vodním paprskem Dynamic Waterjet, což je nejlepší kombinace pro přesnost, rychlost a pružnost.

Jedná se o unikátní, revoluční postup v řezání vodním paprskem. Tento systém nabízí rozšířené možnosti srážení hran a pohyb pod úhlem až 60°. Díky tomuto systému se zvyšuje všestrannost a je umožněno snadné řezání tvarově obtížných součástí ve 3D.

Tato technologie umožňuje řezat 2x až 4x rychleji, a to dokonce s vyšší přesností. Pomocí této technologie je také možno řezat rohové části s menšími rozměry.

Kinematika 3D řezací hlavice umožňuje naklápění v kterémkoliv směru a tím koriguje nedokonalosti vodního paprsku, to vše za pomoci komplexních matematických modelů. Tyto výpočty se provádí pomocí inteligentního softwaru FlowXpert (přes technologii SmartStream), do kterého nemusí operátor zasahovat. Jedinými vstupy jsou výběr typu materiálu z komplexní databáze otestovaných typů materiálu a tloušťka materiálu [12, 27].

Technologie Dynamic Waterjet s rozšířenými schopnostmi práce ve 3D poskytuje nejrozsáhlejší možnosti řezání a dokonalé provedení výrobku. (Ukázka řezání ve 3D s použitím technologie Dynamic Waterjet je na obrázku 3.7. Ukázka obrobků zhotovených tvarovým řezáním (s eliminací úkosů) s použitím DWJ je na obrázku 3.9 a 3.10.)



Obr. 3.8 Ukázka tvarového řezání ve 3D pomocí technologie Dynamic Waterjet XD [27].



Obr. 3.9 Výsledky tvarového řezání s použitím technologie Dynamic Waterjet [27].



Obr. 3.10 Řezání ve 3D a současná korekce úkosů [12].

Vlastnosti systému Dynamic Waterjet XD: [12, 27]

- pohyb pod úhlem až 60°,
- rychlý zdvih a pokles (pomocí přesného elektrického pohonu),
- svislý zdvih 152 mm,
- polohová zpětná vazba poskytuje ovládání uzavřeného pohybu osy Z,
- možnost řezání pod i nad vodní hladinou,
- snadno přístupný kryt chrání kritické přesné součásti,
- vyrovnávání řezací hlavy za použití laseru (systém Dynalign™ od společnosti Flow) zaručující maximální přesnost.

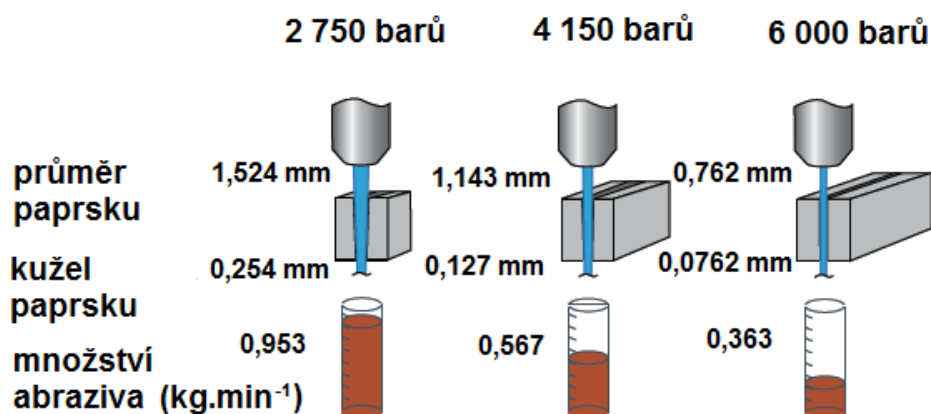
### 3.1.3 Technologie SmartStream

Technologie SmartStream pracuje na bázi složitých matematických modelů, které jsou patentovány firmou Flow. Pomocí těchto modelů se automaticky upraví řezací proud na základě vybraných materiálových parametrů.

Obsluha pouze vybírá typ a tloušťku materiálu z knihovny materiálů, kde je předprogramováno více než sto nejpoužívanějších materiálů. Dále matematické modely vypočítají správné rychlosti a úhly, aby byly součásti řezány co nejpřesněji nejvyšší možnou rychlostí [30].

### 3.1.4 Technologie Hyperpressure firmy FLOW

Tato technologie byla vyvinuta na základě snahy o zvyšování tlaků, která trvá již od počátku 70. let 20. století, kdy se tato technologie začala využívat. Důvod této snahy je zřejmý - se zvyšujícím se tlakem úměrně roste produktivita. Zvýší-li se tlak vodního paprsku, proud se pohybuje rychleji a jeho průměr se zmenší. Dále klesá i spotřeba abraziva, což je nejdražší spotřební materiál. [12, 27] (Ukázka porovnání základních parametrů řezání v závislosti na použitém tlaku je na obrázku 3.11.)



Obr. 3.11 Porovnání základních parametrů řezání na použitém tlaku [30].

Při použití této technologie s tlakem 6 000 barů se dosahuje rychlosti proudu blížíící se hodnotě trojnásobku rychlosti zvuku (asi 1 000 m.s<sup>-1</sup>) a hodnota tlaku je o 45 % vyšší oproti běžně používaným technologiím, které využívají tlaku 4 150 barů.

Řezná rychlost narůstá se zvyšujícím se tlakem (bez ohledu na materiál a jeho tloušťku), takže je možno ji zvýšit o 30 % – 50 %. Technologie řezání vodním paprskem o tlaku 6 000 barů přináší vyšší produktivitu, kdy za stejnou časovou jednotku je možno vyrobit více dílů, a to se stejnou přesností a dokonce s menším průměrem paprsku. Z tohoto plyne, že vodní paprsek je mnohem efektivnější. Snižuje se také spotřeba abraziva, což znamená snížení nákladů na řezný metr [12, 27]. Čerpadlo využívající tuto technologii je na obrázku 3.12.





Obr. 3.12 Čerpadlo s tlakem 6 000 barů.

Výhody čerpadla se jmenovitým tlakem 6 000 barů (oproti čerpadlu se jmenovitým tlakem 4 150 barů): [12, 27]

- řezná rychlost je o 30 % – 50 % vyšší,
- spotřeba abraziva se snižuje až o 30 % – 50 %,
- cena součástí se snižuje až o 20 % – 30 %,
- údržba je mimořádně rychlá a snadná.

Pojem technologie Flow HyperPressure™ neoznačuje pouze čerpadlo, ale celý systém, který umožňuje zvýšení řezného výkonu a rychlosti při snížení výrobních nákladů.

### 3.1.5 Systém ProgressJet 5AX systém

Tento systém umožňuje řezání 3D výřezů z deskových polotovaru (ukázka na obrázku 3.13). Rotační osy je možno naklápět v rozsahu  $\pm 45^\circ$ . V systému 3D režimu vyžaduje program generovaný 3D CAD – CAM [20].

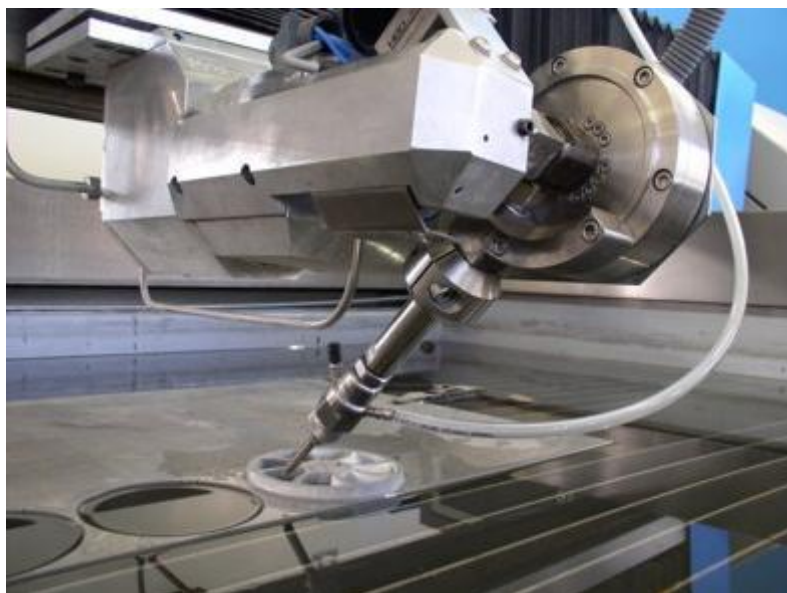


Obr. 3.13 Ukázka použití systému ProgressJet 5AX při řezání 3D výřezů z deskového polotovaru [20].

### 3.1.6 Systém ProgressJet II 60°

Tento systém pouze navazuje na předchozí systém ProgressJet 5AX a rozšiřuje jej o důležité prvky: [20]

- eliminace chyb vzniklých díky energetickému úbytku vodního paprsku;
- možnost realizace kolmých výřezů;
- zvýšení tvarové přesnosti výrobku;
- režim ProgressJet (eliminace úkosů) – funkce jsou plně řízeny systémem CNC stolu na základě materiálové a technologické databáze (v tomto režimu není vyžadován speciální 3D CAD – CAM);
- 3D režim – určen pro řezání výřezů ve 3D z deskového polotovaru (v tomto režimu je vyžadován 3D CAD – CAM), ukázka tvarového řezání z deskového polotovaru je na obrázku 3.14;
- umožnění naklápění rotačních os v rozsahu do  $\pm 60^\circ$ ;
- integrovaný laserový výškový senzor;
- bezpečnostní systém, který pomocí náklonových čidel monitoruje a vyhodnocuje polohu řezací hlavy a proudu abrazivního paprsku v pracovním prostoru, čímž se eliminuje případné zranění obsluhy či poškození stolu;
- zvýšené krytí všech elektronických a mechanických komponentů.



Obr. 3.14 Ukázka použití systému ProgressJet II 60° při tvarovém řezání z deskového polotovaru [20].

## 3.2 Příslušenství

Součástí vybavení moderního stroje pro řezání abrazivním vodním paprskem může být velké množství příslušenství, sloužící k usnadnění práce obsluhy, zvýšení produktivity, přesnosti či ziskovosti výroby. Níže jsou uvedena některá příslušenství od firmy Flow, která se vývojem této technologie zabývá již dlouhou řadu let.

### 3.2.1 Řezací hlava PASER ECL Plus

Jedná se o řezací hlavu, která je vyrobena ve velmi malých tolerancích, takže je možno docílit nejkoherentnějšího a nejsoustředěnějšího vodního paprsku. Je získán paprsek s koncentrickou vyšší až o 30 %, který prochází řeznou hlavou a tryskou. V místě řezu je tak soustředěno více energie a nedochází tolik k ovlivňování ostatních dílů. Touto řezací hlavou je možno docílit rychlejšího, efektivnějšího řezání. Jednotlivé náhradní díly mají díky této hlavici (ukázka na obrázku 3.15) vyšší životnost [27].



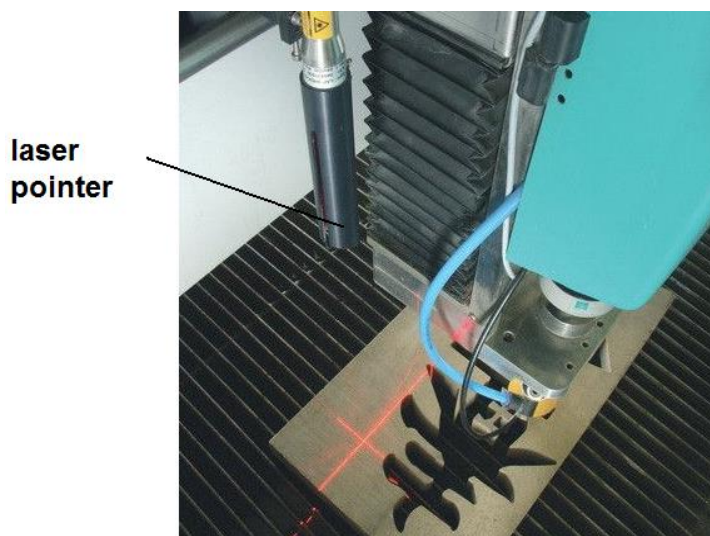
Obr. 3.15 Řezací hlavice PASER ECL Plus [27].

### 3.2.2 Laser pointer

Laserový paprsek v tomto příslušenství umožňuje jednoduchým a přesným způsobem nastavit nulovou pozici, ze které začíná řezání polotovaru.

Použití tohoto příslušenství je velmi snadné. Pomocí ručního posuvu obsluha najede řezací hlavou s laserovým paprskem na nulový bod daného dílu a uloží jej jako uživatelskou pozici (10 možných uživatelských pozic). Při začátku řezného procesu stroj pak automaticky najede na tento bod.

Laserový paprsek v kombinaci se softwarem FlowMaster dále umožňuje natáčet souřadný systém stroje podle hrany materiálu. Také lze nalézt střed kruhových polotovarů [27]. (Ukázka Laser pointeru je na obrázku 3.16.)



Obr. 3.16 Ukázka Laser pointeru [27].

### 3.2.3 Height senzor

Výškový senzor umožňuje automatické najetí řezací hlavy do předem stanovené vzdálenosti od obráběného materiálu: Po zapnutí programu se změří výška od materiálu. Toto měření je možno provádět průběžně při řezání každé kontury nebo ho lze kdykoliv vypnout či zapnout během celého řezacího programu [27]. (Ukázka výškového senzoru je na obrázku 3.17.)



Obr. 3.17 Výškový senzor [27].

### 3.2.4 Kolizní senzor

Kolizní senzor (obr. 3.18) je vhodný pro ochranu řezací hlavy před poškozením. Senzor je prstencovitého tvaru a má vodivý kontakt, který se sepne při srážce s pevnou překážkou, a způsobí tak zastavení všech posuvů a vypnutí vodního paprsku. Kolizní senzor se dodává ve dvou průměrech – 100 mm a 125 mm [27].



Obr. 3.18 Kolizní senzor [27].

### 3.2.5 Vakuový asistent

Vakuový asistent je zařízení, které umožňuje řezání skleněných polotovarů. Abrazivo se při řezání bez vakuového asistenta dostává do řezu se zpožděním, takže sklo počáteční nápor proudu vody bez abraziva nevydrží. Vakuový asistent nasaje díky podtlaku abrazivo zároveň s vodou, takže sklo nepraská [27].

### 3.3 Mach 4C

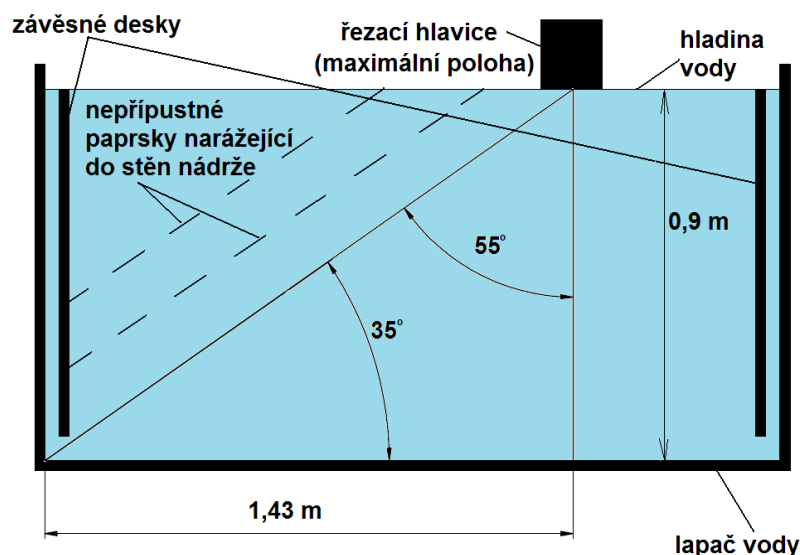
Firma AWAC, pobočka v Brně, si před krátkou dobou zakoupila nový stroj pro řezání ve 3D. Firma se jednoznačně rozhodla pro koupi stroje od firmy Flow, jelikož tato firma patří ke světové špičce v řezání vodním paprskem a velmi intenzivně se zabývá vývojem a výzkumem této technologie. Nově pořízeným strojem je Mach 4C (obr. 3.19). Parametry tohoto stroje jsou popsány v kapitole 2.



Obr. 3.19 Mach 4C [30].

Podstata 3D řezání spočívá v tom, že vodní paprsek může být vychýlen od svislého směru až o úhel 60° (v praxi se používá maximální řezný úhel 55°, vyšší úhel může být nebezpečný z důvodu možného odrazu vodního paprsku

od řezaného materiálu). Pracovní prostor při 3D řezání (při maximálním tlaku 5 500 barů) by měl být obecně omezen, jelikož by paprsek mohl uniknout z pracovního prostoru, proniknout stěnami lapače a tím ohrozit okolí. Materiál by proto (při maximálním tlaku 5 500 barů) nemohl být řezán v menší vzdálenosti než cca 1,43 m od kraje lapače vody, protože paprsek o tak vysokém tlaku nesmí narážet do stěn lapače, pouze do dna. (Ukázka tohoto mezního stavu je na obrázku 3.20.)



Obr. 3.20 Schéma minimální vzdálenosti řezací hlavice od stěny nádrže (při řezání pod úhlem 55°) v případě řezání bez pancéřových desek.

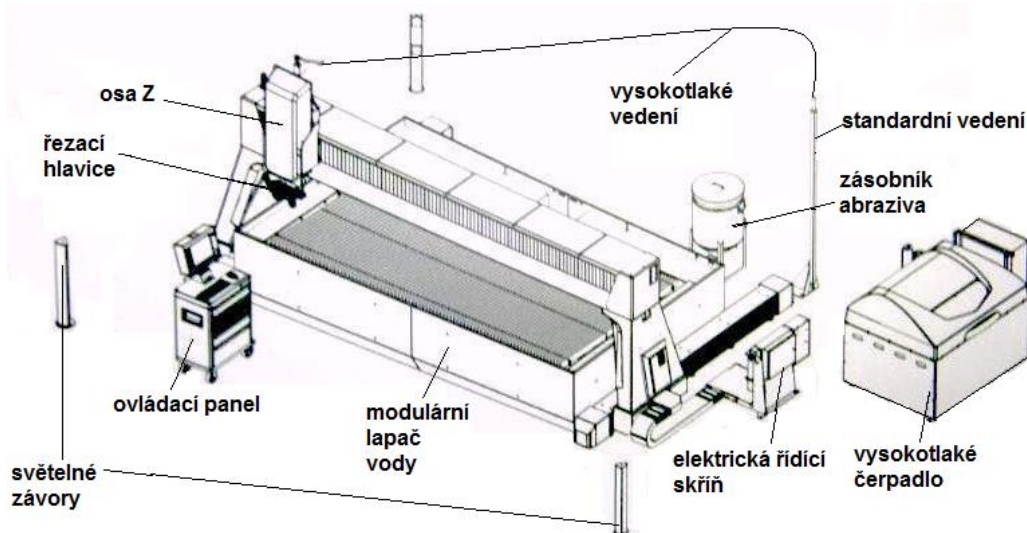
Aby mohla být při úhlovém řezání využívána celá pracovní plocha stroje, jsou při pořízení tohoto stroje v kombinaci s vysokotlakým čerpadlem (6 000 barů) součástí vybavení tzv. závěsné desky. Jedná se o pancéřové výtzuže, které jsou umístěny po vnitřním obvodu lapače vody a brání vodnímu paprsku v průniku stěnami lapače.

Výrobce uvádí, že nejefektivnější řezání na tomto stroji je při koncentraci abraziva v paprsku  $570 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ . V praxi však záleží na zkušenostech obsluhy, aby pro danou operaci odhadla konkrétní množství abraziva v paprsku.

Tento stroj je vybaven moderními technologiemi Dynamic Waterjet (pro korekci úkosů), Dynamic Waterjet XD (rozšíření DWJ o možnost 3D řezání pod úhlem až 60°) a Smartstream (matematické modely, které samy vypočítají úhel a intenzitu vodního paprsku). Všechny tyto technologie jsou podrobně popsány v kapitole 3.1. Mach 4C má pokročilý a lehce obsluhovatelý software FlowXpert. Jedná se o nejnovější software, který je vhodný pro maximalizaci produktivity a minimalizaci časových nároků (o softwaru více v kapitole 1.10.1) [27].

S tímto strojem bylo také zakoupeno nové vysokotlaké čerpadlo (s technologií Hyperpressure (viz kapitola 3.1), které umožňuje řezání až při 6 000 barech (maximální provozní tlak využívaný v této firmě je 5 500 barů, což je šetrnější k jednotlivým dílům celého zařízení, takže se zvyšuje životnost stroje). Díky tomuto čerpadlu je možno řezat rychleji a zároveň s nižšími náklady.

Ukázka schematického zapojení stroje Mach 4C s veškerým příslušenstvím (zásobník abraziva, čerpadlo, obslužná konzola, lapač vody, atd.) je na obrázku 3.21. Jsou zde nainstalovány také světelné závory. V levém rohu od čerpadla je umístěn vysílač a zároveň přijímač paprsku. V ostatních třech rozích jsou umístěna zrcadla, která odrážejí paprsek. Při přerušení paprsku se stroj automaticky vypne. Tím je zajištěna vyšší bezpečnost obsluhy. Zrcadla a zdroj jsou umístěny v dostatečné vzdálenosti od pracovního stolu - 1 500 mm v ose X i Y od maximální rohové pozice řezací hlavy.



Obr. 3.21 Schematické zapojení stroje Mach 4C s veškerým příslušenstvím [31].

Stroj je důmyslně navržen nejen pro zvyšování produktivity výroby a bezpečnosti obsluhy, ale také proto, aby byl zvýšen komfort obsluhy.

Standardní vlastnosti stroje: [12]

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

Volitelná přídatná zařízení: [12]

- dálkový ovladač,
- řízení výšky vodní hladiny,
- více řezných hlav,
- systém pro odkalování abraziva (HydroClean™),
- navrtávací pomůcka UltraPierce™,
- nástroj pro vyjímání součástí ProXtract™,
- výškové čidlo a ochrana před kolizemi,
- laserový zaměřovač
- vakuový asistent.

Firma AWAC si z volitelného příslušenství pořídila také laserový zaměřovač a vakuového asistenta. Dále čeká na dodání výškového senzoru (nyní používají pro nastavení vzdálenosti vodní trysky od materiálu spároměrky – 2,5 mm), který bude při řezání schopen řezací hlavici výškově polohovat. Toho lze hojně využít například při řezání zvlněného plechového polotovaru. Tento přístroj bude schopen hlavici výškově přizpůsobovat pro výchylky plechu velké 8–10 mm.

Stroj Mach 4C je doposud jediný v České republice. 3D řezací stroj samotný by nebyl takovou vzácností, ale ve spojení s vysokotlakým čerpadlem, které umožňuje dodat provozní tlak o velikosti až 6 000 barů, se jedná o unikátní zařízení. Je to také první komerčně využívaný stroj v Brně, který umožňuje 3D řezání.

### **3.4 Experimentální srovnání řezu při řezání na strojích s technologiemi AWJ a DWJ**

Tento experiment byl proveden ve firmě AWAC, pobočka v Brně. Vzorky byly řezány na dvou strojích. První stroj, použitý pro klasické řezání abrazivním vodním paprskem (dále jen AWJ), byl stroj AquaCut 4001.25 (s možností řezání pouze ve 2D). Druhým strojem, využívajícím technologii Dynamic Waterjet (dále jen DWJ), byl stroj Mach 4C od firmy Flow (s možností řezání i ve 3D).

Jmenovité rozměry všech řezaných vzorků byly 20 mm x 40 mm. Na obou strojích byly řezány vzorky ze dvou materiálů – ocel (11 523) a hliník (5083 AW), o třech různých tloušťkách (5 mm, 10 mm, 15 mm).

Na každém stroji bylo nařezáno 5 vzorků z každého druhu a každé tloušťky materiálu. Každý vzorek byl řezán jinou průměrnou rychlostí posuvu řezací hlavice (dále jen posuvová rychlost).

Posuvové rychlosti na obou strojích se neshodovaly - byly využity posuvové rychlosti běžně používané při řezání konkrétního materiálu a tloušťky na daném stroji. Daný vzorek byl nařezán při posuvové rychlosti, která odpovídala standardní kvalitě řezu na daném stroji (určeno na základě dlouholetých zkušeností obsluhy stroje či doporučením od výrobce). Dále byly nařezány dva vzorky o vyšší a dva o nižší posuvové rychlosti (kvalitě). Tyto posuvové rychlosti byly určeny procentuálně z původní standardní (100 %) posuvové rychlosti. Stroj pro AWJ řezání řezal tlakem 3 800 barů, stroj DWJ tlakem 5 500 barů.

Experiment vycházel z přibližného porovnání výsledků řezu na stroji s využitím technologie AWJ a na stroji využívající technologii DWJ. Stroj s technologií DWJ by měl dosahovat celkově vyšší kvality řezu a měl by eliminovat úkosy na řezaném materiálu.

Níže je uvedeno srovnání metod řezání. Ke každému vzorku je zobrazen graf závislosti průměrné posuvové rychlosti řezací hlavice na šířce vzorků, měřené posuvným měřidlem v horní a dolní pozici vzorku. Pro srovnání jsou hodnoty pro metodu řezání AWJ a DWJ umístěny vždy pro daný materiál a danou tloušťku do jednoho grafu. Pro zjišťování šířky vzorků ve dvou měřených pozicích (jinými slovy pro zjišťování velikosti úkosu na vzorcích) bylo použito digitální posuvné měřidlo. Hodnoty uvedené v tabulkách jsou vždy průměrnou hodnotou čtyř měření. Horní



pozice byla měřena cca 1-2 mm od horní hrany, dolní pozice byla měřena 1-2 mm od dolní hrany.

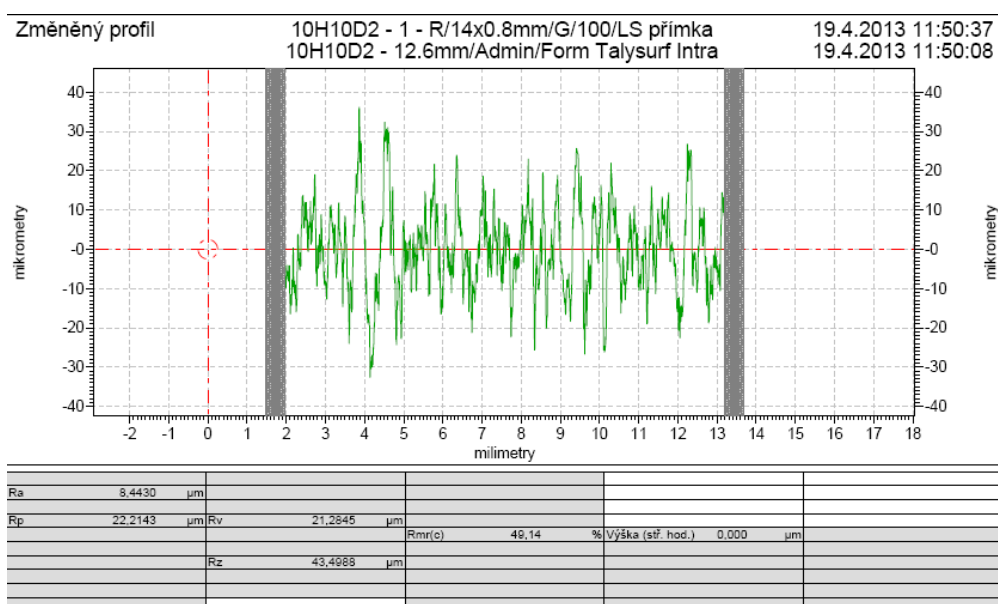
Dalším grafickým znázorněním je závislost posuvové rychlosti na průměrné aritmetické úchylce profilu  $R_a$  řezné plochy, která byla měřena na délce vzorku (ve střední části), a to ve dvou pozicích - horní (1-2 mm od horní hrany) a dolní (1-2 mm od dolní hrany). Opět jsou hodnoty pro srovnání (AWJ, DWJ) umístěny do jednoho grafu.

Při měření drsnosti byl použit přístroj Talysurf Intra 50 (ukázka měření je na obrázku 3.22), který byl propojen s počítačem opatřeným příslušným softwarem. Výstupy měření byly zobrazovány též na počítači. Tento přístroj může měřit od 0,1 mm do 50 mm s datovou roztečí 0,5  $\mu\text{m}$ , a to pomocí raménka, na kterém je kuželový diamantový snímací hrot. Dle normy ČSN EN ISO 4288 bylo měření prováděno na délce 12,5 mm. Tento rozsah je možno použít v případě hodnot struktury povrchu  $R_a$  v rozmezí od 2  $\mu\text{m}$  do 15  $\mu\text{m}$ .



Obr. 3.22 Měření drsnosti vzorků na přístroji Talysurf Intra 50.

Ukázka grafického výstupu z přístroje Talysurf Intra 50 je na obrázku 3.23. Z tohoto záznamu o měření je možno vyčíst nejen hodnoty  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$ , ale je zde graficky znázorněn i celý průběh měření. Některé další ukázky těchto výstupů měření charakteristik profilu jsou uvedeny v příloze 1-4.



Obr. 3.23 Grafický výstup z přístroje Talysurf Intra 50 (hliník, 10 mm, DWJ, dolní pozice).

Grafická vyhodnocení daných naměřených hodnot z tabulek 3.1–3.12 jsou vynesena v grafech na obrázcích 3.26 až 3.31 a 3.33 až 3.39.

Při experimentu byly použity tyto následující pomůcky:

- stroj AquaCut 4001.25 (AWJ),
- stroj Mach 4C (DWJ),
- digitální posuvné měřidlo (pro měření šířky vzorků),
- přístroj Talysurf Intra 50 (pro měření drsnosti vzorků)
- tabulka pro určení stupně kvality.

#### Parametry řezání na stroji AquaCut 4001.25 (AWJ):

- tlak: 3 800 barů,
- abrazivo: indický granát,
- zrnitost abraziva: MESH 80,
- tok abraziva: 540 g.min<sup>-1</sup>,
- Ø vodní trysky (rubínová): 0,3302 mm,
- Ø abrazivní trysky: 1,02 mm.

Jedná se o neměnné parametry, nastavené na stroji při řezání vzorků. (Ukázka z tohoto řezání je na obrázku 3.24.)



Obr. 3.24 Řezání vzorků na stroji AquaCut 4001.25 (AWJ).

**Parametry řezání na stroji Mach 4C (DWJ):**

- tlak: 5 500 barů,
- abrazivo: indický granát,
- zrnitost abraziva: MESH 80,
- tok abraziva:  $540 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $\varnothing$  vodní trysky (rubínové): 0,3556 mm,
- $\varnothing$  abrazivní trysky: 1,02 mm.

Jedná se o neměnné parametry, nastavené na stroji při řezání vzorků. (Ukázka z tohoto řezání je na obrázku 3.25.)



Obr. 3.25 Řezání vzorků na stroji Mach 4C (DWJ).

V následující části diplomové práce jsou vždy nejdříve uvedeny dvě tabulky (jedna pro technologii AWJ, druhá pro technologii DWJ), které se vztahují k jednomu řezanému materiálu o určité tloušťce. Dále jsou uvedena dvě grafická zpracování, která vycházejí z předcházejících tabulek.

V tabulkách jsou zaznamenány informace o konkrétním řezaném vzorku. Je zde vždy uveden název řezaného materiálu, jeho tloušťka, technologie řezání, rychlosti posuvu řezací hlavy a časy řezání. Dále jsou zde uvedeny naměřené hodnoty. V první řadě se jedná o změřené šířky vzorků v horní a dolní pozici. Je zde uvedena hodnota Ra řezné plochy (měřeno na délce vzorku), která byla opět měřena ve dvou pozicích – horní a dolní. Také je zaznamenána hodnota Rz ve dvou pozicích. Posledním uváděnou informací je odhadovaný stupeň kvality. Řezům byly jednotlivé stupně kvality přibližně přiřazovány podle parametrů uváděných v tabulce 1.3 a podle obrázku 1.28.

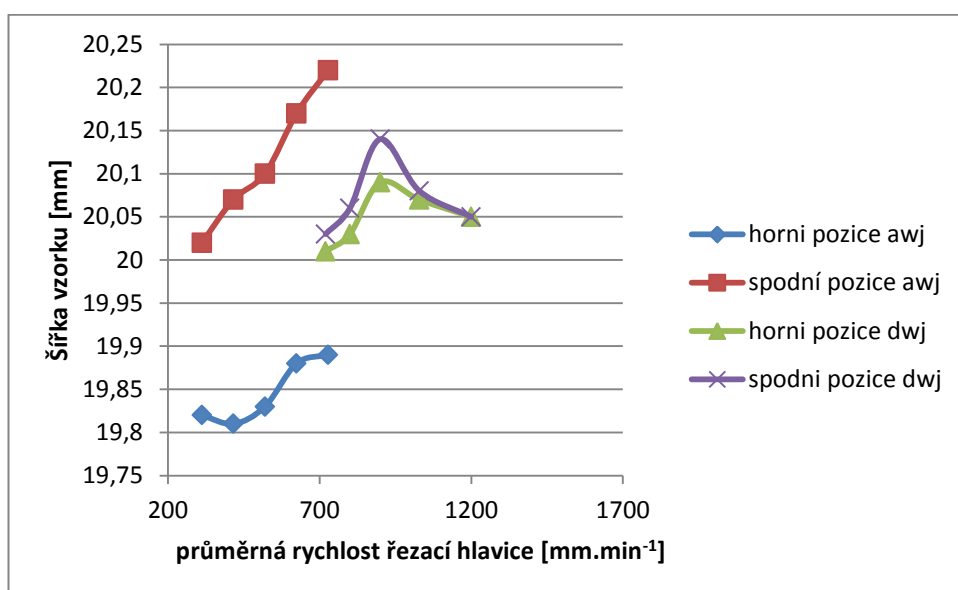
Pod dvěma tabulkami jsou umístěny vždy dva grafy. První graf obsahuje grafické znázornění závislosti šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy. Druhý graf obsahuje grafické znázornění závislosti průměrné aritmetické úchyly profilu Ra na rychlosti řezací hlavy.

Tab. 3.1 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 5 mm, řezáno technologií AWJ.

HLINÍK 5083AW 5 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		312	416	520	624	728
Čas řezání [s]		23	17	13	12	10
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,82	19,81	19,83	19,88	19,89
	Dolní [mm]	20,02	20,07	20,10	20,17	20,22
Pozice měření Ra	Horní [μm]	4,92	4,88	5,11	5,49	6,02
	Dolní [μm]	5,26	5,99	6,92	7,09	7,06
Pozice měření Rz	Horní [μm]	29,79	29,48	32,43	31,94	35,70
	Dolní [μm]	30,96	33,07	42,17	39,74	40,99
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q3	Q3

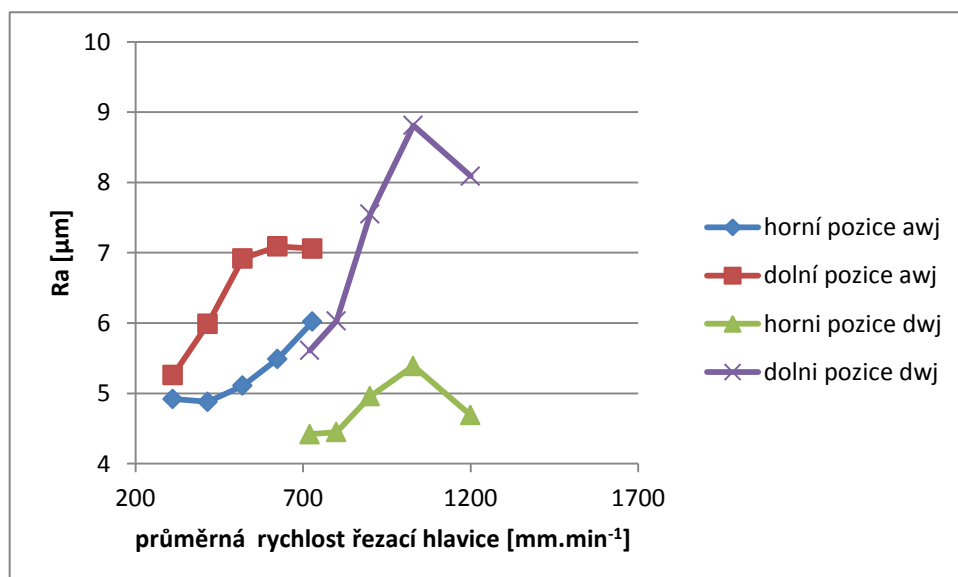
Tab. 3.2 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 5 mm, řezáno technologií DWJ.

HLINÍK 5083AW 5 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		720	800	900	1029	1200
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		10	9	8	7	6
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	20,01	20,03	20,09	20,07	20,05
	Dolní [mm]	20,03	20,06	20,14	20,08	20,05
Pozice měření Ra	Horní [μm]	4,42	4,45	4,96	5,39	4,69
	Dolní [μm]	5,61	6,03	7,55	8,81	8,09
Pozice měření Rz	Horní [μm]	28,21	27,13	30,04	30,55	27,01
	Dolní [μm]	33,57	36,39	45,51	47,48	44,18
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q3	Q3	Q3



Obr. 3.26 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy (hliník, 5 mm).

Z grafu 3.26 je zřejmé, že při řezání hliníku o tloušťce 5 mm technologií DWJ jsou hodnoty úkosu minimální. Při řezání tak tenkého materiálu má průměrná posuvová rychlost řezací hlavy na velikost úkosu téměř minimální vliv. V grafu se vyskytuje hodnota rychlosti řezací hlavy, při které byla zaznamenána odchylka od předpokládaného průběhu naměřených šířek. Může se jednat o chybu měření nebo o místo na vzorku, kde se vyskytovala výrazná striace. Při řezání technologií AWJ je velikost úkosu přibližně konstantní. Se zvyšující se průměrnou rychlostí řezací hlavy se zvětšuje šířka vzorku, a to jak v horní, tak i v dolní pozici.



Obr. 3.27 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavy (hliník, 5 mm).

Graf 3.27 vypovídá o tom, že při řezání hliníku (tl. 5 mm) má vyšší hodnoty Ra (při adekvátních rychlostech) řezání pomocí technologie AWJ. Ovšem při porovnání standardních provozních rychlostí na obou strojích je zřejmé, že hodnoty Ra jsou

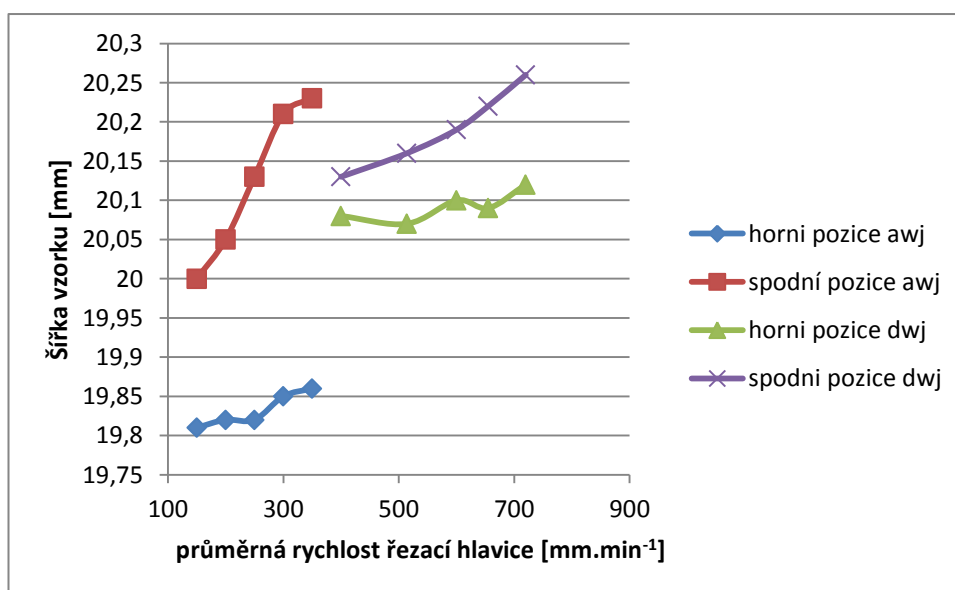
vyšší u řezání pomocí technologie DWJ. Při použití této technologie je i větší rozdíl Ra mezi naměřenými hodnotami horní a dolní pozice.

Tab. 3.3 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 10 mm, řezáno technologií AWJ.

HLINÍK 5083AW 10 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		150	200	250	300	350
Čas řezání [s]		48	36	29	24	21
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,81	19,82	19,82	19,85	19,86
	Dolní [mm]	20,00	20,05	20,13	20,21	20,23
Pozice měření Ra	Horní [μm]	4,41	4,76	4,28	4,99	4,51
	Dolní [μm]	5,10	6,34	5,31	5,28	6,34
Pozice měření Rz	Horní [μm]	27,09	28,60	25,42	30,70	29,71
	Dolní [μm]	30,67	36,41	31,18	30,83	35,58
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q3	Q3

Tab. 3.4 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 10 mm, řezáno technologií DWJ.

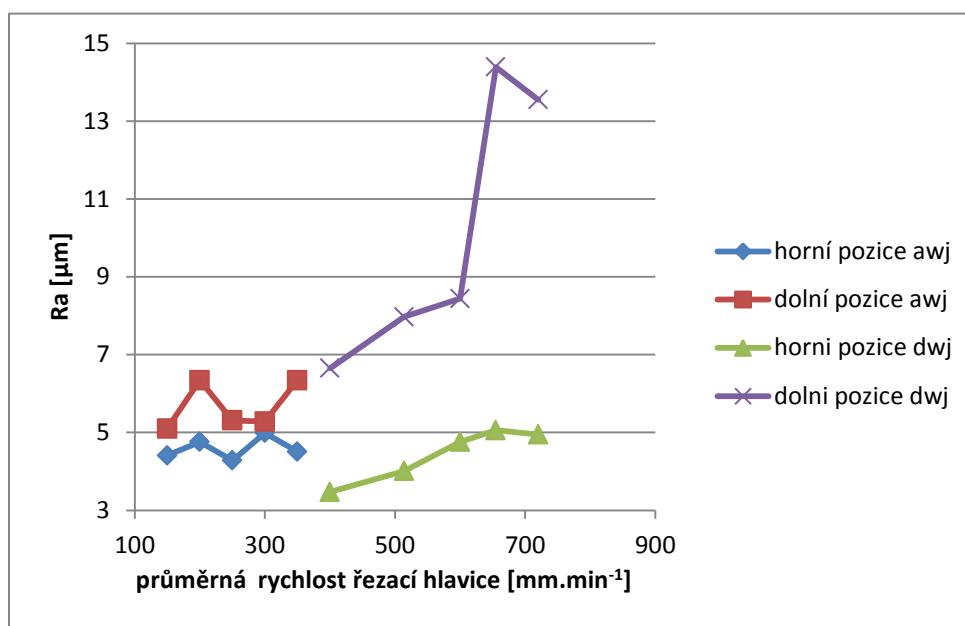
HLINÍK 5083AW 10 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		400	514	600	655	720
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		18	14	12	11	10
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	20,08	20,07	20,10	20,09	20,12
	Dolní [mm]	20,13	20,16	20,19	20,22	20,26
Pozice měření Ra	Horní [μm]	3,47	4,01	4,76	5,06	4,95
	Dolní [μm]	6,65	7,97	8,44	14,39	13,55
Pozice měření Rz	Horní [μm]	20,85	25,11	30,79	30,70	30,25
	Dolní [μm]	38,06	38,26	43,49	62,32	60,31
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q3	Q3	Q2	Q2



Obr. 3.28 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy (hliník, 10 mm).

Z grafu 3.28 je na první pohled jasné, že i při řezání hliníku o tloušťce 10 mm technologií DWJ jsou hodnoty úkosu minimální. Zvyšování průměrné posuvové

rychlosti řezací hlavy má na velikost úkosu minimální vliv. Při řezání technologií AWJ velikost úkosu narůstá se zvyšující se průměrnou rychlostí řezací hlavy.



Obr. 3.29 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavy (hliník, 10 mm).

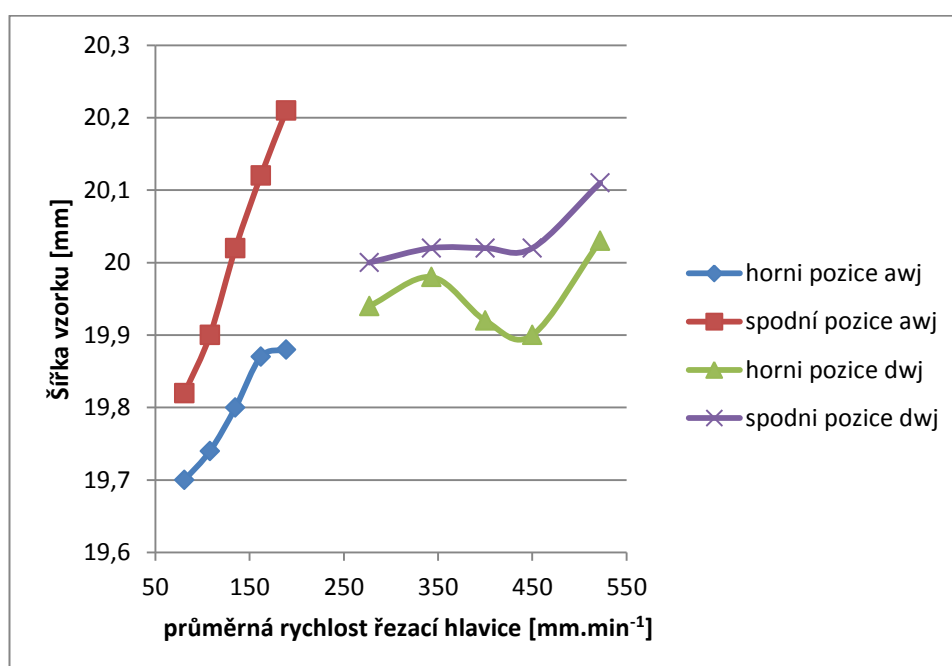
Graf 3.29 vypovídá o tom, že při řezání hliníku (tl. 10 mm) je výraznější rozdíl mezi hodnotami Ra v horní a dolní pozici u metody řezání DWJ. Počáteční hodnoty technologie DWJ (dolní pozice) narůstají přímo úměrně, ale při překročení pomyslné kritické rychlosti řezací hlavy pro daný typ materiálu a jeho tloušťku náhle značně narostou. Pokud je tedy rychlost hlavy příliš vysoká, hodnota Ra prudce stoupne. Stupeň kvality řezu dosahuje pouze hodnoty Q2.

Tab. 3.5 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 15 mm, řezáno technologií AWJ.

HLINÍK 5083AW 15 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		81	108	135	162	189
Čas řezání [s]		89	67	53	44	38
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,70	19,74	19,80	19,87	19,88
	Dolní [mm]	19,82	19,90	20,02	20,12	20,21
Pozice měření Ra	Horní [μm]	3,69	3,74	4,07	4,16	4,19
	Dolní [μm]	4,29	4,85	4,79	5,65	6,18
Pozice měření Rz	Horní [μm]	24,47	24,61	17,72	25,45	24,94
	Dolní [μm]	25,58	27,99	24,71	31,33	34,94
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q4	Q3

Tab. 3.6 Hodnoty ke vzorku z hliníku o tl. 15 mm, řezáno technologií DWJ.

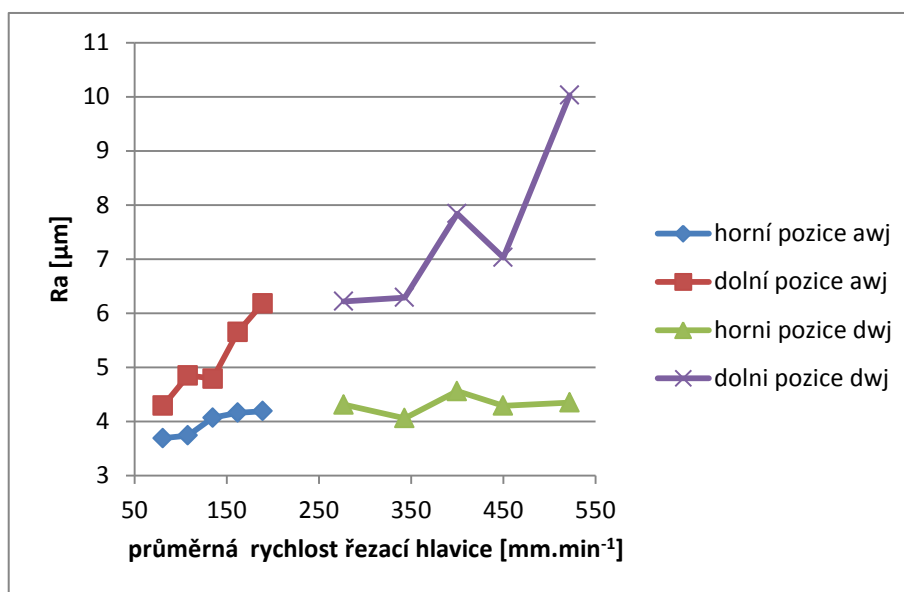
HLINÍK 5083AW 15 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		277	343	400	450	522
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		26	21	18	16	14
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,94	19,98	19,92	19,90	20,03
	Dolní [mm]	20,00	20,02	20,02	20,02	20,11
Pozice měření Ra	Horní [μm]	4,31	4,06	4,56	4,29	4,35
	Dolní [μm]	6,22	6,29	7,84	7,03	10,03
Pozice měření Rz	Horní [μm]	24,74	24,83	29,46	26,07	26,05
	Dolní [μm]	33,48	37,21	41,83	38,06	46,87
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q3	Q3	Q3



Obr. 3.30 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy (hliník, 15 mm).

Graf 3.30 opět potvrzuje, že při řezání hliníku tloušťky 15 mm technologií DWJ jsou hodnoty úkosu také minimální. Zvyšující se průměrná posuvová rychlost má při řezání této tloušťky hliníku opět téměř minimální vliv na velikost úkosu. Jinak je tomu však při řezání technologií AWJ, kde velikost úkosu při zvyšující se průměrné rychlosti řezací hlavy narůstá.





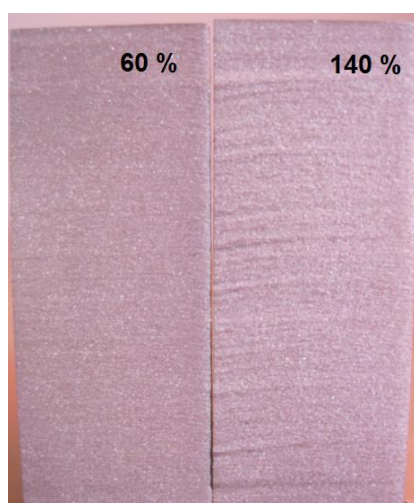
Obr. 3.31 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavice (hliník, 15 mm).

Graf 3.31 znázorňuje, že při řezání hliníku tloušťky 15 mm je dosahováno vyšších hodnot Ra při řezání technologií DWJ. Je zde i výraznější rozdíl mezi hodnotami v horní a dolní pozici z důvodu vyšší posuvové rychlosti řezací hlavice. Ra ve spodní pozici řezání technologií DWJ je téměř konstantní.

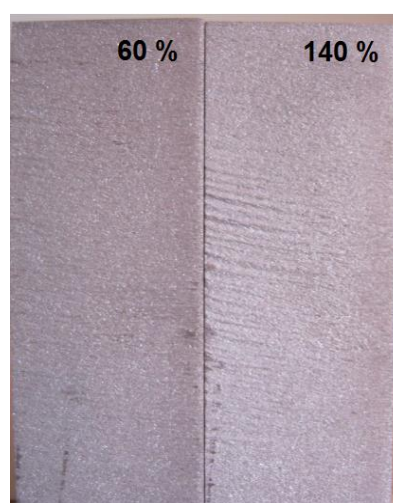
Na obrázcích níže jsou ukázky vzorků řezaných technologií AWJ a DWJ (hliník, 15 mm). Vedle sebe jsou vždy umístěny dva vzorky na rovné podložce. Jeden byl řezán nejnižší průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavice (na nejvyšší kvalitu řezu - 60 %), druhý vzorek byl řezán nejvyšší průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavice (na nejnižší kvalitu - 140 %).

Na obrázku 3.32 je ukázka řezání technologií AWJ. Z obrázku je patrný úkos vzniklý při řezání touto technologií.

Na obrázku 3.33 jsou vzorky z řezání pomocí technologie DWJ. V tomto případě je úkos minimální, okem těžko rozpoznatelný.



Obr. 3.32 Řezáno technologií AWJ.



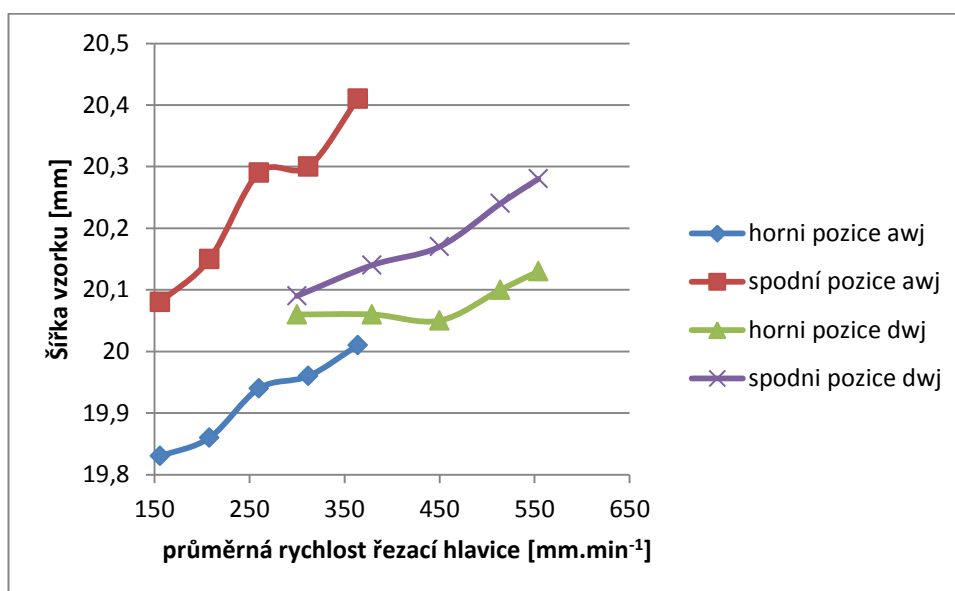
Obr. 3.33 Řezáno technologií DWJ.

Tab. 3.7 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 5 mm, řezáno technologií AWJ.

OCEL tř. 11 523 5 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		156	208	260	312	364
Čas řezání [s]		46	35	28	23	20
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,83	19,86	19,94	19,96	20,01
	Dolní [mm]	20,08	20,15	20,29	20,30	20,41
Pozice měření Ra	Horní [μm]	3,51	3,32	3,78	3,70	4,10
	Dolní [μm]	4,33	4,54	4,75	5,68	6,89
Pozice měření Rz	Horní [μm]	22,87	20,39	23,88	23,08	26,06
	Dolní [μm]	26,58	26,56	28,99	32,45	35,71
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q4	Q3

Tab. 3.8 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 5 mm, řezáno technologií DWJ.

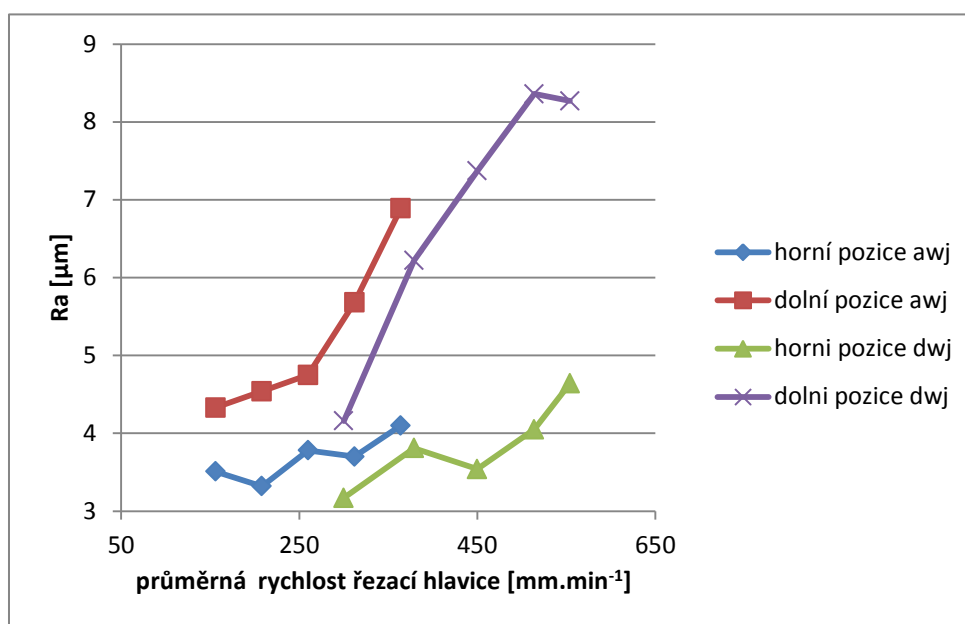
OCEL tř. 11 523 5 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		300	379	450	514	554
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		24	19	16	14	13
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	20,06	20,06	20,05	20,10	20,13
	Dolní [mm]	20,09	20,14	20,17	20,24	20,28
Pozice měření Ra	Horní [μm]	3,17	3,81	3,54	4,05	4,64
	Dolní [μm]	4,16	6,22	7,37	8,36	8,27
Pozice měření Rz	Horní [μm]	18,86	24,26	24,96	25,57	27,96
	Dolní [μm]	24,42	36,02	39,16	41,18	42,33
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q3	Q3	Q3



Obr. 3.34 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavičky (ocel, 5 mm).

Z grafu 3.34 týkajícího se řezání oceli tloušťky 5 mm je zřejmá velikost úkosu při řezání srovnatelnými rychlostmi technologií DWJ a AWJ. Při použití technologie DWJ jsou hodnoty úkosu na rozdíl od technologie AWJ minimální. Velikost úkosu se navyšuje se zvyšující se průměrnou posuvovou rychlostí také jen minimálně. Při řezání technologií AWJ je velikost úkosu se zvyšující se posuvovou rychlostí řezací hlavičky přibližně konstantní. Opět je zřejmý růst rozměrů šířky vzorků se

zvyšující se rychlostí (vzniká rozměrová nepřesnost), který je způsoben zvyšující se posuvovou rychlostí řezací hlavy.



Obr. 3.35 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavy (ocel, 5 mm).

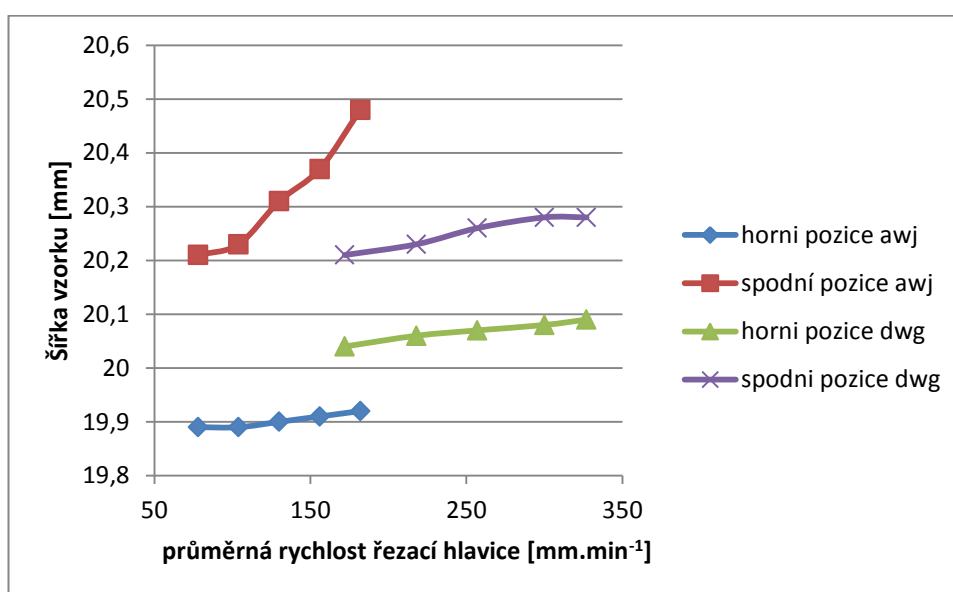
Graf 3.35 opět umožňuje srovnat dva shodně řezané vzorky (při stejné průměrné rychlosti řezací hlavy) z oceli tloušťky 5 mm. Z grafu vyplývá, že hodnoty Ra při řezání metodou DWJ jsou nižší než při řezání metodou AWJ. Rozdíl hodnot mezi horní a dolní mezí je nižší při řezání technologií DWJ. Opět po překročení určité standardní rychlosti řezací hlavy dochází u obou metod k výraznému nárůstu parametru Ra. Při sledování změn hodnot Ra v závislosti na průměrných rychlostech řezací hlavy, které jsou používány na jednotlivých strojích a odpovídají jednotlivým standardům kvality řezu, zjišťujeme, že u metody AWJ je dosahováno nižších hodnot Ra než u metody DWJ.

Tab. 3.9 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 10 mm, řezáno technologií AWJ.

OCEL tř. 11 523 10 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		78	104	130	156	182
Čas řezání [s]		92	69	55	46	40
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,89	19,89	19,90	19,91	19,92
	Dolní [mm]	20,21	20,23	20,31	20,37	20,48
Pozice měření Ra	Horní [µm]	3,19	2,85	2,92	3,99	3,98
	Dolní [µm]	3,96	3,98	4,68	4,39	6,56
Pozice měření Rz	Horní [µm]	22,01	18,94	18,64	23,99	24,85
	Dolní [µm]	24,16	22,60	24,62	25,01	34,73
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q3	Q3	Q3

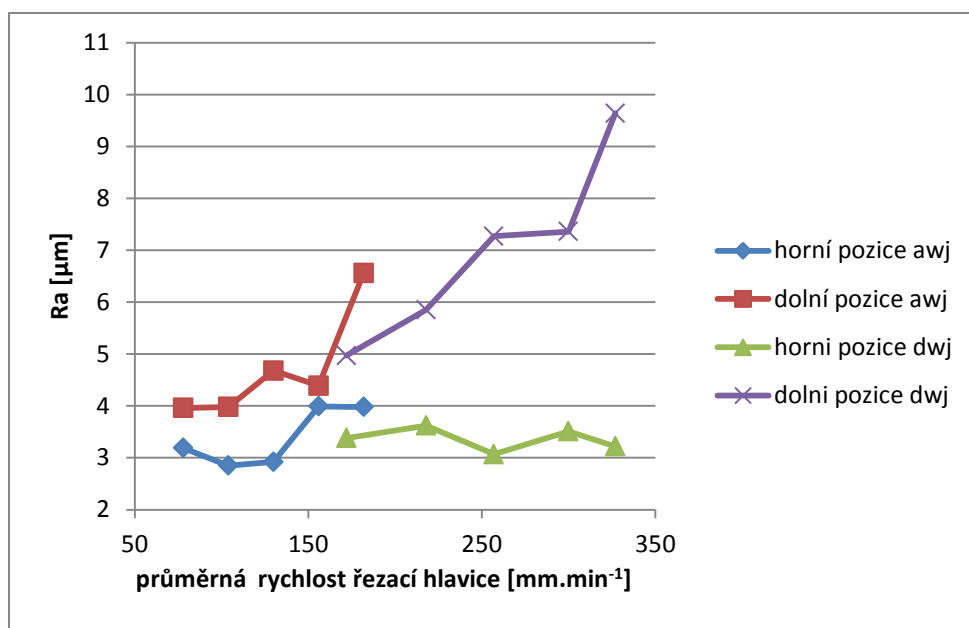
Tab. 3.10 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 10 mm, řezáno technologií DWJ.

OCEL tř. 11 523 10 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		172	218	257	300	327
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		42	33	28	24	22
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	20,04	20,06	20,07	20,08	20,09
	Dolní [mm]	20,21	20,23	20,26	20,28	20,28
Pozice měření Ra	Horní [μm]	3,38	3,62	3,07	3,51	3,22
	Dolní [μm]	4,97	5,85	7,27	7,36	9,64
Pozice měření Rz	Horní [μm]	22,94	24,08	18,96	22,27	19,42
	Dolní [μm]	28,07	32,70	36,86	35,79	45,56
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q3	Q3



Obr. 3.36 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy (ocel, 10 mm).

Z grafu 3.36 týkajícího se řezání oceli tloušťky 10 mm je zřejmé, že úkos při řezání technologií DWJ je v porovnání s úkosem technologie AWJ podstatně nižší. Hodnota úkosu u DWJ je téměř konstantní, i když se průměrná rychlost řezací hlavy zvyšuje. Navyšování rozměrů šířky vzorku se zvyšující se průměrnou rychlostí řezací hlavy je také minimální. U metody AWJ však hodnota spodní pozice měření prudce narůstá se zvyšující se rychlostí řezací hlavy. Navyšuje se tak šířka vzorku ve spodní pozici (úkos).



Obr. 3.37 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavy (ocel, 10 mm).

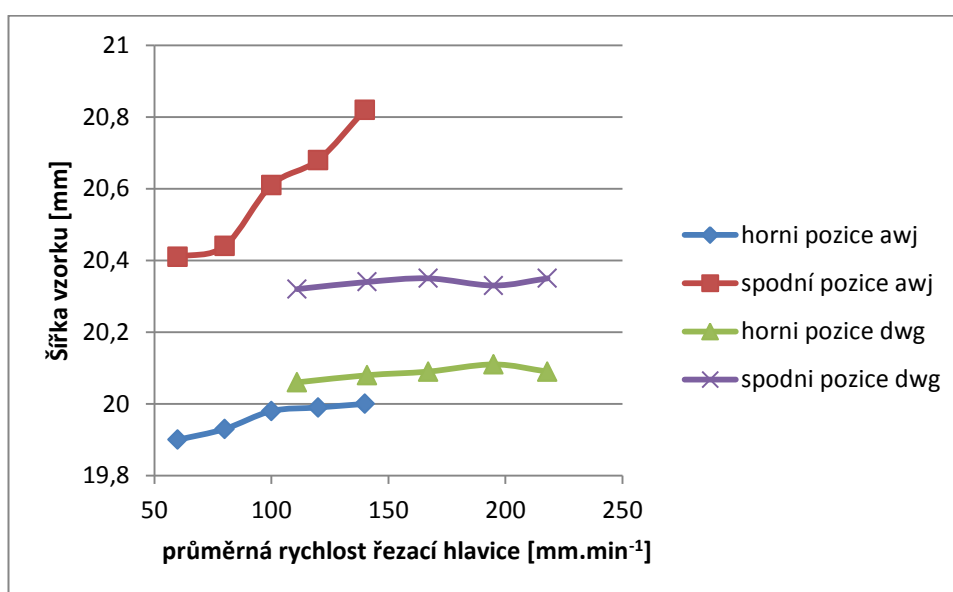
V grafu 3.37 je znázorněno, že při řezání oceli tloušťky 10 mm metodou DWJ je dosahováno nižších hodnot Ra při rychlostech srovnatelných s metodou AWJ. Jinak je nárůst hodnot Ra u metody AWJ minimální, dokud není překročena pomyslná hranice standardní rychlosti. Poté nastává prudké zvýšení hodnoty ve spodní pozici. Obdobný průběh můžeme pozorovat u metody DWJ. Při posuzování hodnoty Ra při standardních provozních podmínkách jednotlivých strojů horší se opět jeví metoda DWJ.

Tab. 3.11 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 15 mm, řezáno technologií AWJ.

OCEL tř. 11 523 15 mm Technologie: AWJ		Rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		60	80	100	120	140
Čas řezání [s]		120	90	72	60	51
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	19,90	19,93	19,98	19,99	20,00
	Dolní [mm]	20,41	20,44	20,61	20,68	20,82
Pozice měření Ra	Horní [µm]	3,15	2,89	2,80	3,08	3,63
	Dolní [µm]	4,29	5,24	4,59	5,93	7,79
Pozice měření Rz	Horní [µm]	20,51	18,74	17,72	20,81	22,29
	Dolní [µm]	22,78	27,57	24,71	30,27	37,20
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q3	Q3	Q3	Q2

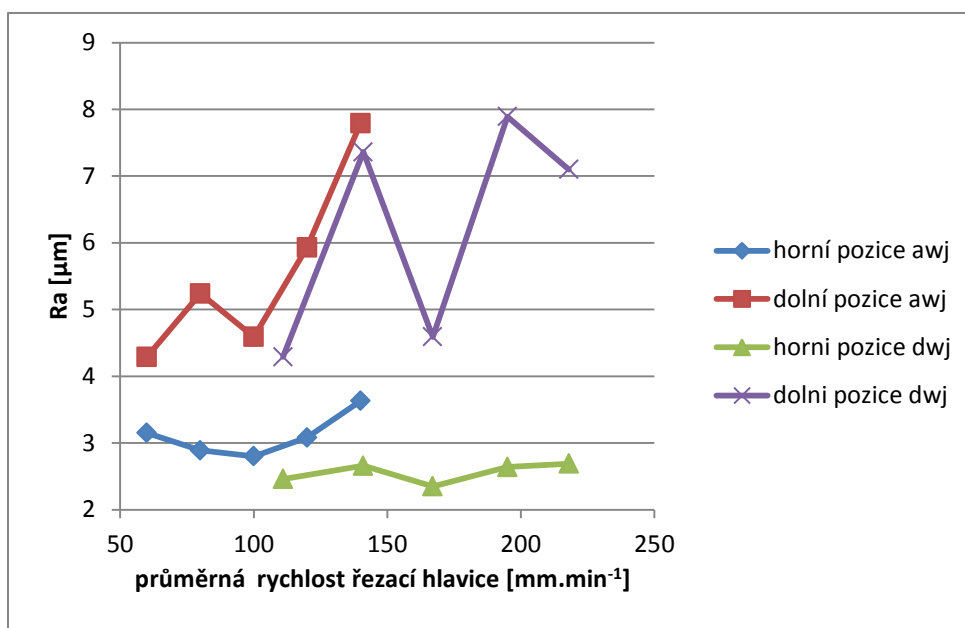
Tab. 3.12 Hodnoty ke vzorku z oceli o tl. 15 mm, řezáno technologií DWJ.

OCEL tř. 11 523 15 mm Technologie: DWJ		Průměrná rychlost posuvu řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]				
		111	141	167	195	218
		60 %	80 %	100 %	120 %	140 %
Čas řezání [s]		65	51	43	37	33
Pozice měření šířky vzorku	Horní [mm]	20,06	20,08	20,09	20,11	20,09
	Dolní [mm]	20,32	20,34	20,35	20,33	20,35
Pozice měření Ra	Horní [μm]	2,46	2,66	2,35	2,64	2,69
	Dolní [μm]	4,29	7,36	4,59	7,89	7,10
Pozice měření Rz	Horní [μm]	16,62	16,45	15,29	18,19	16,44
	Dolní [μm]	18,16	34,18	28,20	37,90	34,85
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q4	Q4	Q4	Q3	Q2



Obr. 3.38 Závislost šířky vzorku na rychlosti řezací hlavy (ocel, 15 mm).

Z grafu 3.38 pro řezání oceli tloušťky 15 mm je zřejmé, že úkos při řezání technologií DWJ je v porovnání s úkosem technologie AWJ podstatně nižší. Také hodnota úkosu u DWJ je při zvyšování průměrné rychlosti řezací hlavy téměř konstantní. Navyšování rozměrů šířky vzorku se zvyšující se průměrnou rychlostí řezací hlavy je také minimální. U metody AWJ však hodnota spodní pozice měření prudce narůstá se zvyšující se rychlostí řezací hlavy. Navyšuje se tedy šířka vzorku ve spodní pozici (úkos).



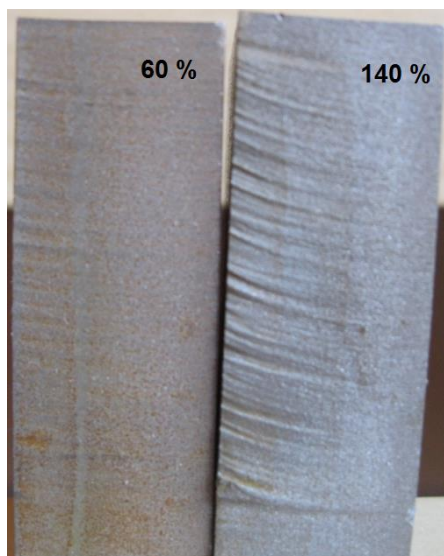
Obr. 3.39 Závislost Ra řezné plochy na rychlosti řezací hlavy (ocel, 15 mm).

V grafu 3.39 je znázorněno, že při řezání oceli tloušťky 15 mm metodou DWJ je dosahováno nižších hodnot Ra (při rychlostech srovnatelných s metodou AWJ). Nárůst hodnot Ra u metody AWJ je malý, dokud opět není překročena pomyslná hranice standardní rychlosti. Poté nastává prudké zvýšení hodnoty ve spodní pozici. V průběhu Ra u technologie řezání DWJ byla zaznamenána odchylka hodnoty Ra (prudké zvýšení hodnoty). Tato odchylka mohla být způsobena například umístěním měřícího hrotu do místa s výraznými striacemi. Naměřené hodnoty Ra v horní pozici vzorků řezaných pomocí technologie DWJ jsou velmi nízké. Při standardních provozních podmínkách byly hodnoty Ra měřené na vzorcích řezaných technologií DWJ nižší než u technologie AWJ.

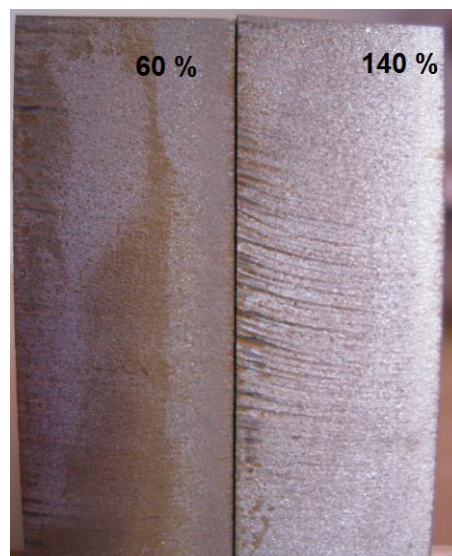
Na obrázcích níže jsou ukázky vzorků řezaných technologií AWJ a DWJ (ocel, 15 mm). Vedle sebe na rovné podložce jsou vždy umístěny dva vzorky. Jeden byl řezán nejnižší průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavy (na nejvyšší kvalitu řezu - 60 %), druhý nejvyšší průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavy (na nejnižší kvalitu - 140 %).

Na obrázku 3.40 je ukázka řezání oceli technologií AWJ. Z obrázku je patrný velký úkos, který vzniká při řezání technologií AWJ.

Na obrázku 3.41 jsou vzorky z oceli řezané pomocí technologie DWJ. V tomto případě je úkos minimální, okem těžko rozpoznatelný.

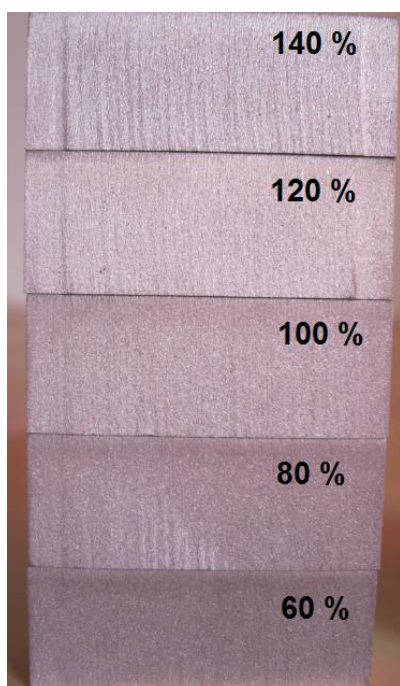


Obr. 3.40 Řezáno technologií AWJ

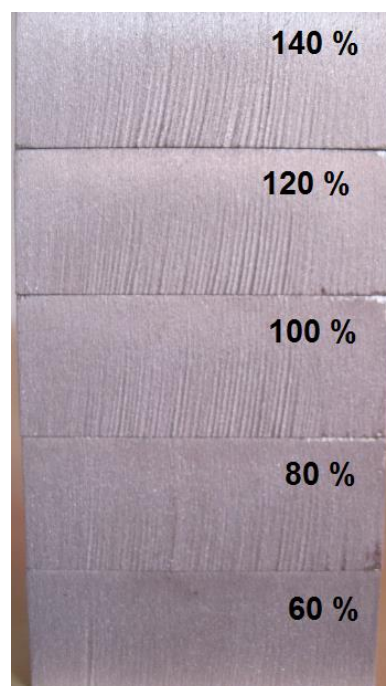


Obr. 3.41 Řezáno technologií DWJ

Níže na obrázcích 3.42 (hliník, 15 mm, AWJ), 3.43 (hliník, 15 mm, DWJ) jsou vyobrazeny vzorky jednotlivých technologií řezání, které jsou umístěny na sobě podle počtu procent, který odpovídá kvalitě řezu (průměrné rychlosti řezací hlavice). Na obou obrázcích je zřetelný nárůst zhoršení kvality povrchu se vzrůstající rychlostí řezací hlavice. Vizuálně se zdá být horší kvalita povrchu vzorků (u tohoto materiálu), které jsou řezány pomocí technologie DWJ.



Obr. 3.42 Řezáno technologií AWJ.



Obr. 3.43 Řezáno technologií DWJ.

Na obrázcích 3.44 (ocel, 15 mm, AWJ), 3.45 (ocel, 15 mm, DWJ) jsou vyobrazeny vzorky, které jsou umístěny opět na sobě podle počtu procent, který odpovídá kvalitě řezu (průměrné rychlosti řezací hlavice). Na obou obrázcích je znovu zřetelný nárůst zhoršení kvality povrchu se vzrůstající rychlostí řezací hlavice. Kvalita povrchu vzorků řezaných technologií AWJ se vizuálně jeví jako horší.





Obr. 3.44 Řezáno technologií AWJ.



Obr. 3.45 Řezáno technologií DWJ.

U obou materiálů (hliník, ocel) při použití technologie AWJ jsou na obrázcích 3.42 a 3.44 patrné zpomalené nájezdy vodního paprsku do rohů. To se projevuje odlišnou hodnotou drsnosti  $R_a$  než je ve střední části řezu, kde je řezná rychlost konstantní.

#### **Celkové vyhodnocení experimentu:**

V experimentu bylo nařezáno celkem 60 vzorků. 30 vzorků bylo řezáno pomocí technologie AWJ, 30 pomocí technologie DWJ. Z výše uvedených vyhodnocení vyplývá, že řezání pomocí technologie DWJ splnilo očekávání týkající se úkosů vzorků. Na všech vzorcích (2 druhy materiálů, 3 tloušťky) byl naměřen minimální úkos v porovnání s naměřenými hodnotami technologie AWJ. Ve většině případů řezání technologií DWJ se úkos jen minimálně zvyšoval s narůstající průměrnou rychlostí řezací hlavy. Porovnáním velikosti úkosů u jednotlivých druhů materiálů bylo zjištěno, že menší rozdíly v horní a dolní pozici jsou u hliníku. Je to zřejmě z toho důvodu, že se jedná o materiál s menší měrnou hustotou, takže vodní paprsek skrze něj pronikne v nezměněném směru snáze než u oceli. Při použití technologie AWJ se u řezání rohů vyskytovala změna drsnosti zřejmá na pohled. To bylo zapříčiněno zpomalením rychlosti vodního paprsku při nájezdu do rohů.

Co se týče druhého porovnání - porovnání průměrné aritmetické úchyly profilu  $R_a$ , předpoklad nebyl potvrzen. Pouze v případě řezání oceli 15 mm pomocí technologie DWJ bylo dosaženo nižších hodnot  $R_a$  než v případě řezání pomocí technologie AWJ. (Porovnání bylo provedeno z hlediska posuvových rychlostí, které jsou využívány na jednotlivých strojích pro dosažení kvality řezu odpovídající standardu.)

Měřením aritmetické úchyly profilu u vzorků z hliníku všech tloušťek a u oceli dvou nižších tloušťek bylo zjištěno, že nebylo dosaženo předpokládaných výsledků. Vzorky z hliníku všech tloušťek a ocelové vzorky o tloušťkách 5 mm

a 10 mm nařezané technologií AWJ mají výrazně lepší hodnoty Ra než vzorky řezané pomocí technologie DWJ. Také rozdíly mezi horními a dolními hodnotami Ra byly znatelně vyšší u řezání pomocí technologie DWJ. (Byly porovnány konkrétní výsledky jednotlivých metod, kterých bylo dosaženo při řezání nestejnými průměrnými rychlostmi řezací hlavice. Řezací hlavice měly takovou rychlost, aby bylo dosaženo optimální kvality řezu na daném stroji.)

Při vizuálním srovnání vzorků mají na první pohled menší úkosity vzorky řezané technologií DWJ (u obou materiálů). U této metody také nevzniká vůbec žádná změna drsnosti v oblasti rohů, která vzniká při použití technologie AWJ kvůli zpomalování rychlosti řezné hlavice.

Co se týče kvality povrchu a hloubky striací u vzorků z hliníku, i vizuálně se jednoznačně jeví jako horší vzorky nařezané technologií DWJ. Toto zjištění vyvrací předpoklad o kvalitnějším řezu všech materiálů.

Důvodem odlišnosti kvality řezu od očekávaných hodnot u hliníku je zřejmě nízká měrná hustota. Vodní paprsek s abrazivem projde (díky použitému tlaku 5 500 barů a vysoké průměrné řezné rychlosti) tímto materiálem snadněji a zanechá výrazné rýhy a striace. U řezání oceli menších tloušťek je dosahováno vyšších hodnot Ra technologií DWJ z toho důvodu, že i pro tento materiál o podstatně vyšší měrné hustotě než hliník jsou za těchto podmínek použity tlak a řezná rychlost příliš vysoké.

U vzorků z oceli o tloušťkách 15 mm se jeví i vizuálně lépe vzorky nařezané technologií DWJ, což potvrzuje předpoklad.

## 4 NÁVRH RÁMCOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ PROVOZU

Provozovna firmy AWAC doposud svými rozměry postačovala pro 3 stroje firmy Microstep. Prostor haly o rozměrech cca 26 m x 12 m sloužil jako pracovní a částečně i jako skladovací plocha.

Nyní však, po nákupu nového stroje Mach 4C od firmy Flow, byly provedeny kapacitní propočty a bylo zjištěno, že stávající plocha nevyhovuje, je nedostačující. Proto firma volila ze dvou možných variant:

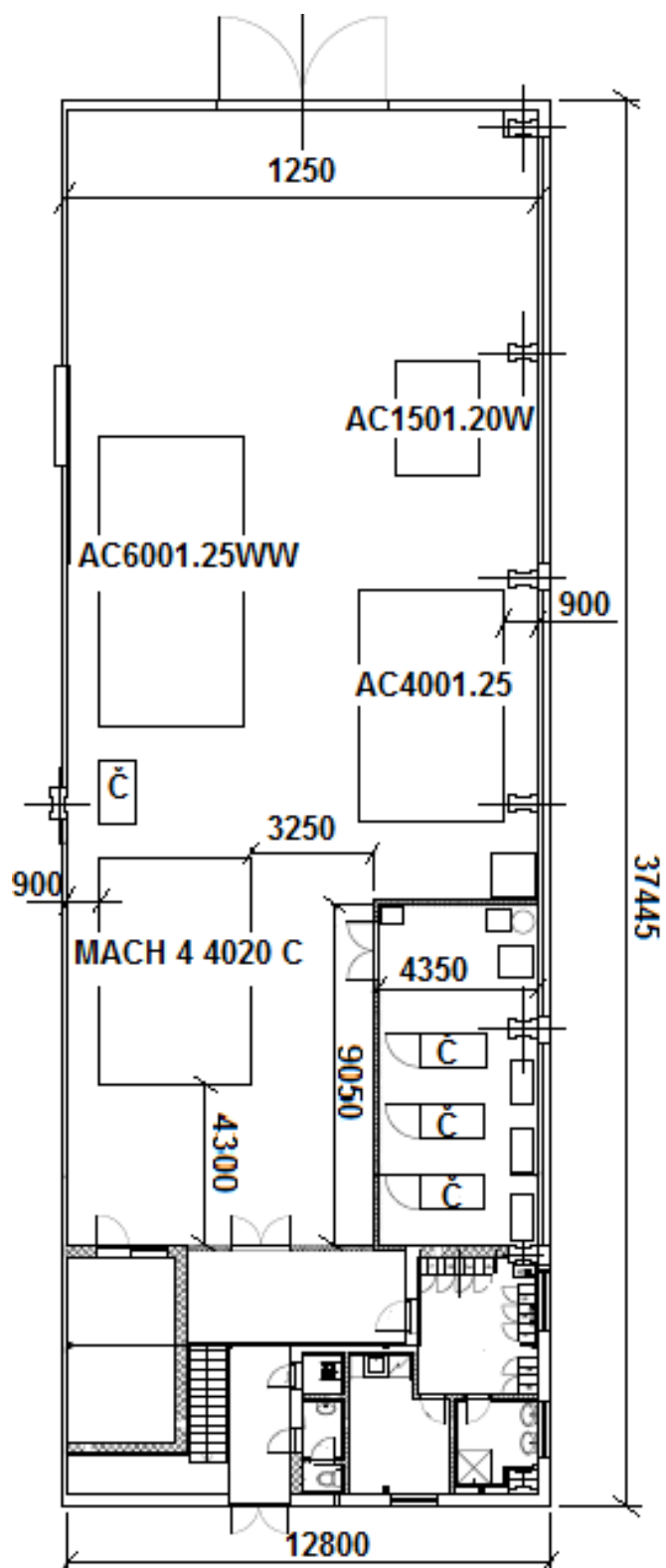
- přestěhování celého provozu do jiné výrobní haly,
- vytvoření skladovacích prostor vedle výrobní haly.

První možnost byla zamítnuta z důvodu nákladného pronájmu větší výrobní haly. Nájem za celou halu by byl totiž placen jako za výrobní prostory, i když část haly by sloužila jako skladovací prostory. Dalším, již méně významným faktorem při rozhodování byla obtížnost stěhování celého provozu a s tím vzniklé problémy a časové prodlevy.

Nakonec se vedení firmy rozhodlo pro druhou variantu, která je levnější a snadněji realizovatelná. Toto rozhodnutí znamená postavení přístřešku vedle stávající haly, který bude sloužit jako skladový prostor. Jedná se spíše o zastřešení venkovních prostor, které jsou již nyní využívány jako venkovní sklad. Skladují se zde zatím ty materiály, které mohou být vystaveny povětrnostním podmínkám. Je zde umístěn i kontejner na zbytky a odřezky již použitého materiálu.

Materiál, který by mohl být povětrnostními podmínkami jakkoli znehodnocen, firma doposud neskladuje. V případě přijetí zakázky, kdy si zákazník nedodá vlastní materiál, firma konkrétní materiál v co nejkratší době objedná a zakoupí. Materiál se ihned zpracovává, takže jej není potřeba skladovat.

Ukázka přibližného rozmístění všech výrobních zařízení ve stávající hale je na obrázku 4.1. Toto rozmístění není zcela ideální, což platí zejména pro čerpadlo nově pořízeného stroje (Mach 4C), které je umístěno přímo vedle výrobního stroje. Ale v tomto případě bez přestěhování do větších prostor není jiná možnost. Čerpadla ke zbylým třem strojům jsou umístěna v tzv. strojovně, místnosti na kraji výrobní haly. Umístěním čerpadel mimo výrobní prostory se zlepšují pracovní podmínky v provozu – je zde méně hluku, manipulace s materiálem a pohyb obsluhy jsou snazší. V této místnosti již ale nebylo dostatek místa pro umístění dalšího zařízení, proto bylo vysokorychlostní čerpadlo umístěno v blízkosti výrobního stroje.



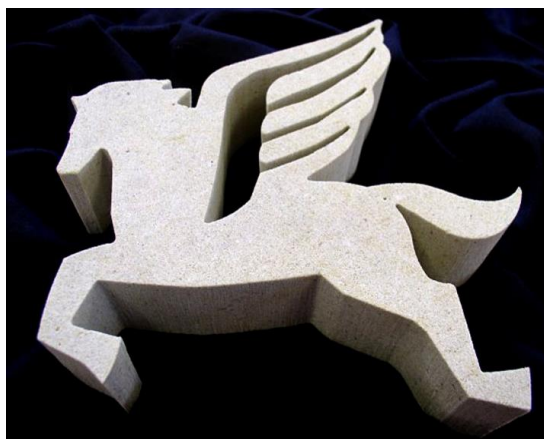
Obr. 4.1 Ukázka přibližného uspořádání provozu.

## 5 ROZBOR POTENCIÁLNÍ SOUČÁSTKOVÉ ZÁKLADNY

Možnosti využití řezání vodním paprskem jsou velmi široké. Tato technologie se uplatňuje zejména ve strojírenském průmyslu (automobilový, letecký atd.), kde je možno ji využít jako náhradu klasického dělení plechového polotovaru (z jakéhokoliv kovového materiálu), zejména větších tloušťek.

Další odvětví, které využívá možnosti řezání vodním paprskem, je stavební průmysl. Zde se tato metoda využívá především pro řezání dlaždic a obkladů pro interiéry i exteriéry. Pokud je totiž potřeba vytvořit nějaký tvarově složitější útvar, přichází v úvahu jediná snadná možnost dělení, a to dělení vodním paprskem. Ve stavebnictví může být tato metoda použita opět kdekoliv. Pro řezání touto technologií není výjimkou ani zpracování kamene či keramiky. Tato technologie se využívá při potřebě řezání tvarových součástí (obr. 5.1).

Dalšími materiály, které lze řezat vodním paprskem jsou různé druhy plastu, kompositu, gumy (obr. 5.2) a pěnových materiálů. U těchto materiálů je použití této technologie řezání vhodné zejména z důvodu jejího studeného řezu. Použití například laseru či plazmy je u těchto materiálů nemožné.



Obr. 5.1 Ukázka možnosti tvarového řezání kamene [32].



Obr. 5.2 Ukázka řezání kotouče z gumy [32].

Častými zákazníky jsou také sklenáři. Rozmanité tvary ze skla, které by byly jinými metodami těžce vyrobitelné, jsou snadno řezány pomocí této technologie. Pro farmaceutický a potravinářský průmysl se hojně řezou vodním paprskem převážně hliníkové polotovary. Také v reklamním průmyslu je možné využít řezání vodním paprskem. Pro řezání různých tvarových log a reklamních nápisů z rozmanitých materiálů je tento způsob dělení materiálu vhodný.

Firmě AWAC (pobočka v Brně) se otevírají další možnosti zejména nyní, kdy vlastní nový stroj se schopností řezání ve 3D. Firma již není omezena řezáním pouze pod úhlem 90°, ale může zákazníkovi nabídnout řezání pod úhlem až 55°, a to zároveň s eliminací úkosů pomocí technologie DWJ.

Díky technologii DWJ je možno eliminovat úkosy i na řezaném materiálu při úhlu řezání 90°. To lze využít především při požadavku na větší rozměrovou přesnost výrobku. Úkosy jsou velmi dobře eliminovány i při řezání materiálů o velkých tloušťkách a díky tomu nemusí být přídatky pro případné další operace velké. Celý proces řezání na tomto novém stroji bude ukončen za podstatně kratší dobu

a s lepšími výsledky řezu než při řezání na starších strojích využívajících řezání pouze pod úhlem  $90^\circ$ . Je to zejména díky kombinaci vysokotlakého čerpadla a technologie DWJ. Ukázka řezání oceli o tloušťce 120 mm na stroji Mach 4C je na obrázku 5.1. Jedná se o válec vyříznutý z kvádrového polotovaru. Je zde výrazná eliminace úkosů a ani striace po řezání vodním paprskem nejsou zřejmé.



Obr. 5.3 Ukázka řezání oceli o velké tloušťce s minimalizací úkosů.

Díky možnosti úhlového řezání se rozšiřuje okruh potenciálních zákazníků. Tuto technologii lze využít například při vytváření různých druhů sražen, například u strojních součástí pro sražení hran (další operace pak není nutná) nebo také ve stavebním průmyslu, kdy je třeba nařezat dlažbu či obklady s určitým sražením hran. Je možné například i řezání děr pro šrouby s kuželovou hlavou, kde lze lehce vytvořit kuželové sražení pro hlavu šroubu. (Ukázky tvarového řezání vodním paprskem jsou na obrázku 5.4 a 5.5.)



Obr. 5.4 Úhlové řezání ozubeného kola (na 3D stroji) [32].



Obr. 5.5 Úhlové řezání lopatek turbíny [12].

Tento nový stroj lze použít například i pro konečnou operaci především tam, kde nejsou požadavky na extrémní přesnost a strukturu povrchu řezných ploch. U tohoto způsobu opracování, oproti třískovému obrábění, odpadá také nutnost tepelného zpracování pro odstranění pnutí po třískovém obrábění. Zrušením nutnosti dalších operací se markantně zkrátí výrobní časy a celé zhotovení výrobku se usnadní a zlevní.

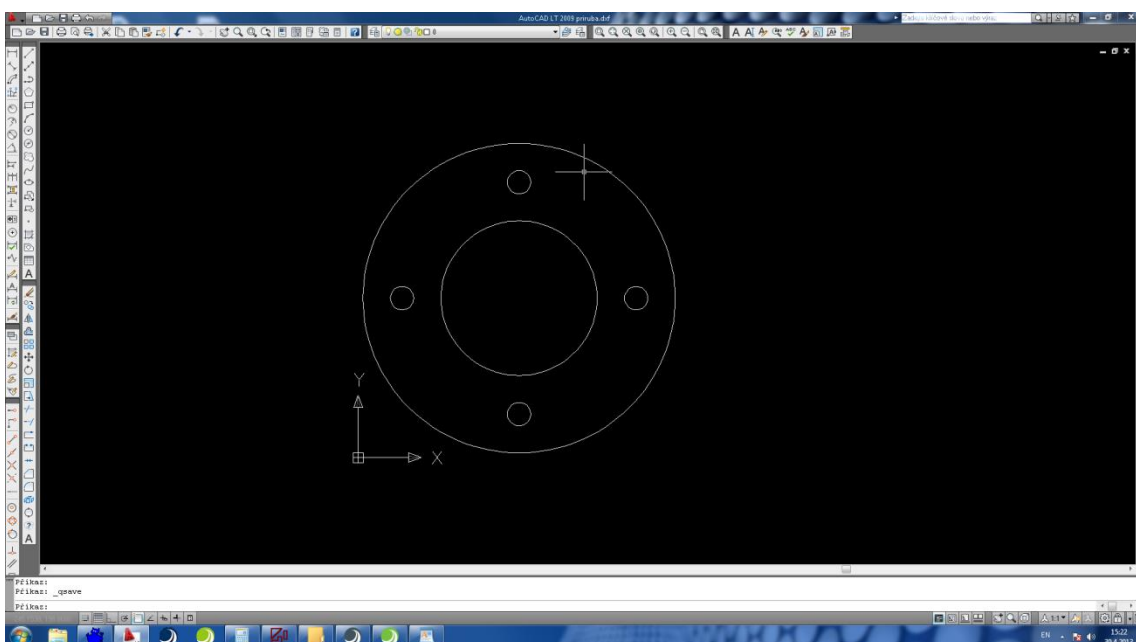
## 6 NÁVRH TECHNOLOGIE NA VZOROVOU SOUČÁSTKU

Tato kapitola uvádí popis úhlového řezání v kombinaci s technologií DWJ. Jako vzorová součást pro řezání na 3D abrazivním stroji (Mach 4C) byla zvolena příruba vyrobená z hliníkového polotovaru. Jedná se o hliník 5083 AW, tloušťky 20 mm.

Úhlové řezání je zde aplikováno na sražené hraně vnitřního průměru příruby a dále na čtyřech zahloubeníh pro šrouby. Celá součást je řezána s eliminací úkosů (technologie DWJ).

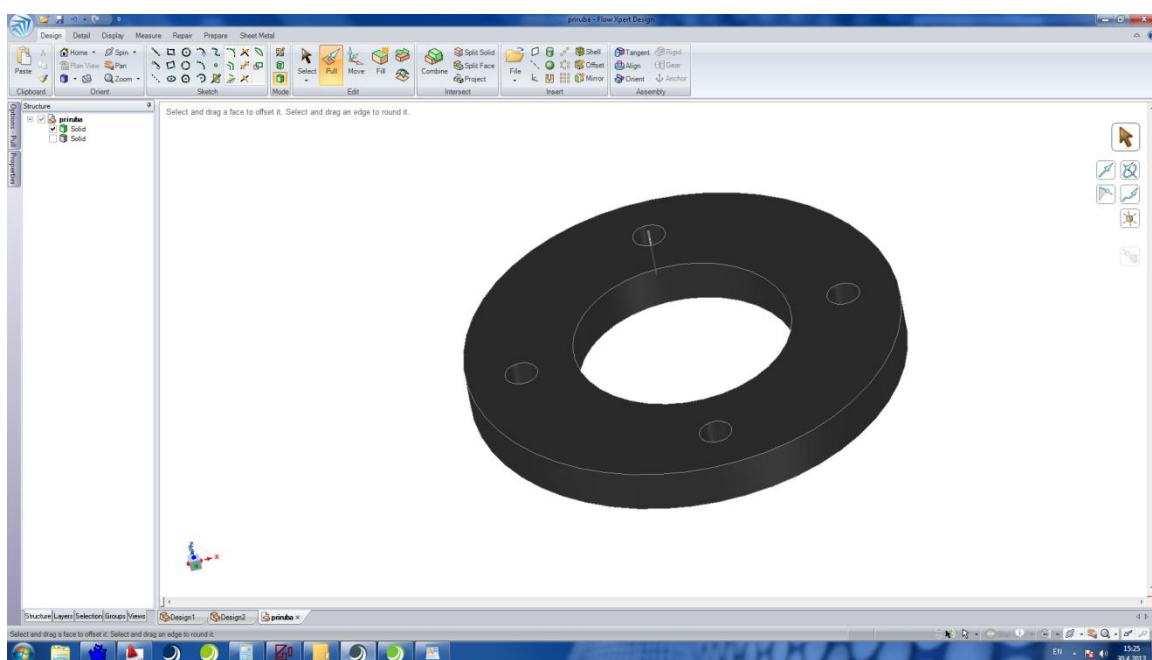
### Technologický postup výroby součásti - příruba:

- Narýsování základní kontury v AutoCADu (nutnost velkého přiblížení). Na obrázku 6.1 je printscreen této kontury:

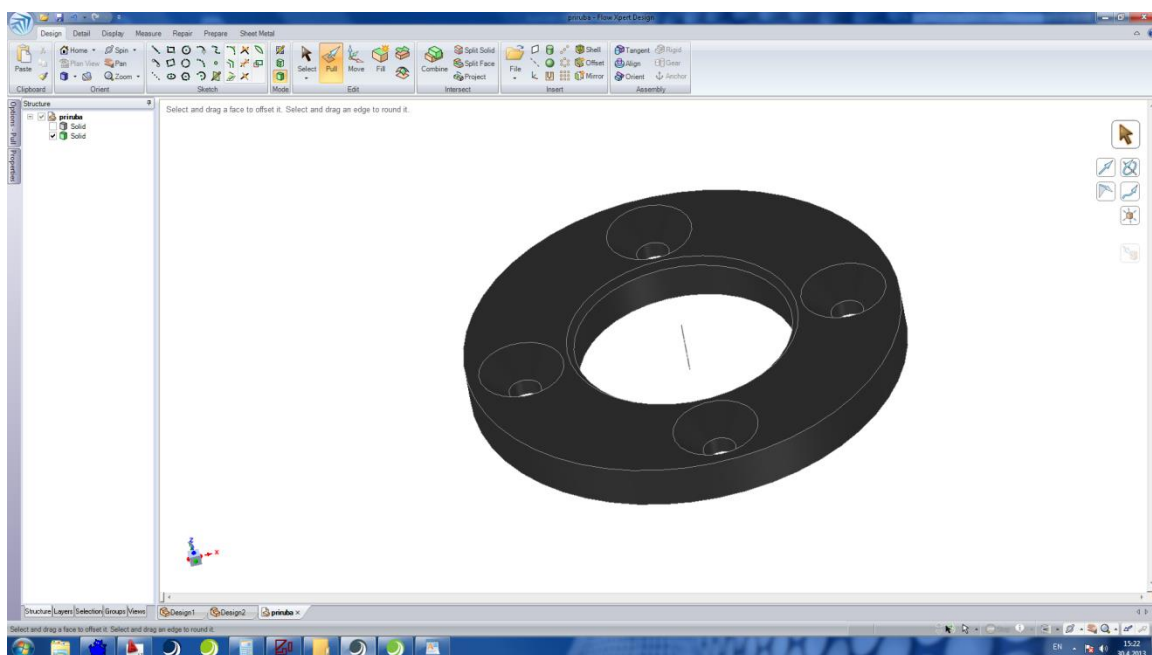


Obr. 6.1 Printscreen narýsované kontury v AutoCADu.

- Dále se kontura z AutoCADu převede do Flow Xpert Design. V tomto programu se z kontury vytvoří dvě tělesa. Jedná se o dvě soustředná tělesa (v prostoru se překrývají). Jedno těleso má vytvořené kolmé řezy děr (obr. 6.2) a u druhého tělesa jsou vytvořena úhlová zahloubení pro hlavu šroubu a vnitřní průměr příruby je sražené (obr. 6.3).



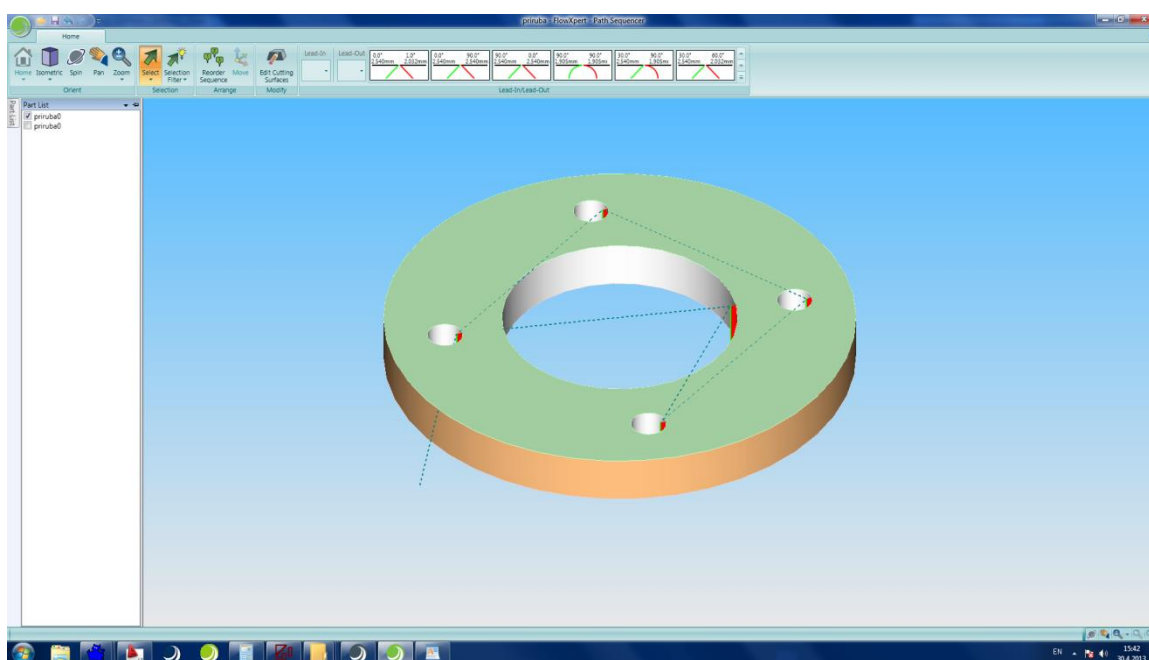
Obr. 6.2 První těleso s kolnými dírami pro šrouby.



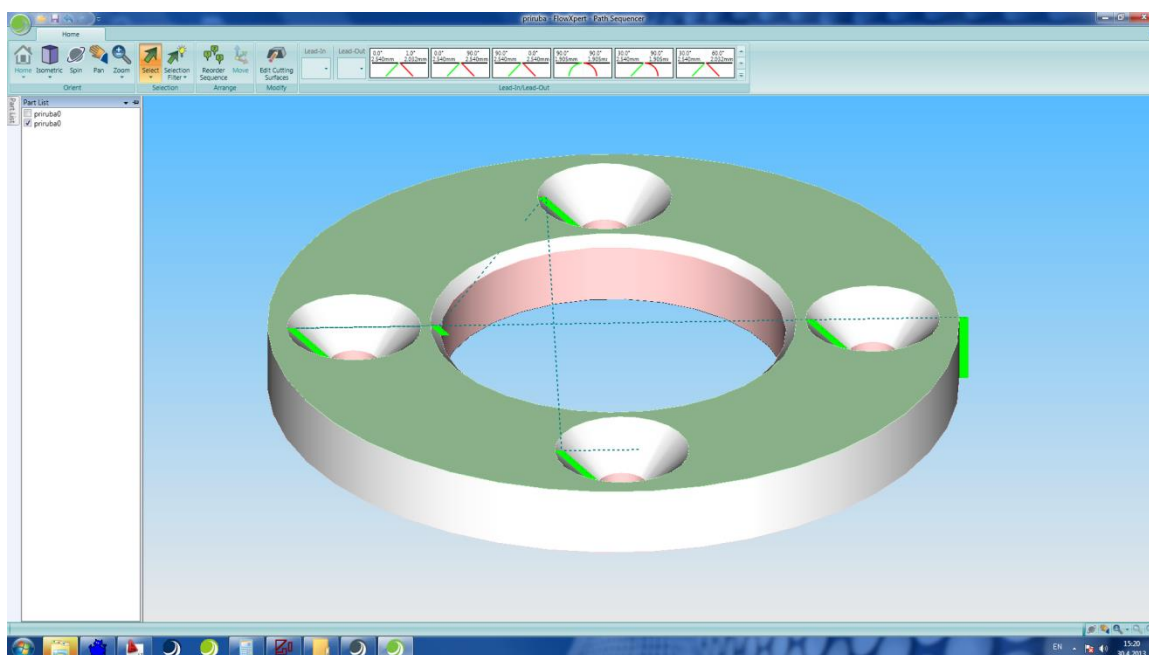
Obr. 6.3 Druhé těleso s úhlovými dírami pro šrouby.

- Poté se v programu Flow Xpert PathSequencer vytvoří pořadí řezaných elementů a dráhy řezací hlavy (kudy bude stroj řezat a v jakém pořadí). Aby byl řez kvalitnější, budou se řezat nejprve kolmé díry pro šrouby a vnitřní průměr příruby, poté zahloubení děr pro šrouby pod úhlem a sražení hrany u vnitřního průměru příruby a nakonec celý obvod příruby. (Ukázky drah a pořadí řezání jsou na obrázku 6.4 a 6.5.)



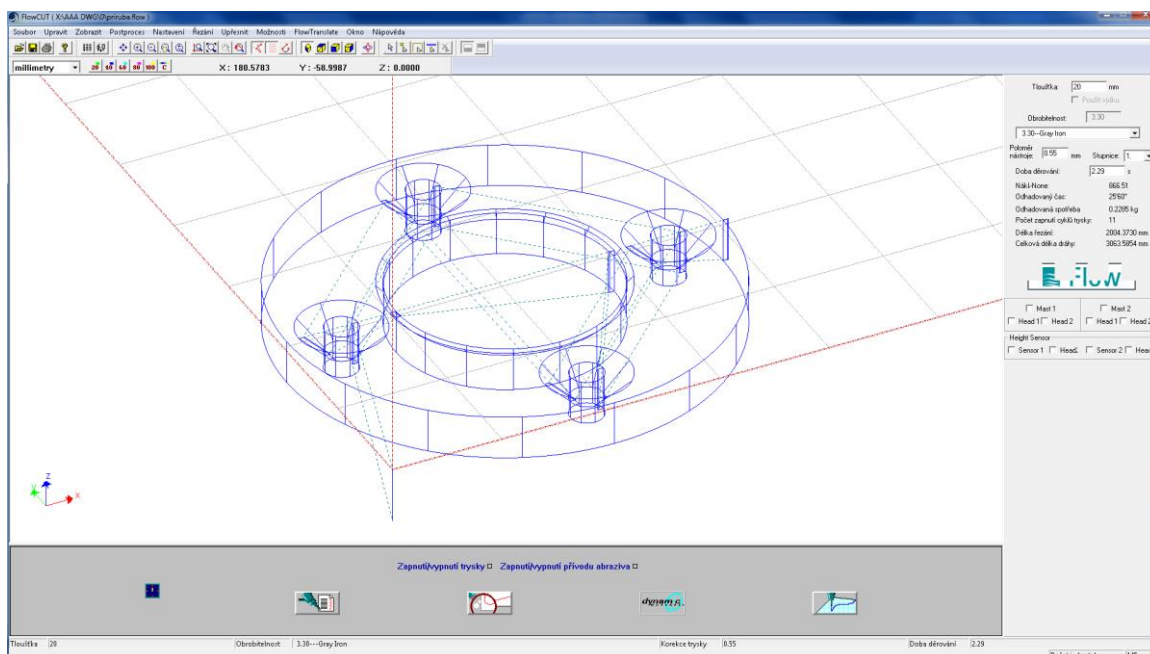


Obr. 6.4 Ukázka drah při řezání kolmých děr.



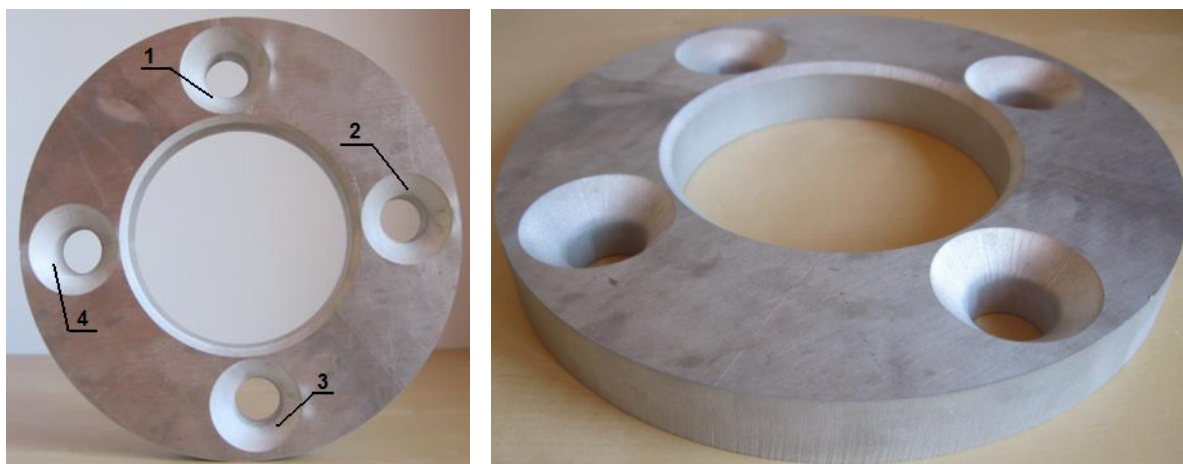
Obr. 6.5 Ukázka drah při úhlovém řezání zahloubení a sražení.

- Poté se předchozí soubory převedou do dalšího programu – FlowCUT, který je přímo na řezacím stroji. Nastaví se zde parametry řezání, jako je druh materiálu, tloušťka materiálu, tlak vodního paprsku, tok abraziva, korekce nástroje (průměr abrazivní trysky), použitá vodní tryska, umístění ve všech třech osách atd. (Printscreen z tohoto programu je na obrázku 6.6.)



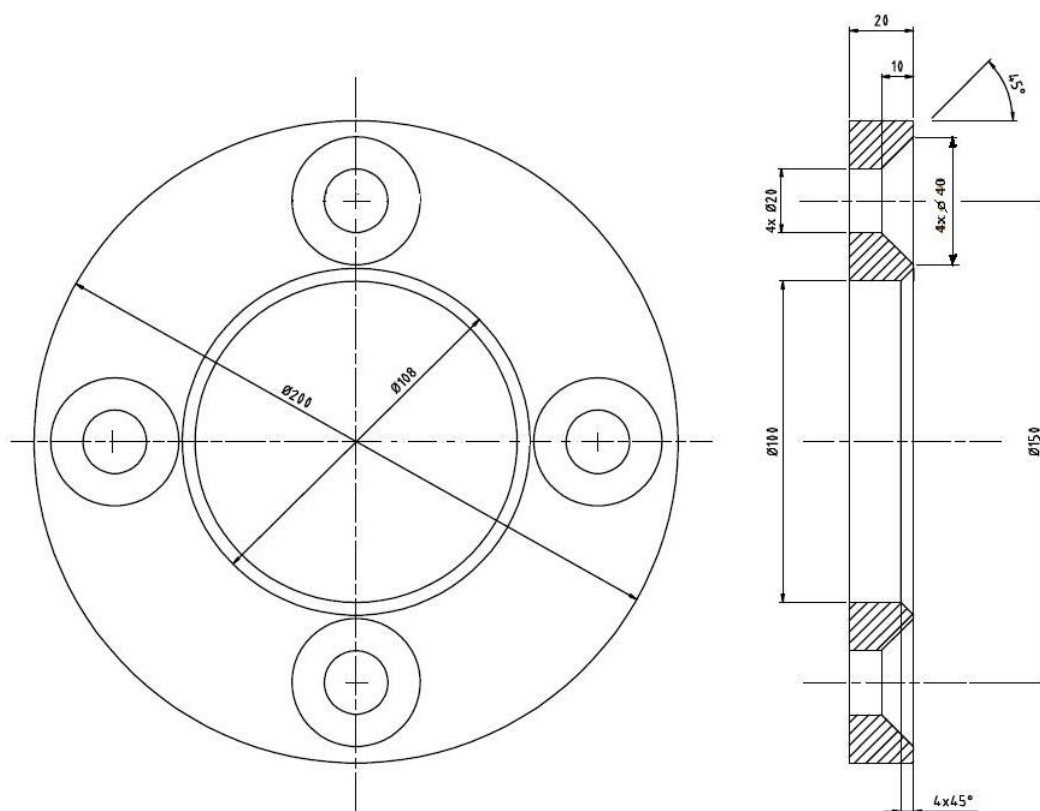
Obr. 6.6 Ukázka prostředí programu FlowCUT.

Poté je program spuštěn, a tím se uvede do chodu i stroj. Hotová součást je na obrázku 6.7. Jednotlivé díry jsou označeny čísly, protože u každé z nich byly měřeny její parametry.



Obr. 6.7 Ukázka hotové součásti.

Parametry nastavené na stroji před začátkem řezání jsou uvedeny níže. V tabulce 6.1 jsou uvedeny naměřené rozměry hotové příruby a odhadovaný stupeň kvality. Jednotlivé rozměry příruby jsou měřeny cca 2 mm od horní hrany - pro horní pozici, cca 2 mm od dolní hrany - pro dolní pozici. U jednotlivých děr byla horní pozice měřena pod zahloubením. Pro měření byla použita digitální posuvka. Na obrázku 6.8 je znázorněna součást s jejími jmenovitými rozměry.



Obr. 6.8 Jmenovité rozměry hotové součásti.

Řezné parametry pro vzorovou součástku na stroji Mach 4C:

- tlak: 5 500 barů,
- abrazivo: indický granát,
- zrnitost abraziva: MESH 80,
- tok abraziva:  $540 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- $\varnothing$  vodní trysky (rubínové): 0,3556 mm,
- $\varnothing$  abrazivní trysky: 1,02 mm.

Tab. 6.1 Naměřené parametry hotové součásti.

<b>PRÍRUBA</b> <b>HLINÍK 5083AW</b> <b>tl. 20 mm</b> Technologie: DWJ		<b>Čas řezání: 26 min, řezaná délka: 2 004,373 mm.</b>					
		<b>Měřená entita</b>					
		<b>Vnější Ø</b>	<b>Vnitřní Ø</b>	<b>Díra 1</b>	<b>Díra 2</b>	<b>Díra 3</b>	<b>Díra 4</b>
Pozice měření vzorku	Horní [mm]	199,08	100,75	20,70	20,90	20,78	20,83
	Dolní [mm]	199,34	100,21	20,66	20,62	20,66	20,69
Stupeň kvality (odhadovaný)		Q3	Q4	Q5	Q5	Q5	Q5

Celková kvalita řezu se dá přiřadit k čistému až velmi dobrému řezu. Nejsou zde žádné velké a výrazné striace. Eliminace úkosů pomocí technologie DWJ je znatelná, úkosy jsou minimální. V některých úsecích je dokonce minimální podřezání součásti (v horní části je větší rozměr než v dolní). Projevuje se malá rozměrová nepřesnost, která mohla být způsobena chybou měření, špatně seřízenou posuvkou či chybou stroje.

## 7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V poslední době narůstá využití řezání vodním paprskem poměrně rychle. Objevují se stále nové oblasti využití této technologie (od potravinářského průmyslu po automobilový a letecký průmysl). Rozšiřování použití této technologie je zapříčiněno také neustálým dynamickým vývojem a výzkumem, který se jednak zabývá novými technologiemi pro zlepšování kvality řezu a přesnosti, ale také nachází stále nové, vyspělé materiály a konstrukční návrhy pro řešení stavby stroje. Tento vývoj a pokrok je také výsledkem zájmu o tuto metodu dělení materiálu. Firmy, které se této metodě věnují již řadu let, nyní musí čelit nově vznikajícím firmám, proto usilují o vývoj svých strojů a snaží se zavádět nové a lepší verze stávajících technologií, aby uspěli v boji proti konkurenci.

V zásadě se jedná o technologii, která se řadí mezi nákladnější způsoby dělení materiálu. Nákladný je jak nákup stroje, tak i jeho provoz. Je pravda, že ceny strojů se za poslední roky značně snížily, ale stále existují levnější metody dělení materiálů. Technologie vodního paprsku má ovšem významné přednosti – schopnost řezání téměř každého materiálu, tepelně neovlivněný řez atd.

Pořizovací náklady stroje pro řezání ve 2D se v dnešní době pohybují okolo 3 000 000 Kč – 4 000 000 Kč. Pořízení nového stroje Mach 4C od firmy Flow společně s technologií Hyperpressure stálo firmu AWAC 7 000 000 Kč, tento stroj však zajišťuje vyšší produktivitu a přitom ještě umožňuje úhlové řezání a eliminaci úkosů. Nákupem tohoto stroje firma rozšířila své pole působnosti a počítá s nárůstem klientely, která bude mít zájem o využití této moderní technologie.

Provoz pracoviště s vodním paprskem je poměrně náročný, jak z energetického hlediska, tak i z ekologického hlediska. Provoz stroje s čerpadlem o výstupním tlaku cca 4 000 barů je méně nákladný na spotřebovanou energii než provoz stroje s výstupním tlakem 6 000 barů.

Provoz je finančně náročný i z ekologického hlediska, protože vyžaduje nemalé výdaje za likvidaci použitého abraziva. Tyto náklady se promítají do výsledné ceny každé zakázky. Z tohoto důvodu doporučují výrobci recyklačních zařízení společnostem, jejichž spotřeba abraziva stoupne nad hodnotu cca 200 tun za rok, aby si zakoupily zařízení pro recyklaci abraziva. Výrobce udává, že se tímto způsobem dají uspořit poměrně značné sumy. Recyklační stroje by měly být schopny získat z již použitého množství abraziva asi 50 % pro další použití. I přes vysoké pořizovací náklady (cca 1 500 000 Kč – záleží na typu) by se firmě mělo vyplatit investovat do koupě a provozu recyklačního stroje. Firma ušetří peníze jak za ekologickou likvidaci již vyřazeného abraziva (cca 1100 za tunu použitého abraziva), tak i za nákup velkého množství abraziva nového. Po čase by firma měla na položkách tohoto typu začít šetřit.

Firma AWAC využívá kromě ekologické likvidace abraziva možnosti dodávání použitého abraziva firmě, která si toto abrazivo sama recykluje a dále využívá pro vlastní potřeby řezání. Na tom profitují obě strany. Firma AWAC ušetří finanční prostředky za ekologickou likvidaci použitého abraziva (odběratelská firma si použité abrazivo odebere zdarma) a odběratel bude profitovat na získání levného recyklátu. Náklady na abrazivo pro tohoto odběratele představuje tedy pouze pořízení recyklačního stroje (a náklady s tím spojené) a jeho provoz.

Po nákupu nového, čtvrtého stroje do firmy AWAC, se nyní zvýší i spotřeba abrazivního materiálu. I když výrobci tohoto nového zařízení udávají hodnotu spotřebovaného abraziva nižší než u běžných strojů, nebude tento rozdíl příliš markantní. Proto jsou níže v tabulce 7.1 provedeny propočty průměrné spotřeby abraziva na celém pracovišti za rok.

Tab. 7.1 Průměrná spotřeba abrazivního materiálu ve firmě AWAC.

Průměrná spotřeba abraziva na jednom stroji	540 g.min <sup>-1</sup>
Počet řezacích hodin na jednom stroji za měsíc	170 hodin
Počet strojů na pracovišti	4
Roční spotřeba abraziva na celém pracovišti	<b><u>264 384 kg.rok<sup>-1</sup></u></b>

Tento výsledek přesahuje doporučené minimální množství spotřeby abraziva (od výrobce recyklačního zařízení) za rok, které se udává kvůli určení návratnosti a efektivnosti využití zařízení pro recyklaci abraziva. Podle teoretických hodnot, které udává firma dodávající recyklační zařízení, z tohoto výpočtu vyplývá, že by se firmě AWAC vyplatilo do tohoto recyklačního zařízení investovat. Skutečnost je ovšem taková, že při používání recyklovaného abraziva klesá celková produktivita o 15-20 %. Při nynějším způsobu likvidace použitého abraziva nemá firma AWAC v plánu pořizovat si vlastní recyklační zařízení a recyklát dále využívat pro vlastní řezání. Není to ovšem do budoucna úplně vyloučeno. Pokud by nadále nebylo možno likvidovat abrazivo jako doposud a náklady na ekologickou likvidaci by se rapidně zvýšily, firma by tuto situaci musela začít nějak řešit.

Cena abraziva, které využívá firma (indický granát), se pohybuje okolo 7 000 Kč za tunu. Cena australského granátu je vyšší - 8 000 Kč až 8 500 Kč za tunu.

Další položkou v nákladech jsou náhradní díly. Jedná se o díly strojů, které jsou často měněny. Patří sem například nízkotlaká a vysokotlaká těsnění, filtry, těsnicí kroužky, části multiplikátoru, různé druhy ventilů. Z řezné části stroje se jedná především o dýzy a abrazivní trysky, které je nutno pravidelně kontrolovat. Cena rubínových a safírových trysek se pohybuje přibližně ve stejné výši, cca 380 Kč, přičemž jejich životnost je několik desítek hodin. U diamantových trysek je cena vyšší (cca 11 000 Kč), ale také jejich životnost je několiknásobně vyšší - asi 1 000 hodin. Cena abrazivní trysky se pohybuje okolo 2 500 Kč a její životnost je okolo 100 hodin.

Celkové náklady na provoz jednoho stroje se pohybují okolo 600 Kč za hodinu. Konečná cena pro zákazníka však závisí na více faktorech. Důležitou roli hraje cena energie, množství kusů v zakázce (možná množstevní sleva), typ materiálu, jeho tloušťka, tvarová složitost součásti a požadovaná kvalita řezu. Dále má firma AWAC možnosti rozšířené o úhlové řezání a řezání s eliminací úkosů pomocí technologie DWJ. Užití těchto technologií také výrazně ovlivní výslednou cenu zakázky.

Předpokládá se, že na nově pořízeném stroji se díky vysoké rychlosti řezací hlavice budou moci řezat součásti o cca 20 % levněji než doposud na strojích využívajících technologii AWJ. Je ovšem potřeba, aby byl stroj minimálně půl roku v provozu.

Jedinou kompletně zveřejněnou informací firmy AWAC, je zatím pouze ceník řezání na 2D stroji (tab. 7.2). Ceny řezání jsou uvedeny pro dva materiály (ocel, hliník) a pro jejich tři tloušťky. Uvedené ceny odpovídají průměrné kvalitě řezu, které je v této firmě dosahováno (100 % posuvové rychlosti řezací hlavy). Při požadavku lepší či horší kvality řezu je cena pouze procentuálně upravena podle příslušné procentuální posuvové rychlosti řezací hlavy.

Tab. 7.2 Ceník řezaných materiálů (ocel, hliník).

	Tloušťka [mm]	Rychlost řezací hlavy [mm.min <sup>-1</sup> ]	Cena [Kč.m <sup>-1</sup> ]
OCEL	5	260	150
	10	130	300
	15	100	400
HLINÍK	5	520	100
	10	250	180
	15	135	250

Při výpočtu nákladů na hodinu řezání vychází u řezání plechů z oceli (všech tloušťek a všech rychlostí) suma přibližně 2 400 Kč. U hliníku se tato suma za hodinu řezu u jednotlivých tloušťek materiálu liší. Při řezání hliníku o tl. 5 mm vychází náklady na jednu řezací hodinu na cca 3 100 Kč, u hliníku tloušťky 10 mm je to přibližně 2 700 Kč a pro tloušťku 15 mm jsou stanoveny náklady na hodinu řezání na 2 000 Kč.

Pro stanovení nákladů na hodinu řezání nově pořízeného 3D stroje je třeba znát jeho pořizovací cenu, náklady na instalaci, náklady na demontáž, jeho likvidační hodnotu (stanovena jako 20 % z pořizovací ceny), dobu životnosti (ta souvisí s dobou odepisování stroje), efektivní časový fond a fixní hodinovou sazbu. Tyto informace jsou uvedeny v tabulce 7.3.

Tab. 7.3 Základní údaje pro stanovení nákladů na hodinu řezání na 3D stroji.

Druh údaje	Symbol	Hodnota údaje
Pořizovací cena stroje	$C_s$	7 000 000 Kč
Náklady na instalaci	$N_i$	330 000 Kč
Náklady na demontáž	$N_d$	150 000 Kč
Likvidační hodnota	$L_h$	1 400 000 Kč
Doba životnosti	$Z$	5 let
Efektivní časový fond	$F_{ef}$	2 040 hod
Fixní hodinová sazba	$S_f$	3 000 Kč

Samotný výpočet těchto nákladů na hodinu řezání 3D řezacího stroje jsou ve vztahu (7.1).

$$N_{HS} = \frac{C_s + N_i + N_d - L_h}{Z \cdot F_{ef}} + S_f \quad (7.1)$$

$$N_{HS} = \frac{7\,000\,000 + 330\,000 + 150\,000 - 1\,400\,000}{5 \cdot 2\,040} + 3\,000$$

$$N_{HS} = 3\,600 \text{ Kč}$$

kde:	$N_{HS}$	[Kč]	- náklady na hodinu řezání,
	$C_s$	[Kč]	- pořizovací cena stroje,
	$N_i$	[Kč]	- náklady na instalaci,
	$N_d$	[Kč]	- náklady na demontáž,
	$L_H$	[Kč]	- likvidační hodnota,
	$Z$	[rok]	- doba životnosti,
	$F_{ef}$	[hod]	- využitelný časový fond,
	$S_f$	[Kč]	- fixní hodinová sazba.

Náklady na hodinu řezání na stroji Mach 4C byly 3 600 Kč.

### Porovnání ceny vzorku z oceli tloušťky 10 mm řezaného pomocí technologie AWJ a DWJ:

Vzorek - 20 mm x 40 mm, ocel tloušťky 10 mm.

#### Technologie AWJ

Na stroji využívajícím technologii AWJ bylo pro dosažení standardní kvality řezu tohoto stroje řezáno průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavy 130 mm.min<sup>-1</sup>. Doba řezání vzorku byla 55 s. Náklady na hodinu řezání u tohoto materiálu jsou 2 400 Kč. Výpočet ceny vzorku řezaného technologií AWJ je uveden ve vztahu (7.2).

$$C_{awj} = \frac{N_{HSa}}{3\,600} \cdot t_{va} \quad (7.2)$$

$$C_{awj} = \frac{2\,400}{3\,600} \cdot 55$$

$$C_{awj} = 37 \text{ Kč}$$

kde:	$C_{awj}$	[Kč]	- cena vzorku řezaného technologií AWJ,
	$N_{HSa}$	[Kč]	- náklady na hodinu řezání technologií AWJ,
	$t_{va}$	[s]	- čas řezání vzorku metodou AWJ.

#### Technologie DWJ

Na 3D stroji využívajícím technologii DWJ bylo pro dosažení standardní kvality řezu řezáno průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavy 257 mm.min<sup>-1</sup>. Doba řezání vzorku byla 28 s. Náklady na hodinu řezání u tohoto materiálu jsou 3 600 Kč. Výpočet ceny vzorku řezaného technologií DWJ je uveden ve vztahu (7.3).

$$C_{dwj} = \frac{N_{HSd}}{3\,600} \cdot t_{vd} \quad (7.3)$$

$$C_{dwj} = \frac{3\,600}{3\,600} \cdot 28$$

$$C_{dwj} = 28 \text{ Kč}$$

kde:  $C_{dwj}$  [Kč] - cena vzorku řezaného technologií DWJ,  
 $N_{Hsd}$  [Kč] - náklady na hodinu řezání technologií DWJ,  
 $t_{vd}$  [s] - čas řezání vzorku metodou DWJ.

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že cena součástky řezané pomocí technologie AWJ vychází na 37 Kč a cena součástky řezané pomocí technologie DWJ vychází na 28 Kč. Tímto se potvrzuje předpoklad, že řezání pomocí technologie DWJ je o 20 % (konkrétně o 22 %) levnější než řezání pomocí technologie AWJ.

Ceny za metr řezu při dosahované standardní kvalitě řezu (příslušné průměrné rychlosti posuvu hlavice) na jednotlivých strojích a jejich náklady na hodinu řezání jsou v tabulce 7.4.

Tab. 7.4 Přehled cen za hodinu a metr řezu.

<b>Technologie</b> (průměrná rychlost posuvu řezací hlavice)	<b>Náklady na hodinu řezání oceli tl. 10 mm</b>  [Kč.hod <sup>-1</sup> ]	<b>Cena za metr řezu oceli tl. 10 mm</b>  [Kč.m <sup>-1</sup> ]
<b>AWJ</b> (257 mm.min <sup>-1</sup> )	2 400	300
<b>DWJ</b> (130 mm.min <sup>-1</sup> )	3 600	230



## 8 DISKUZE

Výsledky praktické části této diplomové práce odpovídají předpokládaným teoretickým odhadům pouze částečně. Předpoklad značné eliminace úkosů byl potvrzen, ovšem naměřené aritmetické úchytky povrchu Ra dosahovaly u řezání pomocí metody DWJ vyšších hodnot než při řezání technologií AWJ. Toto zjištění bylo zřetelné zejména při řezání všech vzorků z hliníku. Při řezání oceli byly naměřeny horší parametry Ra pouze u tenkých vzorků. U oceli tloušťky 15 mm se předpoklad vyšší kvality řezu při použití technologie DWJ potvrdil.

Experiment, který byl proveden v diplomové práci, neměl nejvhodnější podmínky pro konkrétní srovnání obou technologií. Na strojích využívajících technologii AWJ a DWJ nebylo možno nastavit adekvátní průměrnou rychlost posuvu řezací hlavy, jelikož při řezání pomocí technologie AWJ se pro dosažení standardní kvality řezu využívají jiné průměrné posuvové rychlosti než u technologie DWJ. Odlišné průměrné rychlosti posuvu řezací hlavy jsou nastaveny z toho důvodu, že u jednotlivých technologií se využívá různých řezacích tlaků, a tak nemohou být srovnatelné ani rychlosti řezání. U technologie DWJ není rychlost posuvu řezací hlavy konstantní. Hlava při procesu eliminace úkosů zvyšuje a snižuje svoji posuvovou rychlost podle potřeby. Na stroji tudíž není nastavována rychlost řezací hlavy, ale požadovaná kvalita řezné plochy. Jednotlivé kvality řezu jsou označovány procenty. Standardní kvalita řezu nastavená na stroji je označena 100 %. U stroje využívající technologii AWJ dochází ke zpomalování řezací hlavy pouze při řezání rohů.

V údajích zjištěných v experimentu tedy není možno dohledat odpovídající hodnoty pro obě technologie (AWJ a DWJ) u konkrétní posuvové rychlosti. U technologie DWJ byly obecně použity vyšší průměrné posuvové rychlosti řezací hlavy. Podle naměřených hodnot mohou být obě technologie srovnávány pouze podle jednotlivých standardních nastavení (na konkrétním stroji) a podle dosahované kvality řezu.

V ekonomickém zhodnocení byly zejména porovnány ceny řezu jednotlivých technologií. Potvrdilo se, že řezání pomocí technologie DWJ je cca o 20 % levnější než řezání pomocí technologie AWJ.

Výsledkem celého experimentu je zejména zjištění, že všechny tloušťky hliníkového materiálu využité v experimentu je vhodnější řezat na strojích vybavených technologií AWJ. Při řezání hliníku nejsou vhodné vysoké řezné rychlosti, jelikož zhoršují kvalitu řezu a prudce vzrůstá hodnota parametru Ra. Navýšení této hodnoty je způsobeno nízkou měrnou hustotou hliníku. Vodní paprsek o vysokém tlaku a rychlosti proniká obráběným materiálem snadněji, a tím i použité abrazivo snadněji vytváří striace. Pro dosažení kvalitní řezné plochy je možno řezat hliník na stroji vybaveném technologií DWJ při nižších průměrných rychlostech posuvu řezací hlavy, ale tato varianta by byla pro firmu neproduktivní.

Pro větší objektivitu experimentu by bylo vhodné vyhodnotit širší škálu vzorků o větší tloušťce, aby byl prokázán, či vyvrácen závěr této práce, ze kterého vyplývá, že hliníkový materiál je vhodnější řezat pomocí technologie AWJ. Stejně prozkoumání je třeba provést i u ocelových materiálů, aby tak byla potvrzena, či

vyvrácena domněnka, že při řezání oceli větší tloušťky bude dosaženo lepší kvality řezu než při použití technologie AWJ. Vhodné by bylo provést porovnání i u dalších druhů řezaných materiálů.

## ZÁVĚR

Výsledky diplomové práce vyvracejí předpoklad, že prostřednictvím použití technologie DWJ v kombinaci s vysokotlakým čerpadlem (6 000 barů) bude obecně dosahováno lepších kvalitativních vlastností řezu.

Na základě provedených experimentů bylo prokázáno, že nově zakoupený stroj Mach 4C (umožňující úhlové řezání a eliminaci úkosů) v kombinaci s vysokotlakým čerpadlem (6 000 barů) není vhodný pro řezání zejména hliníkového materiálu a pro oceli malých tloušťek.

Negativním dopadem užití technologie DWJ a vysokotlakého čerpadla (6 000 barů) při řezání hliníku a malých tloušťek oceli je narůstající hodnota aritmetické úchytky profilu způsobená vysokým tlakem a vysokou průměrnou posuvovou rychlostí řezací hlavice. Výhodnější metodou pro řezání těchto materiálů uvedených tloušťek je tedy technologie AWJ, při níž je dosahováno nižších hodnot Ra.

Lepších kvalitativních výsledků řezu pomocí technologie DWJ bylo dosaženo při řezání oceli větší tloušťky (15 mm).

Z experimentu dále vyplývá, že čím vyšší je průměrná rychlost posuvu řezací hlavice, tím výraznější jsou na obrobku striace a tím je řezná plocha méně kvalitní.

Naopak se potvrdil druhý předpoklad, že použití technologie DWJ výrazně eliminuje úkosy a vytváří součásti o vysoké rozměrové přesnosti (vše v kratším čase než při řezání technologií AWJ).

Ekonomické zhodnocení dokazuje, že řezání stejné součásti pomocí technologie DWJ je přibližně o 20 % levnější než řezání technologií AWJ. Metodu DWJ je nejvhodnější použít pro ocelové materiály o tloušťce více jak 10 mm.

Obecně se tato technologie řadí mezi velmi progresivní. Její vývoj se neustále posouvá kupředu a důkazem toho je i nový moderní stroj Mach 4C zakoupený firmou AWAC, spol. s r. o. Jeho velkou předností je kombinace s vysokotlakým čerpadlem (6 000 barů). AWAC, spol. s r. o. je první firmou v České republice, která tuto kombinaci technologií využívá pro komerční účely. Toto zařízení je schopno pokrýt požadavky i těch náročnějších zákazníků díky 3D řezací hlavici, která umožňuje úhlové řezání. Tyto aspekty svědčí o neustálém vývoji a pokroku technologie vodního paprsku.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně. [online]. [vid. 2013-01-8]. Dostupné z: <http://www.dlouhe-strane.cz>
2. Vinařská obec Slup. [online]. [vid. 2013-01-10]. Dostupné z: <http://www.slup.cz>
3. HÍREŠ, Ondřej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálů okružnou pílou, vodným proudem a plazmovým oblúkom*. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
4. Corbis Images. Hydraulic Mining During the Klondike Gold Rush. [online]. [vid. 2013-03-13]. Dostupné z: <http://www.corbisimages.com/Enlargement/BE060176.html>
5. SCHWACHA, B. G.: Liquid Cutting of hard Materials. U. S. Patent USA No. 2985050.
6. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
7. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi WJM*. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
8. MEK Malá encyklopedie kosmonautiky. [online]. [vid. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz>
9. Minnesota Waterjet. [online]. [vid. 2013-03-18]. Dostupné z: <http://www.mnwaterjet.com>
10. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
11. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění (vzdělávací a tréninkový modul)*. Brno 2012. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství.
12. Flow International Corporation. [online]. [vid. 2013-02-02]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/>
13. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
14. OH Precision Corporation. [online]. [vid. 2013-01-15]. Dostupné z: <http://www.ohprecis.com>
15. WARD Jet [online]. [vid. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>

16. R-garnet. [online]. [vid. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.r-garnet.ru/parts/>
17. PKIT Praha s.r.o. [online]. [vid. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.pkit.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
18. Státní zdravotní ústav. [online]. [vid. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/hluk-v-pracovnim-prostredi>
19. AWAC, spol. s r.o. [online]. [vid. 2013-01-12]. Dostupné z: <http://www.AWAC.cz>
20. PTV spol. s r.o. [online]. [vid. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz>
21. ABRASIV, a.s. [online]. [vid. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://eshop.abrasiv.cz/tryskani/tryskaci-materialy/prirodni-granat/tryskaci-material-prirodni-granat-80-mesh>
22. AQUAdem, s.r.o. [online]. [vid. 2013-03-31]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/>
23. Dearnaley, G.: Developments in Ion-assisted Coatings. *Surface and Coatings technology*, 33/1987 pp.453-467.
24. Orbanic, H. a M. Junkar. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting. *University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering*.(2008). no 265 (2008), s. 821–830.
25. Hlaváč, Libor. Investigation of the abrasive water jet trajectory curvature inside the ker. *Journal of Materials Processing Technology*. (2009). no 209 (2009) s. 4154 – 4161.
26. Vy-tech steel, s. r. o. *Řezání vodním paprskem*. [online]. [vid. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.vytech.cz>
27. Flow International Corporation. [online]. [vid. 2013-04-5]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz>
28. Flow International Corporation. *Flow MACH 4C*. [online]. [vid. 2013-04-06]. Dostupné z: [http://www.flowcorp.cz/upload/File/Pdf/Mach/Flyer\\_MACH4\\_CZ.pdf](http://www.flowcorp.cz/upload/File/Pdf/Mach/Flyer_MACH4_CZ.pdf)
29. WATERJETS. USA. Media: Pictures. [online]. [vid. 2013-04-2]. Dostupné z: [http://www.waterjets.org/waterjet\\_pictures.html](http://www.waterjets.org/waterjet_pictures.html)
30. Flow International Corporation. *Flow MACH 4 WATERJET SERIES*. [online]. [vid. 2013-04-08]. 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)

31. AWAC, spol. s r. o. *Materiály ke stroji Mach 4 C, Flow.*

32. TALPA – RPF, s. r. o. [online]. [vid. 2013-04-22]. Dostupné z:  
[www.rezeme-vodou.cz](http://www.rezeme-vodou.cz)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid hlinitý
AWJ	Abrazivní vodní paprsek
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DWJ	Dynamic Waterjet
EBM	Obr. elektronovým paprskem
EDM	Elektroerozivní obrábění
LBM	Obrábění laserem
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NC	Numerical Control
PAM	Obrábění plazmou
PASER	Particle Stream Erosion
PVC	Polyvinylchlorid
SiC	Karbid křemíku
USA	United States of America
USM	Obrábění ultrazvukem
WC	Karbid wolframu
WJM	Řezání vodním paprskem
2D	Dvourozměrný
3D	Třírozměrný

Symbol	Jednotka	Popis
C <sub>awi</sub>	[Kč]	Cena vzorku řezaného AWJ
C <sub>dwi</sub>	[Kč]	Cena vzorku řezaného DWJ
C <sub>s</sub>	[Kč]	Požizovací cena stroje
F <sub>ef</sub>	[hod]	Efektivní časový fond
H <sub>p</sub>	[-]	Tvrдость abraziva
L <sub>h</sub>	[Kč]	Likvidační hodnota
N	[mm]	Dráha ve svislém směru
N <sub>d</sub>	[Kč]	Náklady na demontáž
N <sub>HS</sub>	[Kč]	Náklady na hodinu řezání
N <sub>HSa</sub>	[Kč]	Náklady na hodinu řezání na stroji AWJ
N <sub>HSd</sub>	[Kč]	Náklady na hodinu řezání na stroji DWJ
N <sub>i</sub>	[Kč]	Náklady na instalaci
Q1	[-]	Stupeň kvality – separační řez
Q2	[-]	Stupeň kvality – hrubý řez
Q3	[-]	Stupeň kvality – čistý řez
Q4	[-]	Stupeň kvality – kvalitní řez
Q5	[-]	Stupeň kvality – excelentní řez
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylna profilu
Rp	[μm]	Největší výška výstupku
Rv	[μm]	Největší hloubka prohlubně
Rz	[μm]	Nejvyšší vzdálenost mezi výstupkem a prohlubní
S	[mm]	Dráha stopy parsku

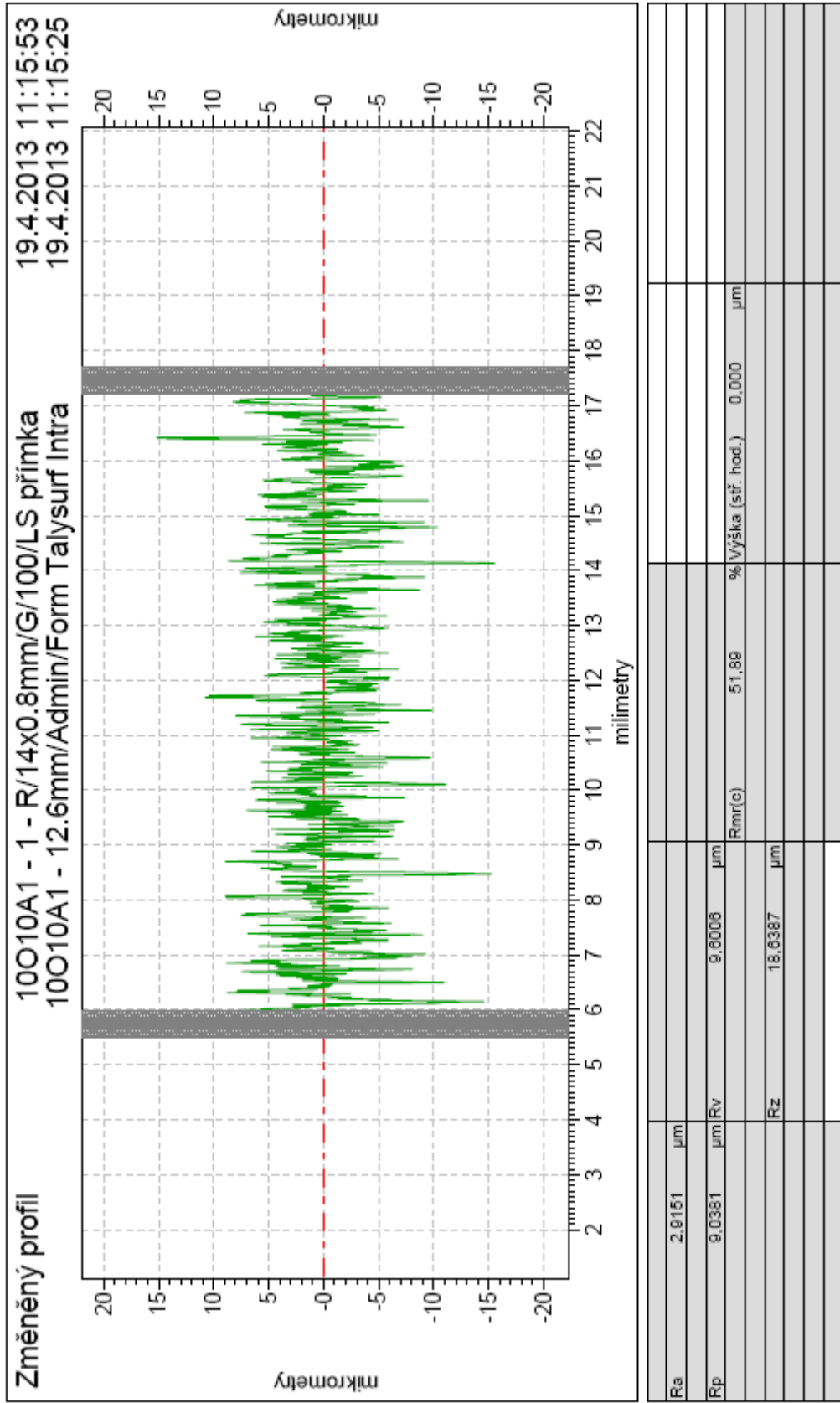
$S_f$	[Kč]	Fixní hodinová sazba
$S_{1,2}$	[mm <sup>2</sup> ]	Plocha
$X$	[mm]	Zdvih
$Z$	[rok]	Doba životnosti
$d_0$	[mm]	Průměr vodní dýzy
$d_F$	[mm]	Průměr zaostřování
$d_p$	[mm]	Průměr částice
$l_F$	[mm]	Délka zaostřovací trubice
$m_A$	[kg.min <sup>-1</sup> ]	Hmotnostní tok
$n_p$	[-]	Počet přechodů
$p$	[Pa]	Tlak
$s_A$	[°]	Směr přívodu abraziva
$s_p$	[°]	Směr posuvu
$t$	[s]	Čas
$t_{va}$	[s]	Čas řezání vzorku metodou AWJ
$t_{vd}$	[s]	Čas řezání vzorku metodou DWJ
$v$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	Rychlost posuvu
$\Phi$	[°]	Úhel působení
$\theta$	[°]	Úhel vychýlení paprsku



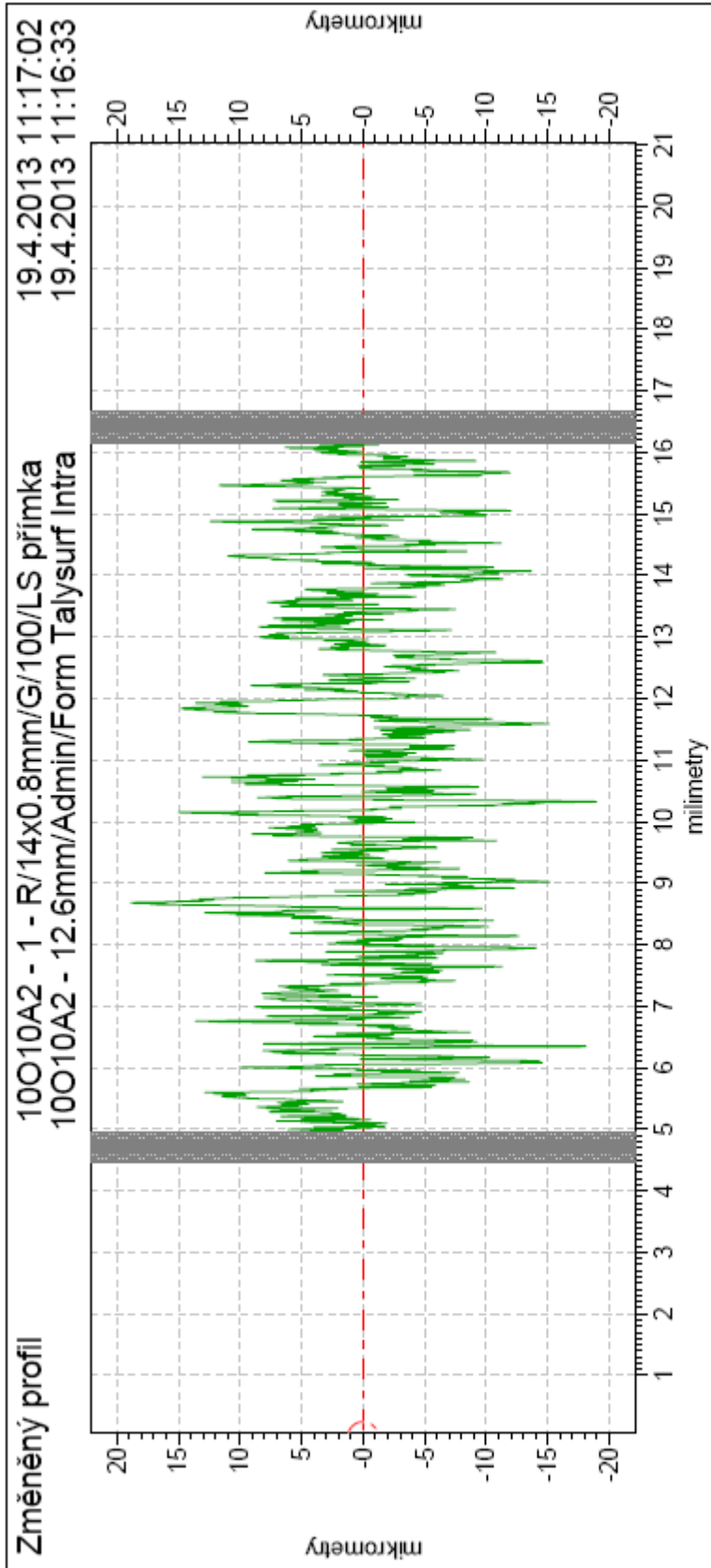
**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Grafický výstup z přístroje Talysurf Intra 50. Ocel, tloušťky 10 mm, standardní posuvová rychlost řezací hlavice, řezáno metodou AWJ, měřeno v horní pozici.
- Příloha 2 Grafický výstup z přístroje Talysurf Intra 50. Ocel, tloušťky 10 mm, standardní posuvová rychlost řezací hlavice, řezáno metodou AWJ, měřeno v dolní pozici.
- Příloha 3 Grafický výstup z přístroje Talysurf Intra 50. Ocel, tloušťky 10 mm, standardní posuvová rychlost řezací hlavice, řezáno metodou DWJ, měřeno v horní pozici.
- Příloha 4 Grafický výstup z přístroje Talysurf Intra 50. Ocel, tloušťky 10 mm, standardní posuvová rychlost řezací hlavice, řezáno metodou DWJ, měřeno v dolní pozici.

# PŘÍLOHA 1

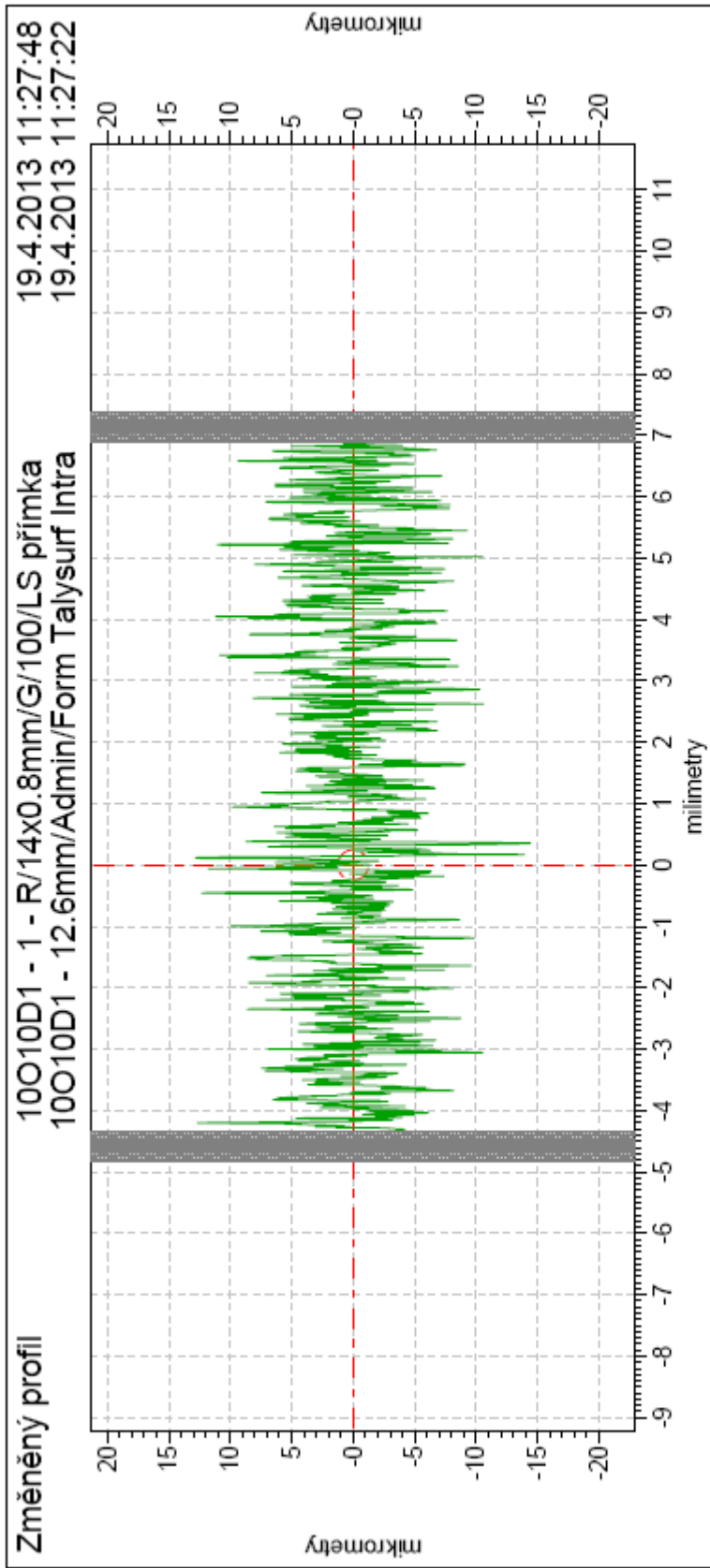


# PŘÍLOHA 2



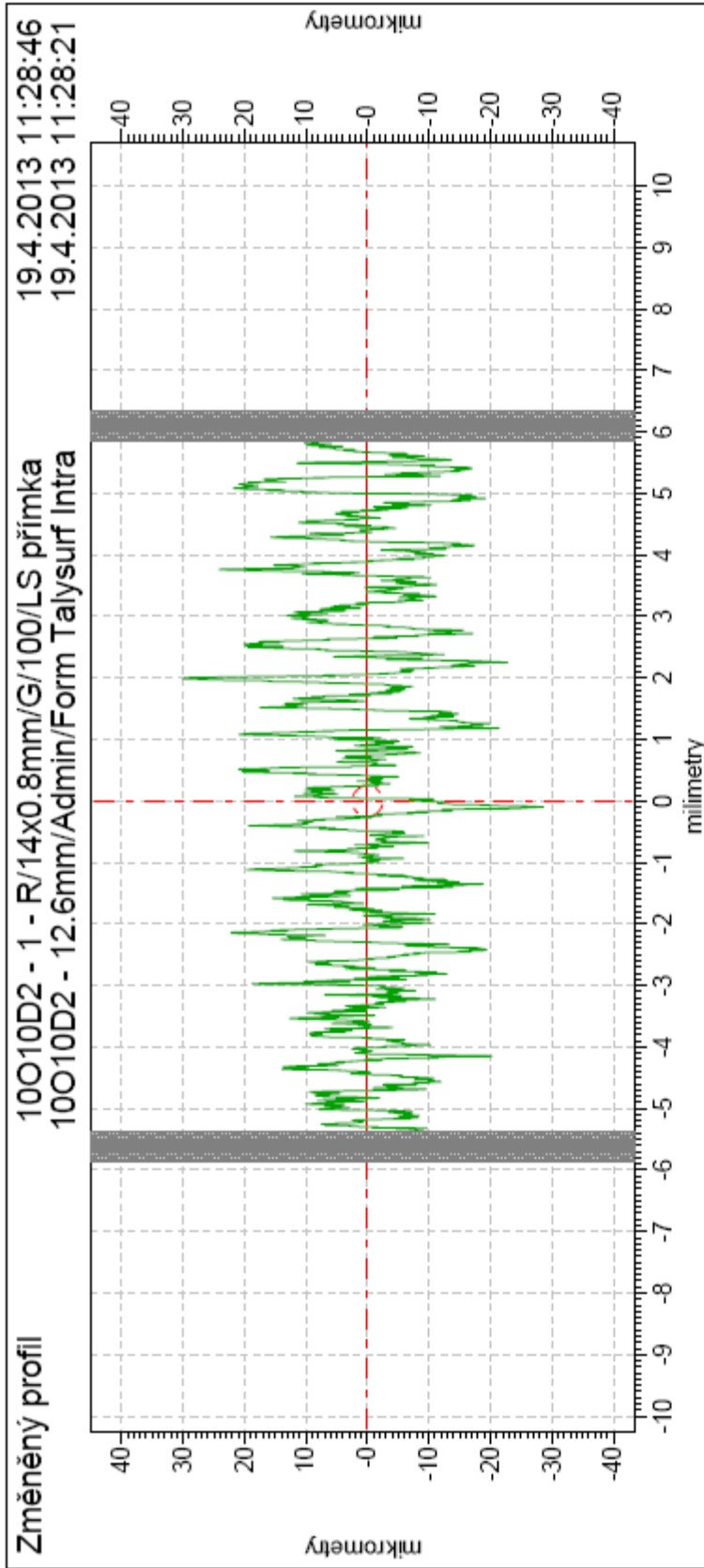
Ra	4,6841	µm			
Rp	11,6441	µm	Rv	12,6778	µm
			Rmr(c)	50,34	% Výška (stř. hod.)
			Rz	24,6220	µm
					0,000
					µm

# PŘÍLOHA 3



Ra	3,0744	µm		
Rp	9,6853	µm	Rv	9,2705 µm
			Rmr(c)	50,11 % Výška (stř. hod.) 0,000 µm
			Rz	18,9558 µm

# PŘÍLOHA 4



Ra	7.2722	µm			
Rp	19.0889	µm	Rv	17.7945	µm
			Rmr(c)	47.93	% Výška (stř. hod.)
			Rz	36.8614	µm
					0.000
					µm