



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

## PRODUKCE SOUČÁSTÍ Z TABULÍ PLECHŮ NEKONVENČNÍ METODOU VODNÍHO PAPRSKU

PRODUCTION OF PARTS FROM SHEET METAL (THIN PANEL) THROUGH  
THE USE OF METHOD WJM/AWJ

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Hana OPOČENSKÁ

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/12

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Hana Opočenská

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

### **Produkce součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku**

v anglickém jazyce:

### **Production of parts from sheet metal (thin panel) through the use of method WJM/AWJ**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor technologie výroby vodním paprskem. Posouzení vůči standardním metodám obrábění. Představení firemního zázemí (technologie, součástková základna). Návrh výroby konkrétní součásti. Zhodnocení návrhu.

Cíle bakalářské práce:

Zpřehlednění nekonvenční metody obrábění vůči standardním obráběcím procesům. Opodstatnění navrženého řešení ve firemních podmínkách.



Seznam odborné literatury:


1. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresivní technologie. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. CIHLÁŘOVÁ, Petra, Michael Lars George HILL and Miroslav PÍŠKA. Fundamentals of CNC Machining. [online]. Dostupné na World Wide Web: <<http://cnc.fme.vutbr.cz>>.
3. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
4. ŠTULPA, Miloslav. CNC obráběcí stroje a jejich programování. 1. vyd. Praha: Technická literatura BEN, 2007. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.
5. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. Miroslav Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
6. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing s. r. o., 2008. 240 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
7. KOČMAN, Karel. Speciální technologie obrábění. 3. vyd. Brno: VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, 2004. 230 s. ISBN 80-214-2562-8.
8. FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1996. 262 s. ISBN 80-85867-95-8.
9. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.
10. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



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

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan

## ABSTRAKT

Bakalářská práce zabývající se produkcí součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku se skládá ze dvou částí. První, teoretická část, vysvětluje základní princip technologie obrábění vodním paprskem, popisuje parametry ovlivňující jakost povrchu a přesnost obrábění. V druhé, praktické části je uveden pracovní postup zadané součásti zhotovené ve firmě a technicko-ekonomické zhodnocení její výroby.

### Klíčová slova

nekonvenční metody obrábění, technologie vodního paprsku, vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, dělení vodním paprskem

## ABSTRACT

This bachelor's thesis, divided into two parts, deals with unconventional water stream metal cutting methods used for production of components made from metal sheets. First part is theoretical and explains basic principles of water stream cutting technology and describes aspects affecting surface quality of the products and precision of the cutting. The second part focuses on the company product technological procedures and techno-economical evaluation of the component production.

### Keywords

unconventional methods of metal cutting, water stream technology, water stream, abrasive water stream, cutting by water stream

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OPOČENSKÁ, H. *Produkce součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 38 s. příloh 2. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Produkce součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Hana Opočenská

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Milanovi Kalivodovi z VUT Brno za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Zvláštní poděkování patří společnosti AQUADEM, s. r. o., která mi umožnila řešení praktické části bakalářské práce.

Dále bych ráda poděkovala všem, kteří mi byli po celou dobu studia oporou. Zejména mé rodině za podporu a trpělivost.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ .....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU .....	10
1.1 Historie .....	10
1.2 Princip metody obrábění vodním paprskem .....	11
1.3 Základní metody řezání .....	11
1.3.1 Technologie WJM .....	11
1.3.2 Technologie AWJ .....	12
1.3.3 Parametry metod WJM a AWJ .....	12
1.4 Princip řezání.....	13
1.4.1 Hlavní části zařízení a jejich popis .....	13
1.4.2 Abrasivo .....	18
1.5 Řezná dráha paprsku .....	19
1.5.1 Vznik úkosů.....	20
1.5.2 Ovlivnění kvality řezu .....	20
1.6 Výhody vodního paprsku .....	21
1.7 Nevýhody vodního paprsku .....	21
2 POSOUZENÍ VŮČI KONVENČNÍM METODÁM .....	22
2.1 Posouzení vůči standardním konvenčním metodám .....	22
2.2 Posouzení vůči vodnímu paprsku.....	23
2.2.1 Soustružení .....	23
2.2.2 Frézování .....	24
2.2.3 Vrtání .....	24
3 NÁVRH SOUČÁSTI VE FIREMNÍM PROSTŘEDÍ .....	25
3.1 Představení firmy.....	25
3.2 Obecný postup výroby součásti.....	25
3.2.1 Volba polotovaru .....	26
3.2.2 NC program .....	26
3.2.3 Nastavení rezných podmínek.....	27
3.2.4 Řezání.....	29

4 DISKUZE .....	31
ZÁVĚR .....	33
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	34
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	37
SEZNAM PŘÍLOH.....	38

## ÚVOD

Žijeme v době, ve které neustále dochází k významnému rozvoji ve všech odvětvích průmyslu. Zejména technické obory zaznamenávají v průběhu posledních let velmi rychlý vývoj. To, co si lidé dříve ani nedovedli představit, se stává skutečností.

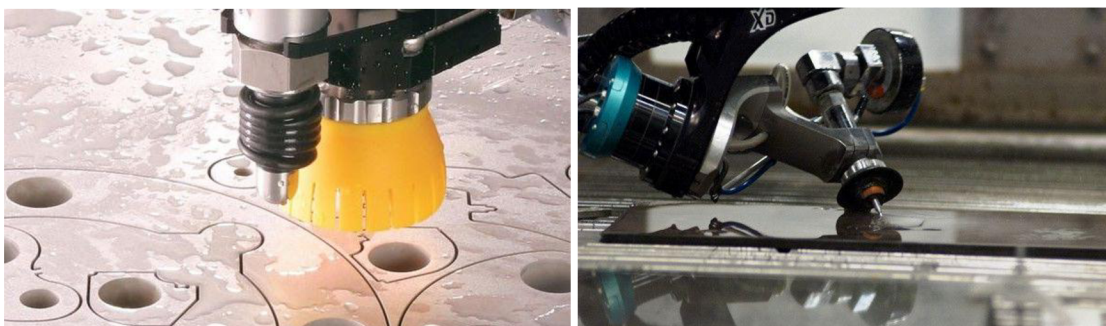
Dnešní moderní člověk ke svému pohodlnému životu potřebuje velké množství technických vymožeností. Neobejde se bez elektrospotřebičů, automobilů, počítačů a mnoha dalších věcí, které používá zcela běžně a automaticky. Denně se setkává s novými a modernějšími výrobky, o kterých mnohdy ví jen to, k čemu slouží a jak se používají. Už většinou nepřemýšlí o tom, na jakém principu pracují, natož co bylo prvopočátkem jejich vzniku a jakým dlouhodobým vývojem prošly.

Již před staletími člověk vyráběl různé předměty, které mu usnadňovaly život. Využíval k tomu jen to, co mu poskytla příroda. Jejím pozorováním získával znalosti a zkušenosti. Cíleně tak začal přetvářet původní přírodní prostředí v kulturní krajinu. A protože byl chytrý a vynalézavý, chtěl si práci ulehčit. Snažil se co nejvíce využívat přírodní síly ve svůj prospěch. Díky tomu se už od pradávna využívá proudící voda.

V přírodě se síla vody projevuje formou eroze. Jejím působením, které trvá již miliardy let, se vyvíjela a měnila krajina. Znalost těchto přírodních zákonů přispěla k sestrojení technického zařízení, které splňuje rostoucí požadavky na přesnost, jakost a produktivitu. Jedná se o technologii řezání vodním paprskem.

Podstata dělení materiálu spočívá v jeho obrušování tlakem vody. Tento princip připomíná miliony let přetrvávající proces vodní eroze, ale nekonečná léta jsou značně zrychlena pomocí vysokého tlaku na několik minut.

Bakalářská práce se tedy zabývá již zmíněnou nekonvenční technologií vodního paprsku (obr. 1). Zachycuje přehled základních metod řezání, princip dělení materiálu, popis jednotlivých částí strojů. Dále obsahuje výhody, nevýhody a základní rozdíly oproti běžným obráběcím metodám. Poslední část je zaměřena na praktickou ukázkou postupu výroby součásti ve firmě AQUADEM, s. r. o.



Obr. 1 Řezání vodním paprskem [9].

## 1 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Technologie vodního paprsku patří mezi nekonvenční metody obrábění, nepoužívají se tedy běžné klasické nástroje, ale vlastní proces dělení materiálu se realizuje pomocí vodního paprsku přiváděného do řezu pod vysokým tlakem. Jednoduchý, avšak současně velmi složitý princip.

### 1.1 Historie

Metoda řezání materiálu vodním paprskem se rozvíjela především v posledních dvou desetiletích. Díky své všestrannosti a flexibilitě použití vyvolala ve výrobním průmyslu řetězovou reakci.

První poznatky o řezání vodou pochází od lesního inženýra, Dr. Normana Franze (obr. 1.1), který se v 50. letech 20. století snažil nalézt nové, efektivnější metody dělení dřeva. Zabýval se spouštěním těžkých břemen na sloupce vody, které procházely přes velmi úzký otvor. Tímto Norman získal krátké paprsky vody o vysokém tlaku, které umožňovaly řezat dřevo i ostatní materiály. Ani v pozdějších studiích se mu však nepodařilo vytvořit kontinuální vysokotlaký proud vody [1].



Obr. 1.1 Dr. Norman Charles Franz [3].

V roce 1974 byla založena společnost Flow, která o rok později uvedla na trh čerpadla pro nepřetržitý provoz. První uplatnění našla tato nová technologie při řezání jednorázových plen.

Netrvalo dlouho a v roce 1979 Dr. Mohamed Hashish navrhl proces, který by umožňoval řezat téměř všechny materiály. Do běžného vodního paprsku přidal abrazivní částice, minerální granát.

Od roku 1980 se technologie vodního paprsku dále vyvíjela a postupně pronikala do různých odvětví průmyslu. Velké uplatnění našla jak v letectví, tak v kosmonautice, neboť umožnila řezat materiály o vysoké pevnosti, jako jsou titan a nerezová ocel, ale i lehké kompozity.

Tato metoda se významně proslavila v roce 1987, když napomohla k záchraně dítěte ze studny. Pomocí vodního paprsku se vedle studny vyhloubila šachta a z ní se následně prorazil otvor do studny. V tomto roce také společnost Flow vyvinula první 5 ti osý souřadný systém pro 3D řezání.



Až do roku 2001 se firma Flow zabývala především zdokonalováním čerpadel. Tento rok však vytvořila novou technologii, která zůstává aktuální dodnes. Jedná se o systém Dynamic Waterjet, jehož vlastnosti rozšiřují řezání tvarově složitých součástí ve 3D [2].

## 1.2 Princip metody obrábění vodním paprskem

Řezání materiálu při obrábění vodním paprskem spočívá v přeměně kinetické energie vysokorychlostního a vysokotlakého vodního paprsku na mechanickou práci. Kapalina, která vystupuje z pracovní trysky, dosahuje dvou až čtyřnásobně vyšší rychlosti proudění ( $600$  až  $900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) než je rychlost zvuku. Čímž se paprsek vody z hlediska svého účinku na okolí chová jako pevné těleso [4, 8].

## 1.3 Základní metody řezání

V technologických aplikacích se využívají dvě základní metody, které se od sebe liší druhem použitého pracovního média:

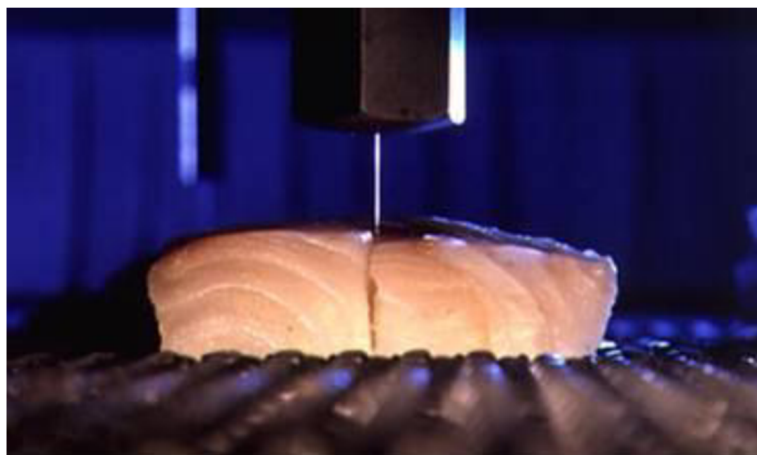
- **WJM** – *Water Jet Machining* – čistý vodní paprsek, tzv. hydrodynamické obrábění,
- **AWJ** – *Abrasive Waterjet Machining* – abrazivní vodní paprsek, tj. vodní paprsek, do kterého jsou přiváděna zrna brusiva.

Pracovní kapalina závisí především na druhu řezaného materiálu. Nejčastěji se užívá čistá, chemicky neupravená voda či olej. V potravinářském průmyslu se výrobky řezou např. pomocí kakaa [5, 8].

### 1.3.1 Technologie WJM

Jak již bylo zmíněno v předchozí části práce, řezání čistým vodním paprskem patří mezi původní metody dělení materiálů. Jelikož k řezu dochází pouze za pomoci vysokotlaké vody, zařízení se využívá pro zpracování měkkých, lehkých materiálů do tloušťky 100 mm, mezi které patří např. papír, kůže, guma, umělé hmoty, textil, potraviny, izolační a pěnové materiály [9, 10].

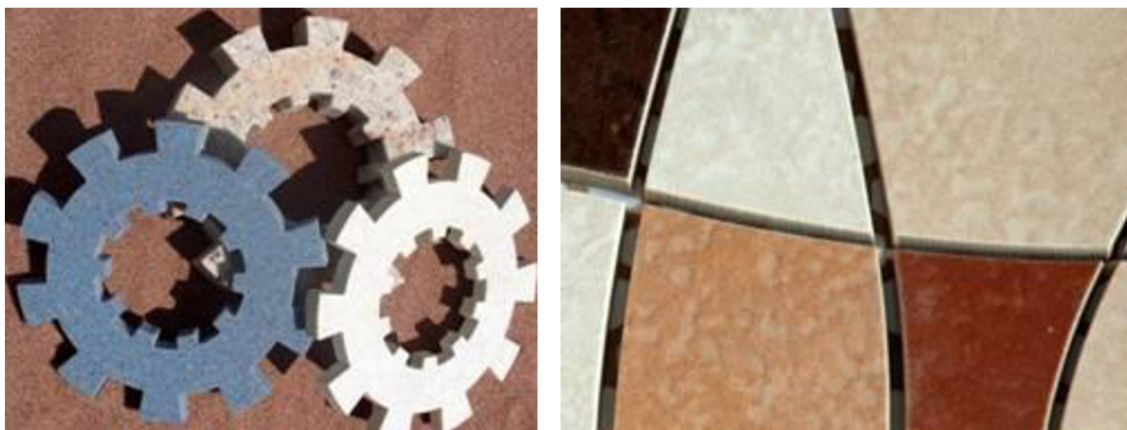
Při řezání masa (obr. 1.2), pečiva, čokoládových tyčinek, apod. nedochází k přenosu bakterií mezi potravinami, čemuž použitím běžného nože nelze zabránit.



Obr. 1.2 Příklad aplikace: Řezání masa [21].

### 1.3.2 Technologie AWJ

Na rozdíl od řezání čistou vodou, paprsek s příměsí brusiva umožňuje řezat prakticky všechny materiály (obr. 1.3), jako jsou kompozity, železné i neželezné kovy, mramor, žula, sklo, keramika aj. až do tloušťky 250 mm. Materiál rozrušují zrna abraziva, která jsou urychlována vodním paprskem [9, 13, 18].



Obr. 1.3 Příklad aplikace: Ozubená kola z kamene, mozaika z dlažby [20].

### 1.3.3 Parametry metod WJM a AWJ

Porovnání základních parametrů metody WJM s AWJ zobrazuje tab. 1.1.

Tab. 1.1 Srovnání parametrů metody WJM a AWJ.

	PARAMETRY METOD	
	WJM	AWJ
Pracovní tlak vody	až 700 MPa	60 až 400 MPa
Průměr trysky	od 0,075 mm	
	0,1 až 0,25 mm	0,8 až 2 mm
Šířka paprsku	0,1 až 1,5 mm	1,2 až 2,5 mm
Šířka řezné spáry	0,1 až 0,3 mm	1,1 až 2,5 mm
Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem	2,5 až 6,35 mm	10 až 25 mm
Celkový příkon	25 – 40 (70) kW	
Množství vody	2 – 4,5 (8) l.min <sup>-1</sup>	

#### Rychlost řezání

Rychlost řezání vodním paprskem závisí na druhu a tloušťce materiálu. Pro kovy se rychlosti pohybují od 5 mm.min<sup>-1</sup> až do 2000 mm.min<sup>-1</sup>.

#### Přesnost tvaru

Přesnost u tenkých obrobků (do tloušťky 10 mm) bývá maximálně ± 0,1 mm. U materiálů větších tloušťek a v rádiusových přechodech přesnost klesá až na ± 1 mm.

### **Průměrná aritmetická úchylka profilu řezu**

Průměrná aritmetická úchylka profilu (dále jen Ra) se mění podél tloušťky řezaného materiálu. Pohybuje se v rozmezí Ra = 2,5 až 12 μm. Při vstupu paprsku do obrobku je Ra povrchu nejlepší a směrem k výstupu se zhoršuje.

### **Kolmost řezaných stěn**

Řezná spára se s rostoucí vzdáleností od místa vniku paprsku směrem dolů rozšiřuje. Kolmost řezaných stěn činí 0,3 až 6,4° [5, 11].

### **1.4 Princip řezání**

Podstata metody spočívá v obrušování materiálu tlakem vodního paprsku, který je značně urychlen a soustředěn do jednoho místa. K vyvození tak vysokého tlaku slouží hydraulická jednotka, která se skládá ze speciálního vysokotlakého vodního čerpadla a multiplikátoru. Z hydraulického zařízení se potrubím voda pod vysokým tlakem dopravuje do řezací hlavice umístěné na portálu řezacího stolu. V ní se následně vytvoří usměrněný paprsek.

Pokud se jedná o metodu AWJ, paprsek dále pokračuje do směšovací komory, na kterou je napojen přívod abrazivních částic. V případě metody WJM paprsek vstupuje do vodní trysky.

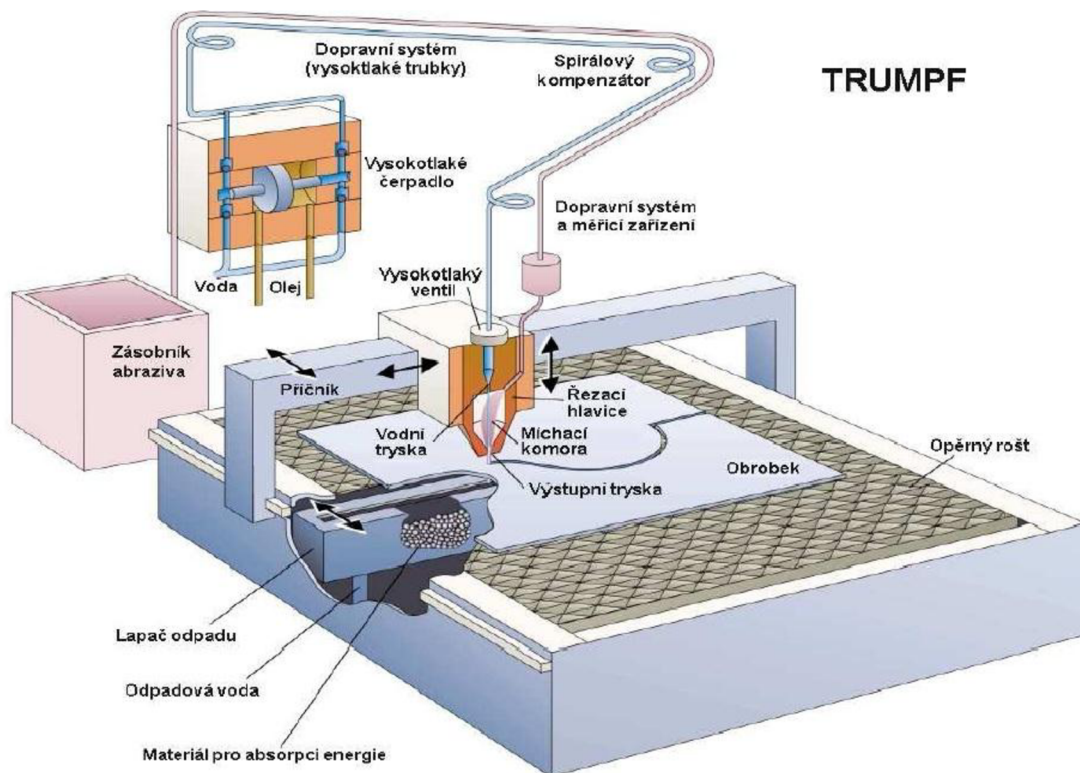
Řezací hlavici zakončuje řezací tryska, ze které vystupuje čistý nebo abrazivní paprsek ven a dopadá na obráběný materiál. Celý proces řezání probíhá na CNC stroji podle předem navrženého programu. Je tedy řízen jak pohyb řezací hlavy, tak celá dráha řezu. To umožňuje provést i tvarově náročný řez součástí. Po dokončení obrábění se směs vody a abrazivních zrn zachycuje v lapači umístěném pod řezacím stolem. Ve většině případů dochází k následné recyklaci abraziva [8, 12, 14].

#### **1.4.1 Hlavní části zařízení a jejich popis**

Zařízení pro technologii vodního paprsku, které znázorňuje obr. 1.4, se skládá z následujících částí [4]:

- hydraulická jednotka (s čerpadlem a multiplikátorem),
- akumulátor,
- filtry,
- potrubí pro rozvod vody,
- ventily,
- systém pro dávkování abraziva,
- řezací hlavice,
- zařízení pro pohyb řezací hlavice (ve třech osách),
- opěrný rošt,
- lapač nečistot,
- systém úpravy vody,
- systém recyklace vody,

- řídicí NC a CNC systém.



Obr. 1.4 Schéma řezání [17].

### Stroj pro řezání vodním paprskem

Obr. 1.5 zobrazuje řezací stroj od firmy MicroStep spol. s r. o., jehož předností je možnost kombinace dělení materiálu vodním paprskem s dalšími technologiemi, např. vrtáním, řezáním závitů. Také vyniká vyspělým řídicím systémem.



Obr. 1.5 CNC stroj AQUACUT [19].



### Vysokotlaké čerpadlo

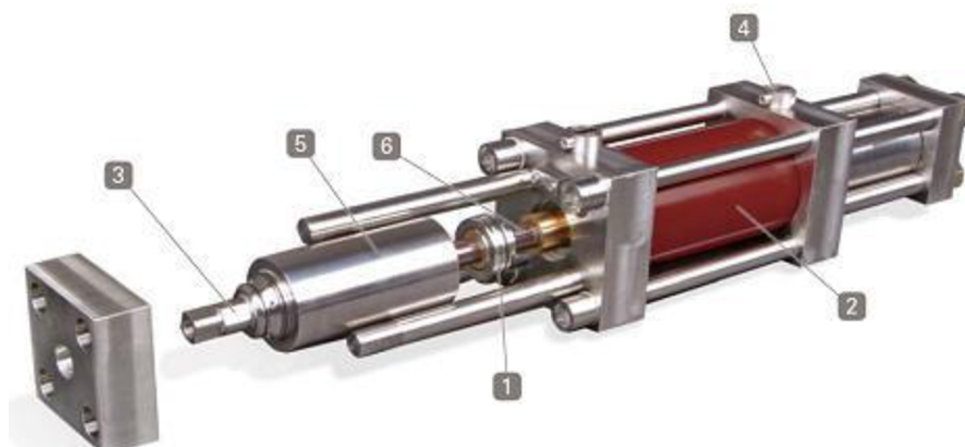
Toto zařízení (obr. 1.6) tvoří základní prvek technologie vodního paprsku, neboť slouží pro vyvození vysokého tlaku vody. Tlak je zajišťován buď pomocí multiplikátoru, jehož výrobou se zabývá americká firma Flow Systems, nebo se využívají triplexová plunžrová čerpadla, která pocházejí od japonských firem [6, 8].



Obr. 1.6 Vysokotlaké čerpadlo PTV JETS – 2.2/60 (Výkon 2,2 l.min<sup>-1</sup> při max. tlaku 4 130 bar) [15].

### Multiplikátor

Multiplikátor neboli násobič tlaku (obr. 1.7), jak napovídá název, slouží ke zvýšení tlaku vody. Obsahuje dva spojené písty. Na větší průměr pístu se přivádí nízký tlak oleje, a ten je následně přetvářen na vysoký tlak vody na malém pístu, který lze plynule regulovat [8].



1 – Hydraulické těsnění s ložiskem, 2 – Nízkotlaký válec, 3 – Zpětný ventil,  
4 – Elektronika, 5 – Vysokotlaký válec, 6 – Píst

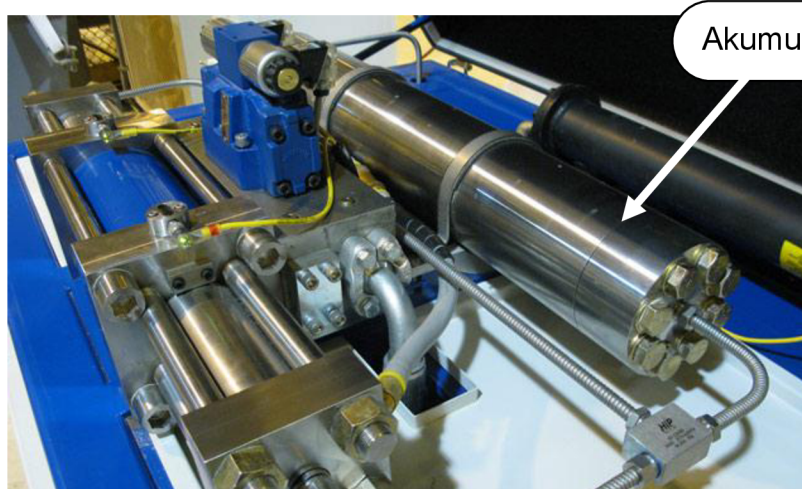
Obr. 1.7 Multiplikátor [16].

### Filtr

Slouží pro filtraci kapaliny, čímž zároveň odděluje drobné nečistoty a chrání výstupní otvor trysky [6].

## Akumulátor

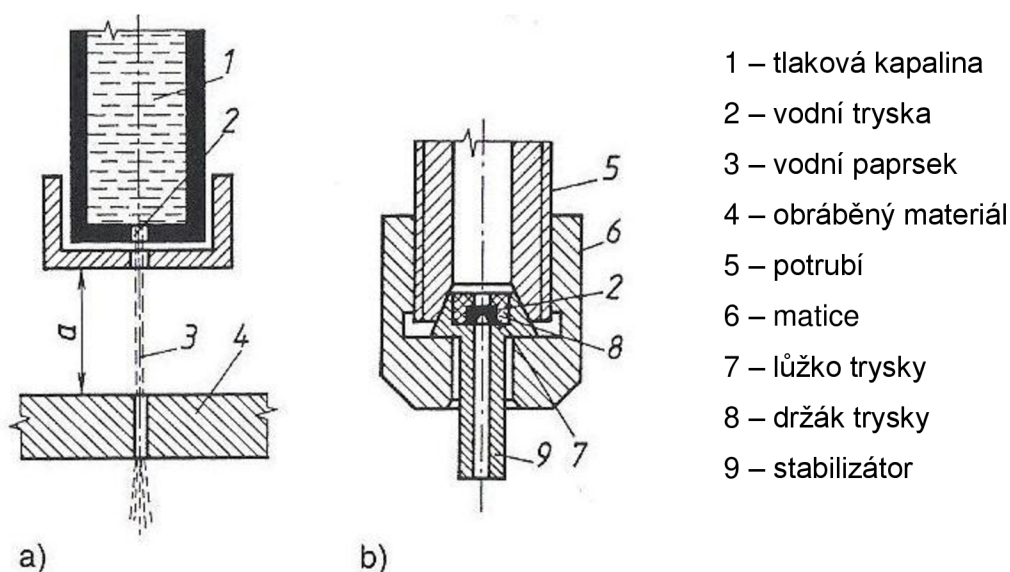
Při provozu vznikají v multiplikátoru rázy vody, které tlumí právě akumulátor, který je zobrazen na obr. 1.8. Ten má tvar tlustostěnné nádoby. Před použitím se nádoba přetlakuje, aby se v materiálu vytvořily plastické deformace, které způsobí následné zpevnění materiálu. Tento proces zamezuje šíření trhlin při pulzaci přiváděné tlakové vody [8].



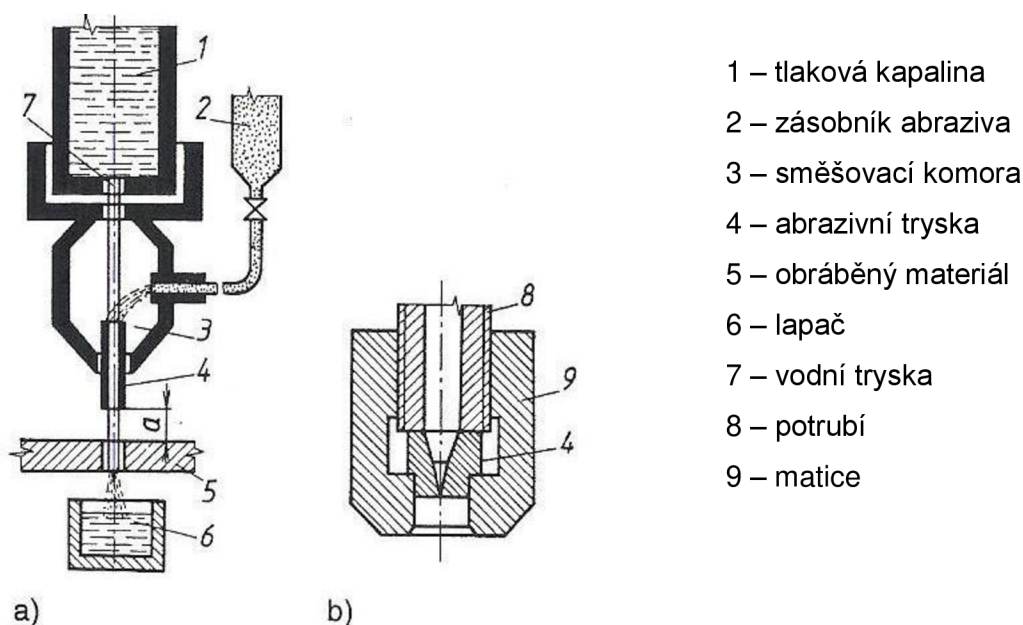
Obr. 1.8 Akumulátor [30].

## Řezací hlava

Použitá řezací hlava závisí na druhu paprsku. Pro čistý vodní paprsek je ve spodní části tělesa hlavy umístěna vodní tryska o průměru výstupní díry (obr. 1.9). V opačném případě, bude-li se jednat o metodu AWJ, po průchodu vodní tryskou, umístěné v horní části hlavy, paprsek dále postupuje do směšovací komory, do které jsou ze zásobníku nasávána abrazivní zrna. Paprsek se těmito zrny obalí a abrazivní tryskou putuje z řezací hlavy do místa řezu (obr. 1.10).



Obr. 1.9 Řezací hlava pro čistý vodní paprsek: a) schéma, b) provedení vodní trysky.



- 1 – tlaková kapalina
- 2 – zásobník abraziva
- 3 – směšovací komora
- 4 – abrazivní tryska
- 5 – obráběný materiál
- 6 – lapač
- 7 – vodní tryska
- 8 – potrubí
- 9 – matice

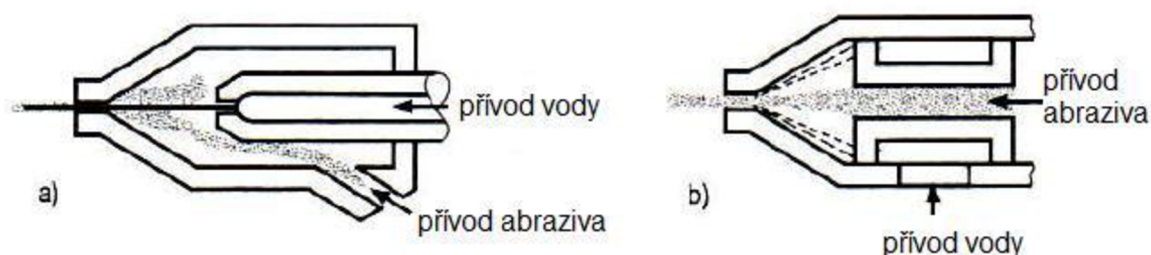
Obr. 1.10 Řezací hlava pro abrazivní vodní paprsek: a) schéma, b) provedení abrazivní trysky.

Kóta s označením „a“ vyjadřuje vzdálenost trysky od obrobku. Pohybuje se v rozmezí od 2,5 do 6,35 mm pro WJM, od 10 do 25 mm pro AWJ.

Trysky patří mezi nejdůležitější části celého zařízení, neboť řídí kvalitu vodního paprsku i kvalitu řezu. Nejčastěji jsou vyráběny ze safíru nebo z KNB. Safírová tryska pracuje přibližně 200 hodin, po této době se musí vyměnit, protože se její výstupní otvor zanesou nečistotami a vodními usazeninami.

V současnosti se upřednostňují diamantové trysky, neboť mají až 10 ti násobně vyšší pracovní životnost, tudíž se snižují nároky na údržbu a výměnu. S tím roste i cena, která je 7 až 10 krát vyšší. Oproti safírové se diamantová tryska může několikrát vyčistit a nadále bude produkovat koherentní vysokotlaký paprsek.

Pro abrazivní vodní paprsek se rozlišují trysky s radiálním a axiálním přívodem brusiva (obr. 1.11). První obrázek zobrazuje konstrukci s radiálním přívodem brusiva. Tento typ trysek se snadno vyrobí a lze jej použít i pro čistý vodní paprsek. Tryska na druhém obrázku, s axiálním přívodem brusiva, zase umožňuje lepší míšení brusiva s vodou, čímž dochází k menšímu opotřebování trysky.



Obr. 1.11 Trysky pro AWJ: a) Tryska s radiálním přívodem brusiva, b) Tryska s axiálním přívodem brusiva.

Při řezání abrazivním vodním paprskem se podle konstrukce trysky rozlišují dvě základní technologie:

- systém s přímým přívodem brusiva (**AWJ** – *abrasive waterjet*). Ze zásobníku se brusivo přivádí do směšovací komory, ve které je vysokotlakým vodním paprskem strháváno a urychlováno. Tlak vody se pohybuje od 7 do 400 MPa, průtok abraziva 1 až 200 kg.min<sup>-1</sup>.
- systém s přímým vstřikováním brusiva (**ASJ** – *abrasive slurry jet*). V tlakové nádobě se nachází stlačená suspenze smíšená s vodou, která se přivádí do trysky. Tlaky jsou do 100 MPa, průtok suspenze okolo 20 kg.min<sup>-1</sup>. Tento systém má oproti AWJ vyšší účinnost, vyšší proudovou hustotu a umožňuje použití menšího průměru paprsku [5, 6, 8, 11].

### Lapač nečistot

Jedná se o nádobu, nejčastěji o výšce 800 mm naplněnou keramickými kuličkami, která je umístěna pod řezaným materiálem. Slouží pro zachycení vodního paprsku, třísky a tlumí rázy. Lze použít i nižší nádoby s kovovými kuličkami [5, 6].

### Zásobník brousicích zrn

Ze zásobníku (obr. 1.12) se zrna abraziva nasávají do směšovací komory řezací hlavy [5].



Obr. 1.12 Zásobník zrn abraziva a regulátor abraziva [16].

### 1.4.2 Abrazivo

Přidávání abraziva do vysokotlakého vodního paprsku značně rozšířilo možnosti řezání. Jedná se o směs částic materiálů (brusný materiál), které mají výraznou abrazivní schopnost a vysokou tvrdost. Lze použít rozmanité množství abrazivních



částic, které se rozdělují podle druhu materiálu a zrnitosti. Každý druh má své specifické výhody a výrazně ovlivňuje kvalitu a cenu řezu.

Čím jemnější zrna se při řezání použijí, tím je výsledný řez hladší. Pro vyšší rychlost řezání a hlubší řezy se zase využívá větší množství abraziva. S jeho spotřebou roste cena řezu.

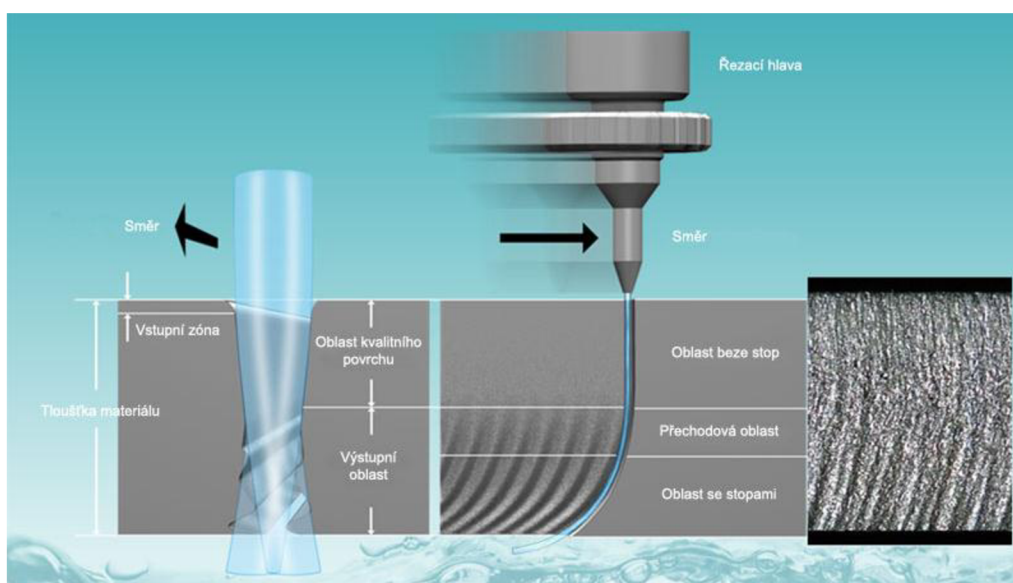
*Druhy abraziva:*

- přírodní australský granát ( $5 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{ Y}_2\text{O}_3$ ),
- olivín  $(\text{Mg, Fe})_2(\text{SiO}_4)$ ,
- oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- křemičitý písek,
- ocelová drť, broky,
- sůl, cukr, kakao,
- ledová tříšť.

V praxi se nejčastěji využívá australský granát pro svůj vyšší abrazivní účinek, to se však odráží na jeho vyšší ceně. Mezi další nevýhody se řadí vyšší opotřebenost trysek a nevhodnost recyklace [11, 14].

### 1.5 Řezná dráha paprsku

Paprsek proniká do obráběného materiálu, kde postupně ztrácí svoji kinetickou energii a následně se vlivem tření s materiálem obrobku vychyluje z původního směru. Vychýlení vodního paprsku se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od místa vniku, a tím se zhoršuje jakost povrchu obrobenej plochy.

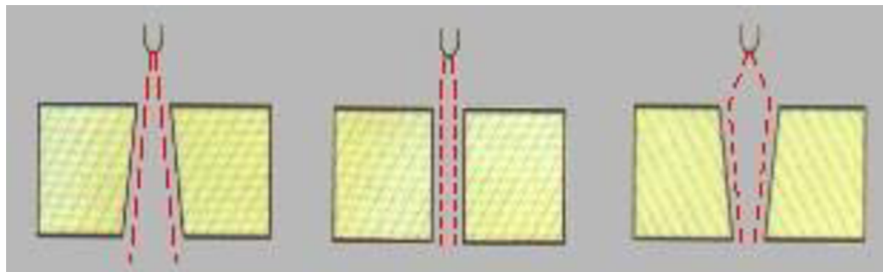


Obr. 1.13 Vychýlení vodního paprsku [7].

Obr. 1.13 znázorňuje vychýlení vodního paprsku, který se pohybuje po zaoblené dráze a jehož poloměr se mění s přešlou délkou oblouku [4, 5, 6].

### 1.5.1 Vznik úkosů

Vznik a velikost úkosů ovlivňuje především řezná rychlost, druh a tloušťka materiálu, ale také tvar řezu, množství abraziva aj.



Obr. 1.14 Vznik úkosů [28].

Obr. 1.14 zobrazuje druhy úkosů. První situace znázorňuje řez, který probíhá při velmi pomalých rychlostech, nebo v měkkém materiálu. Vodní paprsek zanechává svou obvyklou kuželovitou stopu. Následující obrázek zachycuje optimální řeznou rychlost a tloušťku materiálu. Nevzniká úkos, jelikož paprsek prochází po celou dobu ve válcovitém tvaru. Vysokou rychlost řezu, či hůře obrobitelný materiál zobrazuje poslední obrázek. Už na vstupu do materiálu nestihne paprsek proříznout materiál a směrem k výstupu se zužuje [11, 28].

### 1.5.2 Ovlivnění kvality řezu

Na kvalitu řezu má významný vliv výtokový průměr trysky, tlak vody, rychlost paprsku, vzdálenost trysky od povrchu materiálu, úhel sklonu paprsku, druh použitého abraziva. Obr. 1.15 znázorňuje kvalitu řezu definovanou čísly 1 až 5. Nižší čísla označují hrubší povrch hrany, čísla vyšší povrch hladší. Tedy Q1 – nejhorší a Q5 – nejlepší. Běžně používaný řez má označení Q3 [11, 29, 30].



Obr. 1.15 Kvalita řezu [30].

Tlak kapaliny v procesu vodního paprsku určuje Bernoulliho rovnice pro proudění nestlačitelné kapaliny [6]:

$$v^2 = \frac{2 \cdot p}{\rho} \quad (1)$$

kde:  $v$  [m.s<sup>-1</sup>] - rychlost proudění  
 $p$  [MPa] - tlak kapaliny  
 $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] - hustota kapalného média

### 1.6 Výhody vodního paprsku

Hlavní výhody technologie řezání vodním paprskem lze shrnout do následujících bodů [6, 8, 11, 22, 27]:

- studený řez, nedochází tudíž k tepelnému ovlivnění (bez ohřevu a zpevňování) řezaného materiálu,
- obrobený materiál bez zbytkových napětí a mikrotrhlin,
- univerzální použití pro libovolné druhy materiálů i problémových (vata, síťe),
- možnost řezat těžko obrobitelné materiály, i po tepelném zpracování,
- při řezání nevznikají škodlivé emise,
- bezprašný řez,
- malý úběr materiálu díky úzkému řezu,
- vysoká životnost trysek,
- řezané hrany většinou není nutno dále opracovávat,
- lze provádět vícesměrné řezání s nulovým poloměrem zaoblení,
- možnost řezat jakékoliv tvary, obrysy, úkosy,
- není potřeba předvrtávat díry,
- šetrnost k životnímu prostředí,
- možnost řezání pod vodní hladinou,
- vysoká energetická účinnost,
- jednoduchá obsluha,
- velmi přesné leštění povrchů těžkoobrobitelných materiálů, např. keramiky,
- není potřeba upnutí obrobků,
- malý nebo žádný otřep,
- možnost automatizace procesu,
- extrémně přesná geometrie řezaných dílů.

### 1.7 Nevýhody vodního paprsku

Tato metoda má samozřejmě i své nevýhody [8, 11, 27]:

- nevyhnutelný kontakt materiálu s vodou, příp. abrazivem,
- možnost vzniku koroze povrchu např. při řezání ocelí, korodování však lze omezit, či úplně odstranit,
- hlučný provoz,
- nelze řezat kalené sklo, nezpracovanou hrnčířskou hlínu,
- u silnějších materiálů dochází vlivem výběhu paprsku k deformaci spodní hrany řezu,
- u nasákavých materiálů delší doba vysoušení.

## 2 POSOUZENÍ VŮČI KONVENČNÍM METODÁM

V dnešní době nachází technologie vodního paprsku stále širší uplatnění. Kromě dělení materiálů, se vysokotlaký proud vody využívá jako řezný nástroj při soustružení, frézování, vrtání, i řezání závitů, především u těžkoobrobitelných materiálů [6, 26].

### 2.1 Posouzení vůči standardním konvenčním metodám

U základních (konvenčních) metod obrábění dochází k úběru materiálu břity nástroje, které mají definovanou geometrii. Po určité době dochází k jejich opotřebení a musí se naostřit. Při kontaktu s tvrdším materiálem či nevhodnými podmínkami obrábění, může dojít k jejich poškození nebo vylomení. Což má za následek zkrácení životnosti nástroje. Tyto problémy u technologie vodního paprsku odpadají, neboť nástrojem lze nazývat přímo vysokotlaký paprsek vody usměrněný do jednoho místa.

I do vody však musejí být přidávána aditiva, která napomáhají vytváření souvislého paprsku a účinnějšímu řezání. Mezi používaná aditiva patří polymery typu PAA (polyakrylamid) nebo PEO (polyetyloxid) [6].

Ani technologie paprsku se však neobejde bez opotřebování. V tomto případě abrazivní trysky (obr. 2.1). Mohou za to nečistoty, usazeniny, ale i použité abrazivo. Podle materiálu, ze kterého jsou trysky vyrobeny, se po uplynutí doby životnosti buď vyhodí, nebo vyčistí.



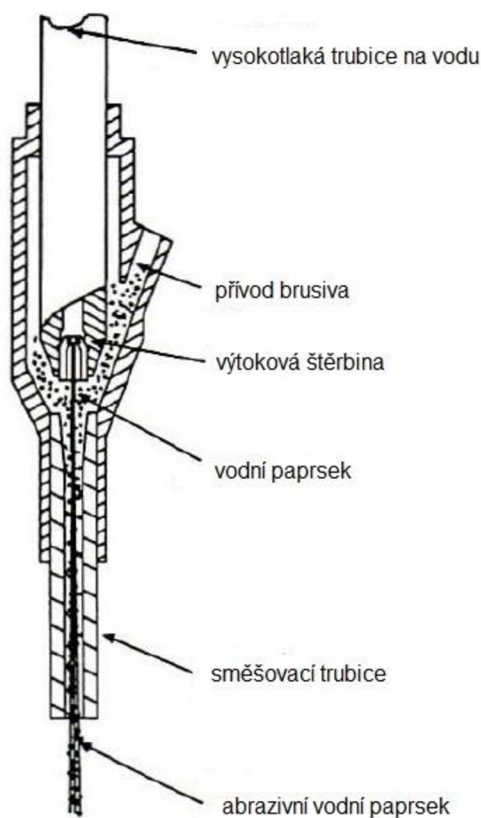
Obr. 2.1 Abrazivní tryska [24].

Části zařízení pro vodní paprsek se konstruuje tak, aby umožňovaly rychlou záměnu řezání z čistého vodního paprsku na abrazivní způsob. Tím se oproti konvenčním metodám značně snižuje čas na výměnu nástroje. U paprsku lze též použít jen jeden řezný nástroj pro všechny druhy materiálů, což u klasických metod nelze.

Mezi hlavní přednosti obrábění vodním paprskem, v porovnání s konvenčními metodami, patří především studený řez, tudíž nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu, následnému pnutí a deformacím. Další výhody zachycuje předcházející kapitola 1.7.

## 2.2 Posouzení vůči vodnímu paprsku

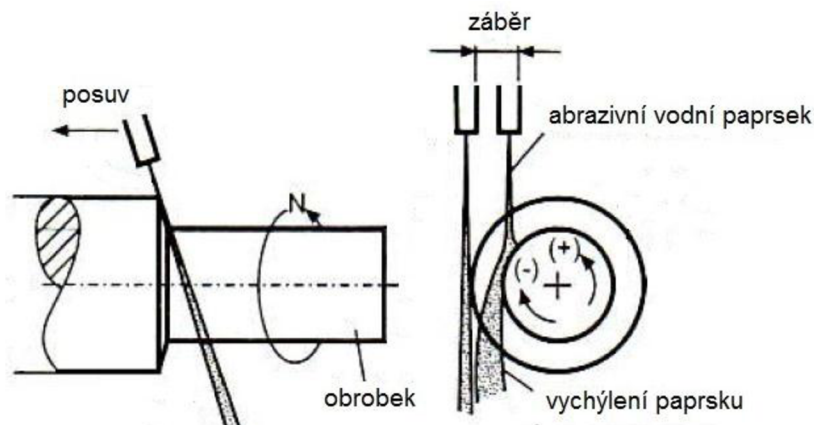
Pro obrábění vodním paprskem se používá tryska, kterou znázorňuje obr. 2.2.



Obr. 2.2 Tryska pro obrábění vodním paprskem [6].

### 2.2.1 Soustružení

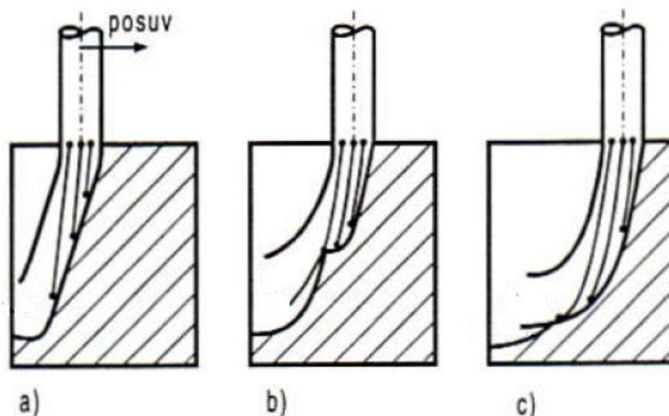
U soustružení (obr. 2.3) koná rotační pohyb obrobek, což zůstává stejné jako u klasické metody obrábění, a abrazivní paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. K úběru materiálu dochází radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu.



Obr. 2.3 Soustružení abrazivním vodním paprskem [6].

### 2.2.2 Frézování

Při frézování (obr. 2.4) nedochází k dělení materiálu, ale jedná se o proces řezání. Hloubka řezu je tudíž menší než tloušťka materiálu. Abrasivní vodní paprsek opakovaně přechází po ploše obráběného materiálu a postupně vytváří požadovaný tvar součásti [26].



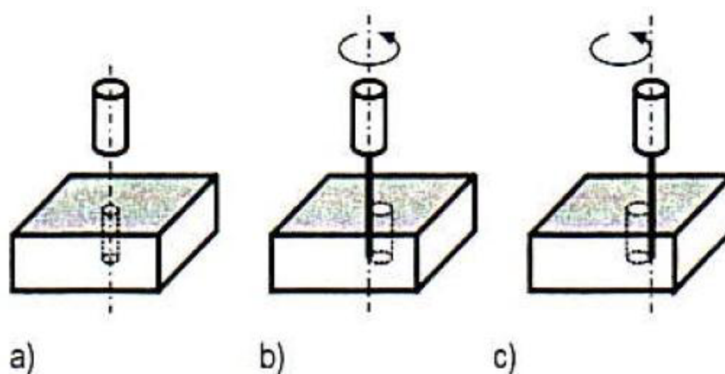
a) začátek tvoření stopy, b) stabilizovaná stopa řezu se stupni posuvu, c) pokračující posuv paprsku a vyrovnání stupňovitosti řezu

Obr. 2.4 Řezný proces při frézování [6].

Tato metoda se využívá pro obrábění tvarově složitých obrobků, nejvíce pro opracování skla a minerálů. Též nachází uplatnění při výrobě tvářecích nástrojů [6].

### 2.2.3 Vrtání

Druh metody vrtání otvorů pomocí technologie AWJ charakterizuje vzájemný pohyb paprsku a obrobku. Nejčastěji se využívá vrtání se stacionárním paprskem a obrobkem, vrtání rotujícím paprskem nebo vibrujícím paprskem se stacionárním obrobkem, tzv. vyřezávání středu otvoru (obr. 2.5).



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

Obr. 2.5 Způsoby vrtání [6].

Vrtání slouží pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, např. keramiky, skla, niklových slitin.



### 3 NÁVRH SOUČÁSTI VE FIREMNÍM PROSTŘEDÍ

V současnosti se metoda řezání vodním paprskem velmi rozšířila i v České republice.

#### 3.1 Představení firmy

Roku 1996 zahájila svojí činnost firma AQUAdem, s. r. o. (obr. 3.1) sídlící v Brně, která do svého výrobního programu jako první zařadila technologii vodního paprsku pro dělení plošných materiálů. Původní zařízení zakoupila od firmy FLOW EUROPE. Se zvyšujícími se nároky na kvalitu a produktivitu práce rozšířila svá pracoviště o nejmodernější CNC stroje od firmy Water Jet Sveden, NC 3000 a NC 4030T. S ohledem na požadavky zákazníka společnost nabízí i široké spektrum dokončovacích operací jako je CNC ohýbání na ohraňovacích lisech, CNC soustružení a frézování, svařování, lepení, povrchové úpravy, aj [23].



Obr. 3.1 Logo firmy AQUAdem, s. r. o. [23].

#### 3.2 Obecný postup výroby součásti

Praktická část bakalářské práce se zabývá výrobou součásti z plechu, kterou jako jednu z mnoha objednávek obdržela firma AQUAdem, s. r. o.

Postup výroby součásti probíhá v následujících krocích:

- volba polotovaru,
- NC program,
- pořadí rezných hran,
- nastavení rezných podmínek,
- volba stroje,
- nastavení ostatních parametrů,
- volba nástroje,
- rychlost posuvu,
- odeslání programu do CNC stroje,
- zapnutí CNC stroje a načtení příslušného programu,
- ustavení polotovaru,
- vlastní řez,
- očištění součásti.

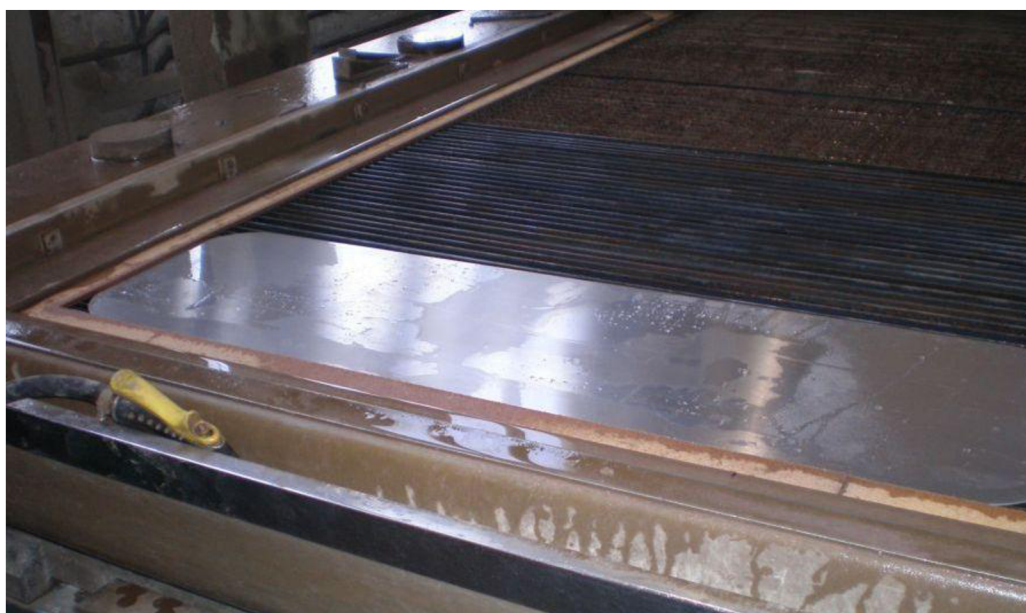
### 3.2.1 Volba polotovaru

Pro součást byl zvolen polotovar ve formě tabule plechu. Materiál a rozměry obsahuje tab. 3.1.

Tab. 3.1 Polotovar.

Polotovar	
Rozměr	P2 – 1000 x 2000 mm
Materiál	DURAL EN AW – 5754 H22 EN 573

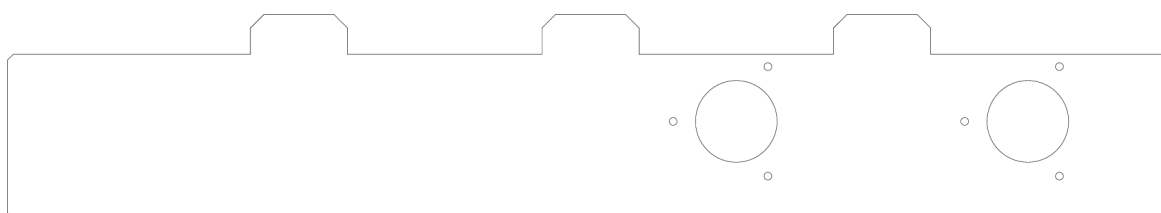
Do výrobního programu se zadal rozměr již zmiňovaného polotovaru. Jelikož šlo o výrobu pouze jedné součásti za účelem ukázky, použil se zbytkový polotovar ze skladu (viz obr. 3.2).



Obr. 3.2 Pracovní stůl CNC stroje s polotovarem.

### 3.2.2 NC program

Společnost obdržela zakázku ve formě technického výkresu vytvořeného v programu AutoCAD - formát dwg. CNC stroje pro řezání vodním paprskem podporují pouze formát dxf, proto se musela součást znovu překreslit v měřítku 1:1 a uložit do požadovaného formátu. Nově vytvořený výkres (obr. 3.3) znázorňuje součást v poloze, ve které bude vyříznuta (tzv. řezný obrys).



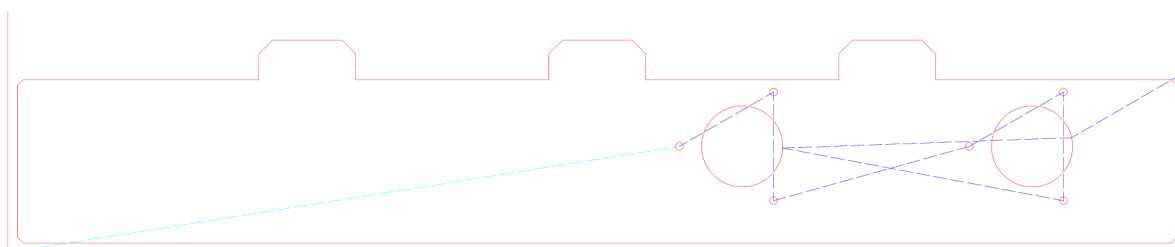
Obr. 3.3 Tvar součásti převedený do dxf formátu.



V počítačovém programu, který je dodáván s CNC strojem, pracovník následně umístil součást na použitý polotovar. Příkaz – jeden kus do zbytku. Poté se zvolil rozměr polotovaru (1000 x 2000 mm). Nastavila se požadovaná vzdálenost od okraje plechu. V našem případě 5 mm. V následujícím kroku se určil počátek řezacího programu a pořadí řezných hran:

- nájezd řezací hlavy z počátku,
- nástřel 6 ti děr pro následné vyvrtání děr o  $\varnothing$  6 mm,
- 2x díra  $\varnothing$  42 mm,
- vyříznutí vnějšího obrysu součásti,
- výjezd řezací hlavy.

Řeznou dráhu paprsku zachycuje obr. 3.4.



Obr. 3.4 Postup řezání součásti

### 3.2.3 Nastavení řezných podmínek

V počítačovém programu se vyplnil materiál a tloušťka polotovaru (viz tab. 3.2).

Tab. 3.2 Volba polotovaru v řezacím programu.

Volba polotovaru	
Materiál	Aluminium
Tloušťka	2 mm

Na základě vstupních parametrů, software od firmy Water Jet Sweden, vypočítal celkový čas řezání a jednotlivé dílčí časy (viz tab. 3.3).

Tab. 3.3 Časy řezání.

Časy řezání	
Celkový čas	1 min 36 s (0,027 hod)
Rychlý čas	6 s (0,002 hod)
Doba značení	1 s (0,000 hod)
Prostřelovací čas	27 s (0,007 hod)
Řezný čas	1 min 3 s (0,018 hod)

V následujícím kroku se zvolil CNC stroj pro řezání vodním paprskem. Společnost vlastní dva stroje, z nichž byl použit AWJ Fanuc NC 3000, který znázorňuje obr. 3.5.



Obr. 3.5 Stroj NC 3000 s polotovarem.

Dále se zvolil maximální tlak, který vychází z parametrů čerpadla (viz tab. 3.4).

Tab. 3.4 Tlak čerpadla.

Volba tlaku	
Tlak	3600 bar

Firma používá abrazivo GMA Garnet 80, jeho množství závisí na řezaném materiálu. K řezu se zvolila nejčastěji používaná vodní tryska. Přehled parametrů zachycuje tab. 3.5.

Tab. 3.5 Ostatní parametry.

Nastavení ostatních parametrů	
Druh abraziva	GMA Garnet 80
Množství abraziva	300 g.min <sup>-1</sup>
Průměr vodní trysky	0,254 mm
Průměr trysky	0,762 mm

Abrazivo zajišťuje firma GMA Garnet, která je největším evropským dodavatelem nejúčinnějšího přírodního minerálního granátu GMA. Ten obsahuje nejtvrdší a nejpevnější materiál, almandinová granátová zrna [25].

Poté se do programu zadal počet řezacích hlav. Pro naši kusovou výrobu stačilo použít jednu řezací hlavu.

Celkovou řeznou délku součásti vypočítal program dle výkresu (viz tab. 3.6).

Tab. 3.6 Řezná délka.

Řezná délka	
Celková řezná délka	1734,061 mm

Jelikož nebyly kladeny nároky na průměrnou aritmetickou úchylku profilu, zvolila se maximální rychlost posuvu. Přehled možných posuvů znázorňuje tab. 3.7.

Tab. 3.7 Posuv.

Posuv	
Maximální rychlost posuvu	1899,999 mm.min <sup>-1</sup>
Minimální rychlost posuvu	854,934 mm.min <sup>-1</sup>
Průměrná rychlost posuvu	1644,322 mm.min <sup>-1</sup>

Na závěr se celý program odeslal do CNC stroje.

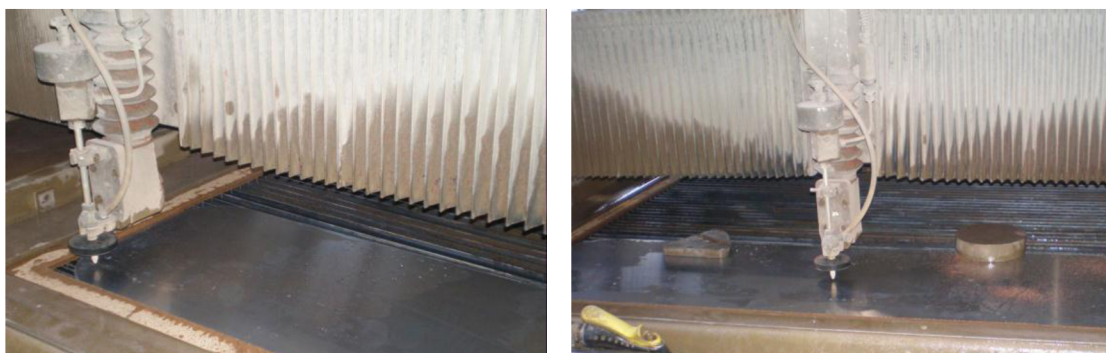
### 3.2.4 Řezání

Po zapnutí stroje se otevřel příslušný program. Na displeji se zobrazila požadovaná součást včetně dráhy nájezdu řezací hlavy a zvoleného pořadí řezných hran (obr. 3.6).



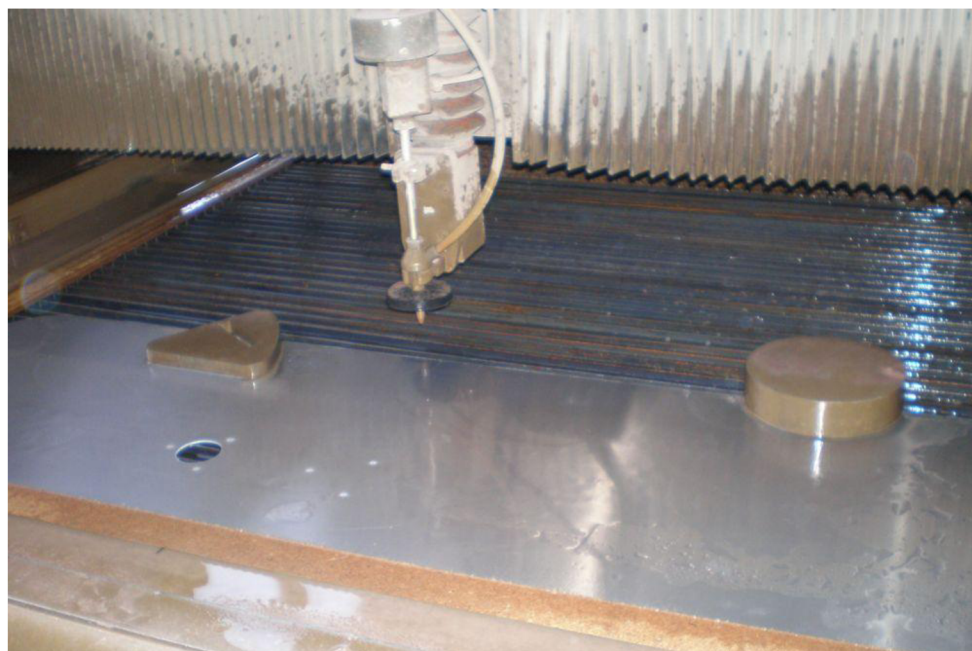
Obr. 3.6 Displej CNC stroje.

Polotovar se pomocí závaží zajistil proti posunutí, nastavila se výchozí poloha řezací hlavy a spustil se řezný proces (obr. 3.7).



Obr. 3.7 Výchozí poloha řezací hlavy a její následné přemístění pro nástřel prvního otvoru.

Obr. 3.8 zachycuje pozastavení řezného programu v průběhu řezání, při kterém pracovník obsluhy stroje zkontroloval, zda má vyříznutý otvor požadovaný průměr. Poté se celý řez součásti dokončil.



Obr. 3.8 Kontrola vyříznutého otvoru v průběhu řezného procesu.

Po dokončení řezu podle programu došlo k očištění součásti od třísek a zbytků abrazivních částic.



## 4 DISKUZE

Praktická část bakalářské práce vychází z poznatků získaných ve společnosti AQUAdem, s. r. o., ve které se následně provedl řez konkrétní součástí. Kapitola 3 zachycuje celý postup výroby součásti z plechu, od volby polotovaru, nákresu v NC programu, nastavení řezných podmínek, až po vlastní proces řezání.

Výstupní parametry řezání shrnuje tab. 4.1.

Tab. 4.1 Parametry procesu řezání.

Výstupní parametry	
Rozměr polotovaru	P2 – 1000 x 2000 mm
Materiál polotovaru	DURAL EN AW – 5754 H22 EN 573
Celkový čas řezání	1 min 36 s
Celková řezná délka	1734,061 mm
Stroj	AWJ Fanuc NC 3000
Tlak	3600 bar
Počet řezacích hlav	1
Druh a množství abraziva	GMA Garnet 80, 300 g.min <sup>-1</sup>
Průměr vodní trysky	0,254 mm
Průměr trysky	0,762 mm
Průměrná rychlost posuvu	1644,322 mm.min <sup>-1</sup>

Součást z plechu na obr. 4.1 byla vyříznuta za celkový čas 1 minutu a 36 sekund. I s přihlédnutím na čas potřebný pro ustavení polotovaru, kontrolu průměru otvoru během řezu a následné očištění součásti od zbytků abrazivních částic, výroba součásti nepřesáhla 3 minuty. Lze tedy říci, že výroba součástí z plechu touto metodou je rychlá a přesná.



Obr. 4.1 Výsledný tvar součásti.

Nevýhoda se skrývá v ceně. Za motohodinu práce si firmy, které používají metodu vodního paprsku, účtují kolem 2.500,- Kč.hod<sup>-1</sup> pro zahájení výroby. Další cena se odvíjí v závislosti na druhu materiálu, jeho tloušťce, požadované kvalitě, tvarové složitosti řezu a způsobu řezání. U materiálů tloušťky 2 mm se cena za minutu řezu pohybuje většinou okolo 50,- Kč.

V současné době vzrostl počet společností zabývajících se produkcí součástí vodním paprskem. Jelikož potřebují obstát v konkurenci s ostatními, snaží se nabízet služby za co nejnižší ceny.

Snížení nákladů můžeme ovlivnit především kvalitou povrchu. U technologie vodního paprsku většinou i hrubší řez splňuje požadavky zákazníka, a tím se zároveň stává ekonomicky dostupnější. Také se zvyšujícím se počtem kusů a délkou řezu se cena řezání snižuje. S rostoucí tloušťkou řezaného materiálu bývá výsledná cena výrazně nižší než při ostatních metodách dělení.

Obecně tedy platí, že s klesající rychlostí roste kvalita řezu, ale také se prodlužuje strojní čas a spotřeba abraziva. Z čehož vyplývá, že s náklady se zvyšuje i cena řezání vodním paprskem.

Vzhledem k tomu, že firma nepovolila konkrétní údaje o dodavateli, postup výroby součásti je řešen pouze obecně.

## ZÁVĚR

Produkce součástí z tabulí plechů nekonvenční metodou vodního paprsku se postupem času stala celosvětově rozšířenou technologií, která nahradila velké množství jiných obráběcích metod.

Řezání vodou získává každým rokem nové příznivce, proto ho celá řada firem zařadila do svého výrobního programu. Našla v něm velký přínos, ať už zvýšením produktivity, nebo v ziskovosti. Tento netradiční způsob dělení materiálu se stal pro svoji univerzálnost, technologické možnosti, rozmanité druhy obráběcích materiálů o různých tloušťkách, velice používaný ve všech odvětvích průmyslu.

Důležitým hlediskem při zavádění do výroby této progresivní metody je výběr zařízení. Existují různorodé systémy. Jedny ideálně splňují podmínky pro velkosériovou, druhé pro malosériovou výrobu, jiné pro rychlou změnu požadavků řezání. Další umožňují zhotovit jakékoliv tvary rychleji a s větší přesností ve 2D, nebo ve 3D. Je důležité vybrat ten nejvhodnější z pohledu možnosti využitelnosti a efektivity. Pro běžný provoz potom už jen stačí zvládnout základní obsluhu stroje. Vždyť celý proces řídí počítač dle předem připraveného programu. Přetrvávající nevýhodou je vysoká pořizovací cena stroje, mnohonásobně vyšší než u klasických metod.

Technologie vysokotlakého vodního paprsku se již několik desítek let neustále vyvíjí. Z hlediska samotného principu neprobíhají žádné převratné změny. Zdokonalují se však materiály pro dosažení delší životnosti a spolehlivosti jednotlivých součástí, technologie pro bezporuchový nepřetržitý provoz, nejmodernější technika. O tom, že je v této oblasti nadále co zdokonalovat, svědčí stále nové a dokonalejší stroje uváděné na trh.

Ironií zůstává, že původní účel Dr. Normana Charlese Franze, využít vodu jako řezný nástroj pro dělení dřeva, se stal vedlejší částí využití této technologie.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Manufacturing Processes - WaterJet Machining* [online]. Engineershandbook. [vid. 2. ledna 2012]. Dostupné z: <http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/waterjet.htm>
2. *Waterjet Cutting Technology*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 8. ledna 2012]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>
3. WJTA [online]. *Hydrodemolition On Swiss Railroad Near Gotthard*. © 2007. [vid. 8. ledna 2012]. Dostupné z: [http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews\\_Dec07.pdf](http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf)
4. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 3. část* [online]. In: *Obor technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. [vid. 16. února 2012]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-3cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-3cast.pdf)
5. ŘASA, J., P. POKORNÝ a V. GABRIEL. *Strojírenská technologie 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*. Praha: Scientia, s. r. o., 2001. ISBN 80-7183-227-8.
6. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
7. Řezání vodním paprskem. In: *Flowcorp* [online]. © 2006 – 2009 Flow International Corporation. [vid. 10. března 2012]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/novinky-15/?aid=91>
8. PÍŠKA, Miroslav a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
9. *Abrazivní řezání vodním paprskem*. [online]. Flow International Corporation. [vid. 10. března 2012]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/abrazivni-rezani-vodnim-paprskem-28/>
10. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
11. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: Vysoká škola Báňská, 2009. ISBN 978-80-248-2107-8.
12. *Technologie řezání vodním paprskem*. [online]. WCM, s. r. o. [vid. 11. března 2012]. Dostupné z: <http://www.flowcorp.cz/abrazivni-rezani-vodnim-paprskem-28/>
13. *Hydroabrazivní paprsek*. [online]. CHPS, s. r. o. [vid. 15. března 2012]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek.html>
14. DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem* [online]. *MM průmyslové spektrum*, 2007 [vid. 29. dubna 2012]. Dostupný z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>



15. PTV JETS – 2.2/60 bez krytáže. In. *PTV* [online]. © 2006 PTV, spol. s. r. o. [vid. 15. března 2012]. Dostupné z: [http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/vysokotlaka\\_cerpadla/PTV\\_22\\_60\\_bez\\_krytaze/index.html](http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/vysokotlaka_cerpadla/PTV_22_60_bez_krytaze/index.html)
16. ACCUSTREAM [online]. *Product brochure*. © 2012. [vid. 6. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.accustream.com/pdf/product-literature/2012-product-brochure.pdf>
17. BRYM, Radek. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Brno: VUT, 2008. Diplomová práce. VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
18. BOUDA, Luděk. Řezání vodním paprskem [online]. *MM průmyslové spektrum*, 2008 [vid. 6. dubna 2012]. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem.html>
19. *CNC stroje AQUACUT* [online]. AWAC, spol. s. r. o. [vid. 8. dubna 2012]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/?lang=cz&m1=3&m2=7&m3=10&m4=13>
20. Ozubená kola z různých druhů kamene, mozaika z kachliček a dlažby. In: *Řežeme vodou* [online]. © 2011 Řežeme vodou. [vid. 2. února 2012]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/ukazky-pouziti-rezani-vodnim-paprskem.php>
21. *Řezání potravin* [online]. Flow International Corporation. [vid. 2. února 2012]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-cutting/applications/food%20cutting.aspx>
22. KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
23. *AQUADEM, s. r. o. – Komplexní zpracování materiálu CNC technologií*. [online]. AQUADEM, s. r. o. [vid. 16. prosince 2011]. Dostupné z: <http://www.aquadem.cz/>
24. KMT [online]. *KMT H20 Jet Spare Parts Catalog*. © 2008. [vid. 2. května 2012]. Dostupné z: [http://www.kmtwaterjet.com.mx/KMT\\_H2O%20Parts%20Catalog.pdf](http://www.kmtwaterjet.com.mx/KMT_H2O%20Parts%20Catalog.pdf)
25. *Abrazivní materiál pro řezání vodním paprskem*. GMA Garnet (Europe) GmbH, 2011.
26. DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a glavírování nekonvenční technologií AWJ [online]. *MM průmyslové spektrum*, 2007 [vid. 19. dubna 2012]. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>
27. *Co je to řezání vodním paprskem?* [online]. Řežeme vodou. [vid. 29. března 2012]. Dostupné z: <http://www.rezeme-vodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>
28. *Princip dělení vodním proudem* [online]. LAVAP Watter Cutting. [vid. 29. března 2012]. Dostupné z: <http://www.lavap.cz/?web=princip-deleni-vodnim-proudem>

29. *Řezání vodním paprskem* [online]. ELNA Servis, s. r. o. [vid. 15. února 2012]. Dostupné z: <http://www.elnaservis.cz/voda.htm>
30. *Pumps* [online]. WARDJet. [vid. 3. března 2012]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/pumps.html>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	Dvoudimenzionální - dvourozměrný
3D	[-]	Trojdimenzionální - trojrozměrný
ASJ	[-]	Abrasive slurry jet - paprsek abrazivní suspenze
AWJ	[-]	Abrasive Waterjet Machining - abrazivní vodní paprsek
CNC	[-]	Computer Numerical Control - číslicové řízení pomocí počítače
DWG	[-]	DraWinG - formát souborů výkresů AutoCADu
DXF	[-]	Drawing Exchange Format - formát pro ukládání návrhů z AutoCADu
KNB	[-]	kubický nitrid bóru
NC	[-]	Numeric Control - číslicové řízení
PAA	[-]	polyakrylamid
PEO	[-]	polyetyloxid
WJM	[-]	Water Jet Machining - čistý vodní paprsek

Symbol	Jednotka	Popis
$\text{Al}_2\text{O}_3$	[-]	oxid hlinitý
$5 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{Y}_2\text{O}_3$	[-]	přírodní australský granát
$(\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{SiO}_4$	[-]	olivín
Ra	[ $\mu\text{m}$ ]	střední aritmetická úchylka profilu
n	[ot.min <sup>-1</sup> ]	otáčky
p	[MPa]	tlak kapaliny
v	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota kapalného média

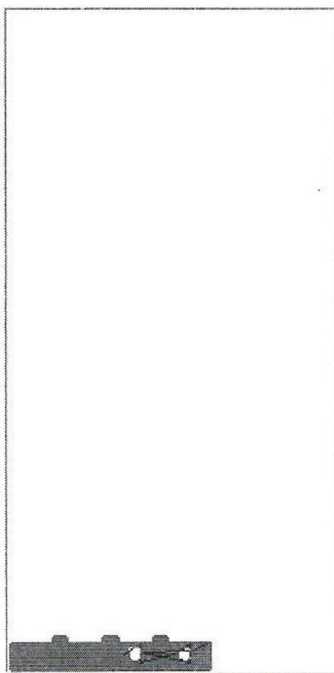
**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Parametry řezání vytisknuté z řídicího systému stroje.  
Příloha 2 Výrobní výkres řezané součásti.

# PŘÍLOHA 1

Parametry řezání vytisknuté z řídicího systému stroje.

## Job report



### CNC soubor:

**Material:** Aluminium  
Tloušťka.: 2.000  
Sheet ID:  
Sheet name: SHEET-235  
Uložení:  
Sheet size X: 1000.000  
Sheet size Y: 2015.000  
**Stroj:** AWJ Num  
Tlak: 3600  
Abrazivo druh: GMA Garnet 80  
Abrazivo g/min: 300  
Prumer vodni trysky: 0.254  
Prumer trysky: 0.762

### Nastroje:1

**Rezná délka:** 1734.061mm  
Rapid length: 1048.197mm  
Marking length: 0.000mm  
**Max feedrate:** 1899.999mm/min  
Min feedrate: 854.934mm/min  
Prumerna rychlost posuvu: 1644.322mm/min  
**Celkový čas:** 1m, 36s [0.027h]  
Rychly cas: 6s [0.002h]  
Doba znaceni: 1s [0.000h]  
Prostrelovaci cas: 27s [0.007h]  
Rezny cas: 1m, 3s [0.018h]  
Drilling/Rapid time: 1s [0.000h]



---

**Part name:** PART-313  
Zakaznik:  
Datum: 15.11.2011  
Vaha: 0.275  
X-rozmer: 600.000  
Y-rozmer: 105.000  
Marking length: 0.000mm  
Rezná délka: 1734.061mm  
Number of parts: 1  
Prumerny cas: 1m, 36s [0.027h]  
Single time: 1m, 36s [0.027h]  
Celkový čas: 1m, 36s [0.027h]

---

