

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NEKONVENČNÍ METODA OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM

THE UNCONVENTIONAL METHOD OF CUTTING WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. ONDŘEJ PRAX

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Zadání

Licenční smlouva - oboustranně

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce obsahuje literární rešerši zabývající se nekonvenční technologií vodního paprsku. První část je věnována rozboru technologie vodního paprsku a možných způsobů řízení a zadávání dat. Na ni navazuje kapitola pojednávající o vlivech vstupních parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění. Práce dále rozebírá ekologické hledisko vodního paprsku.

Součástí diplomové práce je část praktická, řešící kompletní technologii výroby řetězového kola. V závěru práce je ekonomicky vyhodnocena technologie vodního paprsku pro výrobu ozubeného kola s porovnání závislosti výsledné ceny na řezných podmínkách.

### **Klíčová slova**

Vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, řezání kapalinovým paprskem, nekonvenční technologie, ekologické hledisko řezání vodním paprskem.

## **ABSTRACT**

The master thesis contains a literature search dealing with the unconventional technology of water jet cutting. The first part is aimed to description of the water jet technology and shows the possibilities of controlling and awarding data for cutting. Follows the chapter about the influences of the input parameters to a surface quality and machining accuracy. The thesis also giving an account of ecological factors of the water jet cutting.

The description of the whole technology for production of the sprocket is a part of the thesis. The last part of the thesis is solving the economics of the water jet cutting technology, especially for production of the sprocket with comparing dependency of the cutting conditions.

### **Key words**

Water jet, abrasive water jet, liquid jet cutting, unconventional technology, ecological aspects of water jet cutting.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PRAX, O. *Nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem" vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Dne 25.05.2011

.....  
Bc. Ondřej Prax

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi byli po dobu mého studia oporou. Zejména mé rodině, která mi umožnila studovat a bez které, by tato práce určitě nevznikla. Děkuji vedoucímu práce Ing. Karlu Osičkovi Ph.D. za cenné rady při řešení diplomové práce. Dále děkuji svojí přítelkyni za trpělivost a pomoc při tvorbě této práce. Velké díky patří firmě Fontana R. Především pak Ing. Miloši Pokornému a Ing. Antonínu Fialovi, kteří mi umožnili po dobu vysokoškolského studia pracovat v této firmě. A Richardu Hájkovi, za pomoc při řešení praktické části diplomové práce.

Zvláštní poděkování patří prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za možnost zahraniční studijní stáže na Danmark Technical University.

Many thanks to Nos and Kathy Espath for the book about the water jet cutting.

**OBSAH**

Abstrakt .....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah .....	7
Úvod .....	9
1 Cíl práce a přístup k řešení .....	10
2 Rozbor technologie vodního paprsku .....	11
2.1 Definice základních pojmů .....	11
2.2 Historie vodního paprsku .....	13
2.2.1 Vznik a vývoj kapalinového paprsku ve 20. století .....	14
2.2.2 Technologie vodního paprsku od přelomu 21. století .....	15
2.3 Základní princip vodního paprsku .....	16
2.4 Makromechanismus úběru materiálu .....	19
2.4.1 Fenomén rýh .....	20
2.5 Druhy kapalinových paprsků .....	22
2.5.1 Čistý vodní paprsek - WJM .....	22
2.5.2 Abrazivní paprsek - AWJ .....	24
2.5.3 Ostatní druhy paprsků .....	27
2.6 Strojní vybavení vodního paprsku .....	28
2.6.1 Úprava vody .....	29
2.6.2 Generátor vysokotlaké vody .....	31
2.6.3 Hydraulické rozvody .....	33
2.6.4 Řezací hlavy .....	34
2.6.5 Souřadnicové stoly .....	35
2.6.6 Abrazivo .....	35
2.7 Technologické možnosti vodního paprsku .....	38
2.7.1 Řezání .....	38
2.7.2 Vrtání .....	39
2.7.3 Frézování .....	39
2.7.4 Soustružení .....	40
2.7.5 Gravírování .....	41
2.7.6 Trojrozměrné obrábění .....	42
2.8 Aplikace WJM a AWJ .....	42
2.8.1 Výhody a nevýhody vodního paprsku .....	44
3 Rozbor možných způsobů řízení a zadávání dat .....	46
4 Vliv vstupních parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění .....	49
4.1 Odchylka kolmosti .....	51
4.2 Hloubka řezu .....	52
4.3 Drsnost povrchu .....	55
5 Hledisko ekologie vodního paprsku .....	59
6 Kompletní řešení technologie pro konkrétní součást .....	61
6.1 Technologický a výrobní postup řetězového kola .....	62
6.1.1 Polohování polotovaru .....	62
6.1.2 Vytvoření CNC programu .....	64

6.1.3 Nastaveních řezných podmínek .....	66
6.1.4 Proces řezu .....	69
6.2 Technologické nastavení řezného procesu .....	73
7 Ekonomické vyhodnocení .....	78
Závěr.....	81
Seznam použitých zdrojů .....	82
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	86



## ÚVOD

Odedávna je lidskou snahou překonávat pro člověka nepříznivé přírodní jevy a vítězit nad přírodou. Ve většině případů, se však člověk svými vynálezy ani zdaleka nedokázal vyrovnat fenoménu, jakým je příroda sama. Ve skutečnosti veškeré převratné objevy a pokroky vycházely ze znalostí získaných na základě pozorování přírody.

Především pak síla přírodních živlů přitahovala lidskou pozornost a její podmanění mělo za následek velký krok ve vývoji lidské populace. V 6.st. př.n.l. čínský filozof Lao-c ve své knize Teo-te-ťing uvedl [36]:

*„Voda je nejměkčí a nejslabší bytí na světě, v  
překonávání tvrdého a silného je však neporazitelná  
a není jí na světě rovno.“*

S touto myšlenkou se ztotožnilo mnoho významných vynálezců a konstruktérů, kteří se snažili vodní živel využít ve prospěch lidské společnosti. Byly zavedeny jednotlivé vědní obory, které se cíleně zabývaly přírodními zákony. Zdokonalování vědních oborů vedlo až k dosažení takové technologie, kdy se vodní paprsek stal nástrojem, který dokáže využít sílu vody k řezání těch nejtvrdších přírodních a technických materiálů na Zemi.

Jelikož se v současnosti do velké míry řeší procesy kontaminace a znečišťování přírody, je ekologicky čistá nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem technologií s velkou budoucností. Dá se předpokládat, že masivní využívání této technologie, která se neustále zdokonaluje a vyvíjí, povede k rozšíření spektra využití a bude určovat nové standardy pro ekologické technologie 21. století.

## **1 CÍL PRÁCE A PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ**

Diplomová práce na téma „Nekonvenční metody obrábění vodním paprskem“ rozebírá technologii kapalinových paprsků a možné způsoby řízení a zadávání dat. Dále popisuje vliv vstupních parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění a řeší kompletní technologii výroby konkrétní součásti. Poukazuje na otázky ekologie vodního paprsku a vyhodnocuje ekonomické hledisko technologie.

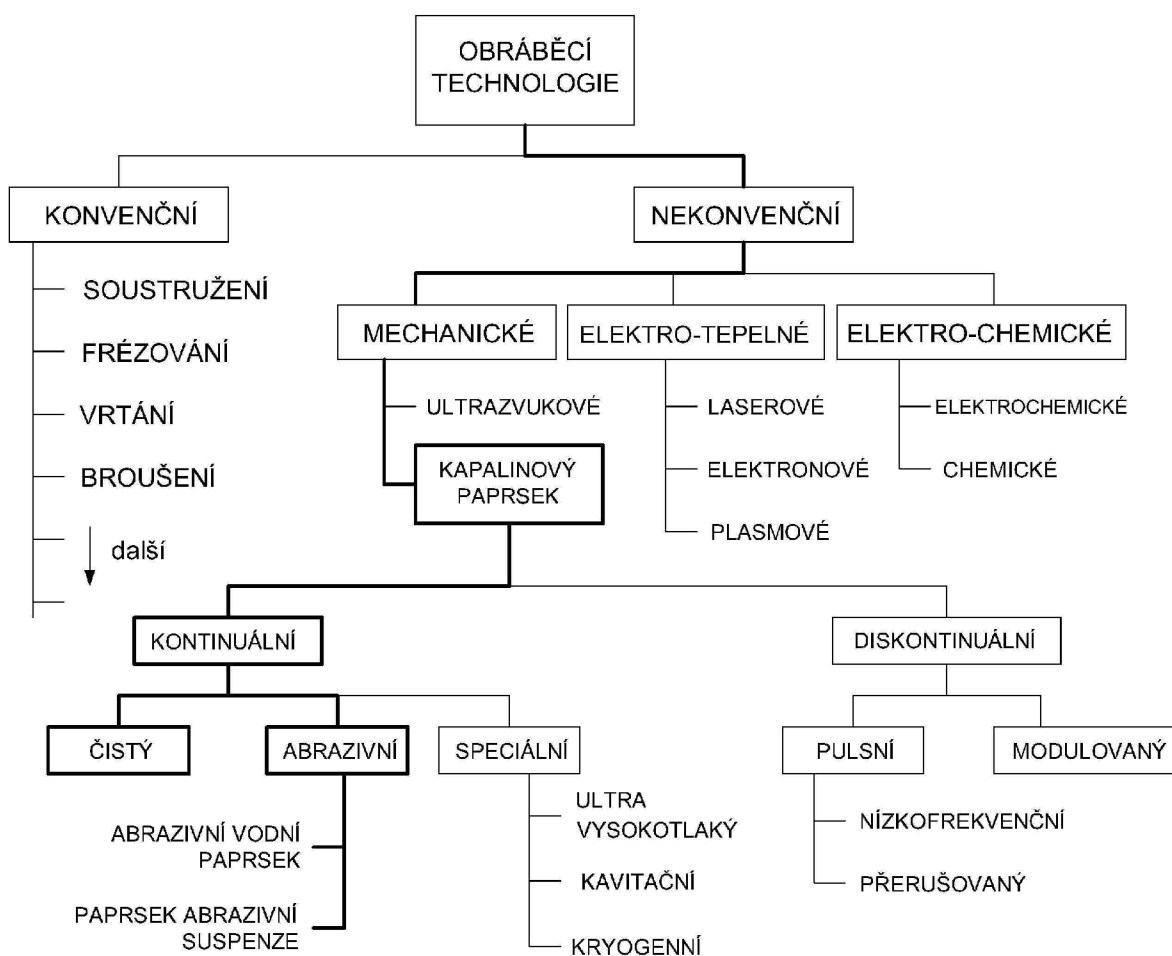
Diplomová práce se dělí na dvě části, část teoretickou a část praktickou. Teoretická část zahrnuje literární rešerši nekonvenční technologie obrábění vodním paprskem. V části praktické je řešena kompletní technologie vodního paprsku pro konkrétní výrobek včetně ekonomického vyhodnocení. Kompletní řešení technologie vodního paprsku konkrétní součásti je popsána na základě pozorování a zkušeností získaných ve výrobním areálu firmy Fontana R, s.r.o. sídlící v Říčanech u Brna. Firma Fontana R odebírá a následně zpracovává cca 310 tun (převážně nerezové oceli AISI 304, podle německé normy DIN 1.4301) hutního materiálu ročně, ze kterého vyrábí zařízení pro čistírny odpadních vod.

## 2 ROZBOR TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Kapitola rozbor technologie vodního paprsku řeší první cíl diplomové práce, tedy rozbor technologických možností vodního paprsku. Tato kapitola je rozdělena do šesti hlavních částí (podkapitol) zabývajících se problematikou technologických možností vodního paprsku.

### 2.1 Definice základních pojmů

Dříve než se začneme zabývat samotnou technologií vodního paprsku je nutné popsat několik základních pojmů. Obr. 2.1 znázorňuje rozdělení obráběcích technologií z hlediska konvenčnosti.



**Obr. 2.1:** Rozdělení obráběcích technologií [2; 4; 7]

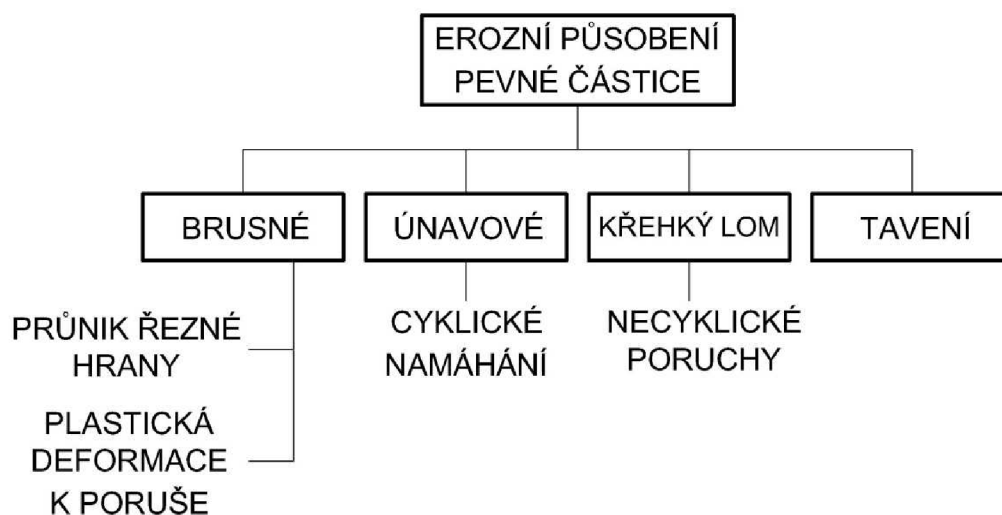
Pojem **konvenční** pochází z anglického slova conventional. Pro účely technologie by se dalo použít jako synonymum slovo běžné. Mezi běžné technologie se dají zařadit obráběcí technologie: soustružení, frézování, vrtání, broušení a to na klasických konvenčních strojích (soustruhy, frézky, vrtačky, brusky, atd.).

O nekonvenčních technologiích by se také dalo hovořit jako o technologiích neobvyklých nebo originálních. **Nekonvenční obráběcí technologie** (NTO) nejsou zpravidla využívány ve výrobních procesech v takové míře, jako je tomu u obráběcích technologií konvenčních. NTO se využívají především v případech, kdy je zapotřebí obrobit těžkoobrobitelné materiály (jako jsou žárovečné / žáruvzdorné oceli, oceli kalené, slitiny titanu, kompozitní materiály, atd.) a tvarově složité součásti různých velikostí. Velkou výhodou NTO je spolupráce s CAD systémy a tedy možnost využití nekonvenčních technologií v automatizovaných provozech.

Vzhledem k mechanismu obrábění se mohou nekonvenční technologie rozdělit do tří hlavních skupin: mechanicko-fyzikálních, elektro-tepelných a elektro-chemických (Obr.2.1). Mikromechanismus úběru kapalinovým paprskem je založen na principu **eroze**. Jde o fyzikálně-mechanický způsob odebírání materiálu (Obr.2.1).

**Přírodní eroze** je proces, při kterém dochází k oddělování, transportu a ukládání materiálu erozními (většinou abiotickými) činiteli. Proces vodní eroze je vyvolán gravitací a je úměrný hmotě (proudící kapalině) a její rychlosti. Účinek závisí na pevnosti a tvrdosti hornin, proto je eroze v měkkých horninách intenzivnější. Pohyb vyvolaný gravitací ovlivňuje vnitřní tření hmot a kontaktní tření o podklad. Rychlost erozního procesu dále závisí na sklonu mezi počáteční úrovní působení (tzv. horní erozní bází) a úrovní základny (tzv. spodní erozní bází). [3]

Na dělení tvrdších materiálů má hlavní vliv působení abrazivních částic, které vysokotlaký vodní paprsek unáší a dopravuje při vysokých rychlostech na materiál obrobku. Na obr. 2.2 je znázorněna hierarchie procesu odstraňování materiálu obrobku erozním působením pevných částic. [2]



**Obr. 2.2:** Erozní působení pevné částice [2]

Hlavními mechanismy úběru materiálu jsou dělení, únava, vytváření křehkých lomů a tavení. Jejich váha na konkrétní proces úběru materiálu závisí na úhlu dopadu, kinetické energii částic, tvaru částic, vlastností obráběného materiálu a okolních podmínek. [2]

**Kapalinový paprsek** (obecné pojmenování NTO vodního paprsku) se dělí podle mechanismu proudění kapaliny na kontinuální a diskontinuální. Přičemž hlavní a nejpoužívanější **čistý vodní paprsek** (WJM - Water Jet Machining) a **abrazivní vodní paprsek** (AWJ - Abrasive Water Jets) se řadí do skupiny kapalinových paprsků kontinuálního charakteru proudění. AWJ se dále dělí podle způsobu přívodu abraziva jakožto **aditiva** do paprsku a to na **abrazivní vodní paprsek** (AWJ popřípadě AWIJ - Abrasive Water Injection Jets) a **paprsek abrazivní suspenze** (ASJ nebo AWSJ - Abrasive Water Suspension Jets). Všechny druhy kapalinových paprsků jsou rozebrány podrobněji v dalších kapitolách.

**Aditiva** jsou látky nebo přísady dodávané do systému k úpravě nebo zlepšení vlastností celého procesu.

## 2.2 Historie vodního paprsku

První využití vodního proudu, jakožto pracovního nástroje v průmyslu se datuje k roku 1853, kdy se na území USA začalo dobývat zlato. Zde se poprvé projevil výhody využití vody, jako média k odstraňování materiálu. Tato metoda dobývání zlata se začíná masivně využívat na Klondiku v období zlaté horečky (Obr.2.3). Dopravovaná voda o tlaku řádově několika desítek MPa a vysoké rychlosti unášela částice sedimentu a tím pomohla zlatokopům ke snadnějšímu způsobu dobývání nerostného bohatství. Zdaleka se ale nejednalo o vodní paprsek, který známe nyní. Při prvních pokusech využití vody k obrábění nešlo ani tak o řezání materiálu, ale spíše o vymílání a odplavování lehčích nánosů. Vznik myšlenky a vývoj technologie vodního paprsku jaký známe dnes se datuje do poloviny 20. století.



**Obr. 2.3** Dolování zlata v období zlaté horečky na Klondiku [11]

### 2.2.1 Vznik a vývoj kapalinového paprsku ve 20. století

Koncept využití vysokotlaké (UHP - ultra high pressure) vodní trysky pro řezání materiálů byl poprvé použit Dr. Normanem C. Franzem (Obr.2.4 - 1953).

Lesní inženýr z university v Michiganu se v 50. letech 19. století pokusil vyvinout novou technologii pro řezání dřeva. Při vývoji prvního vysokotlakého vodního paprsku se nechal Franz inspirovat metodou, která zjišťovala únik páry z tlakových nádob pro přehřátou páru pomocí koštěte. V případě, kdy se v tlakové nádobě vyskytl kaz (díra), pak unikající pára z tlakových hrnců měla dostatečnou kinetickou energii k naštipnutí násady koštěte.



50. léta

1953

Pozdější zkoumání ukázalo, že použití tlakové páry pro řezání je nepraktické, především z hlediska složitosti zařízení. Ani první pokusy, při kterých byla řezným médiem kapalina (resp. voda) nebyly použitelné pro praxi. Především nekontinuální průtok vody, zapříčinil nepoužitelnost technologie vodního paprsku pro obrábění. Až vývoj přípravku k zajištění soudržného (kontinuálního) proudu vody otevřel dveře této technologii.



60. léta

Pozdější spolupráce s firmou McCartney Manufacturing přivedla Dr. Franze k výrobě prvního komerčního zařízení, využívajícího vysokotlaký vodní paprsek pro řezání materiálu (listopad 1971). Zařízení bylo zakoupeno firmou Alton Box Board, která tento stroj použila na obrábění nábytku (Obr.2.4 - 1971).

70. léta

1971

První dvě mezinárodní konference věnované technologii řezání pomocí vodního paprsku, sponzorované Britskou asociací British Hydromechanics Research Association, poukázaly na zájem ze strany odborné veřejnosti. Druhé konference pořádané v dubnu 1974 se zúčastnili zájemci z šesti zemí.



1974

1979

80. léta

V této době vznikly první komerční firmy (např. Flow International Corporation). První komerční stroje používaly tlak 40.000 až 50.000 psi a byly používány pouze pro řezání měkkých nekovových materiálů. [1; 5; 10]



1983

90. léta

**Obr.2.4** Historie vodního paprsku ve 20. století [1; 5; 10]

V roce 1979 přišel Dr. Mohamed Hashish (Obr.2.4 - 1979) s myšlenkou, přidat do procesu řezání abrazivní částice, díky kterým se dalo dosáhnout řezu i u "tvrdých" materiálů.

Rok 1983 přinesl další zlom ve vývoji technologie vodního paprsku. Prodala se první komerční stroj firmou Flow International. Tento stroj dokázal řezat tloušťku materiálu až 76 mm a byl použit na řezání skel v automobilovém průmyslu.

Do konce 20. století ovládli trh s technologií vodního paprsku dvě americké firmy, Flow International a Ingersoll-Rand. [1; 5; 10]

### 2.2.2 Technologie vodního paprsku od přelomu 21. století

Na přelomu 21. století dochází díky vývoji počítačové technologie k značnému posunu možností vodního paprsku. Již v roce 1990 přichází firma Flow International s prvním systémem inteligentního řízení vodního paprsku. V následujících letech se na trhu objevily nové stroje dosahující vyšších výkonů. Firmy se poté zaměřily zejména na výkon tlakových čerpadel. Zatímco v roce 1986 dokázala vyvinout vysokotlaká čerpadla s přímým vstupem tlak do 36.000 psi (2.400 bar), v roce 1992 je to již 40.000 psi (2.700 bar). Následovala vysokotlaká čerpadla s tlakem 50.000 psi (3.400 bar) a 60.000 psi (4.100 bar). V roce 1997 dokázalo čerpadlo firmy Flow International jako první vyvinout tlak 87.000 psi tedy 6.700 barů.

Na začátku 21. století se firmy zaměřily na přesnost řezu. Dynamickým řízením vodního paprsku (Obr.2.5) se snažily dosáhnout kolmosti řezu a zvýšení kvality ostatních geometrických parametrů. Na trh přichází nové firmy a možnosti vodního paprsku lákají více průmyslových firem.

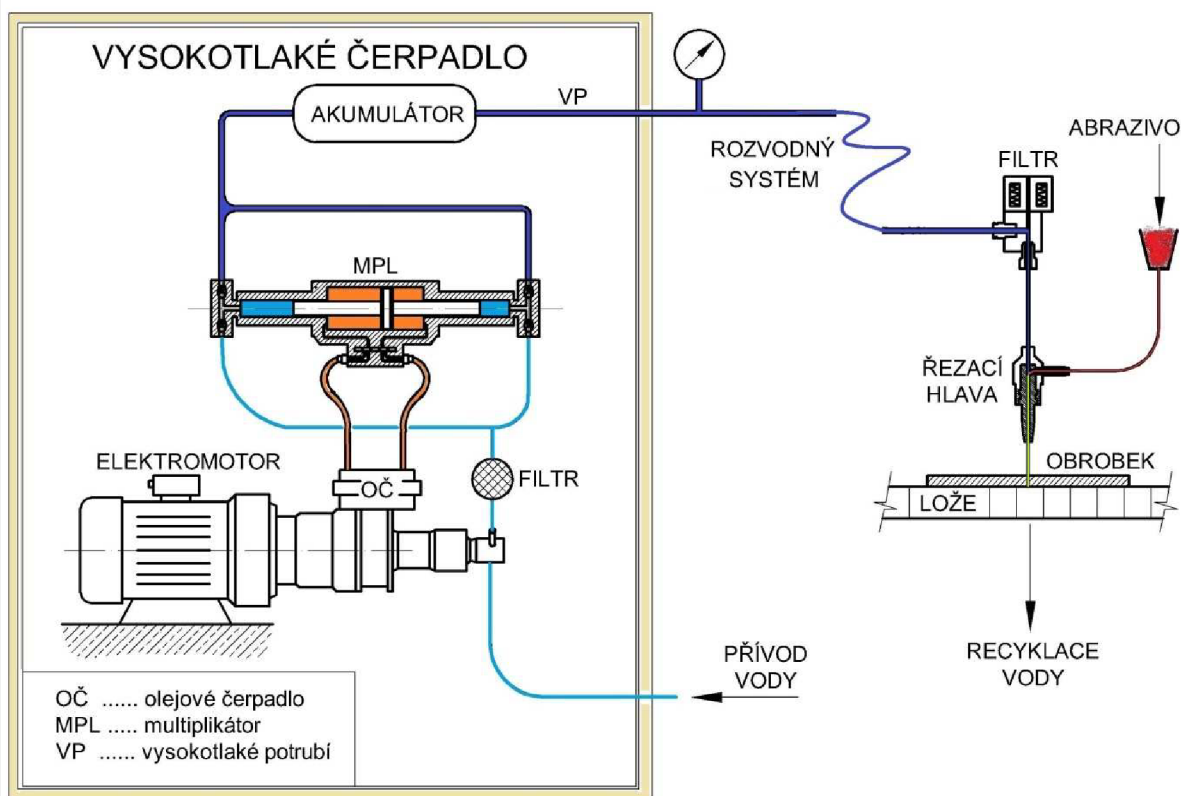
Od myšlenky Dr. Normana C. Franze (rok 1983), který se snažil vyvinout novou technologii na řezání dřeva, přes nápad Dr. Mohameda Hashishe s přidáním abraziva do procesu řezu (rok 1979) se z technologie označované jako nekonvenční stává technologický fenomén, který by se dal zejména svým zájmem ze strany firem a využíváním v praxi zařadit mezi technologie konvenční. [1; 10]



**Obr.2.4** Dynamicky řízená hlava vodního paprsku [10]

### 2.3 Základní princip vodního paprsku

Obrábění vodním paprskem je mechanicko-fyzikální metoda úběru materiálu, kdy na obrobek dopadá úzký paprsek vodního proudu o vysoké rychlosti. V důsledku vysoké rychlosti a velké kinetické energii na jednotce povrchu obráběné součásti dochází k průniku paprsku obrobkem. [2]



Obr. 2.5 Schéma principu vodního paprsku

Celý proces vedoucí k vytvoření řezného nástroje začíná ve vysokotlakovém čerpadle (Obr.2.5). K dosažení vysokého tlaku, který je nutnou podmínkou pro splnění předpokladu řezání vodním paprskem, slouží multiplikátory. Multiplikátor má dva okruhy, přičemž do prvního nízkotlakového okruhu (znázorněn oranžově) se přivádí olej o tlaku  $p_1$ , který je dopravován do oblasti pístu o ploše  $S_1$ . Druhý okruh (znázorněn světle modrou), dodává do systému přefiltrovanou vodu na opačnou stranu pístu o ploše  $S_2$ . Z Pascalova zákona pak vyplývá (1), že působící tlak  $P_1$  na píst vyvolá tolikrát vyšší tlak  $P_2$ , kolikrát je menší plocha pístu  $S_2$  vůči ploše  $S_1$ .

$$P_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot P_1 \text{ [Pa]} \quad (1)$$



Multiplikátor pak standardně dosahuje tlaku mezi 300 až 450 MPa. Za těchto podmínek je voda stlačena až o 13 %. Takto stlačená voda je dopravována pomocí vysokotlakého potrubí přes akumulátor rázů a vysokotlaký filtr do řezací hlavy [10].

Průtokové množství a rychlost kapaliny závisí především na vnitřním průměru dýzy a požadovaném tlaku, který se mění po průchodu dýzou v proudění kapaliny. Využitím Bernoulliho rovnice pro výtok z nádoby a rovnice kontinuity pro ústí dýzy je možné objem protékající vody v závislosti na tlakovém spádu vypočítat podle vztahu (2). [4]

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

Pro rychlost pístu  $v_p$  a průtokové množství hydrogenerátoru  $Q_c$  pak platí:

$$v_p = \frac{Q_c}{S_o} \cdot \eta_r \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde,

$$Q_c = \frac{P}{P_1} \quad [\text{m}^3] \quad (4)$$

V řezací hlavě se za pomoci trysky přetváří vysokotlaká voda na vysokorychlostní. Z hlediska disipace energie v dýze jsou důležitými faktory kvality výtokový a ztrátový součinitel dýzy. Výtokový součinitel  $\mu_v$  se nejčastěji určuje experimentálně nebo lze určit analyticky (5):

$$\mu_v = \frac{Q_s}{Q_i} = \varepsilon \cdot \varphi \quad [-] \quad (5)$$

zjednodušeně pak,

$$\mu_v \cong \varphi = \frac{v}{v_i} \quad [-] \quad (6)$$

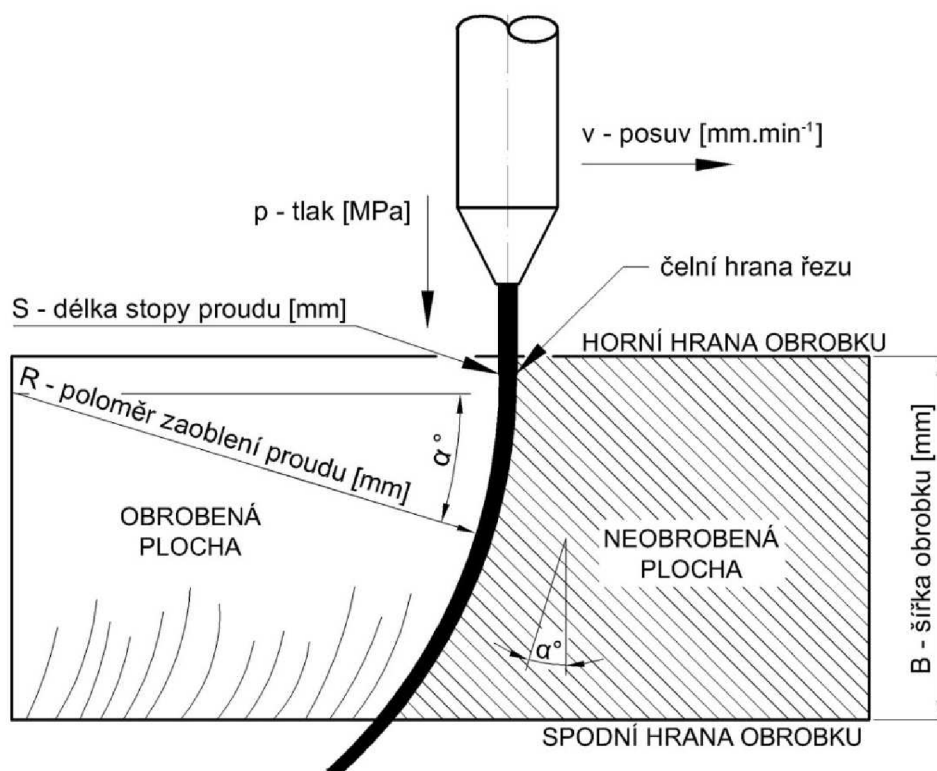
Vydeme-li z rovnice pro kinetickou energii (7), kde se s rostoucí rychlostí exponenciálně zvyšuje kinetická energie je zřejmé, že právě pro dosažení práce potřebné k řezu materiálem je zapotřebí dosáhnout dostatečně vysokou rychlost vodního paprsku. Výrobci uvádí rychlost paprsku v násobcích rychlosti zvuku (v praxi kolem trojnásobné rychlosti zvuku). Rychlost vychází z tlaku kapaliny, kdy tlak kapaliny je přímo úměrný čtverci rezné rychlosti, který je proporcionální ke kinetické energii (8). Práce vykonaná vodním paprskem, je rovna rozdílu kinetických energií v místě vstupu do obrobku a výstupu z něj (9). Abrazivum jakožto aditivum znásobuje mechanické účinky paprsku. [2; 7]

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (7)$$

$$v^2 = \frac{2 \cdot p}{\rho} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

$$W = \Delta E_{kin} = E_{kin1} - E_{kin2} \quad [\text{J}] \quad (9)$$

Na Obr.2.5 je znázorněn průběh dráhy kapalinového paprsku a charakter jeho vychýlení. Paprsek se v každém bodě pohybuje po zaoblené dráze, které se mění poloměr s předcházející délkou oblouku. [7]



$\alpha$  - úhel vychýlení mezi skutečným směrem proudu v řezu a kolmým směrem [°]

**Obr. 2.6** Charakter řezu kapalinového paprsku

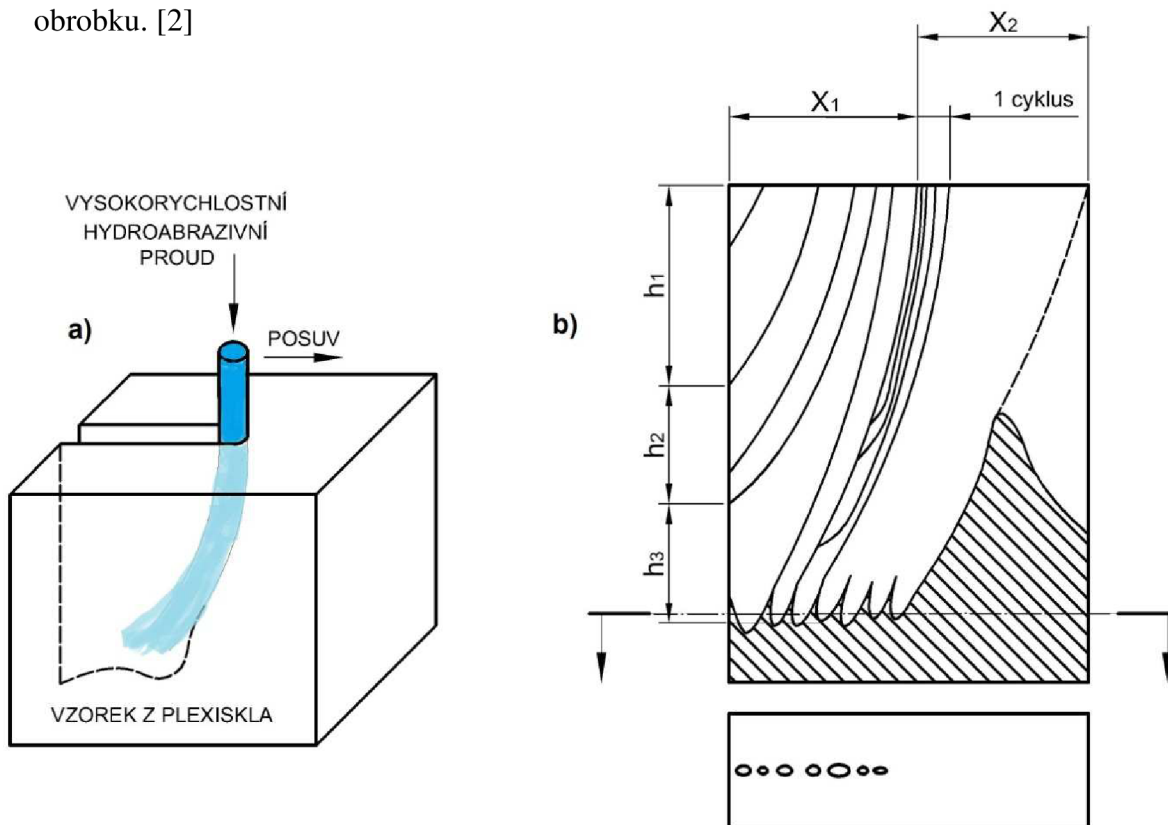
Z tribologického hlediska se jedná o proces eroze, který je závislý na úhlu nárazu částice  $\alpha$  (viz. Obr.2.6) na povrch a na pevnostních vlastnostech materiálu. Tab.2.1 popisuje tzv. kritické úhly nárazu pro tvárný a křehký materiál a udává převládající mechanismus erozivního opotřebení. [7]

Materiál	Úhel nárazu $\alpha$		
	< 20°	45°	90°
<b>Tvárný</b>	Maximální řezné opotřebení	Smíšený režim	Maximální deformační opotřebení
<b>Křehký</b>	Velmi malá eroze	Střední eroze	Maximální eroze

**Tab. 2.1** Reakce materiálu na různé úhly dopadu částice [8]

## 2.4 Makromechanismus úběru materiálu

Z hlediska makrogeometrie se skutečný povrch v místě řezu vysokorychlostním vodním paprskem vytváří v důsledku posuvu trysky. Částice působí na povrch obrobku při malých úhlech, přičemž způsobují řezný mechanismus úběru materiálu obrobku. [2]



**Obr. 2.7.1 a)** Vizualizace procesu dělení plexiskla

**b)** Kontury obrobeneé plochy

$x_1$  - vstupní oblast,  $x_2$  - ustálený úsek dělení,  $h_1$  - rovnoměrné dělení,  
 $h_2$  - nerovnoměrné dělení

Tvar a topografie povrchu jsou dva hlavní rysy makroskopického úběru materiálu. Mechanismus makroskopického procesu úběru je pak získaný z analýz povrchových struktur vzorků, které jsou vytvořené vysokorychlostním hydroabrazivním proudem. Pro lepší představu celého makromechanismu se Summers [12; 13; 14; 15] rozhodl použít jako obrobek plexisklo, které umožnilo lepší vizualizaci řezného procesu. Obr. 2.7 zobrazuje charakter obrobeneé plochy. [2]

Ve vzdálenosti  $x_1$  se dosáhne maximální hloubka řezu  $h$ . Se vzdáleností  $x_2$  dělení postupuje cyklickým způsobem. V horní erozní zóně  $h_1$  je stav ustálený, kdy rychlost úběru materiálu je rovna rychlosti posuvu nástroje vysokorychlostního hydroabrazivního proudu. V této zóně dominuje řezné opotřebení materiálu. [2]

Vlivem nárazu pod hranicí  $h_1$  nastává úběr materiálu postupnými kroky, dokud proud paprsku nedosáhne hloubky  $h_2$ . Zároveň se pod hranicí  $h_1$  postupnými kroky

zaobluje a mění směr, což má za následek změnu úhlu dopadu částic. V první vstupní oblasti projde proud paprsku jistý úsek, než dosáhne maximální hloubky. [2]

Maximální hloubka se rovná součtu:

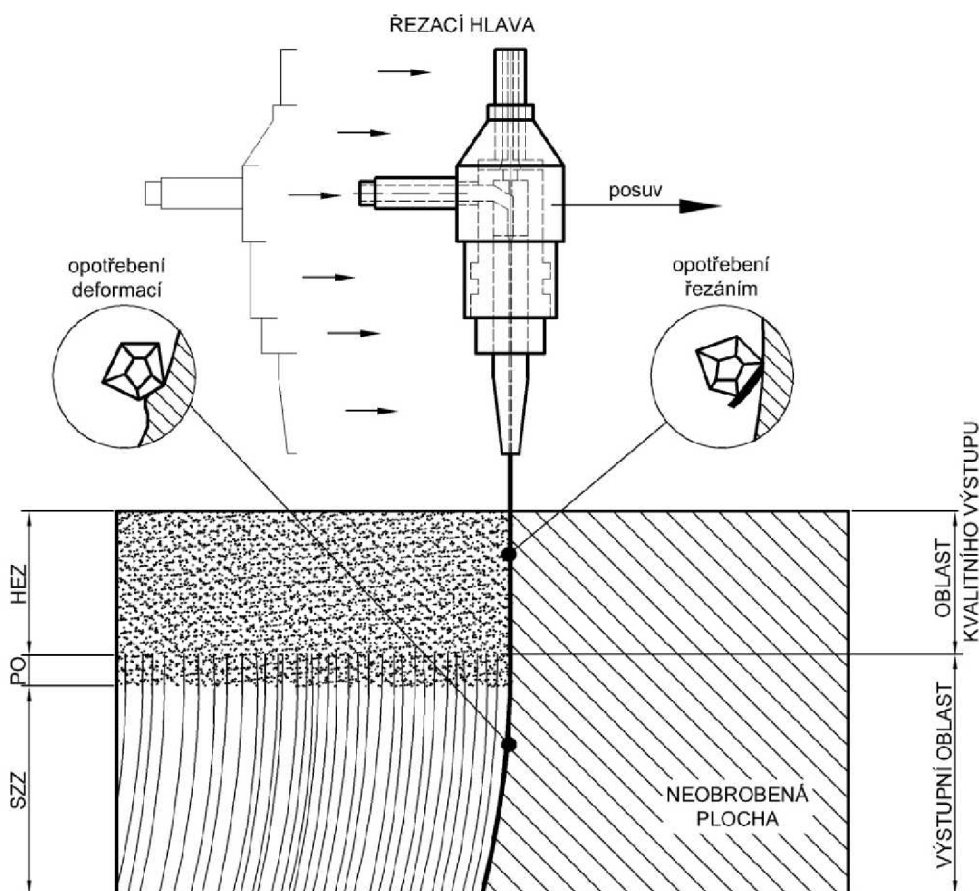
$$h_{\max} = h_1 + h_2 + h_3 \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

V oblasti  $h_1$  odpovídá odstraněná plocha řeznému opotřebování, kdy je množství odstraněného materiálu rovno materiálu přemístěnému. Na hranici hloubky  $h_1$  zaniká mechanismus řezného opotřebování z důvodu vychylování hydroabrazivního proudu a tedy i částic. Pod hranicí  $h_1$  se jedná již o deformační způsob obrábění. Tento krok zaniká ihned po vytvoření nového kroku ve vzdálenosti  $x_1$ . Proces pokračuje tak dlouho, dokud proud nepřestane odstraňovat materiál. V oblasti  $h_3$  se proud vychyluje ve zvyšujícím se směru nahoru, čímž způsobuje další pronikání jakožto následek zvýšené hybnosti proudu.

Při výstupu proudu z řezu vzniká zóna, ve které nebyl materiál oddělen (tvar trojúhelníku). Z toho vyplývá, že proces se dá považovat za ustálený pouze do určité hloubky  $h_1$ . [2]

#### 2.4.1 Fenomén rýh

Postupným zkoumáním hydroabrazivního proudu byla zjištěna pravidelná odchylka proudu ve spodní části vzorků.



Obr. 2.7.2 Zóny povrchu řezu AWJ [2; 4; 7; 10]

Obecně se povrch vzorku, vyprodukovaný vysokorychlostním hydroabrazivním proudem skládá ze tří základních zón (Obr.2.7.2) [2]:

- horní hladké zóny – horní erozní zóny (HEZ),
- střední přechodové zóny - přechodové oblasti (PO),
- dolní zdrsňené zóny - spodní zdrsňené zóny (SZZ).

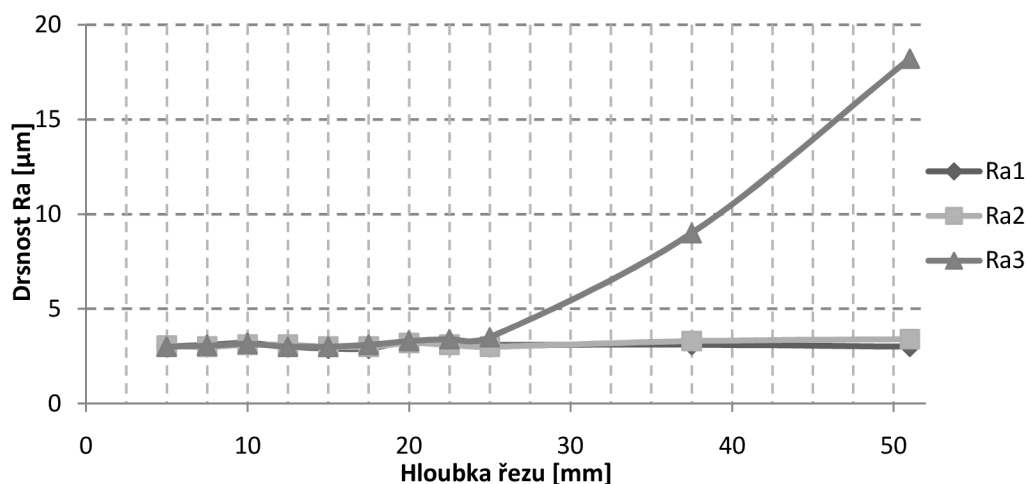
V horní hladké zóně se rýhy nenachází a základem povrchových nerovností je drsnost v přechodové zóně (přechodové oblasti) začíná inicializace rýh. Ve spodní zdrsňené zóně dominují zvlněné rýhy. Na základě vykonaných experimentů se přepokládá, že tvorba rýh je způsobená vlnitou distribucí kinetické energie abrazivní částice vztažené k obráběnému povrchu. V případě požadavku na vysokou kvalitu povrchu musí být tloušťka materiálu menší než je teoretická tloušťka horní erozní zóny u konkrétního obrobku (závisí na materiálu obrobku, druhu abraziva, charakteru paprsku a rychlosti posuvu abrazivní hlavy). S ohledem na kvalitu povrchu se volí řezné podmínky. [2]



**Obr. 2.7.3** Druhy dosažitelných povrchů pomocí metody AWJ [34]

Kde:

- Q1 – separační řez** – velice špatný řez (nejlevnější),
- Q2 – korýtkový řez** – nejvíce používaný řez [34],
- Q3 – čistý řez** – nejvíce používaný řez [34],
- Q4 – kvalitní řez** – alternativa mezi Q3 a Q5,
- Q5 – vysoce kvalitní řez** – nejkvalitnější řez (nejdražší).

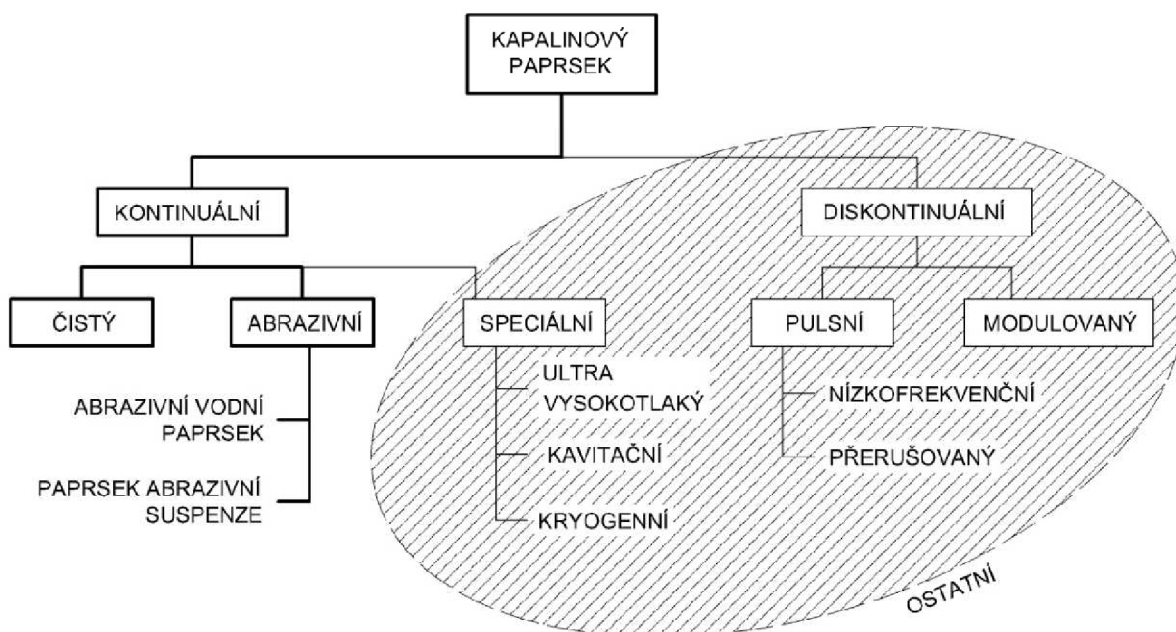


**Obr. 2.7.4** Drsnosti povrchu v závislosti na hloubce řezu [7]

Ra1 – horní část řezu; Ra2 – střední řezná plocha; Ra3 – spodní část řezu  
 Při tlaku vody 317,4 MPa; řezné hloubce 12,7 mm; průměru dýzy 0,286 mm;  
 Rychlost toku brusiva 199,5 g·min<sup>-1</sup>; vzdálenost stand off 1,5 mm.

## 2.5 Druhy kapalinových paprsků

Druhy kapalinových paprsků jsou znázorněny na Obr.2.8. Primárně se dělí s ohledem na kontinuálnost paprsku. Jejich další rozdělení (varianty) se pak v praxi používají s ohledem na charakter obráběného materiálu a podmínkách řezného procesu.



**Obr. 2.8** Rozdělení kapalinových paprsků

Přes širokou škálu vodních paprsků se jako hlavní a v praxi nejvíce využívané zástupce této technologie dají označit dvě základní metody spadající do kategorie kontinuálních paprsků. Tyto metody se od sebe liší z hlediska použitého pracovního média [2; 4]:

- WJM - Water Jet Machining - čistý vodní paprsek (nebo tzv. hydrodynamické obrábění),
- AWJ - Abrasive Waterjet Machining - abrazivní vodní paprsek (nebo také vodní paprsek s přísadou jemného brusiva).

### 2.5.1 Čistý vodní paprsek - WJM

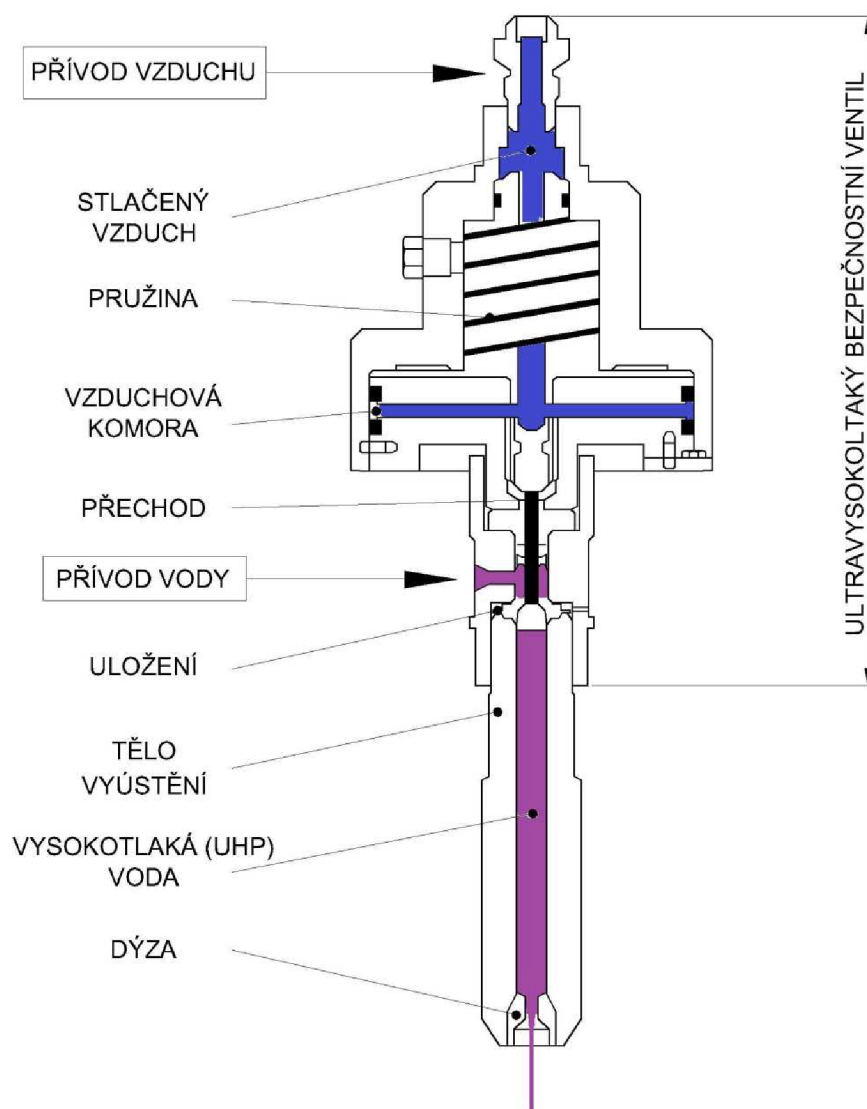
Čistý vodní paprsek byl první technologií použitou mezi kapalinovými paprsky. Jedním z nejdůležitějších faktorů pro samotnou technologii WJM byl výběr pracovní kapaliny. Pracovní kapalina WJM musela splňovat následující vlastnosti:

- nízkou viskozitu, která má za následek redukci ztrát výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím a dýzou,
- minimálně agresivní s ohledem na kovové části zařízení,
- malou toxicitu s ohledem na obsluhu - nesmí dráždit pokožku, dýchací cesty, zrak, atd.,
- dostupnost (běžná kapalina),

- nízkou cenu,
- schopnost splňovat hydrodynamické charakteristiky, především v trysce,
- schopnost zabezpečení produktivity,
- schopnost zabezpečovat nejlepší kvalitu obrábění při co nejmenších energetických ztrátách.

Voda je svým složením velmi atypická chemická sloučenina, přestože se některé požadavky na charakter kapaliny částečně vylučují, vlastnosti vody se nejvíce blíží charakteru hledané pracovní kapaliny. [4]

Čistý vodní paprsek s pracovním tlakem v rozmezí 60 až 415 MPa dosahuje v místě řezu až trojnásobnou rychlost zvuku. Přeměna vysokotlaké vody na vysokorychlostní se děje pomocí dýzy (Obr.2.9), jejíž vnitřní průměr se pohybuje mezi 0,1 až 1,5 mm (přičemž šířka vodního paprsku je zhruba o 0,3 mm větší). WJM se používá především pro obrábění nekovových materiálů. [7; 17]



**Obr. 2.9** Tryska pro WJM od firmy Jet Edge

### 2.5.2 Abrazivní paprsek - AWJ

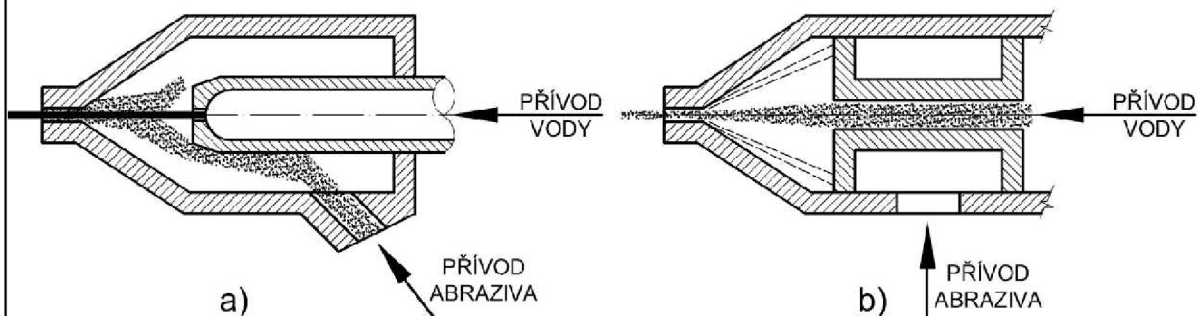
Abrazivní vodní paprsek byl vyvinut v důsledku nedostatečné síly WJM. Čistý vodní paprsek je schopen řezat pouze materiály "měkkého" charakteru. Pro řezání kovů, kamene, keramiky, kompozitních materiálů apod. bylo zapotřebí zvýšit účinnost WJM. V roce 1979 Hashish přidává do procesu řezání abrazivní částice. Ukázalo se, že erozivní síla paprsku je při použití abrazivních částic mnohonásobně (stokrát až tisíckrát) silnější, než je erozivní síla čistého vodního paprsku. [10]

Zatímco u WJM slouží nadzvukový proud vody jako řezný nástroj. U AWJ slouží vodní paprsek k urychlení abrazivních částic (materiál: granát, minerální písek, křemičitý písek, oxid hlinitý, atd.) rozrušujících materiál. Průtok abraziva je v rozmezí 1 až 20 kg·min<sup>-1</sup>. [21] Pracovní tlak WJM se pohybuje mezi 300 až 400 MPa. Rychlost AWJ dosahuje 600 až 900 m·s<sup>-1</sup> při šířce paprsku 1,2 až 2,5 mm. [7; 10]

Podle konstrukce dýzy rozeznáváme dva způsoby řezání abrazivním vodním paprskem:

- AWJ - Abrasive Waterjet - Systém s přímým přívodem brusiva
- ASJ - Abrasive slurry jet - Systém s přímým vstříkáváním brusiva

U systému s přímým přívodem brusiva (AWJ) je brusivo vedeno ze zásobníku do směšovací komory. Ve směšovací komoře je vysokotlakým vodním paprskem brusivo strháváno a urychlováno. Mísení probíhá v řezací hlavě, u níž rozeznáváme dvě konstrukční varianty. Ty se dělí z hlediska směru přívodu abraziva (Obr.2.10). [7]

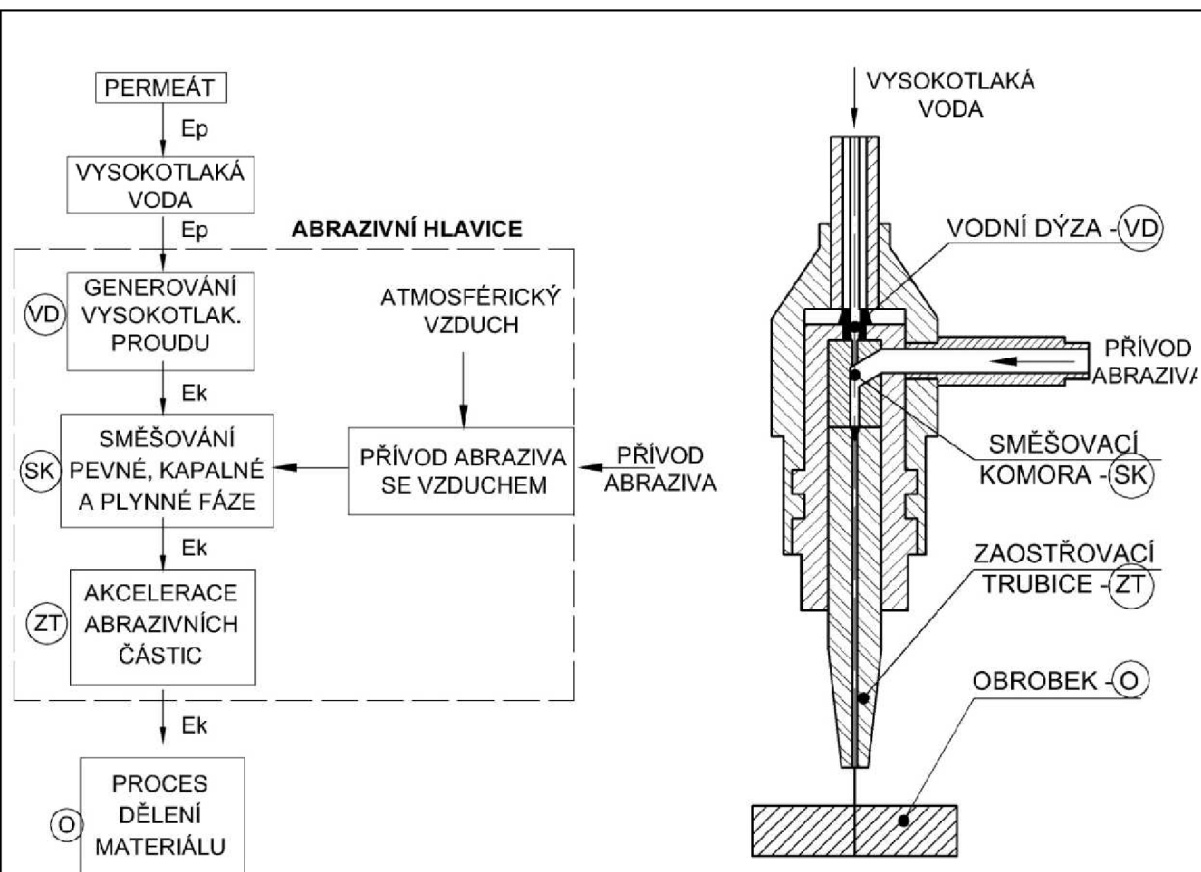


**Obr. 2.10** Mísení abraziva s vysokotlakým paprskem AWJ

- a) Dýza s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva  
 b) Dýza se smíšeným paprskem a axiálním přívodem brusiva

Zatímco u varianty na Obr.2.10a je největší výhodou konstrukční jednoduchost a možnost využití i pro WJM, varianta na Obr.2.10b vykazuje lepší mísicí poměr, což má za následek menší opotřebení dýzy.





Obr. 2.11 Princip technologie AWJ

Na Obr.2.11 je schematicky znázorněn princip abrazivní technologie, který závisí na formování řezného nástroje v abrazivní hlavici. Potenciální energie vysokotlaké vody, která je přivedena přes systém vysokotlakého potrubí na vodní dýzu (VD), se po průchodu dýzou mění na energii kinetickou. Vzniklý vysokorychlostní paprsek v místě směšovací komory (SK) strhává a urychluje abrazivní částice, které jsou do abrazivní hlavice přiváděny ze zásobníku abrasiva společně s atmosférickým vzduchem. V zaostřovací trubici (ZT) akcelerují abrazivní částice na požadovanou rychlost, která je potřebná pro samotný proces dělení obrobku.

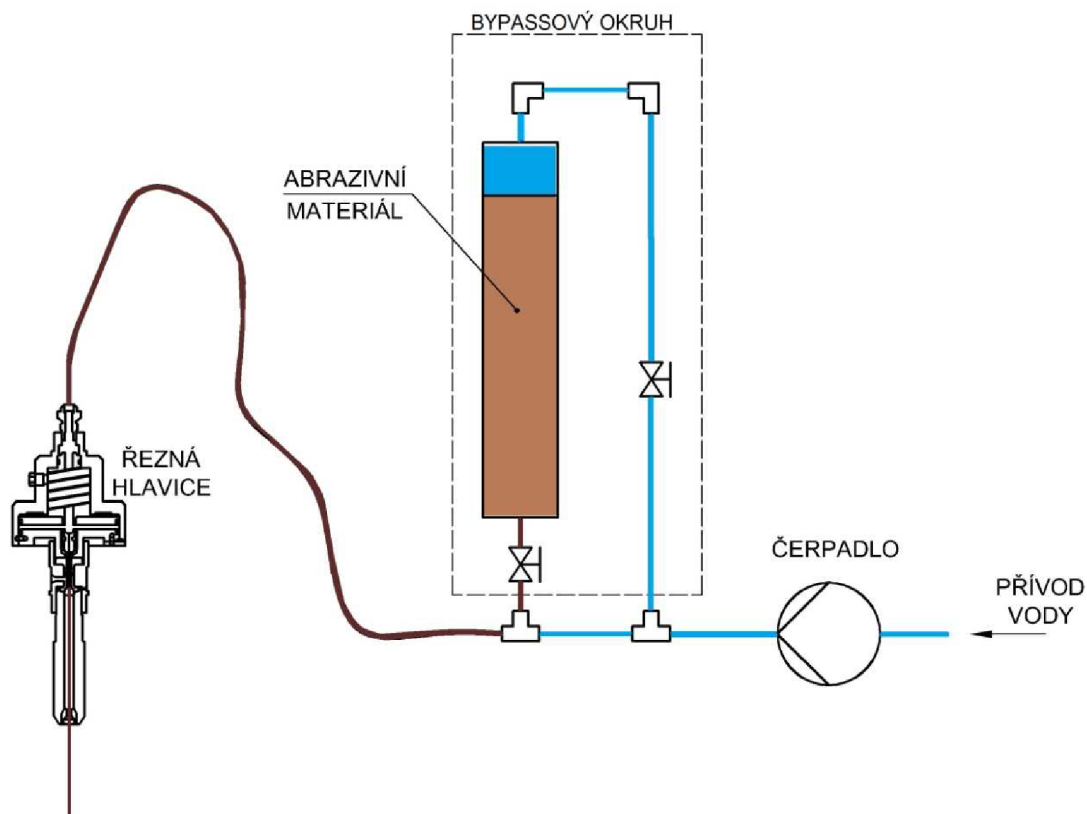
U systému s **přímým vstřikováním brusiva (ASJ)** se do směšovací komory přivádí stlačená suspenze. Používané tlaky jsou do 100 MPa, přičemž přítok suspenze je okolo  $20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$  (v případě přesného řezání  $1 \text{ až } 3 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ). [7]

Systém ASJ se dle Water jet Laboratory Hannover [19] dělí z hlediska koncepce mísení abrazivních částic s mediem na tři základní metody:

- Metoda přímého vstřikování - Direct pumping - technologicky a konstrukčně nejjednodušší koncepce mísení abrasiva, kdy je suspenze abrasiva s mediem mísená za atmosférického tlaku. Takto upravená suspenze je odčerpána čerpadlem a dopravena pod vysokým tlakem do řezné hlavice, kde se po průchodu dýzou mění na vysokorychlostní abrazivní paprsek, který dopadá na

obráběný materiál. Jedná se o sporadicky využívanou metodu, především z důvodu velkého opotřebení čerpadla abrazivní suspenzí.

- Metoda nepřímého vstřikování - Indirect pumping - princip dvou okruhů čerpaných médií přičemž první okruh dopravuje pod stanoveným tlakem vodu na píst tlakové nádoby, ve které je umístěna předem namísená suspenze. Ta se působením pístu dopravuje do řezné hlavice a jako vysokorychlostní abrazivní paprsek dopadá do místa řezu.
- Metoda bočního mísení abraziva - Bypass principle - metoda znázorněná na obr.2.12 využívá k mísení abrazivních částí s čerpaným médiem dvou větví, kdy je hlavní větví dopravována tlaková voda, zatímco v bypassové větvi dochází k mísení tlakové vody s čistým abrazivem v mísící komoře. Díky mísení abraziva v bypassové větvi, bez potřeby pístu nebo jiných prvků pro vyvození tlaku abrazivní suspenze, není tato koncepce náchylná proti opotřebení abrazivní suspenzí (ke které dochází u předchozích metod).



**Obr. 2.12** Metoda ASJ bypass principle

Porovnáním kvality technologií abrazivních vodních paprsků AWJ a ASJ vyplývá, že systém ASJ má vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic než je tomu u metody AWJ. Zároveň systém ASJ umožňuje použití užšího průměru dýzy, čímž dosahuje užšího řezného paprsku. Metoda AWJ je však šetrnější k celému systému. [19]

### 2.5.3 Ostatní druhy paprsků

Svémi vlastnostmi a škálou využití jsou hlavními zástupci technologie vodních paprsků paprsky WJM a AWJ. Přesto, že pole působnosti těchto paprsků zaručuje využití v takřka každé situaci, jsou případy, kdy je jejich použití nevýhodné nebo přímo nevhodné. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody kapalinových paprsků, které jsou svým charakterem specializované na konkrétní případy použití.

Ostatní druhy paprsků:

- **Ultra-vysokotlaké,**
- **Kavitační,**
- **Kryogenní,**
- **Pulzní,**
- **Modulované.**

**Ultra-vysokotlaké paprsky** jsou charakteristické především svým výkonem. Vysokotlaká čerpadla vyvozují v případě technologie „HyperPressure“ až dvojnásobné tlaky (600 MPa) oproti ostatním vodním paprskům, čímž zvyšují kvalitu řezného procesu a snižují čas řezání. Princip technologie samotné však zůstává stejný jako je tomu u metody AWJ. Složitost tohoto druhu technologie se odráží v pořizovací ceně, avšak čas ušetřený na řezu, snižuje náklady na provoz samotný. Obecně platí úměra, čím vyšší je tlak kapaliny, tím nižší jsou náklady na vyrobený díl (snížená spotřeba energie, abraziva a vody). Paprsek vykazující se vyšší energetickou vydatností zvyšuje řezný výkon a tím i kvalitu řezné hrany. [18]

**Kavitační vodní paprsek**, který se řadí mezi kontinuální kapalinové paprsky, využívá pro samotný řezný proces jev zvaný kavitace. Mechanismus kavitace vzniká při lokálním poklesu tlaku, jenž způsobí dutiny v kapalině, které následně implodují. Dutiny v kapalině jsou nejprve vyplněny vakuem, později do nich mohou difundovat plyny okolní kapaliny. Lokální pokles tlaku není stálý a v okamžiku vymizení kolabují vzniklé dutiny, což má za následek rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Rázový tlak se může teoreticky zvyšovat osmi až deseti násobně. Kavitační paprsky generované při nízkých tlacích (méně než 100 MPa) se používají v případech, kdy se vyžaduje značná přesnost finálního řezu. [4]

Intenzita kavitace je určena kavitačním číslem  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \frac{2 \cdot (P_a - P_v)}{v^2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

- |                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| $\sigma_0 > \sigma_1$ | kavitace se nevyskytuje |
| $\sigma_0 = \sigma_1$ | kavitace právě začíná   |
| $\sigma_0 < \sigma_1$ | kavitace se zesiluje    |

I když erozivní účinek kavitačního paprsku vykazuje lepší vlastnosti než je tomu u samotného čistého vodního paprsku, jeho využití v praxi je malé. Důvodem je především složitost trysky tvořící kavitaci a dále omezení některých parametrů jako například krátká pracovní vzdálenost. [4]

**Kryogenní paprsek** je založený na stejném principu jako je tomu u WJM a patří i do stejné skupiny paprsků. Hlavní rozdíl oproti metodě WJM, je v použití jiného pracovního média. Jako pracovní medium se využívá tekutý dusík LN<sub>2</sub>. Důvodem a hlavní výhodou využití LN<sub>2</sub> je možnost použití této technologie pro případy, kdy je nemožné použít klasický vodní paprsek. Je to především v případech řezání chemicky reaktivních materiálů, dále při řezání v kontaminovaných prostředích a všude tam, kde je obrobkem materiál špatně snášející (reagující) H<sub>2</sub>O.

Jelikož se dusík vyskytuje v tekutém stavu pouze za velmi nízkých teplot (až -190 °C), je zapotřebí přizpůsobit tomuto faktu i celé strojní vybavení jednotky kryogenního paprsku.

**Pulzní a modulované vodní paprsky** patří do skupiny diskontinuálních kapalinových paprsků a jsou charakterizovány měnící se hladinou energie paprsku po dobu trvání řezného procesu. Kolísající energie paprsku má za následek impaktní tlak působící v místě obrábění. Oproti tlaku stagnačnímu  $p_s$  je impaktní tlak  $p_i$  značně vyšší, a jeho charakter má za následek zvýšenou penetraci paprsku, která vede k únavovému namáhání obráběného materiálu. [4; 7]

$$\frac{p_i}{p_s} = \frac{2 \cdot C_0}{V_0} \quad (12)$$

## 2.6 Strojní vybavení vodního paprsku

Strojní vybavení vodního paprsku se skládá z řady komponentů odolávajících vysokým tlakům, propojených vysokotlakým potrubím. Hydraulické zařízení generující vysokorychlostní proud média (vody - WJM nebo směsi abraziva a vody - AWJ) se dělí na dva základní okruhy:

- primární (nizkotlaký),
- sekundární (vysokotlaký).

Vysokotlaký okruh je řízený primárním okruhem prostřednictvím tlaku řídicí kapaliny vyvozené hydraulickou jednotkou. [4]

### Za hlavní části vysokotlakého okruhu se považují:

- filtry - separují nečistoty o velikosti větší než  $1,2 \div 0,5 \mu\text{m}$ ,
- násobič tlaku - vysokotlaké čerpadlo, které je zdrojem tlakové kapaliny,
- akumulátor tlaku - vysokotlaká nádoba pohlcující rázy v kapalině,
- ventily - regulují případně uzavírají průtok kapaliny a tím řídí režim dělení,
- rozváděcí elementy - vysokotlaká potrubí, hadice, otočné elementy a těsnění,
- řezací hlavice - výstupní dýzy - utváří charakter řezného nástroje (paprsku),

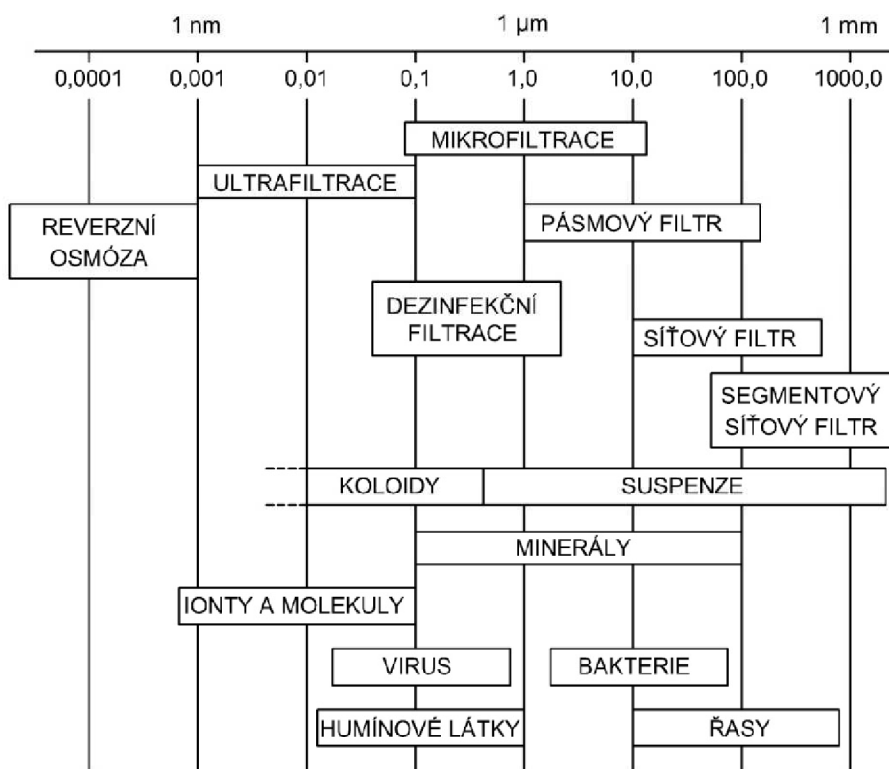
### 2.6.1 Úprava vody

Celý systém, především pak otvor dýzy, musí být chráněn před různými druhy příměsí, které se ve vodě vyskytují. Jelikož se průměr dýzy pohybuje v rozmezí 1,2 až 2,5 mm je případné usazování příměsí rizikové z hlediska správné funkce vodního paprsku. [7]

Krajný [4] uvádí tři základní postupy pro úpravu vody:

- Mechanická úprava vody (filtrace),
- Fyzikálně-chemická úprava vody,
- Biologická úprava vody.

Filtrace je separační metoda, při které dochází k oddělování pevné fáze od fáze kapalné. Děje se tak za pomoci prostupného materiálu (filtrační přepážky). Suspenze je vedena přes porézní filtrační přepážku, která může být opatřena nosným roštem. Filtrace se používá při separování částic v suspenzi o velikosti do  $1 \times 10^{-5} \text{m}$ . [22]



Obr. 2.13 Oblasti filtračních metod dle velikosti [4]

Pro metodu WJM se doporučuje používat filtraci, změkčování, deionizaci a reverzní osmózu (Obr. 2.13). [4]

**Změkčování vody** je vhodné, jakožto před-úpravný krok před deionizací nebo reverzní osmózou. Tvrdost vody je suma koncentrace vápníku a hořčíku. Pro hodnocení vody z technického hlediska se používá stupnice dle Tab 2.2. Jednotkou tvrdosti v soustavě SI je  $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$  (starší  $\text{mval}\cdot\text{l}^{-1}$ ), dále se používají stupně německé ( $^{\circ}\text{DH}$ ), anglické, francouzské ( $^{\circ}\text{F}$ ) a americké. [23]

Voda	$\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$	$^{\circ}\text{DH}$	$^{\circ}\text{F}$
velmi měkká	< 0,7	< 3,9	< 7
měkká	0,7 ÷ 1,25	3,9 ÷ 7	7 ÷ 12,5
mírně tvrdá	1,26 ÷ 2,5	7,01 ÷ 14	12,6 ÷ 25
tvrdá	3,61 ÷ 3,75	14,1 ÷ 21	25,1 ÷ 37,5
velmi tvrdá	> 3,75	> 21	> 37,5

$$1\text{mmol/l} = 5,6^{\circ}\text{DH} = 7,02^{\circ}\text{ang.} = 10^{\circ}\text{F} = 100^{\circ}\text{amer}$$

**Tab. 2.2** Tvrdost vody [23]

Zařízení na změkčování vody se skládá z nádržky s pryskyřicí, nádržky se slanou vodou a z kontrolní klapky. V okamžiku, kdy voda přetéká přes pryskyřicové řečiště (plastický materiál ve formě zrněk), je vápník a hořčík (kladný náboj) přitahován a zadržován částicemi pórovitých pryskyřicových zrněk (záporný náboj). [4]

**Deionizace**, stejně jako je tomu u změkčování vody, využívá proces výměny iontů. Jedná se však o proces složitější. Deionizátor používá kationtovou a aniontovou pryskyřici umístěnou v dvoukomorové nádržce. V okamžiku, kdy voda prochází přes kationtovou pryskyřici, jsou různé kationty jako uhlík, hořčík a železo přesunuty volnými minerály kyselin. Voda pokračuje přes aniontovou jednotku, kde jsou anionty, chloridy a sulfáty přesunuté a nahrazené hydroxidy. Ty se slučují a tvoří vodu, očištěnou od všech iontových nečistot. [4]

**Reverzní osmóza** je separační metoda, při které je voda vysokým tlakem usměrňována přes polopropustnou membránu, která zachycuje nečistoty a rozpuštěné částice. Rozdíl tlaků je pak hybnou silou membránové filtrace. Molekulární hmotnost zachycených částic je menší než  $200\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . [22]

Jelikož je proces čištění vody pro WJM a AWJ závislý na více separačních metodách čištění a jelikož se u již upravené vody sleduje více parametrů ukazujících úroveň kvality čištěné vody, byly zavedeny předpisy s doporučenými hodnotami nečistot. [4]

Specifikace množství nečistot v řezném médiu zavedené pro své zákazníky firmou Ingersoll-Rand a Flow System [4]:

- celkové množství rozpuštěných pevných látek (TDS), max.  $500\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- celková tvrdost (ve formě  $\text{CaCO}_3$ ): max.  $25\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- obsah železa (ve formě Fe): max.  $0,2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- obsah manganu (ve formě Mn): max.  $0,1\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- obsah chloridu (ve formě Cl): max.  $100\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- obsah zákalu: max. 5 NTU,
- obsah volného chlóru (ve formě  $\text{Cl}_2$ ): max.  $1,0\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ,
- pH faktor: od 6,5 do 8,5.

### 2.6.2 Generátor vysokotlaké vody

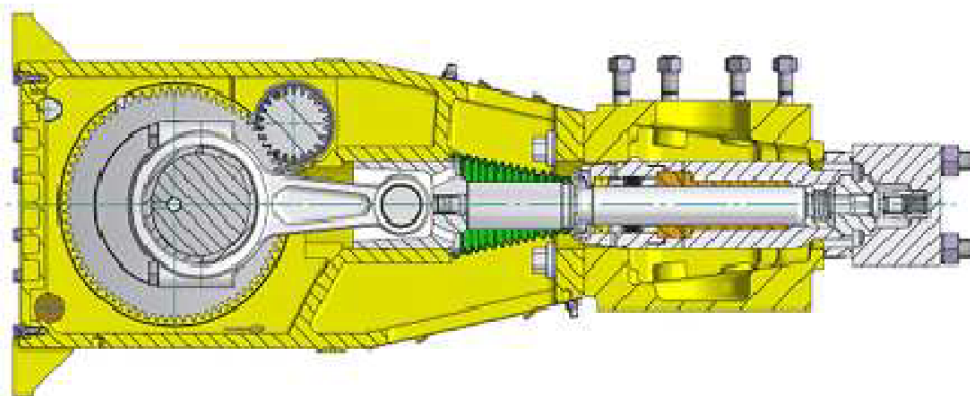
Generátor tlakové vody musí zajišťovat stálý a nepřetržitý proud vody o předepsaném tlaku. V závislosti na velikosti tlaku a průtoku rozeznáváme dvě metody generování vysokotlaké vody. Pro nízké a střední tlaky (do 300 MPa) se používají triplexová pístová čerpadla. Pro vysoké tlaky (až 650 MPa) se používají multiplikátory [4; 18; 24].

#### Pístová (plunžrová) čerpadla

Plunžrová čerpadla pracují na stejném principu, jako je tomu u čerpadel pístových. Rozdíl je pouze v tom, že pístní tyč a píst splývá v jednu součást o stejném průměru - plunžr. Na obr. 2.14 je znázorněn řez plunžrovým čerpadlem od firmy Hammelmann.

Při pohybu klikového mechanismu směrem k dolní úvratí, se zvětšuje objem v pracovním prostoru, což má za následek snížení tlaku a skrze otevřené ventily se do pracovního prostoru nasává voda. Následně nastává reverzní pohyb plunžru, při kterém se tlak v pracovním prostoru zvětšuje na hodnotu výtlačného tlaku. Ventily pro přívod vody se uzavřou a vysokotlaká kapalina je vytlačena do vysokotlakého potrubí.

Plunžrová čerpadla využívaná pro technologii vodního paprsku pracují s tlaky do 300MPa, při výkonu 750 kW a průtoku dosahujícím až  $400\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . [4; 24; 25]

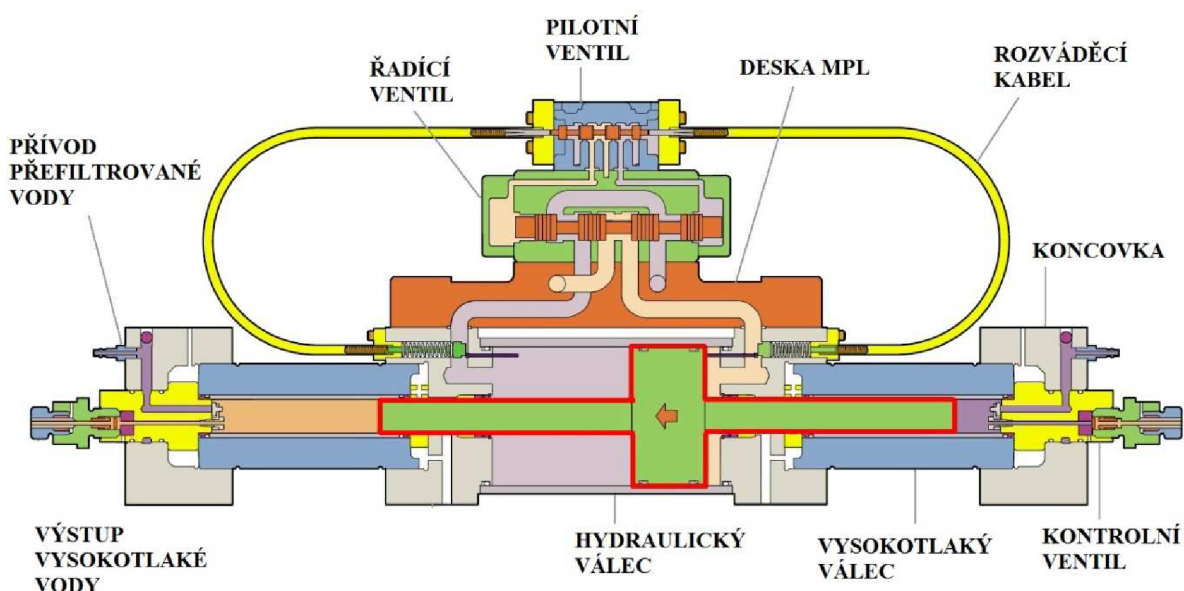


Obr. 2.14 Plunžrové čerpadlo [25]

### Multiplikátory

Multiplikátor (Obr.2.15) neboli hydraulický násobič využívá pro vyvození tlakové vody rozdílu pracovních ploch pístu. Jak již bylo řečeno v kapitole pojednávající o základním principu vodního paprsku, má multiplikátor dva okruhy, přičemž do prvního nízkotlakého okruhu se přivádí olej o tlaku  $p_1$ , který je dopravován do oblasti pístu o ploše  $S_1$ . Druhý okruh dodává do systému přefiltrovanou vodu na opačnou stranu pístu o ploše  $S_2$ . Z Pascalova zákona pak vyplývá rovnice (1). Působící tlak  $p_1$  na píst vyvolá tolikrát vyšší tlak  $p_2$ , kolikrát je menší plocha pístu  $S_2$  vůči ploše  $S_1$ .

Objem vysokotlaké vody dodávané multiplikátorem není kontinuální a tak je nutné v systému použít akumulátor, který kolísání tlaku vyrovná. Jednoduché multiplikátorové systémy generují tlaky do 650 MPa, při výkonu 85 kW a průtoku  $11 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . [4; 24]



Obr. 2.15 Multiplikátor - schéma firmy Flow [10]

Pro dvojčinné multiplikátory, které jsou používány v praxi častěji platí (13):

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \text{ [Pa]} \quad (13)$$

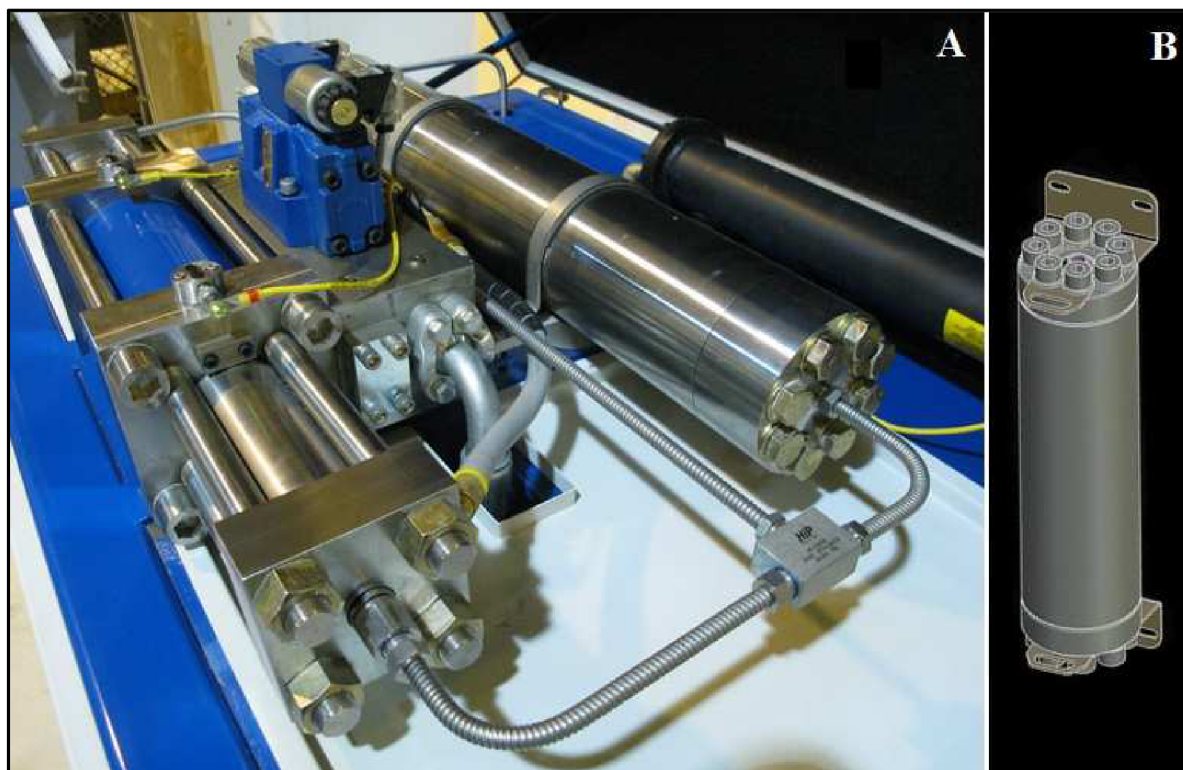
Jelikož v multiplikátoru dochází k nepatrným ztrátám, které jsou zahrnuty v mechanické účinnosti (ztráty třením v netěsnostech a hydrodynamické ztráty) získáme tak tvar rovnice (14). Hodnota mechanické účinnosti bývá  $\eta_m = 0,95$ . [4]

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \text{ [Pa]} \quad (14)$$



### Akumulátor

K vyrovnání výkyvů tlaku v systému, způsobeném oscilačním pohybem pístu, slouží akumulátory. Akumulátor je zařazen do vysokotlakého okruhu hned za výtlak multiplikátoru (Obr.2.16 A). Jedná se o dutý válec (Obr. 2.16 B) o specifickém objemu, ve kterém je stlačena pracovní kapalina na požadovaný tlak. V okamžiku lokálního poklesu tlaku expanduje kapalina v akumulátoru a část z ní se dostává do systému, čímž je vyrovnána diference tlaku (kontinuální tok kapaliny). [26]



**Obr. 2.16** Akumulátor pro technologii vodního paprsku

A) Vysokotlaké čerpadlo - detail multiplikátoru s akumulátorem [26]

B) 3D model akumulátoru [27]

### 2.6.3 Hydraulické rozvody

S ohledem na konkrétní aplikace a základní kritéria hydraulických rozvodů tlakové kapaliny si každá firma volí ideální skladbu spojovacích prvků a armatur. Celý systém rozvodu vysokotlaké vody musí odolávat vysokým hydraulickým tlakům, dynamické zátěži v systému a druhu přepravovaného hydraulického média. Dále s ohledem na náročnost montáže, údržbu a pracovní spolehlivost prvků, se spojovací prvky a armatury normalizují. [4]

Je zřejmé, že při využití multiplikátorů, které mají dva okruhy (nízkotlaký a vysokotlaký), bude pro každý okruh systému uvažované rozdílné dimenzování rozvodů.

### 2.6.4 Řezací hlavy

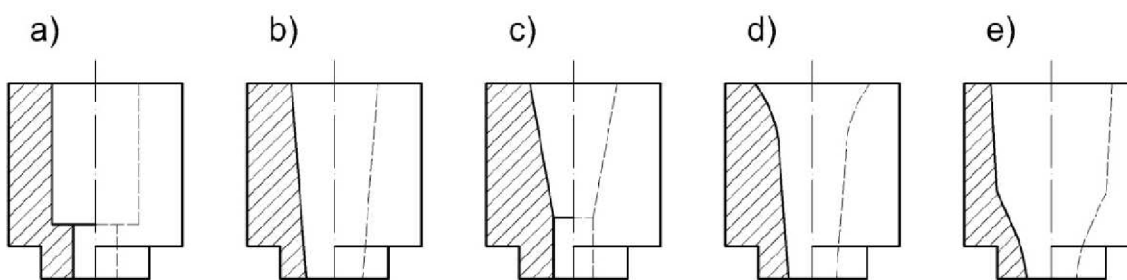
Druhy kapalinových paprsků by se daly rozdělit podle druhů řezacích hlav. Právě řezací hlavy (trysky) vytváří charakter kapalinového paprsku a jsou nejdůležitějším prvkem pro utváření tvaru, kvality a přesnosti řezu.

Z hlediska konstrukce řezacích hlav rozdělujeme:

- řezací hlavy pro WJM,
- řezací hlava pro AWJ,
- řezací hlava pro ASJ.

Všechny tři druhy jsou popsány v kapitole druhy kapalinových paprsků (Kap. 2.5).

Hlavním prvkem každé řezací hlavy je dýza. Především vnitřní průměr, povrch a geometrie tohoto prvku v řezací hlavě vytváří finální charakter řezného paprsku. Tvary vyráběných a používaných vodních dýz jsou znázorněny na Obr.2.17. [4]



**Obr. 2.17** Tvary vyráběných vodních dýz [4]

**a)** válcová **b)** kuželová **c)** kombinovaná (kuželová s přechodem do válcové)  
**d)** kónická **e)** složená - bikubická

Materiál vodních dýz se volí podle hodnoty dosahovaných tlaků:

- pro velmi nízké a nízké tlaky - výroba z tvrdokovu,
- pro střední a vysoké tlaky (aplikace řezání) - výhradně se používají materiály safír, rubín a syntetický diamant.

Diamantové dýzy dosahují 5 až 10ti násobek životnosti dýz oproti safíru a rubínu. Životnost dýz závisí od druhu a kvality pracovního média. Z toho důvodu se voda před-upravuje (viz. kap. 2.7.1).

Vzhledem k velmi malým rozměrům dýz a vysoké rychlosti vodního paprsku je výroba dýz velice náročná. Vysokorychlostní paprsek vystupuje z dýzy rychlostí cca  $300$  až  $1400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a to při velmi malém vnitřním průměru dýzy. Hlavní kontrolované faktory při výrobě dýz jsou souosost jednotlivých částí dýzy a drsnost vnitřního povrchu. [4]

### 2.6.5 Souřadnicové stoly

Řezací stůl vodního paprsku je multifunkční zařízení mající za úkol:

- převádět CNC kód do reálného pohybu řezací hlavy,
- zachycovat energii paprsku,
- zachycovat a odvádět použitou vodu,
- na loži sestávajícím se z roštů (nebo kuličkových loží) je uložen obrobek.

Souřadnicové stoly kooperují se softwarem typu CAD/CAM a tím zajišťují automatizovaný provoz potřebný pro efektivní výrobu. Souřadnicové stoly se vyrábí v různých rozměrových variantách a mohou dosahovat plochy až 54 m<sup>2</sup> (6 x 9 m). [10]

### 2.6.6 Abrazivo

Abrazivní materiál se u technologie WJM přidává do řezného procesu, čímž znásobuje mechanické účinky řezného paprsku. Pomocí *Finnieho modelu* [28], byl popsán mechanismus, který popisuje erozi materiálu obrobku abrazivními částicemi. Obr.2.18 zobrazuje geometrické a kinematické parametry pro tento model. Model, který je dán vztahem (15) a je založený na odstranění určitého množství materiálu pomocí jedné abrazivní částice s určitou trajektorií. [2]

$$V_M = \frac{m_p \cdot v_p^2}{\sigma_f \cdot K \cdot \psi} \cdot f(\varphi) \quad [\text{m}^3] \quad (15)$$

kde:

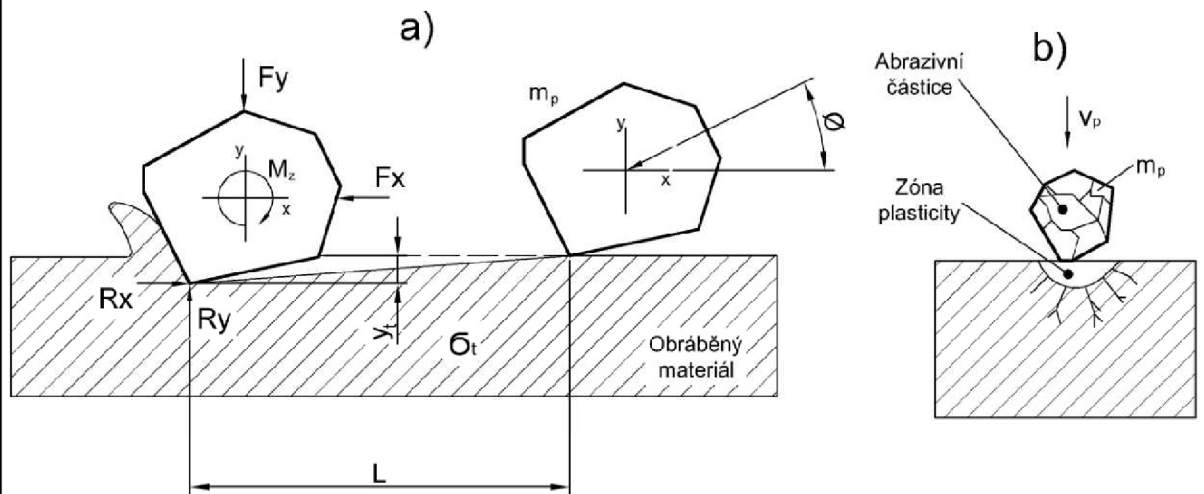
$$f(\varphi) = \sin(2 \cdot \varphi) - \frac{6}{K} \cdot \sin^2 \cdot \varphi \quad \text{pro } \tan \varphi = \frac{K}{6} \quad (16)$$

$$f(\varphi) = \frac{K \cdot \cos^2 \cdot \varphi}{6} \quad \text{pro } \tan \varphi = \frac{K}{6} \quad (17)$$

$$K = \frac{F_y}{F_x} \cong 2 \quad (18)$$

Rovnice vyjadřuje práci vykonanou při odstraňování určitého objemu materiálu erozí a je zlomkem kinetické energie abrazivní částice. Odlišnost rovnice (17) od rovnice (16) se vynačuje tím, že práce při obrábění je vypočítána jako výsledek množství materiálu odstraněného a napětí materiálu  $\sigma_f$ .

V rovnici (15) je K poměr vertikální a horizontální síly,  $\psi = L \cdot y_t^{-1}$  (Obr.2.18) a  $f(\varphi)$  je funkce úhlu, pod kterým abrazivní částice zasáhne cílový materiál. Bylo zjištěno, že poměr  $L \cdot y_t^{-1}$  se nemění a obvykle se rovná 2. [2]



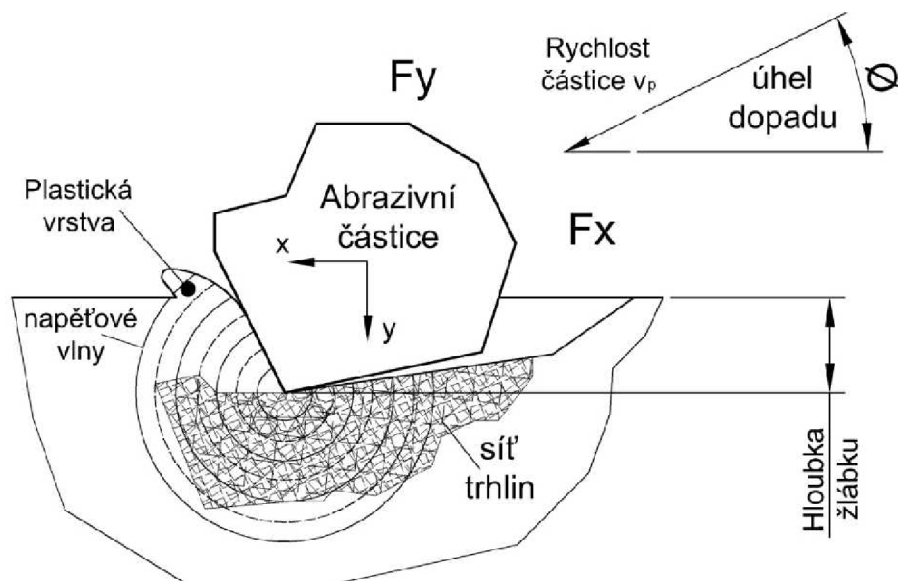
**Obr. 2.18** Charakteristika odstraňování materiálu abrazivní částicí [2]

a) mikrodělení

b) laterální šíření trhliny

Druhý známý model pro popis odebraného množství materiálu působením vysokorychlostního hydro-abrazivního proudu vytvořil Hutchings [29].

**Hutchingsův model** definuje dva způsoby dělení pomocí hydroabrazivního proudu. Jak je znázorněno na obr.2.19, zářezový způsob deformace je vytvořený abrazivními částicemi s ostrými hranami. Abrazivní částice působí na cílový materiál, ve kterém se vytváří žlábek. Ne každá částice ale vnikne do materiálu. Některé mohou rotovat v opačném směru. Za pomoci SEM (Scanning Electron Microscope) byly zpozorovány stopy opotřebení materiálu [20], které jsou charakteristické pro abrazivní částice vytvářející povrch rýhováním, vrypy a vyhloubeninami. Tyto stopy však nejsou stejně široké a předpokládá se, že za to může velikost distribuce částic. [2]



**Obr. 2.19** Model interakce abrazivního zrna s obráběným materiálem [2]

Základní sledované parametry u abraziva [7]:

- **řezivost** - závisí na krystalické stavbě abraziva, přičemž nejvhodnější krystalovou mřížkou je mřížka kubická, která dodává abrazivu schopnost netupit se (ekologická výhoda - možnost recyklovat abrazivum),
- **zrnitost** - má vliv na celý řezný proces, především pak na drsnost povrchu. Je vyjádřena v jednotkách MESH, kdy jako jemná je označována zrnitost 100 a 150, střední 60 a 80 a hrubá zrnitost 16 a 36,
- **tvrdost** - zvyšuje efektivitu řezného procesu.

Existuje několik druhů abraziva. Jako příklad slouží Tab.2.3 vytvořená na základě informací od firmy PTV s.r.o [30].

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

**Tab. 2.3** Složení abrazivního materiálu GMA australského původu [30]

Prodejce [30] uvádí o abrazivu australského původu typu GMA vhodnost použití pro všechny aplikace řezání včetně uhlíkové mědi, mědi, žuly, hliníku, gumy, skla, korozivzdorné oceli, mramoru a dřeva.

Fyzikální charakteristika (typická) granátu GMA [30]:

- sypná hmotnost 2,38 t·m<sup>-3</sup>,
- měrná hmotnost 4,1 t·m<sup>-3</sup>,
- tvrdost dle Mohra 7,5 ÷ 8,0,
- bod tavení 1250 °C,
- tvar přírodních zrn kubický.

Ostatní charakteristiky (typická) granátu GMA [30]:

- radioaktivita není měřitelná nad podložím,
- absorpce vlhkosti není hydrokopický, je inertní,
- chloridy celkem < 0,0025 %,
- volné Fe; Cu; ostatní < 0,01 %.

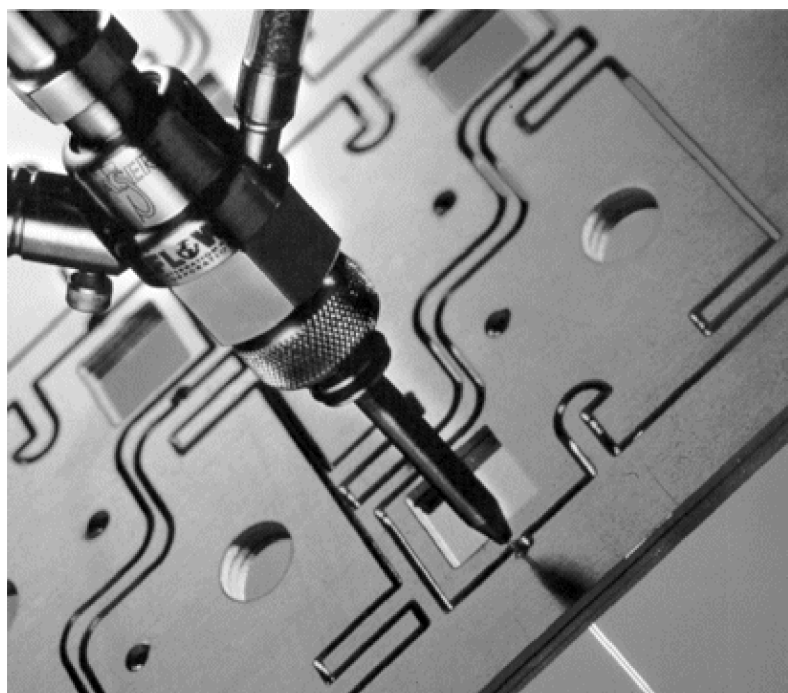
## 2.7 Technologické možnosti vodního paprsku

Vodní paprsek dokáže mimo klasický proces dělení materiálu také operace obrábění (soustružení, frézování, vrtání, řezání závitů především u těžkoobrobitelných materiálů) a další operace jako jsou gravírování a trojrozměrné obrábění.

### 2.7.1 Řezání

Základní technologií a historicky první využívanou oblastí vodního paprsku bylo klasické dělení (řezání) materiálu. I v dnešní době se metody WJM a AWJ používají v nejvyšší míře pro proces dělení. Zatímco dříve se jednalo pouze o jednovrstvé materiály, v dnešní době dokáže technologie kapalinového paprsku řezat i sendvičové, kompozitní a izolační materiály. První použití technologie vodního paprsku pro vícevrstvé materiály o různých vlastnostech se datuje do 60. let 20. století, kdy bylo využito této technologie pro stavbu raketoplánu. Největší výhodou u řezání vícevrstevných materiálů je minimální silové působení vodního paprsku, které tak nedeformuje měkké vrstvy materiálů sendvičového charakteru.

Dalším posunem technologie vodních paprsků pro řezání materiálů bylo zavedení softwaru řízených pohybů trysky. Pomocí počítačové technologie se zpřístupnila možnost řezat jakkoliv tvarově složité obrazce a to i u velmi tvrdých materiálů (Obr.2.20). Díky tomu se možnost využití vodního paprsku rapidně zvýšila. Navíc se pomocí softwaru optimalizuje rozmístění obrobků na polotovaru, čímž se značně sníží vzniklý odpad.



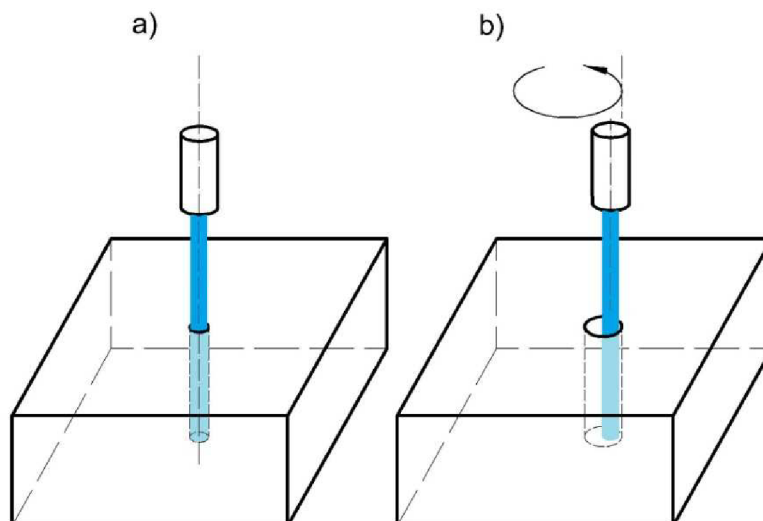
**Obr. 2.20** Řezání titanového obrobku tloušťky 12,5 mm, tlakem 310 MPa  
- firma Flow International Corp. [18]

### 2.7.2 Vrtání

Vrtání technologií vodního paprsku se v praxi využívá především na těžkoobrobitelné materiály jako je keramika, sklo, slitiny niklu a další. Podle druhu trajektorie abrazivní hlavičky rozeznáváme dva základní způsoby vrtání (Obr.2.21) [7]:

- provrtávání,
- frézování otvorů.

V závislosti na průměru otvoru se pak volí ideální způsob vrtání pro konkrétní případ.



**Obr. 2.21** Způsoby vrtání pomocí AWJ

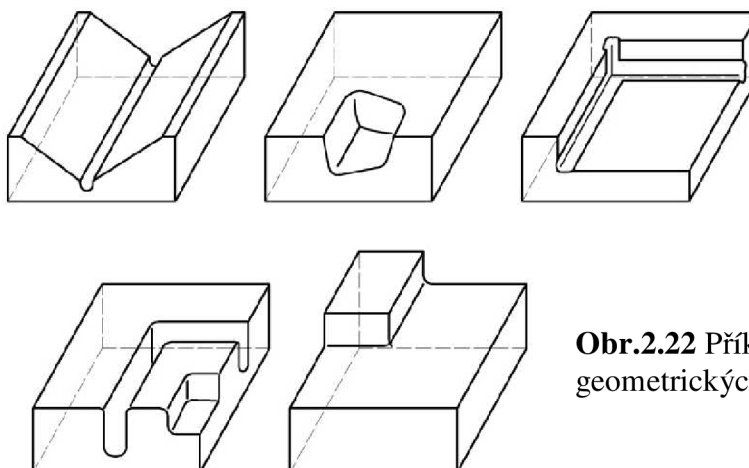
**a)** Provrtávání

**b)** Frézování otvorů

Je zřejmé, že při metodě provrtávání je průměr otvoru roven průměru vodního paprsku. Zatímco u metody na Obr. 2.21b jde spíše o frézování kruhového profilu nežli o vrtání.

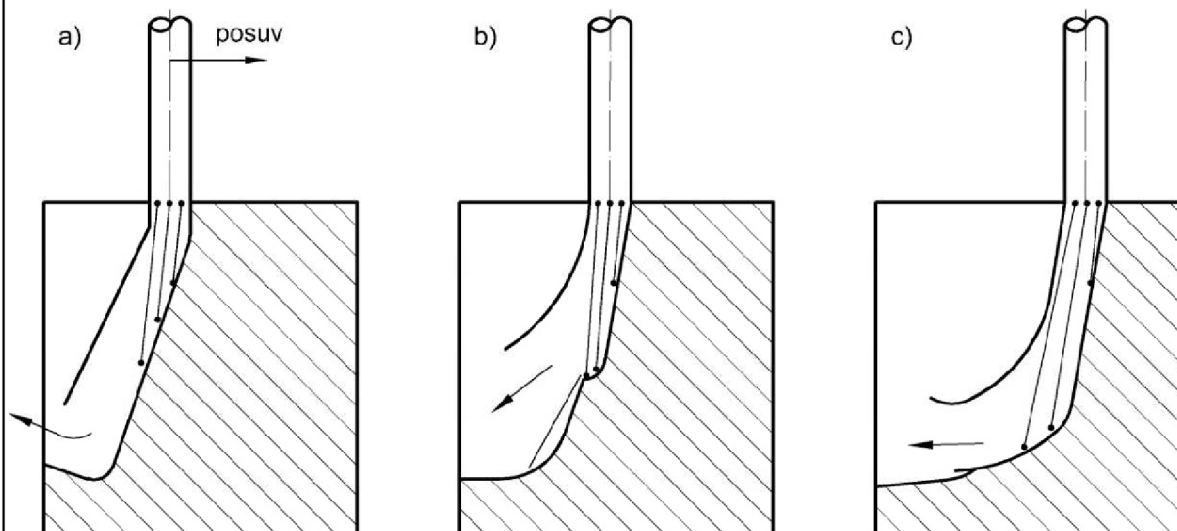
### 2.7.3 Frézování

Frézování pomocí AWJ se využívá pro tvarově složité obrobky (Obr. 2.22). Při frézování jde sice znovu o řezání, ale v tomto případě nedochází k dělení materiálu, jak tomu ukazuje Obr. 2.23. [7]



**Obr.2.22** Příklady frézování různých geometrických tvarů AWJ paprsku [7]

Frézování pomocí AWJ je proces, při kterém abrazivní paprsek vícenásobně prochází po obráběné ploše a postupně tvoří tvar blízký konečnému tvaru (near-net shape). [7]



**Obr.2.23** Řezný cyklus při frézování AWJ [7]

- a) začátek tvoření stopy řezu
- b) stabilizovaná stopa řezu
- c) pokračující posuv paprsku a vyrovnání stupňovitosti řezu

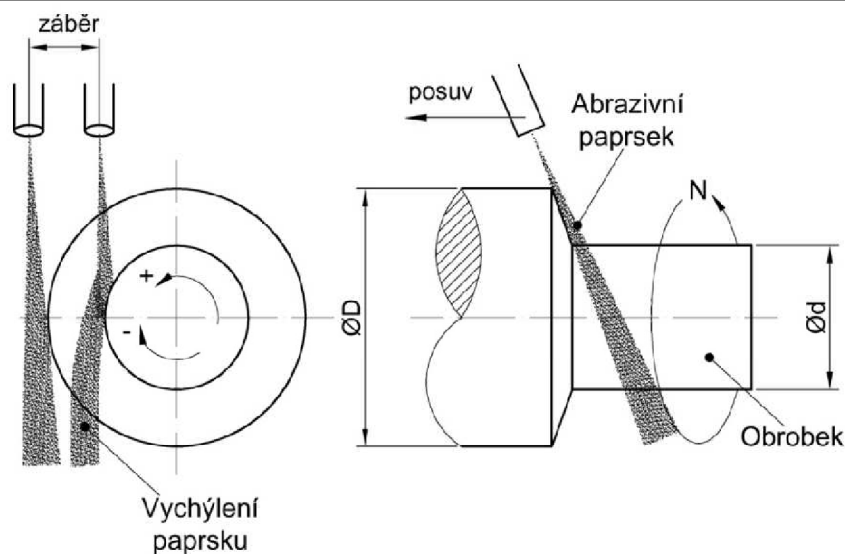
Jako vhodná aplikace pro frézování vodním paprskem se ukazuje tvorba tvářecích nástrojů. Ukazatelem efektivnosti procesu při obrábění abrazivním vodním paprskem je úběr materiálu a topografie povrchu. Ty jsou ovlivněné rychlostí posuvu paprsku a vzdáleností mezi obrobkem a abrazivní hlavicí (stand off). [4; 7]

#### 2.7.4 Soustružení

Soustružení metodou AWJ se stále ještě snaží najít své pole působnosti, ve kterém by bylo ekonomicky životaschopné. Na rozdíl od konvenčního soustružení je soustružení AWJ paprskem méně citlivé na geometrický profil obrobku. Umožňuje tak obrábění dlouhých obrobků o malém průměru. Tento proces je ideální pro těžkoobrobitelné materiály, jako jsou keramika, kompozity, skla, atd. [31]

Při soustružení obrobek rotuje kolem své osy a AWJ paprsek se posouvá ve směru této osy (Obr. 2.24). Úběr materiálu je zabezpečený radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky.





**Obr. 2.24** Soustružení abrazivním vodním paprskem [7]

### 2.7.5 Gravírování

Gravírování je založené na stejném principu jako je frézování AWJ paprskem. Jedná se o 2,5D obrábění, při kterém nedochází k prořezání celé tloušťky obrobku, ale materiál je odebírán pouze do požadované hloubky. Hlavní výhodou technologie AWJ pro gravírování je samotná podstata řezu vodním paprskem. Oproti ostatním gravírovacím technologiím může AWJ paprsek gravírovat veškeré materiály a to i materiály hořlavé, křehké, těžko obrobitelné, pružné či sendvičové. U materiálů hořlavých nebo tepelně citlivých se nemusíme obávat vzniku karcinogenních nebo jedovatých látek, vznícení nebo přílišného vypálení motivu do stran jako by tomu bylo v případě použití např. laseru. Jediným omezením AWJ technologie je případný vliv vlhkého prostředí na materiál. Proto je důležité znát hodnotu relativní nasákavosti, hloubku pronikání vody a intenzitu ovlivnění materiálu vodou (koroze). [32]

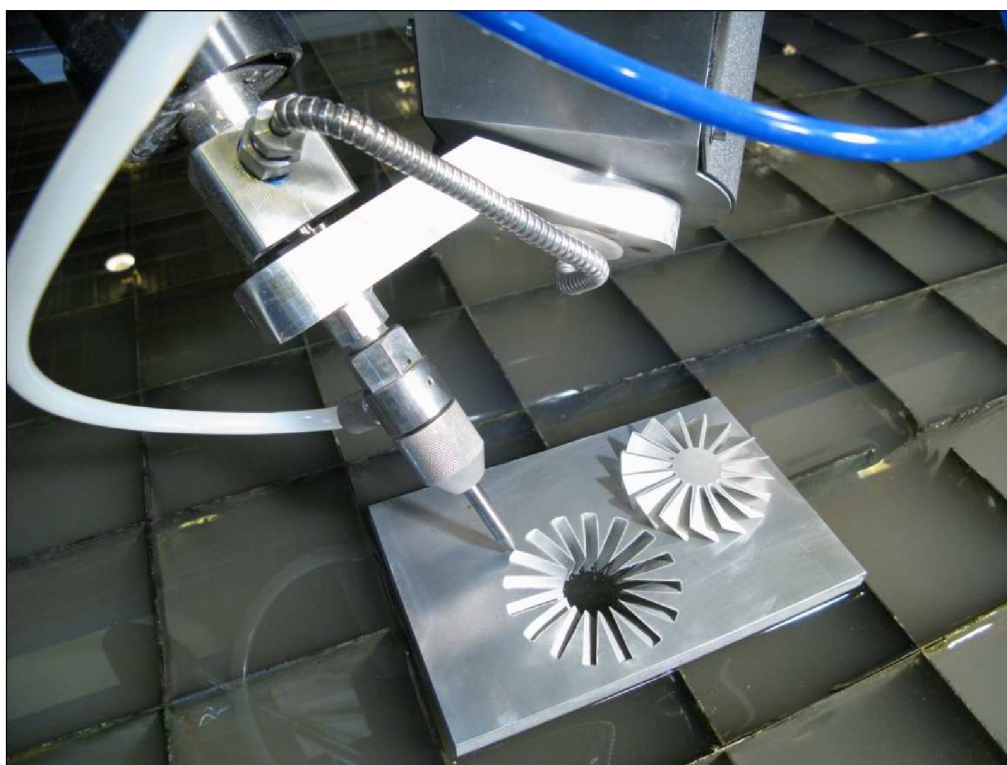
Co se týče tvarů, které je schopen AWJ paprsek docílit, je zde omezení minimálního zaoblení vnitřních rohů. Minimální zaoblení vnitřních rohů je dáno průměrem řezacího paprsku. Přičemž pro měkké a tenké materiály (možno řezat i bez abraziva) bývá průměr paprsku kolem 0,2 mm. Pro silné a těžkoobrobitelné materiály bývá průměr paprsku AWJ od 0,5 ÷ 2,5 mm. [32]



**Obr. 2.25** Gravírování nerez oceli 1.4301

### 2.7.6 Trojrozměrné obrábění

Oproti obrábění ve 2D a 2,5D se technologie prostorového obrábění pomocí vodního paprsku spoléhá na technologicky vyspělejší řídicí systém a především pak na schopnost pohybu řezné hlavy v pěti osách, zároveň s možností rotace kolem hlavní osy až o 360° a  $\pm 90^\circ$  osy vedlejší. Dynamické řízení automaticky kompenzuje rychlost řezného paprsku s ohledem na aktuální řezný proces.



**Obr. 2.26** Řezání pomocí 5-osé řezací hlavy firmy WARDJet Psy

Jak je patrné z obr.2.26 dokáže technologie vodního paprsku vyrábět tvarově velice složité výrobky. Je tedy pouze na provozovateli, pro jaký druh vodního paprsku se rozhodne a jakou škálou schopností musí být stroj vybaven, aby pokryl jeho výrobní nároky.

## 2.8 Aplikace WJM a AWJ

Technologie vodního paprsku v dnešní době nachází uplatnění ve všech hlavních průmyslových odvětvích, kde je svojí flexibilitou konkurenceschopné všem ostatním obráběcím technologiím ať už konvenčním či nekonvenčním. Hlavní pole působnosti technologií WJM a AWJ je ve strojírenském průmyslu, ve kterém se využívají všechny výhody (Kap.2.10) této technologie. Průmyslové aplikace technologií kapalinových paprsků ukazuje Tab. 2.4.

<b>PRŮMYSL</b>	<b>APLIKACE</b>
<b>Chemický</b>	obrábění výbušných látek, plastických hmot, těžkoobrobitelných a kompozitních materiálů
<b>Potravinářský</b>	dělení masa, hub, tabáku, ovoce, zeleniny, zákusků, sýrů, apod.
<b>Elektrochemický</b>	dělení plošných spojů, elektroizolačních materiálů, skla a keramiky
<b>Strojírenský</b>	Dělení titanu, wolframu, tantalu, uranu, extrémně tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů, kompozitních materiálů, skel, izolačních materiálů, výroba tvarově složitých součástek, lopatek a dílů tryskových a raketových motorů, turbín a kompresorů, a mnohé další
<b>Stavební</b>	dělení izolačních materiálů, polystyrénu, sklovitých materiálů, azbestu, plastobetonů, keramiky
<b>Sklářský</b>	dělení skla, plexiskla, matování skla
<b>Papírenský</b>	dělení papíru, buničiny, novinového papíru, papírových plínek
<b>Metalurgický</b>	metalografické rozborů, čištění odlitků
<b>Kamenický</b>	dělení různých druhů kamene, mozaiky, dlaždice, dekorace
<b>Vojenský</b>	odminování, demilitarizace - zneškodňování raketové munice, binárních chemických zbraní a jednorázových chemických zbraní, dělení pancěrů pro obrněná vozidla
<b>Textilní</b>	dělení jemných textilií s maximální úsporou vysoko-kvalitního polotovaru
<b>Automobilový</b>	dělení 3D součástek - nádrže, nárazníky, karoserie, přístrojové desky, opěrky hlavy a rukou, čalounění a interiérové materiály na bázi PVC, kompozity, polyuretany, folie, gumy, koberce, plsti diskových kol z lehkých slitin, keramické materiály, těsnění resp. různé mechanické součástky
<b>Obuvnický</b>	dělení kůží, plastických hmot
<b>Hornictví</b>	stavební a hornické aplikace, vrstvené soustavy pro vrty v horninách, vrty pro uložení kabelů
<b>Kosmický a letecký</b>	dělení keramiky, kompozitních materiálů, titanu, interiérových panelů, hliníkových částí skeletů letadel
<b>Medicína</b>	operace mozkových nádorů, klinické a experimentální aplikace, operace jater a ledvin, odstraňování trombóz z cév

**Tab. 2.4** Průmyslové aplikace [2; 7]

Z Tab.2.4 je zřejmé, že technologie vodního paprsku zastává v dnešní době na poli obrábění rovnocennou pozici s ostatními konvenčními metodami.

### 2.8.1 Výhody a nevýhody vodního paprsku

#### Výhody řezání vodním paprskem [2; 4; 7; 33]:

- řezání vodním paprskem probíhá bez dotyku nástroje a materiálu,
- vysoká energetická účinnost,
- nedochází k tepelnému namáhání materiálu a ke vzniku vnitřního pnutí,
- ekologická technologie (viz. Kap. 6),
- nedochází ke vzniku mikrotrhlin a zbytkových napětí v okolí řezu,
- řezání vodním paprskem nezpůsobuje vznik polétavého prachu z děleného materiálu,
- vodním paprskem lze řezat i materiály měkké a lepivé nebo drolící se a křehké,
- lze provádět kvalitní řezy vrstvených materiálů o různých fyzikálně-chemických vlastnostech,
- nedochází k chemickému ovlivnění řezaného materiálu,
- nevznikají žádné škodlivé plyny nebo páry,
- výsledkem je kvalitní řez bez otřepů,
- řezná hrana obvykle již nevyžaduje další opracování,
- je dosahována vysoká přesnost řezu,
- úspora materiálu při použití materiálu větší tloušťky,
- neporušení povrchové úpravy materiálu (leštění, broušení, atd.),
- obrobek nepotřebuje upnutí (stačí dorazy, případně zatížení na krajích polotovaru).



**Obr. 2.26** Porovnání řezu AWJ vs. Laser [34]

Na Obr. 2.26 je vidět rozdíl a jednu z hlavních výhod technologie vodního paprsku, tedy tepelně neovlivněnou oblast v místě řezu.

**Nevýhody řezání vodním paprskem [2; 4; 7; 33]:**

- nevyhnutelný kontakt s vodou,
- kovové materiály nutno vhodně ošetřit,
- delší vysoušení u nasákových materiálů,
- možnost změny barvy či znečištění některých materiálů,
- fenomén rýh - spodní zdrsňená plocha (zaoblené rýhy),
- prořez roštu - podpůrného podstavce obrobku.



**Obr. 2.27** Vedlejší produkt AWJ - odpad ve formě prořezaných roštů



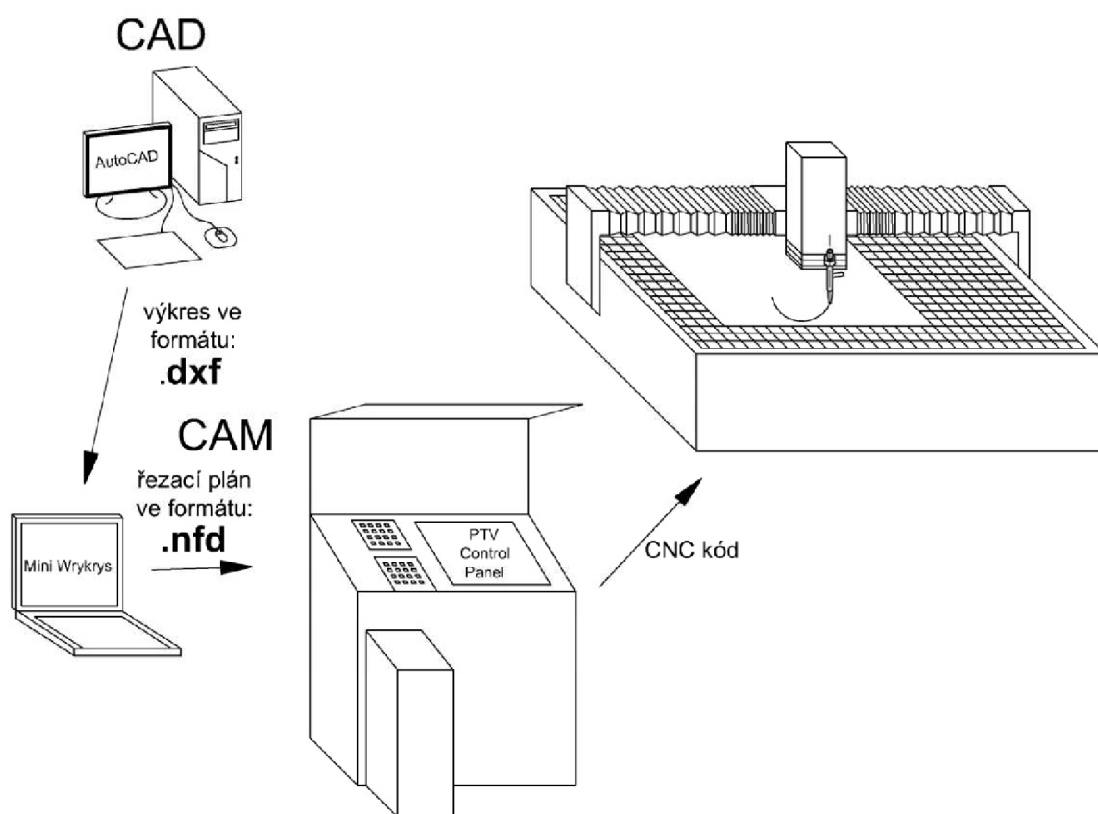
**Obr. 2.28** Povrchová textura spodní části obrobku vzniklá v místě dotyku s rošty

### 3 ROZBOR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ DAT

Využití výpočetní techniky ve strojírenství se dnes považuje již za naprostou samozřejmost. Převedení jednotlivých kroků výrobního procesu do prostředí informační technologie mělo za následek výrazné zvýšení produktivity a kvality výroby. Počítačová podpora navrhování a výroby součástí se dělí do dvou základních skupin [40]:

- CAD - Computer Aided Design - Počítačem podporované navrhování,
- CAM - Computer Aided Manufacturing - Počítačem řízená výroba.

Pro technologii vodního paprsku je postup řízení a zadávání dat schematicky znázorněn na Obr. 3.1. Na úrovni uživatelského rozhraní typu CAD se využívají softwary pomocí kterých se navrhuje reálný tvar budoucího výrobku. Za použití softwarů jako jsou např. AutoCAD, ProEngineer, Solidworks, AutoCAD Inventor a dalších vzniká výstupní výkres ve formátu dwg. Z dwg výkresu je následně odseparován finální obrys výrobku (jsou odstraněny kóty, osy, neviditelné čáry, atd.), který se bude vyrábět pomocí technologie vodního paprsku. Takto upravený výkres se převádí do formátu dxf (drawing exchange format), který je kompatibilní s CAM systémy.



Obr. 3.1 Zadávání a řízení výroby pomocí CAD/CAM technologií

V uživatelském rozhraní CAM se vytváří řezací plán pro předem zvolený polotovar (ve většině případů se jedná o tabule různých tloušťek a formátů). Je tedy zřejmé, že pro jeden řezací plán se volí součástky stejné tloušťky. Pro pohodlnější rozmístování a zadávání základních údajů slouží softwary jako např. Wrykrys. Wrykrys je schopen načíst a umístit dxf výkres na řezací plán s nastavitelnou vzdáleností od okraje či jiného, již umístěného, vnějšího obrysu výrobku. V okamžiku, kdy řezací plán neobsahuje žádné místo pro další náskres součásti nebo kdy už jsou všechny potřebné součásti rozmístěny, se takto nachystaný soubor uloží ve formátu nfd. Ten je následně načten do prostředí ovládacího panelu vodního paprsku (Obr. 3.2).



**Obr. 3.2** Ovládací panel firmy PTV s řídicím systémem Cnc886/Win

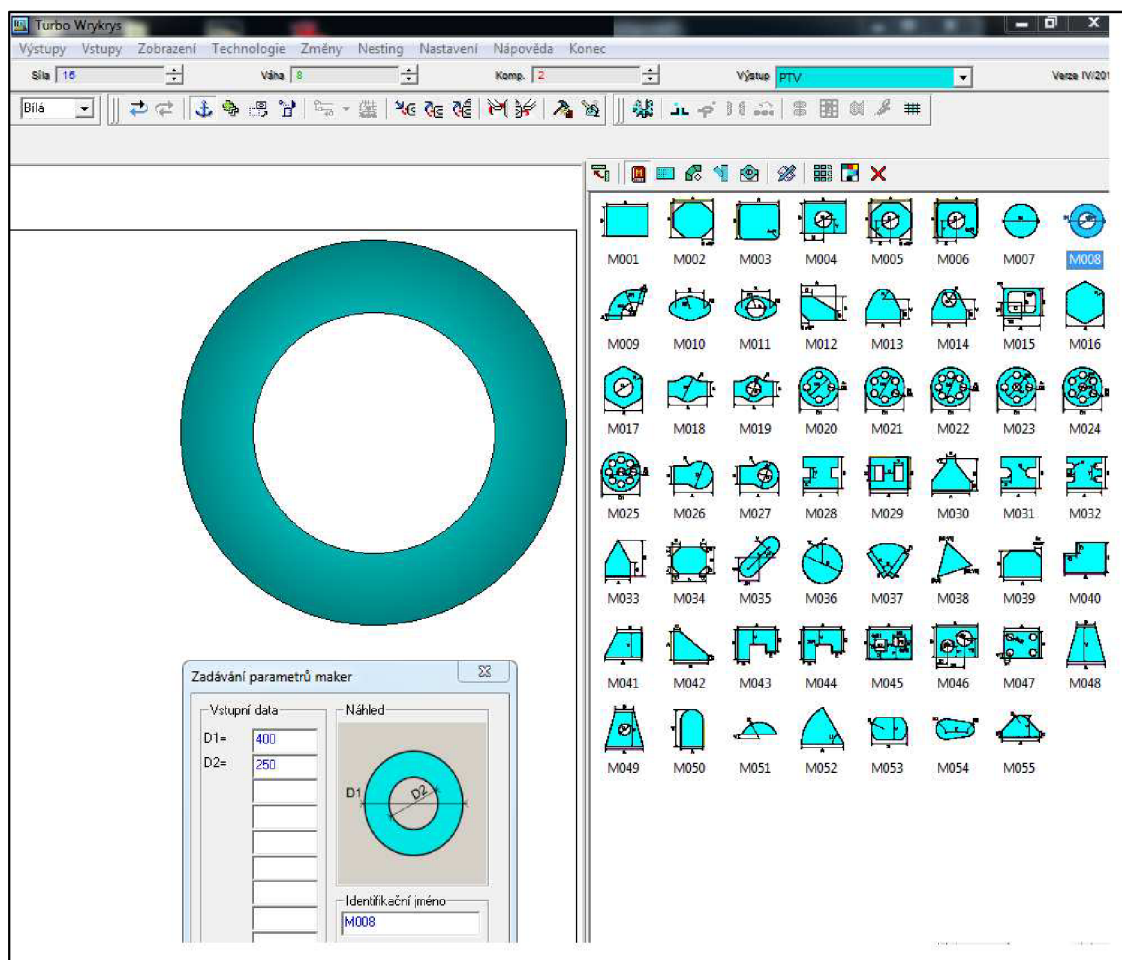
Zde se nastaví vstupní parametry pro proces řezání (druh materiálu, tloušťka, tlak multiplikátoru, množství abraziva, doba a typ průstřelu, atd.), dále se určí postup řezání a případně upraví požadavek na výstupní kvalitu povrchu řezu.

Možné způsoby zadávání dat:

- s využitím CAD systémů - formáty dwg převedené do formátu dxf,
- s využitím šablon (např. rozhraní softwaru typu Wrykrys - Obr. 3.3),
- ruční (nedoporučuje žádný výrobce).

Oproti metodě využívající CAD systémů, která byla popsána na začátku kapitoly, se metoda s využitím šablon obejde bez předřazeného CADovského souboru. Samotný CAM software má výrobcem programu přednastavené základní a nejvíce používané tvary (šablony - tzv. makra), které se dají rozměrově přizpůsobit.

Na Obr. 3.3 je přehled šablon využitelných u softwaru Turbo Wrykrys. Princip spočívá ve vybrání tvaru budoucí součástky. Následně jsou zadány hlavní rozměry tvaru, který je posléze softwarem vygenerován v měřítku 1:1. Zadávání tvarů pomocí této metody se však využívá sporadicky.



**Obr. 3.3** Využití šablon softwaru Turbo Wrykrys

Možné způsoby řízení výroby:

- manuální - na základě znalostí a především zkušeností s ovládním řezného procesu vodního paprsku je možné nastavit všechny parametry,
- poloautomatické - software na základě zadaných vstupních údajů vypočítá řezné podmínky. Avšak ty mohou být v reálném čase dle potřeby měněny,
- automatické - software vyhodnotí ze vstupních parametrů řezné podmínky a vyhodnotí optimální postup výroby.

Možné způsoby řízení a zadávání dat by se následně daly dělit podle výrobců jednotlivých softwarů. Ve výsledku však platí stejné výhody CAD/CAM technologií bez ohledu na výrobce softwaru.

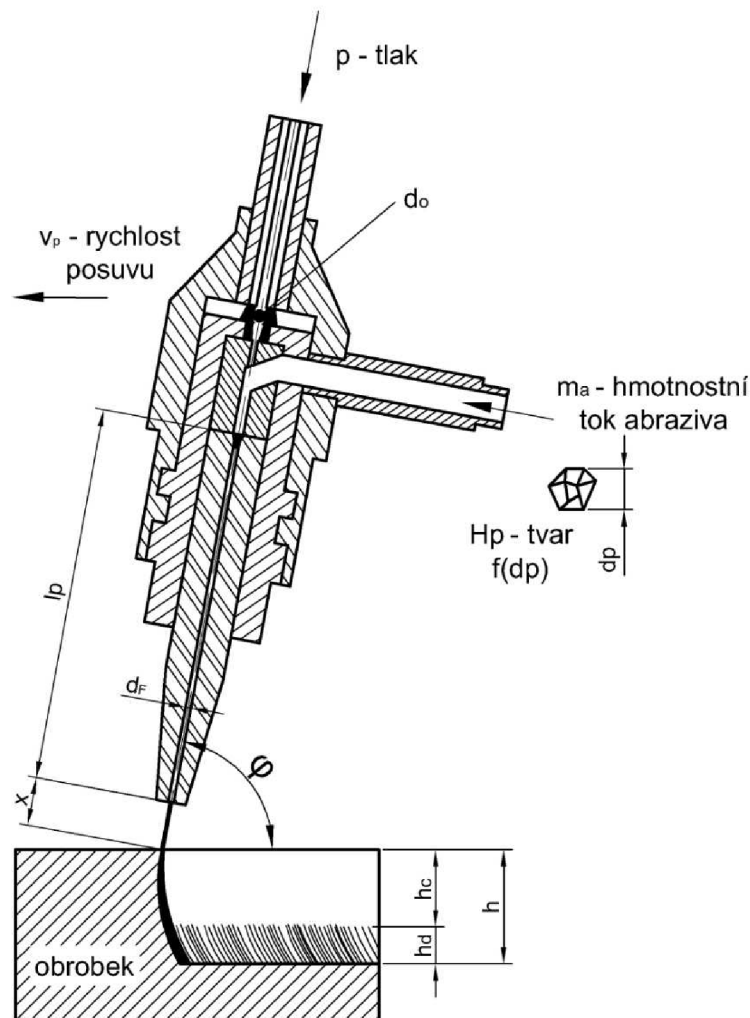


#### 4 VLIV VSTUPNÍCH PARAMETRŮ NA JAKOST POVRCHU A PŘESNOST OBRÁBĚNÍ

Celý systém technologie vodního paprsku závisí při tvorbě řezného nástroje a následném procesu řezání (Obr. 4.1) na celé řadě faktorů ovlivňující výslednou topografii povrchu a geometrii řezu.

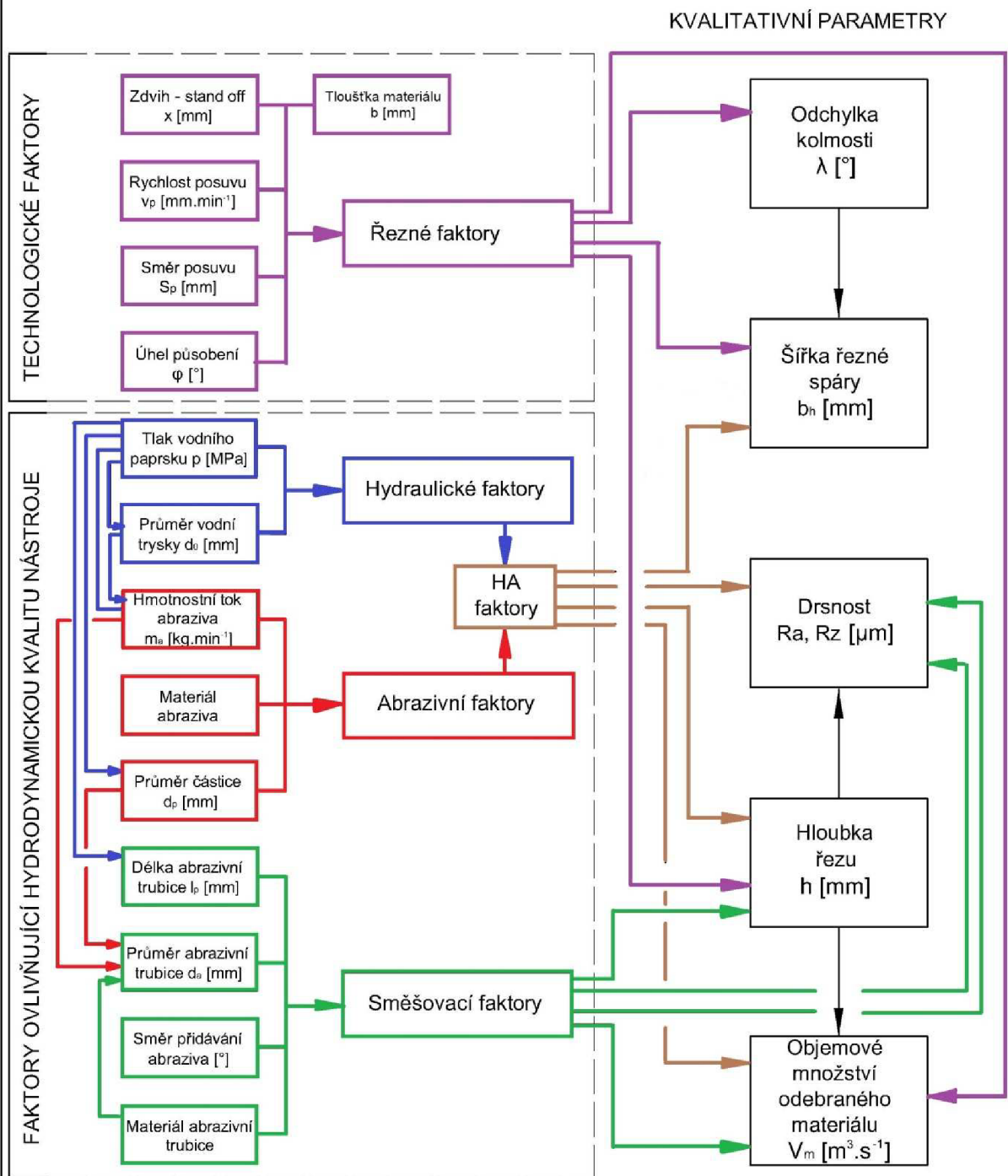
Faktory se z hlediska charakteristik závislostí dělí (Obr. 4.2) na [38]:

- **faktory přímé - technologické faktory**
  - řezné faktory (zdvih, rychlost posuvu, směr posuvu, úhel působení, tloušťka materiálu).
- **faktory nepřímé - faktory ovlivňující hydrodynamickou kvalitu nástroje**
  - hydraulické faktory (tlak čerpadla, tlak kapaliny, průměr vodní dýzy),
  - abrazivní faktory (hmotnostní tok abraziva, materiál abraziva, průměr částice),
  - směšovací faktory (délka a průměr abrazivní trubice, směr přidávání abraziva, materiál abrazivní trubice).



Obr. 4.1 Faktory AWJ ovlivňující kvalitu procesu dělení materiálu [38]

Zatímco většinu přímých faktorů ovlivnit nelze, vhodnou kombinací nastavení nepřímých faktorů docílíme požadované kvality řezu.

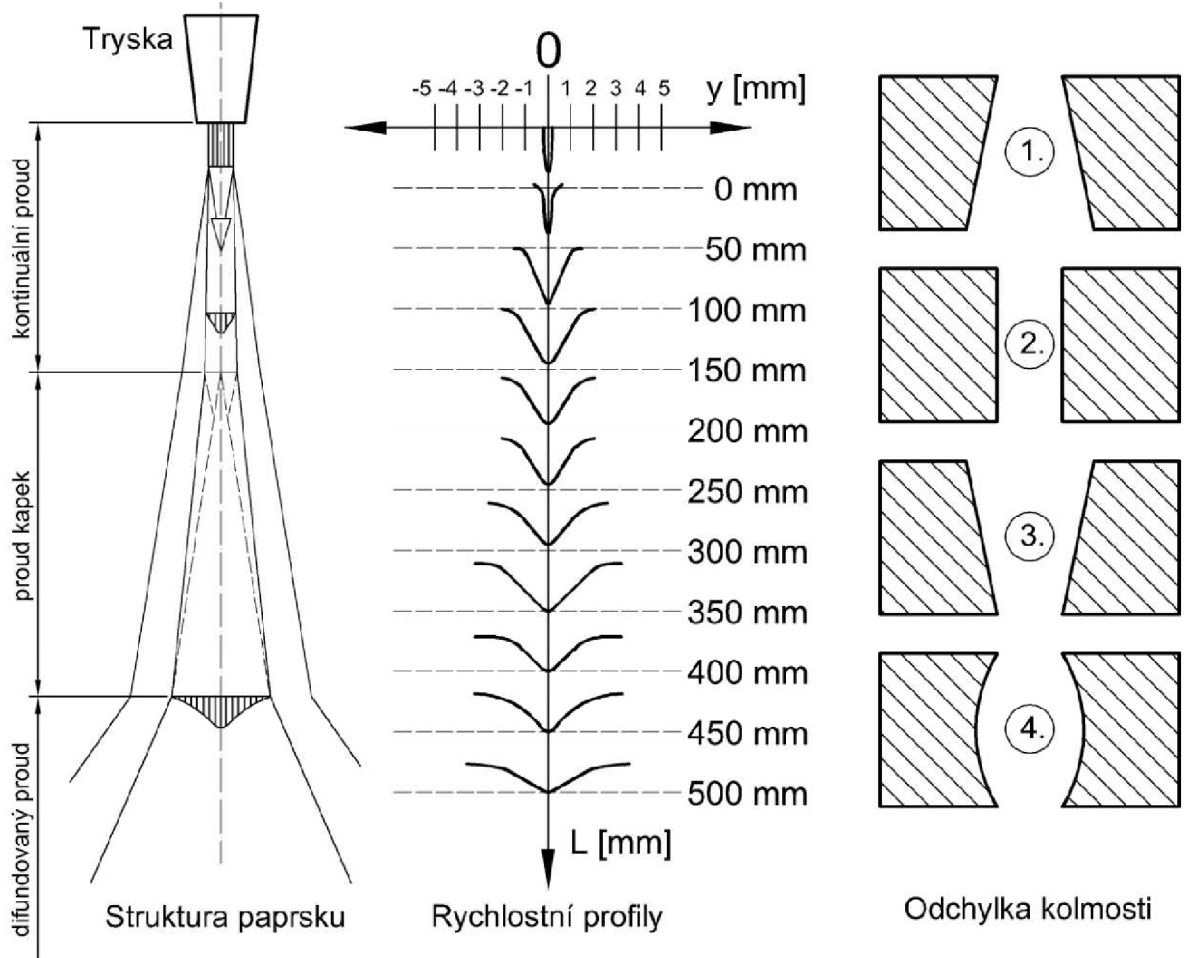


**Obr. 4.2** Grafické znázornění vzájemného působení faktorů na kvalitu obrobenej plochy

Kvalitu řezu určují kvalitativní faktory u kterých rozeznáváme: odchylku kolmosti, šířku a hloubku řezu, objemové množství odebraného materiálu a drsnost povrchu.

## 4.1 Odchylka kolmosti

Odchylka proudu od kolmého směru negativně ovlivňuje geometrii řezaných obrobků. Po výstupu proudu z dýzy dochází k prudkému uvolnění naakumulované energie do okolního prostředí. Původní soudržný (koherentní) proud má tendenci se rozpadat s přibývajícím vzdáleností od ústí dýzy. Úbytek soudržnosti se projevuje narůstající šířkou proudu a poklesem erozního výkonu a to v důsledku postupné ztráty kinetické energie a odporu, který klade řezný materiál. [2]



**Obr. 4.3** Struktura kapalinového proudu a geometrie řezné mezery [2; 39]

Obrysový tvar je výsledkem práce vysokorychlostního proudu (Obr. 4.3). Přičemž nástroj přirozeně kopíruje svůj postupně se rozšiřující tvar do řezaného materiálu v rámci jedné mezery. Charakteristika řezné mezery určuje dosáhnutou kvalitu řezné plochy. [2]

V závislosti na zúžení stěn obrobeneé plochy při technologii dělení vodním paprskem zjišťujeme odchylku od kolmosti.

Rozeznáváme pět základní typů odchylek kolmosti (Obr. 4.3) [2]:

- **Reverzní odchylna kolmosti (1.)** - případ, kdy je horní erozní báze užší než dolní. Tento typ vzniká u měkkých materiálů, které jsou náchylnější na erozi. Nebo v případě, kdy je dělení velmi pomalé.
- **Ideální řez (2.)** - vznikne na základě správného nastavení vstupních parametrů
- **Odchylna tvaru V (3.)** - případ, kdy je v horní část erozní báze širší než v dolní. Vzniká v důsledku delšího působení proudu, což má za následek větší erozní působení v horní části obrobku.
- **Soudková odchylna kolmosti (4.)** - případ, kdy je střed řezu širší než je horní a dolní erozní báze. Vzniká při obrábění velmi hrubých obrobků.
- **Kosodélníková nebo lichoběžníková odchylna** - ve své podstatě se jedná o klasickou V odchylnu, která je nakloněná v důsledku špatného úhlu řezací hlavy.

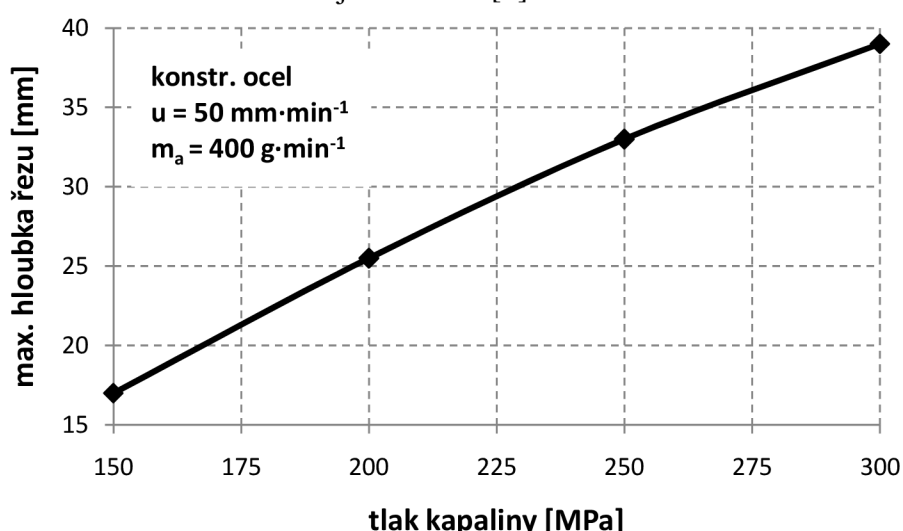
Odchylny kolmosti patří mezi základní makro-geometrické znaky obrobceho povrchu.

## 4.2 Hloubka řezu

Hloubka řezné plochy a její kvalita jsou parametry na sobě technologicky závislé. Charakterizují účinky působení vodního paprsku na řezný materiál. Do této skupiny se dále řadí šířka řezné mezery, přesnost rozměrů a další.

### Maximální hloubka řezu

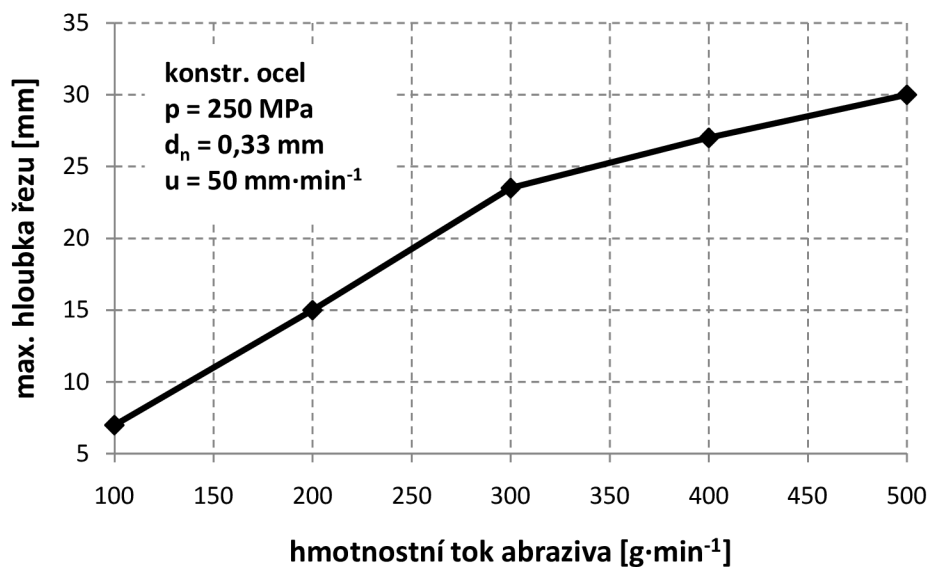
Pro získání maximální hloubky řezu, tedy hloubky, do které je schopen abrazivní vodní paprsek proniknout, byly provedeny zkoušky s postupnou změnou tlaku kapaliny, hmotnostního toku abraziva a dále řezné rychlosti. Vliv tlaku kapaliny na maximální hloubku řezu znázorňuje Obr. 4.4. [4]



**Obr. 4.4** Vliv tlaku kapaliny na hloubku řezu [4]

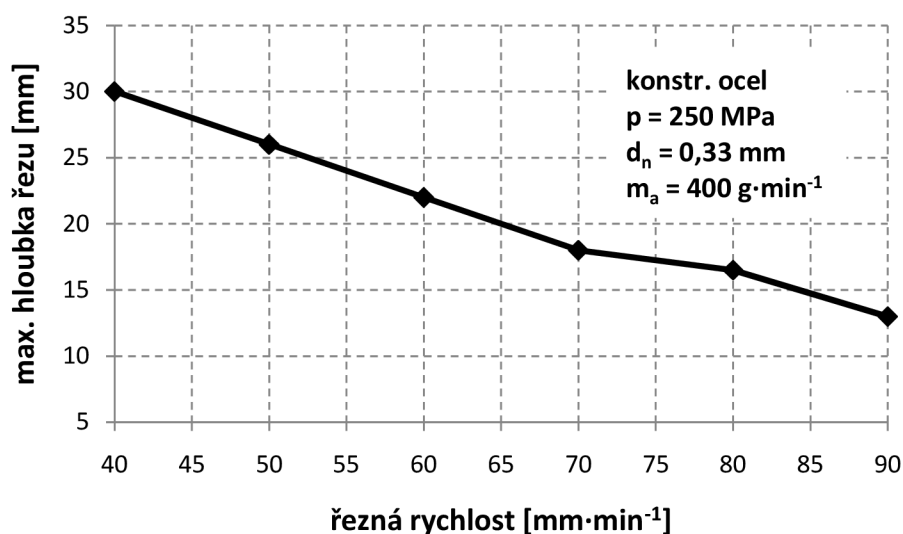
Z Obr. 4.4 vyplývá, že závislost maximální hloubky řezu na tlaku kapaliny je takřka lineární. Tedy zvýšením tlaku docílíme větší hloubky řezu. Minimální kritický tlak

kapaliny  $p_c$  získaný lineární interpolací křivky na Obr. 4.4 je rovný 25 MPa. Hloubka řezu je při tomto tlaku rovna 0 mm. Následným zvyšováním tlaku tak narůstá maximální hloubka řezu podle dané křivky. [4]



**Obr. 4.5** Vliv hmotnostního abrazivního toku na hloubku řezu [4]

Z Obr. 4.5 je zřejmé, že zvýšením hmotnostního toku abraziva dosáhneme větší hloubky řezu. Do hloubky cca 24 mm je křivka pro konstrukční ocel strmější, tedy hmotnostní tok abraziva má větší vliv na dosažení maximální hloubky řezu. Pro větší hloubku řezu než 24 mm u konstrukční oceli ztrácí hmotnostní tok abraziva dle Obr. 4.5 svou strmost, tedy i velikost vlivu na hloubku řezu.



**Obr. 4.6** Vliv řezné rychlosti na hloubku řezu [4]

Zvyšováním řezné rychlosti se snižuje hloubka řezu (Obr. 4.6). Je to z důvodu poklesu energie AWJ potřebné na generování jednotkové délky řezné drážky. Teoretická řezná

rychlost, při které nedochází k tvorbě řezné drážky ( $h = 0$  mm) je rovna  $125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . [4]

### Určení maximální hloubky výpočtem

Matematické určení hloubky popsal Hashish [41] na základě makroskopického pohledu na řezný proces vodního paprsku. Odvodil zjednodušené vztahy na výpočet hloubky řezu pro kovové materiály.

Za předpokladu, že nedojde k prořezání materiálu je celková hloubka [4]:

$$h = h_c + h_d \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

Hloubka  $h_c$  je definovaná [4]:

$$h_c = \frac{\frac{v_a \cdot d_j}{C_k}}{\left( \frac{\pi \cdot \rho_p \cdot u \cdot d_j^2}{14 \cdot m_a} \right) + \frac{v_e}{C_k}} \quad [\text{m}] \quad (20)$$

Hloubka  $h_d$  je definovaná jako [4]:

$$h_d = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_j \cdot \sigma \cdot u}{2 \cdot C_1 \cdot m_a \cdot (v_a - v_c)^2} + \frac{C_f \cdot v_a}{d_j \cdot (v_a - v_c)}} \quad [\text{m}] \quad (21)$$

V Tab. 4.1 jsou zobrazeny celkové výsledky výpočtů maximálních hloubek řezu a jejich porovnání s hodnotami skutečnými podle Krajného [4].

	$h_c$ [mm]	$h_d$ [mm]	$h$ [mm]	$h_{\text{skut}}$ [mm]
$d_n = 0,406 \text{ mm}; m_a = 400 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}; u = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$				
150 MPa	3,3	14,1	17,4	18
200 MPa	3,8	20,5	24,3	26
250 MPa	4,3	26,5	30,8	33
300 MPa	4,8	32,4	37,2	39
$d_n = 0,330 \text{ mm}; p = 250 \text{ MPa}; u = 50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$				
100 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	3,3	7,7	11	7
200 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	3,8	14,2	18	14
300 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	4	19,7	23,7	22
400 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	4,2	24,5	28,7	27
500 $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	4,8	28,5	33,3	32

**Obř. 4.7** Výsledek výpočtu maximálních hloubek řezu [4]

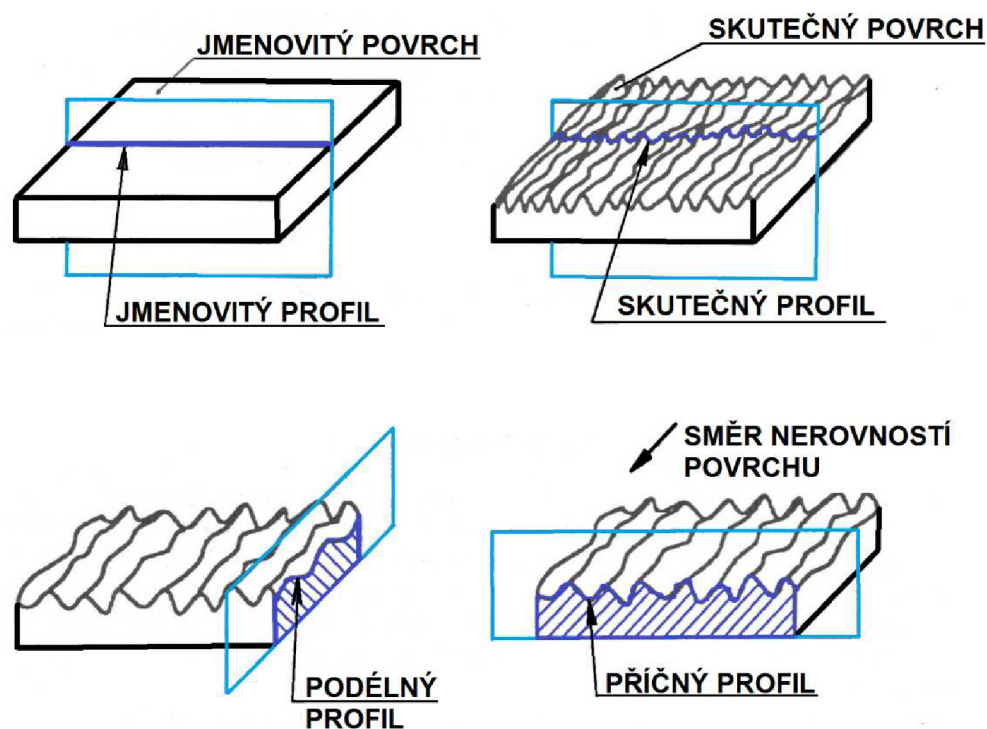
### 4.3 Drsnost povrchu

Jednou z kvalitativních metod hodnocení výsledného obrobku je měření drsnosti. Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, ke kterým dochází při výrobním procesu. Mezi drsnost se nepočítají vady povrchu (náhodné nepravidelné nerovnosti). V závislosti na směru nerovností se drsnost posuzuje v příčném a podélném směru. Podle normy ISO ČSN 1302:1992 se drsnost povrchu uvádí na výrobních výkresech pomocí předepsaných symbolů. Norma rozeznává tři základní výškové charakteristiky drsnosti [42; 43]:

- $R_a$  - střední aritmetická úchylka -  $\mu\text{m}$ ,
- $R_y$  - největší výška profilu -  $\mu\text{m}$ ,
- $R_z$  - výška nerovnosti profilu -  $\mu\text{m}$ .

Základními pojmy v oblasti drsnosti povrchu jsou [43]:

- Jmenovitý povrch - jedná se o ideální povrch součástky, který je určen technickým výkresem,
- Skutečný povrch - ohraničuje povrch tělesa,
- Jmenovitý profil - profil vytvořený na jmenovitém povrchu,
- Skutečný profil - profil vytvořený skutečném povrchu,
- Podélný profil - profil vytvořený řezem povrchu rovinou položenou ve směru nerovností,
- Příčný profil - vytvořený řezem povrchu kolmou rovinou ke směru nerovností [43].

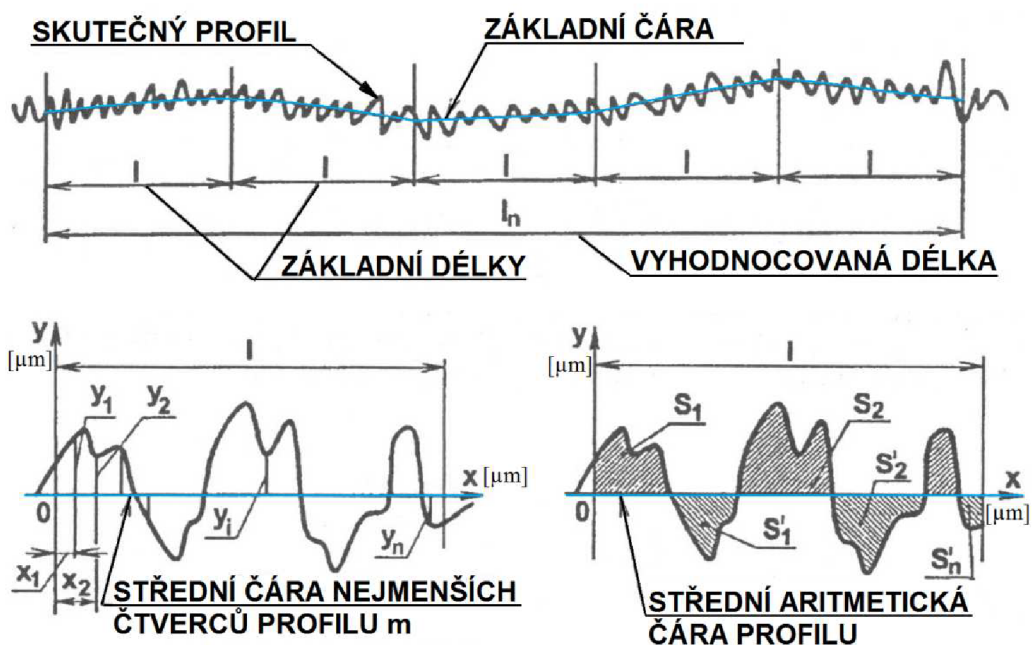


Obr. 4.8 Profily drsnosti [43]

Základní charakteristiky drsnosti povrchu se definují v rozsahu základní délky (konkrétní hodnoty v normě). Vyhodnocovaná délka  $l_n$  obsahuje jednu či více základních délek  $l$ . Základní čára pak rozděluje profil tak, že v rozsahu základní délky platí pro střední čáru nejmenších čtverců rovnice (22) a pro střední aritmetickou čáru profilu rovnice (23). [43]

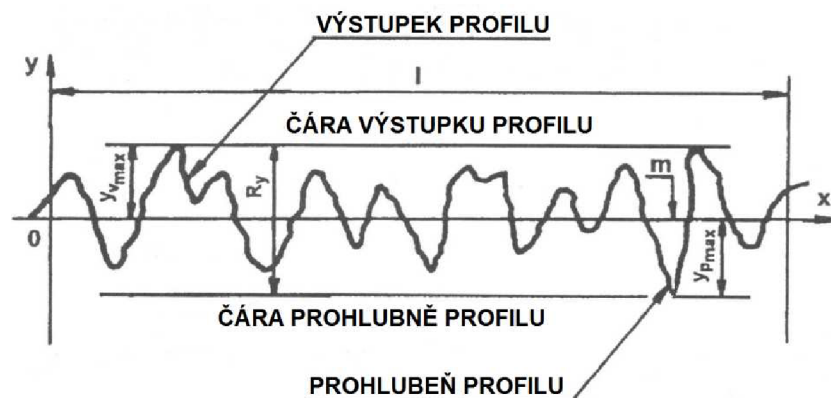
$$\int_0^l y^2 dx = \min \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n S'_i \quad (23)$$



[3]

Největší výška profilu ( $R_y$ ) je maximální vzdálenost mezi čarou výstupku a prohlubní profilu v rozsahu základní délky  $l$ . [43]

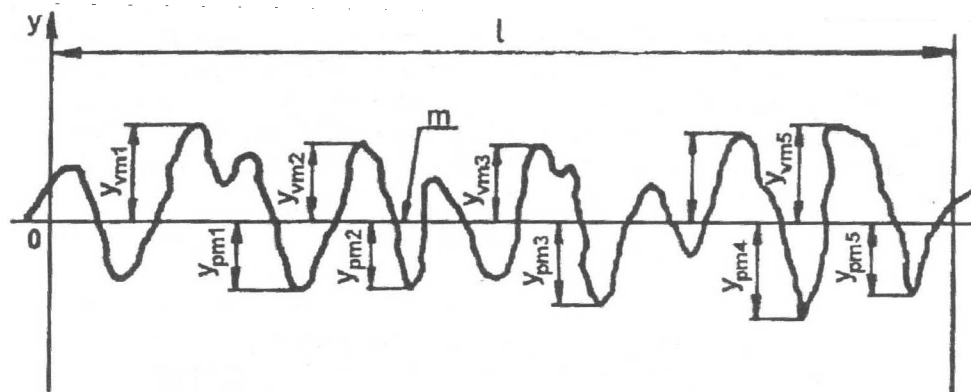


[3]



Výška nerovnosti profilu ( $R_z$ ) je vyjádřena (24) z absolutních hodnot výšek pat nejvyšších výstupků profilu  $y_{vm}$  a hloubek pat nejhlubších prohlubní profilu  $y_{pm}$  v rozsahu základní délky  $l$ . [43]

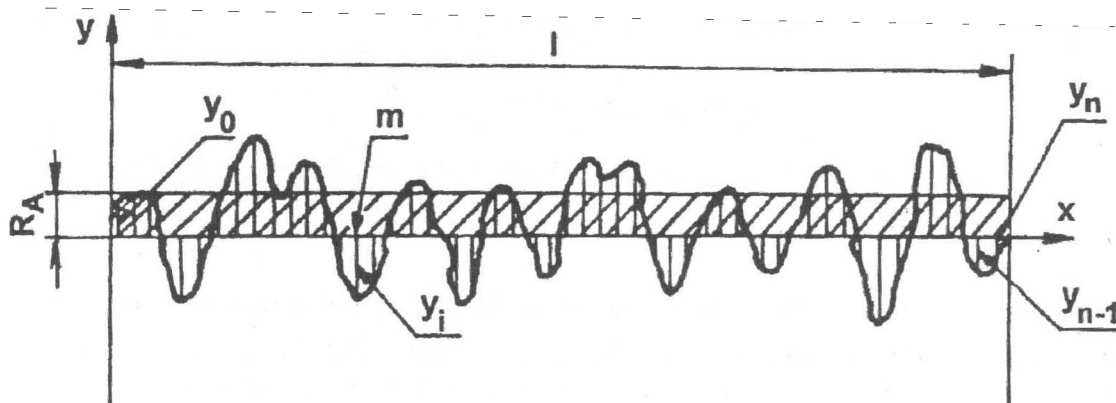
$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{vmi}| + \sum_{i=1}^n |y_{pmi}|}{n} \quad [\mu\text{m}] \quad (24)$$



**Obr. 4.11** Výška nerovností profilu -  $R_z$  [43]

Střední aritmetická odchylka profilu ( $R_a$ ) je střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu  $y$  při  $n$  vybraných bodech profilu na základní délce.

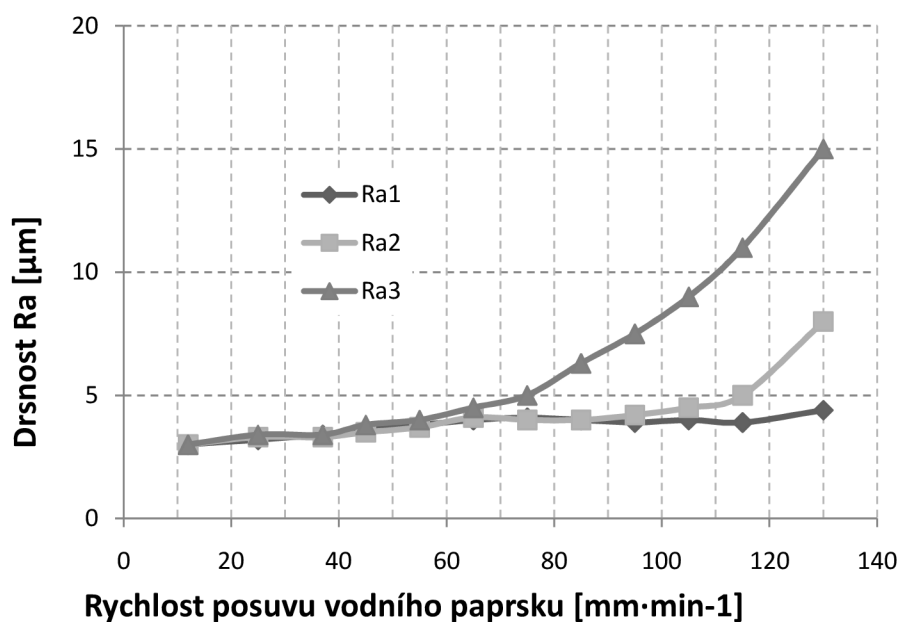
$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |y| dx \approx \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |y_i| \quad [\mu\text{m}] \quad (24)$$



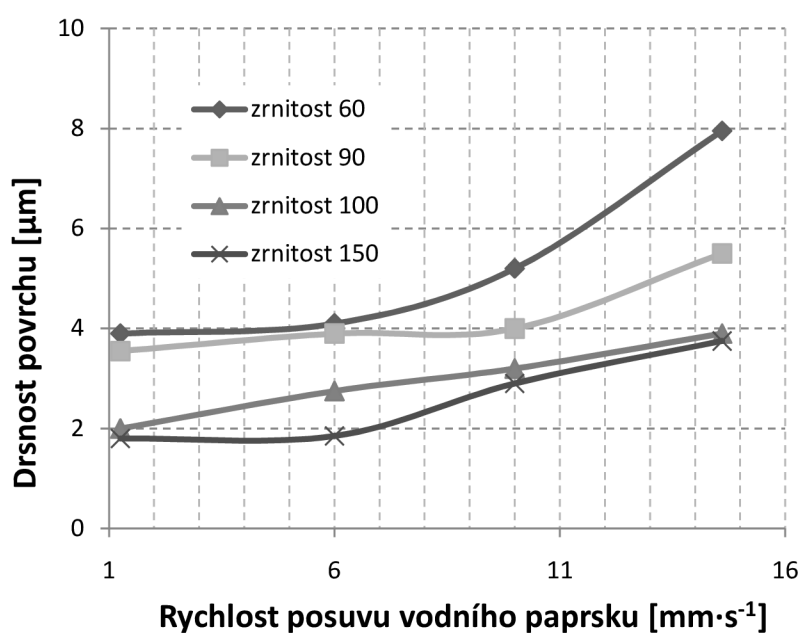
**Obr. 4.12** Střední aritmetická odchylka profilu -  $R_a$  [43]

Střední aritmetická odchylka profilu má největší vypovídací schopnost. A právě z tohoto důvodu se při měření zaměřujeme na hodnotu  $R_a$ .

Čím je nižší naměřená hodnota Ra (případně Rz a Ry), tím kvalitnějšího (hladšího) povrchu se při obrábění dosáhlo. Závislosti na některé vstupní parametry ukazují Obr.2.7.4, Obr. 4.13 a Obr. 4.14.



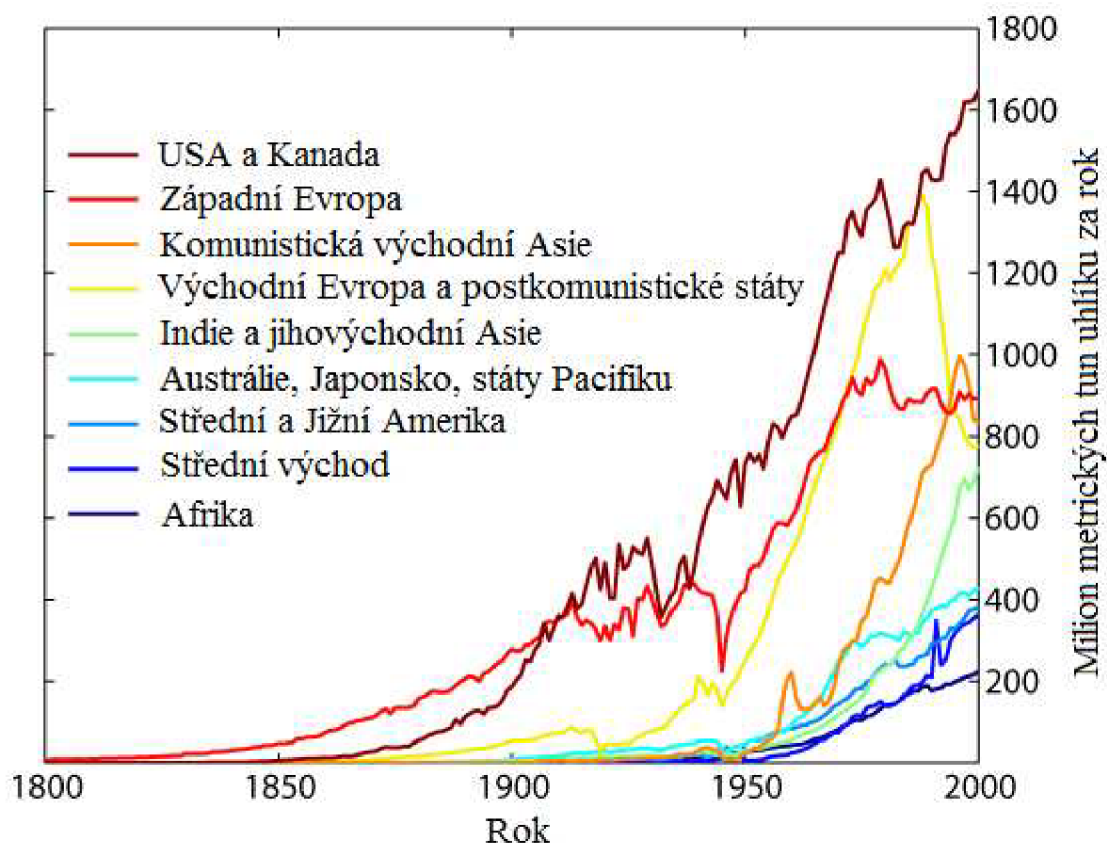
**Obr. 4.13** Závislost drsnosti povrchu na změně rychlosti posuvu vodního paprsku kde Ra1 = horní část řezu, Ra2 = střední část řezné plochy, Ra3= spodní část řezu. Při podmínkách řezání: tlak vody 317,4 MPa; řezná hloubka 12,7 mm; průměr dýzy 0,286 mm; zrnitost brusiva 80; rychlost toku brusiva 199,5 g·min<sup>-1</sup>; stand off 1,5 mm [7]



**Obr. 4.14** Vliv velikosti částic brusiva na drsnosti povrchu. Podmínky řezání:  $m_a=7,6$  g·s<sup>-1</sup>; průměr dýzy 0,330mm; tlak = 311MPa; granát; obrobek: Inconel 718 [7]

## 5 HLEDISKO EKOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

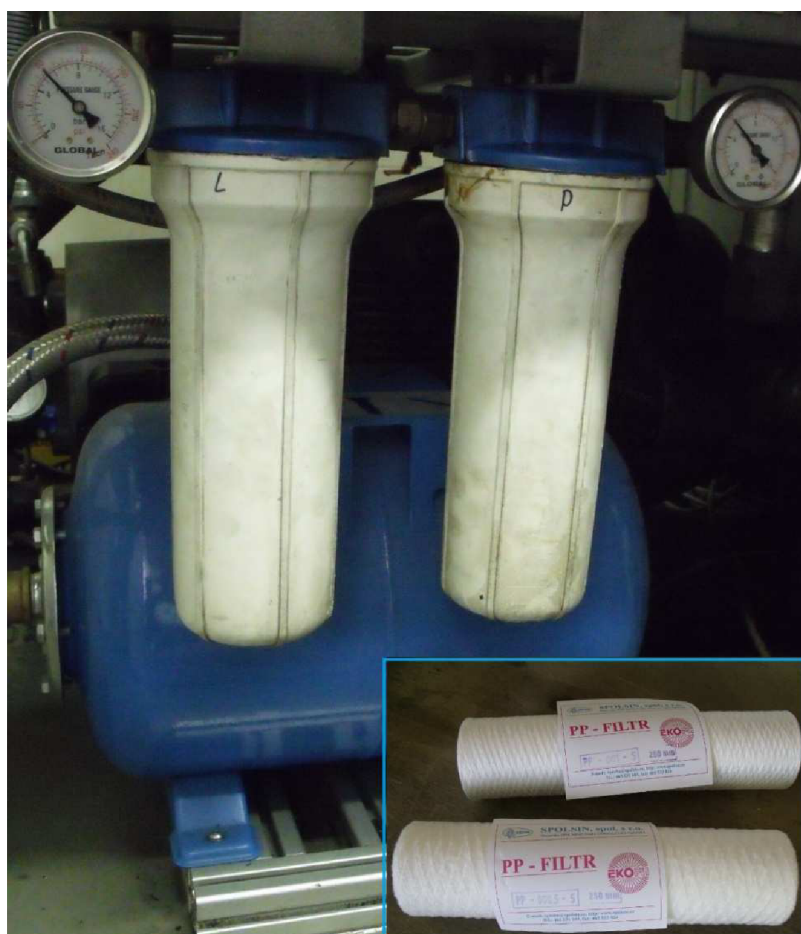
Na konci 18. století vypukla průmyslová revoluce ve Velké Británii. Od té doby se začalo čím dál více využívat strojů na úkor lidské práce. Výhodou byla rostoucí produkce a s ní spojená životní úroveň. Na druhou stranu však s prvními stroji nastává problém s čistotou prostředí v bezprostřední blízkosti továren a ve městech. Působení průmyslu na přírodu mělo za následek zhoršení celého ekosystému Země. Proto se v prosinci 1997 dojednala v japonském městě Kjóto rámcová úmluva OSN o klimatických změnách. Průmyslové země se v ní zavázaly snížit emise skleníkových plynů (oxidu uhličitého -  $\text{CO}_2$ , metanu -  $\text{CH}_4$ , oxidu dusného -  $\text{N}_2\text{O}$ , hydrogenovaných fluorovodíků - HFCs, polyfluorovodíků - PFCs a fluoridu sírového -  $\text{SF}_6$ ) o 5,2 %. Evropská Unie zavedla ekologická pravidla, která jsou dále zpřísnována a směřují ke snižování skleníkových plynů a dalších přírodě nebezpečných látek. Zavádí se pravidla a výhody pro používání obnovitelných zdrojů, recyklovatelných materiálů a technologií minimálně zatěžujících přírodu.



Z tohoto pohledu se využití technologie kapalinových paprsků ve výrobních procesech ukazuje jako ideální řešení. Celá technologie kapalinových paprsků se označuje za technologii ekologickou.

Důvody jsou následující:

- nevznikají žádné spaliny při procesu řezání,
- za pomoci filtrů (Obr. 5.2) a dalších prvků v systému může být voda recyklována,
- v případě abrazivních částic s kubickou mřížkou nedochází k otupení hran zrna a samotné abrazivo může být znovu recyklováno,
- díky řídicímu systému, využívání maximální plochy polotovarů a minimální tloušťce řezného paprsku dochází k velké úspoře materiálu (velká redukce odpadu),
- vysoká energetická účinnost (až 85 % oproti např. laseru 10 %),
- řezání vodním paprskem minimalizuje vznik polétavého prachu z děleného materiálu,
- v případě použití řezného média H<sub>2</sub>O nehrozí zamoření okolí (kontaminace) jako tomu může být při chemickém nebo elektro-chemickém obrábění,
- ušetření nákladů na likvidaci nebezpečného odpadu,
- u technologie vodního paprsku vzniká druhotný odpad (prořezaný podpurný rošt) - jedná se však o ocel, která je recyklovatelná.



**Obr. 5.2** Vodní filtry - umožňují recyklaci vody

## 6 KOMPLETNÍ ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE PRO KONKRÉTNÍ SOUČÁST

Praktická část diplomové práce vychází ze znalostí získaných ve výrobním areálu firmy Fontana R, s.r.o. v Říčanech u Brna (Obr. 6.1). Firma Fontana R je výrobce zařízení pro čistírny odpadních vod. Její hlavní sídlo je v budově IBC Brno, ve které se nachází kanceláře vedení, sekretariátu a konstrukce, čítající dohromady 15 zaměstnanců. Ve výrobním areálu pak pracuje zhruba 65 zaměstnanců.



**Obr. 6.1** Výrobní areál firmy Fontana R

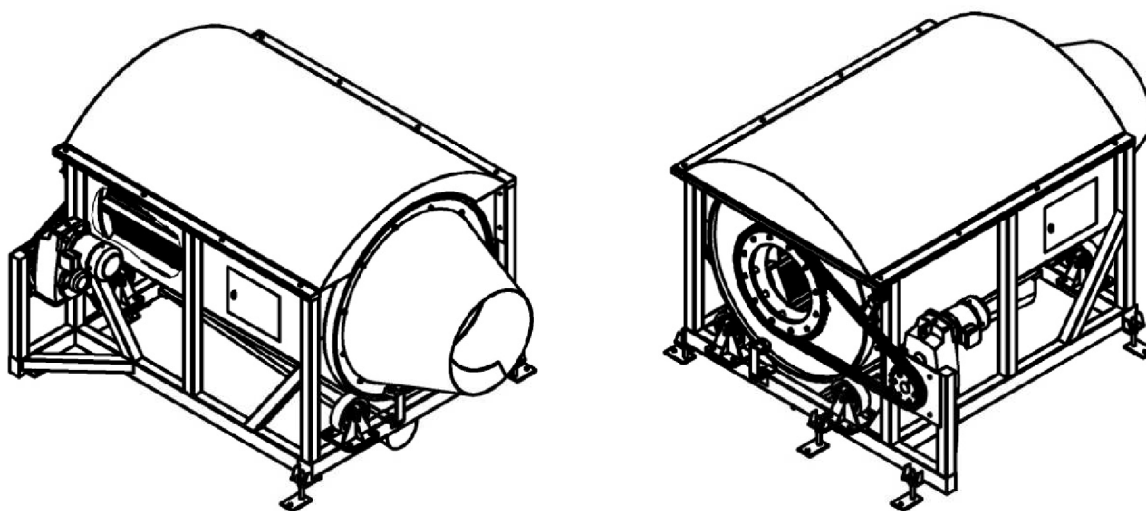
Firma Fontana R odebírá a následně zpracovává cca 310 tun hutního materiálu ročně. Ve většině případů se jedná o nerezovou ocel typu DIN 1.4301, ze které se zhotovují zařízení sloužící k mechanickému čištění odpadních vod.

Firma byla založena v roce 1991, přičemž až do roku 2008 disponovala výhradně konvenčními obráběcími stroji. V roce 2009 byl zakoupen vodní paprsek od firmy PTV, s.r.o.

Fontana R používá technologii vodního paprsku pro výrobu tvarově složitějších součástí a dále pro řezání materiálů o tloušťce větší než 8 mm (plechy o tloušťce do 8 mm jsou stříhány). Nejčastěji používané tabule jsou formátu 1000 mm x 2000 mm, 1250 mm x 2500 mm a 1500 mm x 3000 mm. Ve většině případů se jedná o tabule do tloušťky 20 mm. Obrobky vyrobené technologií WJM či AWJ jsou skoro vždy svařovány a obráběny. Po kontrole svarů se hotové výrobky pasivují. Následně se na základě případného přání zákazníka barví. Firma ročně vyrobí zhruba 500 strojů z nichž 35 % výrobků směřuje do zahraničí.

## 6.1 Technologický a výrobní postup řetězového kola

V roce 2011 obdržela firma Fontana R objednávku na zařízení s názvem „Prací a třídící buben“ (Obr. 6.2). Toto zařízení slouží k odseparování hrubé fáze od fáze jemné. Ze zásobníku na 10 m<sup>3</sup> suspenze charakteru odpadní vody (plněný fekálními vozy) se pomocí šnekového dopravníku přivádí veškerá hydrosměs do „pracího a třídícího bubnu“. Za kontinuálního otáčení bubnu prochází jemná frakce (částice do velikosti 10 mm) skrze bubnové síto. Zbývá hrubá frakce je dopravována pomocí spirálovitě rozmístěných elementů uvnitř bubnu k místu výstupu na opačné straně bubnu. Zde vypadá do násypky šnekového dopravníku, který dopraví hrubou a odvodněnou frakci do kontejneru. Jemná fáze dále pokračuje na další sekce čištění na čistírně odpadních vod.



**Obr. 6.2** Třídící a prací buben firmy Fontana R  
axonometrické pohledy vytvořené v programu AutoCAD Inventor

Pro cíl diplomové práce „Kompletní řešení technologie pro konkrétní součást“ bylo vybráno právě toto zařízení s ohledem na nadstandardně velká řetězová kola, vyráběná z tabule o tloušťce 25 mm.

### 6.1.1 Polohování polotovaru

Polotovarem řetězových kol je tabule o rozměrech P25-1000x2000 z chrom-niklové austenitické nestabilizované oceli typu ČSN 10088-1 1.4301 (X5CrNi 18-10) jejíž vlastnosti jsou [45]:

- legování: Cr 17 ÷ 19,5 %; Ni 8 ÷ 10,5; C < 0,07 %,
- pevnost v tahu Rm 520 ÷ 720 MPa,
- mez kluzu Rp 0,2, minimálně 210 MPa,

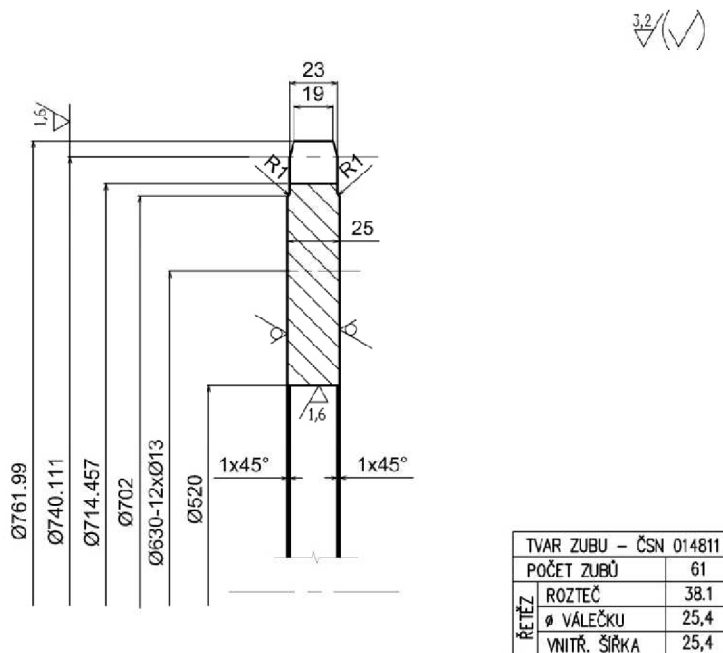
- tažnost A 80 mm, minimálně 45 %
- žíhací teploty 1000 ÷ 1100 °C, chlazení vodou, intenzivně vzduchem,
- nemagnetická,
- nekalitelná,
- sklon ke zpevňování při tažení za studena nebo při třískovém obrábění (zpevnění vzniká přetvořením austenitu na deformační martenzit, který zvýší pevnost, sníží tažnost a způsobí magnetovatelnost),
- odolnost proti korozi (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry),
- svařitelná, v oblasti svaru náchylná k mezikystalické korozi. U průvarů nad tloušťku 5 mm nutno svařenec žíhat,
- celková hmotnost tabule cca 400,0 kg.



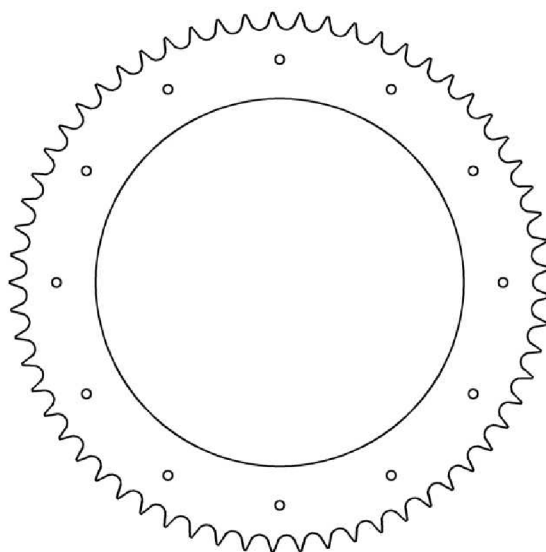
**Obr. 6.3** Ukládání polotovaru na stůl 3000x2000 mm (na podpůrné rošty) s následným polohováním polotovaru k dorazům a nastavením nuly souřadnicového systému v řídicím systému

### 6.1.2 Vytvoření CNC programu

Jelikož řezaný tvar obrobku vychází z technického výkresu, je nutné v prvním kroku vytvořit řezný obrys, který je následně uložen ve formátu dxf. Především u ozubených a řetězových kol se liší technický výkres (uložen ve formátu dwg a v papírové formě zaslán do výrobního areálu) od výkresu obrysu pro proces řezání (formát dxf zaslán emailem a uložen do databáze řezaných výrobků). Zatímco program vodního paprsku potřebuje přesný výkres obrysu (nárys) v měřítku 1:1 (Obr. 6.5), výkres řetězového kola se podle norem kreslí v bokorysu (Obr. 6.4) a není tedy použitelný pro řezací plán.



**Obr. 6.4** Výkres řetězového kola F 74 13332 (nepoužitelný pro následné převedení na CNC kód vodního paprsku)

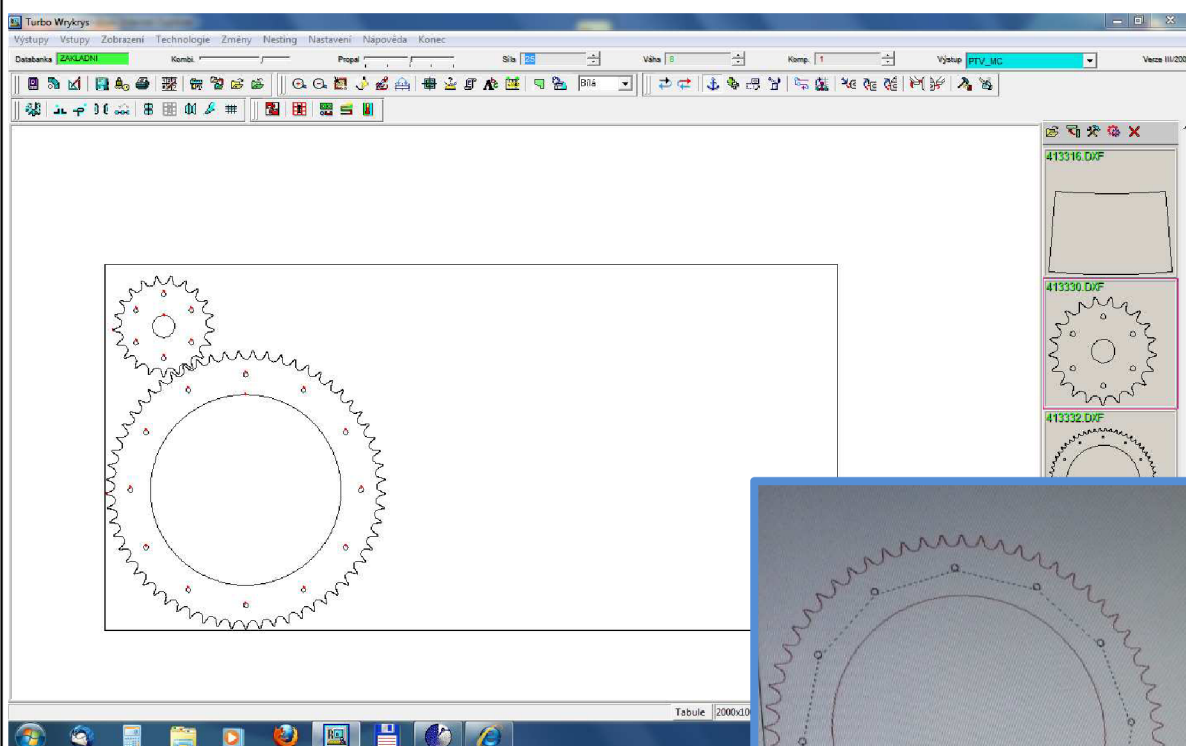


**Obr. 6.5** Tvar řetězového kola v programu AutoCAD LT 2011  
Dwg výkres se převede do formátu dxf.



V programu MiniWRYKRYYS (Obr. 6.4) obsluha rozmístí v uživatelském rozhraní všechny součásti (dvě řetězová kola), uvažované pro řezání na daný polotovar (P25-1000x2000). Vzdálenost mezi jednotlivými obrobky je volitelná. V tomto případě je minimální vzdálenost od okrajů nastavena na 3 mm od okrajů plechu a 3 mm mezi jednotlivými řetězovými koly. Následuje nastavení pořadí řezu jednotlivých hran. Jako první je zvoleno velké řetězové kolo (výkres F 74 13332). Pořadí řezání:

- 12x otvor  $\varnothing 13$  (pro 12 ks šroubu M12x70),
- vnitřní otvor průměru  $\varnothing 520$  mm (bude následně obrobeno na  $\varnothing 510$  mm horizontální vyvrtávačkou),
- 61 zubů (roztečná kružnice  $D = 740$  mm; hlavová kružnice  $D_a = 762$  mm).



**Obr. 6.6** Prostředí CAM softwaru Turbo Wrykrys. Rozmístění ozubených kol s následným určením postupu řezání.

Směr řezání vnitřního průměru  $\varnothing 520$  mm je proti směru hodinových ručiček zatímco řez zubů probíhá po směru hodinových ručiček. Je to z důvodu kompenzace nepřesností vedoucí k co nejbližšímu zachování rozměrů. Následuje řezání menšího řetězového kola. Se stejným pořadím řezání:

- 6x otvor  $\varnothing 13$ ,
- vnitřní otvor průměru  $\varnothing 60$  mm,
- 21 zubů.

### 6.1.3 Nastaveních řezných podmínek

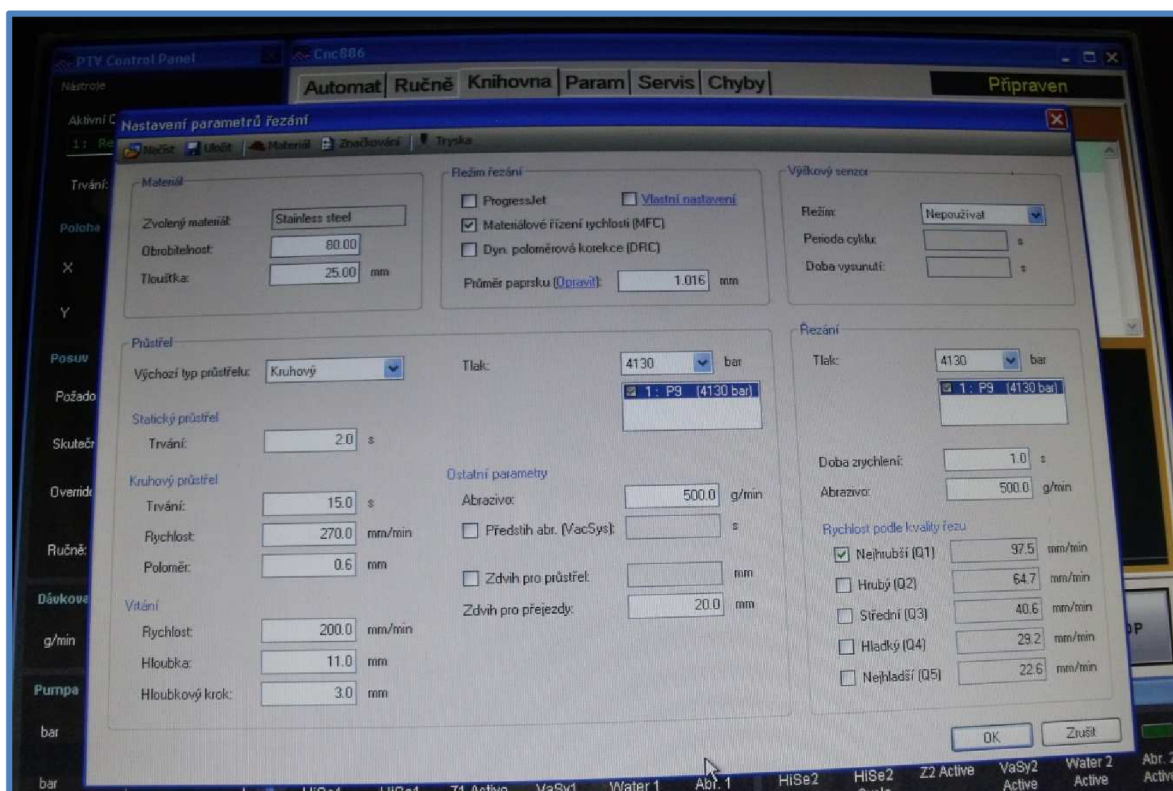
Na základě vstupních parametrů se volí vstupní parametry pro samotný proces řezání. Pro velké řetězové kolo ( $z = 61$ , výkres F 74 13332) se nastavují parametry obecně pro všechny řezané hrany.

V softwaru od firmy PTV se nastavují řezné podmínky v uživatelském okně „Nastavení parametrů řezání“. Na základě zvoleného materiálu a tloušťky se software pomocí programu PTVcalc přepočítá **obrobitelnost polotovaru**:

- zvolený materiál: stainless steel,
- tloušťka: 25 mm,
- vypočítaná obrobitelnost: 80.

Jelikož se jedná o materiál velké tloušťky je nutné zvolit **výchozí typ průstřelů**:

- kruhový průstřel
- doba trvání průstřelu: 15 s; následně snížen na 13 s,
- rychlost:  $270 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- poloměr průstřelu: 0,6 mm.



Obr. 6.7 Nastavení parametrů řezání

Tlak je zvolený maximální možný, tedy 4130 bar. Vycházející z **parametrů vysokotlakého čerpadla** (Obr. 6.8):

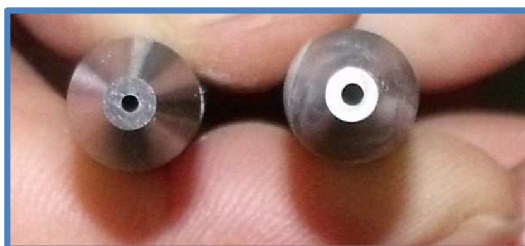
- vysokotlaké čerpadlo JETS - 3.8/60-COMPACT,
- celkový příkon 39,3 kW; 3x400V/230V; 50 Hz,
- maximální pracovní teplota oleje + 52°C,

- maximální výstupní tlak vody 4130 bar,
- maximální množství vody pro řezání  $3,8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- minimální tlak vstupní vody 3,5 bar, maximální 6 bar,
- pracovní tlak oleje 215 bar,
- stupeň filtrace řezací vody  $1 \mu\text{m}$  a  $0,5 \mu\text{m}$ ,
- náplň hydraulického oleje 160 litrů.



**Obr. 6.8** Vysokotlaké čerpadlo JETS - 3.8/60-COMPACT

Pro dosažení objektivnějšího výstupu kvality vodního paprsku byla před řezným procesem vyměněna zaostřovací trubice abrazivní hlavy (Obr. 6.9).



**Obr. 6.9** Nová zaostřovací trubice (vlevo), stará zaostřovací trubice

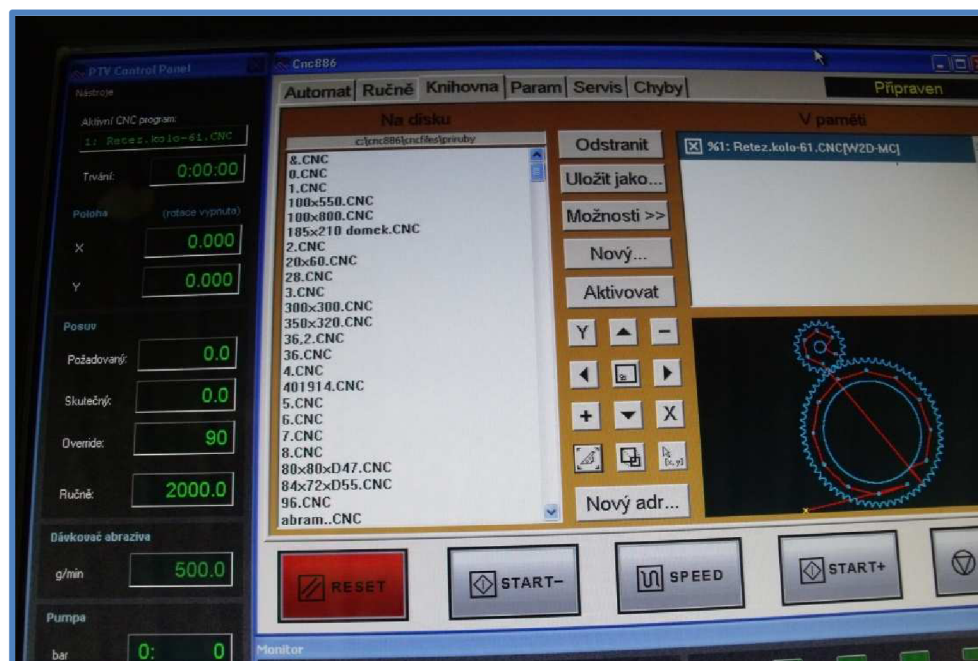
**Nastavení ostatních parametru:**

- abrazivo: doporučené dávkování firmou PTV je  $400 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ; na základě zkušeností z provozu se ve firmě Fontana R dávkuje u obvyklých tloušťek plechů (tl.10 mm až 15 mm). Pro ozubená kola bylo zvoleno dávkování  $500 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- průměr abrazivní dýzy 1,016 mm,
- zdvih pro přejezdy: 20 mm.

**Rychlost podle kvality řezu:**

V kapitole 2.4.1 byly popsány dosažitelné kvality povrchu řezu v rozmezí Q1 (nejhorší) až Q5 (nejkvalitnější). Při nastavování kvality řezu obsluha vodního paprsku (firmy Fontana R) nastaví kvalitu na Q1, tedy nejhorší. Následně v reálném čase při řezání snižuje procentuálně rychlost řezu v závislosti na tvarové složitosti řezu. V oblasti posuvu na řídicím panelu PTV (Obr. 6.10) lze nastavovat procenta v položce override:

- pro otvory  $\varnothing 12$  - override = 80 %; požadovaný posuv =  $78 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- vnitřní průměr  $\varnothing 520$  mm - override = 80 %; požadovaný posuv =  $78 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,
- zub kola - override = 50 %; požadovaný posuv  $48,75 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .



**Obr. 6.10** Prostředí PTV řídicího panelu (pravá oblast software CNC886)

U požadovaného posuvu se ale stále nejedná o posuv skutečný. Ten je závislý na zakřivení dráhy a charakteru napojujících se uzlových bodů. Tato problematika je řešena v Kapitole 6.2 Technologické řešení řezného procesu.

### 6.1.4 Proces řezu

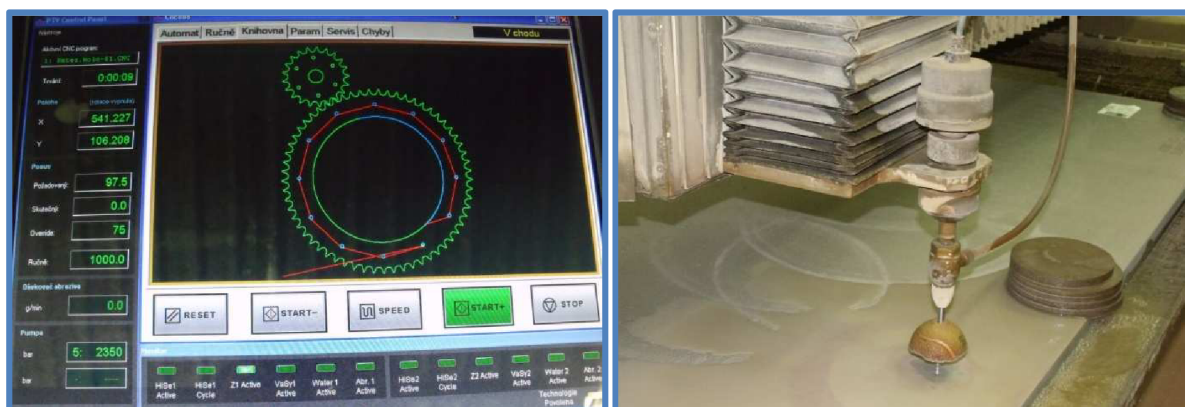
Před samotným spuštěním stroje je potřeba zahřát olej. Při spuštění čerpadla se postupně zvedá tlak což má za následek větší šetrnost k celému systému. Postupné zvyšování se nastavuje na řídicím panelu, kde je ovládání podobné „kalkulátoru ” (Obr. 6.11). Každému číslu je přiřazen tlak dosažitelný vysokotlakým čerpadlem:

- 1 = 600 bar
- 2 = 1000 bar
- 3 = 1500 bar
- 4 = 2000 bar
- 5 = 2350 bar
- 6 = 2700 bar
- 7 = 3200 bar
- 8 = 3800 bar
- 9 = 4130 bar

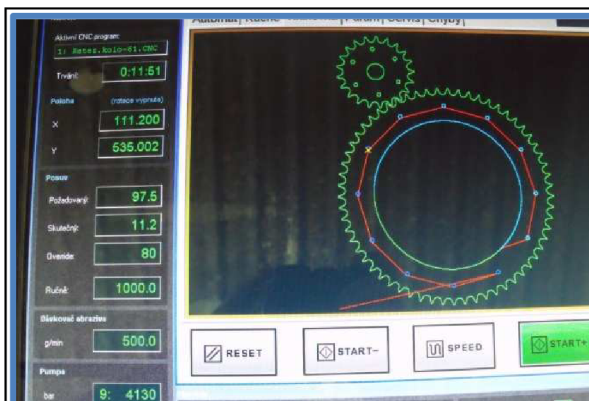


Obr. 6.11 Compact 2 - nastavení tlaku čerpadla

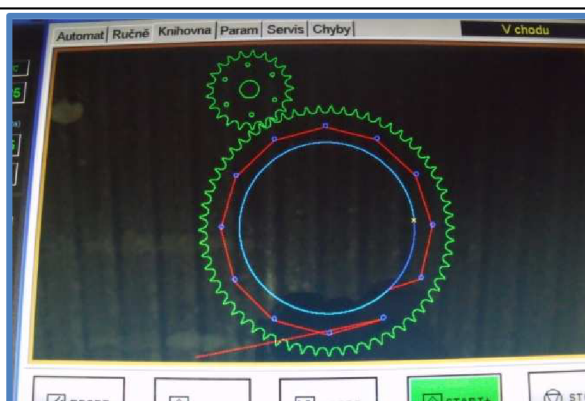
Po dosažení maximálního tlaku je spuštěn řezný proces. Do abrazivní hlavice je přiváděno abrazivo (australský granát) v množství  $500 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . Nastává průstřel (kruhový), který se po dobu 15 sekund prožravá po rádiuse  $R = 0,6 \text{ mm}$ . Následuje samotný řez v již nastaveném pořadí.



Obr. 6.12 Řezání prvního otvoru  $\varnothing 12$   
Na řídicím panelu se v reálném čase ukazuje přesná poloha řezací hlavy a zároveň se načítají následné kroky



**Obr. 6.13** Řezání šestého otvoru  $\varnothing 12$



**Obr. 6.14** Řezání vnitřního otvoru  $\varnothing 520$  mm (proti směru hodinových ručiček)

Jelikož nebyly na předchozí operace řezání otvorů kladeny nároky na drsnost povrchu (přidávky na obrábění pro vnitřní otvor a díra  $\varnothing 13$  pro šroub M12) byl nastaven override na 80 % při kvalitě řezu Q1 (separační řez). Toto nastavení bylo dostatečné s ohledem na rychlost řezu. Doba řezání otvorů:

- 12x otvor  $\varnothing 13$  - doba řezání  $t_{c1} = 90,3$  minut,
- vnitřní průměr  $\varnothing 520$  mm - doba řezání  $t_{c2} = 43,7$  minut.

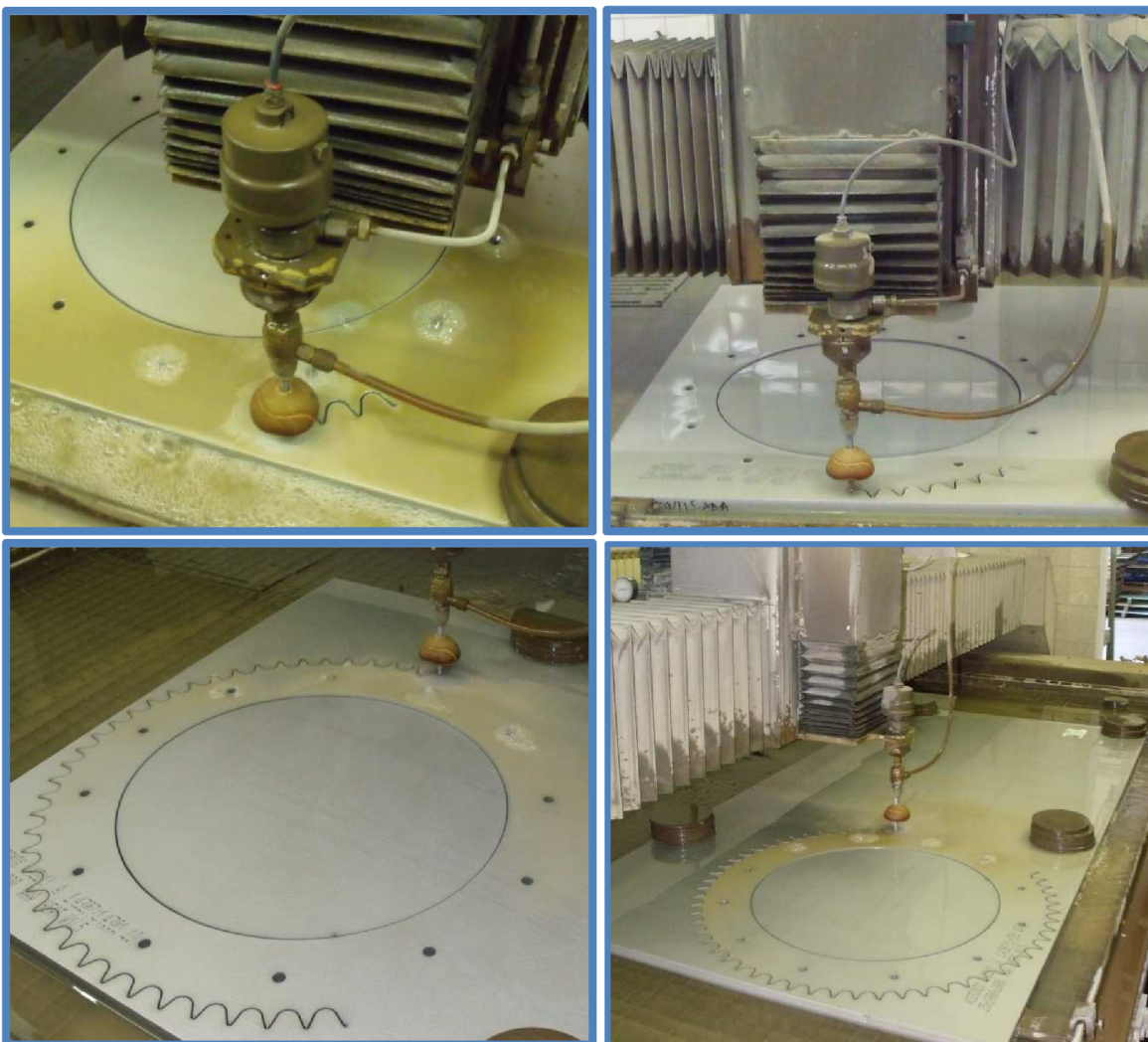
Pro zuby řetězového kola byly parametry řezu změněny s ohledem na kvalitu povrchu. Override byl nastaven na 50 %, přičemž doba řezání jednoho zubu řetězového kola byla 3 minuty 18 sekund. Celková doba řezání všech zubů:

- 61 zubů ozubeného kola - doba řezání  $t_{c3} = 182$  minut.

Celková doba řezání celého ozubeného kola:

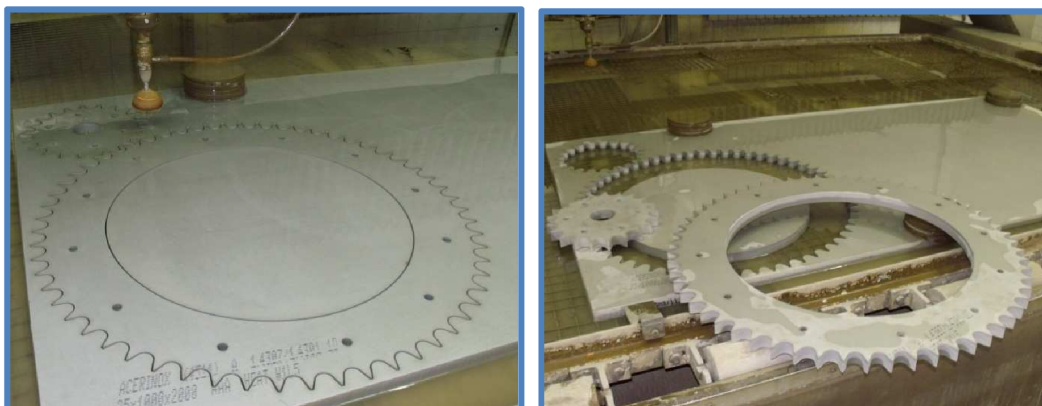
$$t_c = t_{c1} + t_{c2} + t_{c3} \quad [\text{min}] \quad (25)$$

- Velké ozubené kolo (výkres F74 13332) - celková doba řezání  $t_c = 316$  minut,



**Obr. 6.15** Řezání zubů řetězového kola (výkres F 74 13332; 61 zubů)

Po vyřezání velkého řetězového bylo vyřezáno malé ozubené kolo ve stejné chronologii jako první řetězové kolo. Následně byla obě kola očištěna tlakovou vodou a vyjmuta z řezacího stolu.

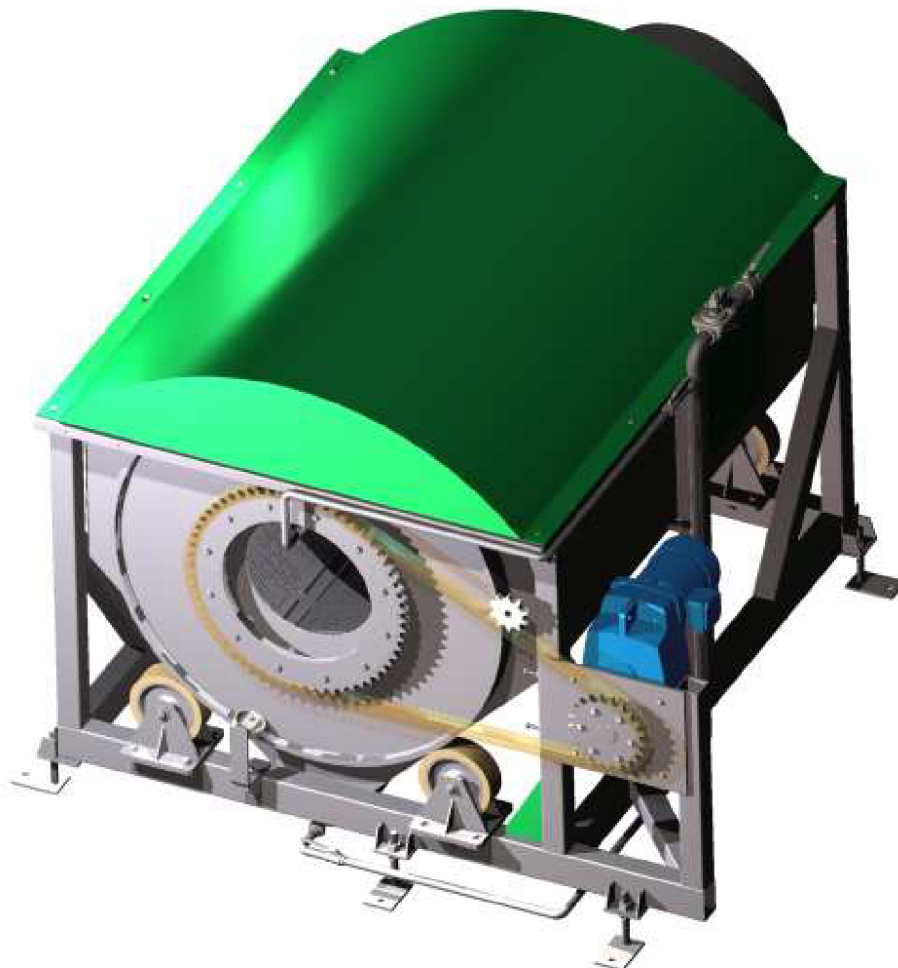


**Obr. 6.16** Hotová řetězová kola  
Třídícího a pracího bubnu

Drsnost povrchu dosažná na ploše řetězových zubů byla měřena pomocí Perthometru M2. Drsnost byla měřena ve třech úrovních (na délce  $l = 5,6 \text{ mm}$ ) s výsledkem:

- horní část řezu -  $Ra_1 = 1,995 \text{ } \mu\text{m}$
- střední část řezu -  $Ra_2 = 2,106 \text{ } \mu\text{m}$
- spodní část řezu -  $Ra_3 = 2,510 \text{ } \mu\text{m}$

Měřeno na Ústavu strojírenské technologie dne 16.05.2011.



**Obr. 6.17** Třídící a prací buben

Řetězová kola budou sloužit k převodu kroutícího momentu z převodovky typu NORD SK 4kW, 400V, 50Hz. Převodový poměr řetězových kol vyjadřuje vzorec (26). Převodový poměr pro daný řetězový převod  $i = 2,905$ .

$$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Mk_2}{Mk_1 \cdot \psi_m} \quad \text{kde,} \quad \psi_m = \frac{P_2}{P_1} = (0,95 \div 0,98) \quad (26)$$

Pro pohon Třídícího a pracího bubnu byl vybrán válečkový řetěz 24B-1-3,9m. mající minimální pevnost v tahu dle výrobce 170 kN (pro zušlechtnou ocel). Řetěz Třídícího a pracího bubnu bude však z nerezové oceli, proto byl vybrán řetěz s vysokou dimenzí.



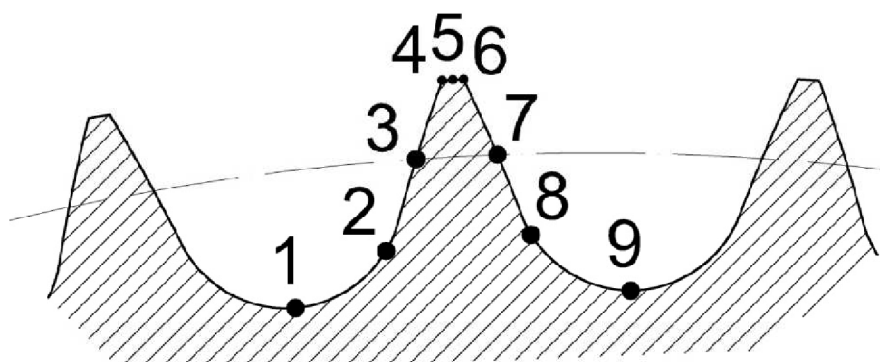
## 6.2 Technologické nastavení řezného procesu

V průběhu řezu byly v reálném čase odečítány hodnoty řezných rychlostí v závislosti na poloze abrazivního paprsku. Doba řezání jednoho zubu řetězového kola byla změřena na 3 minuty 18 sekund. V případě zubu řetězového kola byly nastaveny parametry:

- materiál stainless steel, tloušťka plechu 25 mm, obrobiteľnosť 80,
- separační řez Q1 - základní požadovaný posuv =  $97,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- override 50 % - požadovaný posuv (maximální posuv) =  $48,75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- tlak  $p = 4130 \text{ bar}$ ,
- přívod abraziva =  $500 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ,
- vnitřní průměr abrazivní trysky 0,04 inch = 1,016 mm,
- stand off  $\approx 3 \text{ mm}$  (zařízení nedisponuje výškovým senzorem).

Přesto, že byla řezná rychlost (posuv) nastavena na požadovaný posuv  $48,75 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , jedná se pouze o teoretickou hodnotu. Ve skutečnosti je pohyb trysky závislý na zakřivení dráhy a charakteru napojujících uzlů.

Pro jednotlivé body (Obr. 6.18) ležící na trajektorii řezného paprsku byly naměřeny rychlosti dle Obr. 6.18.

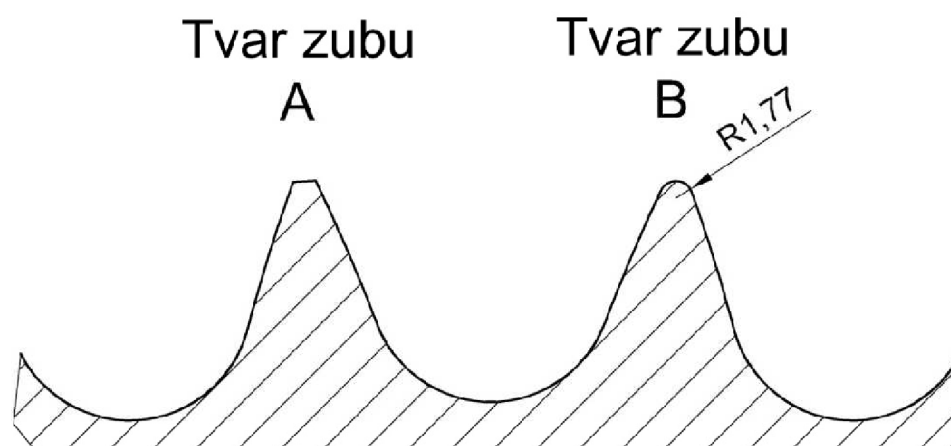


Poloha bodu	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Okamžitá rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	32,2	31,4	26,5	8,7	8,7	8,7	26,5	31,4	32,2

**Obr. 6.18** Polohy měřených okamžitých rychlostí

Při měření rychlosti posuvů a řezných časů bylo zjištěno, že oblast mezi body 4 až 6 svým charakterem výrazně zpomaluje řez zubu. Zatímco celková doba řezu jednoho zubu je 3 minuty a 18 sekund, doba řezu horní plochy na hlavové kružnici je v důsledku zpomalení na řeznou rychlost  $8,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  více než minutová. Výsledný čas řezání v oblasti 4 až 6 je 1 minuta a 3 sekundy. Tedy takřka třetina doby potřebná k vyřezání celého tvaru jednoho zubu. Z tohoto důvodu byla pozornost zaměřena právě na rovnou oblast na hlavové kružnici.

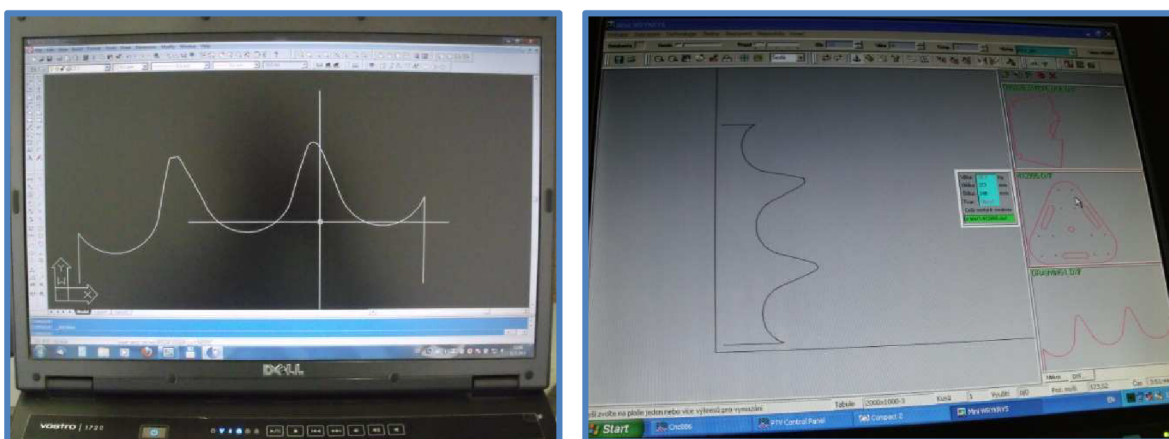
Pro rychlejší výrobu zubu řetězového kola byl navržen tvar zubu, který by nezměnil funkční parametry zubu jako takového, ale měl by za následek snížení řezných časů.



**Obr. 6.19** Tvar původního zubu A, tvar upraveného zubu B

Při tvorbě nového zubu byl použit tvar standardního zubu (Obr. 6.19A). Jediná tvarová změna spočívá v tečném napojení přechodů z evolventy na rovnou plochu a zpět na další evolventu zubu (Obr. 6.19B). Při zkeslení se jevil jako nejvhodnější poloměr na špičce zubu  $R\ 1,77$ , který celou horní část převedl do spojitého rádiusu tečně se napojujícího na boční hrany zubu.

Byl vytvořen a nahrán program pro vyřezání obou zubů a z videozáznamu byly zpětně odečteny výsledné parametry řezání.

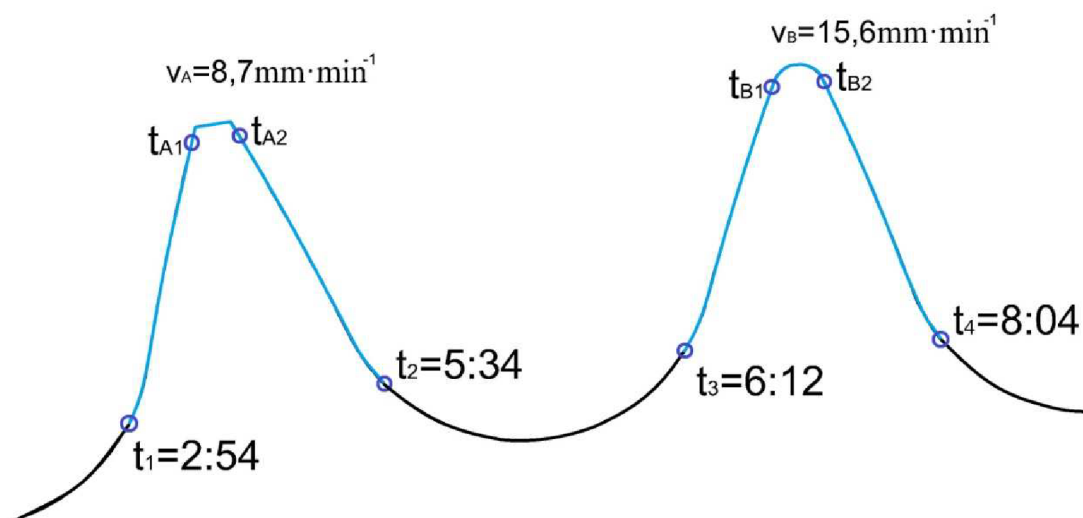


**Obr. 6.20** Tvorba řezného programu

- výkresové prostředí AutoCAD (vlevo)
- řezací plán programu Wrykrys (vpravo)

Z videozáznamu byly odseparovány vedlejší rychlosti a pohled byl zaměřen především na oblast, ve které jsou oba zuby odlišné. Jelikož by rychlosti na vrcholu zubu mohly

mít vliv i na rychlosti v místě řezání evolventních hran, byl časový úsek zaznamenávání rychlostí vyhodnocován od okamžiku  $t_1$  respektive  $t_3$  (Obr. 6.21).



**Obr. 6.21** Polohy zaznamenávaných rychlostí v čase

Oblasti snímání v čase  $t_1$  a  $t_3$  vykazovaly stejný rychlostní charakter a proto se jeví jako ideální volba pro začátek záznamu každého zubu. Stejně tak v čase  $t_2$  a  $t_4$  docházelo ke stejnému rychlostnímu výstupu a proto byly v těchto bodech vyhodnoceny poslední hodnoty rychlostí posuvu.

Oblast  $t_{A1}$  a  $t_{A2}$  ohraničuje místo konstantní rychlosti  $v_A = 8,7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (nejpomalejší zaznamenaný posuv u zubu A). Stejně tak oblast  $t_{B1}$  a  $t_{B2}$  ohraničuje místo nejpomalejšího posuvu pro zub B. Rychlost  $v_B = 15,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Je tedy takřka dvojnásobná oproti rychlosti  $v_B$ .

Výsledné časy vyšly následně:

- doba řezu v oblasti  $t_{A1}$  až  $t_{A2}$ :

$$t_A = t_{A2} - t_{A1} = 1 \text{ min } 3 \text{ s} \quad (27)$$

- doba řezu v oblasti  $t_{B1}$  až  $t_{B2}$ :

$$t_B = t_{B2} - t_{B1} = 37 \text{ s} \quad (28)$$

- rozdíl doby řezu u špičky zubu A oproti tvaru špičky B:

$$\Delta t_{AB} = t_A - t_B = 26 \text{ s} \quad (29)$$

- doba řezu v oblasti  $t_1$  až  $t_2$  (doba řezu profilu zubu A):

$$T_{Z1} = t_2 - t_1 = 334 - 174 = 2 \text{ min } 40 \text{ s} \quad (30)$$

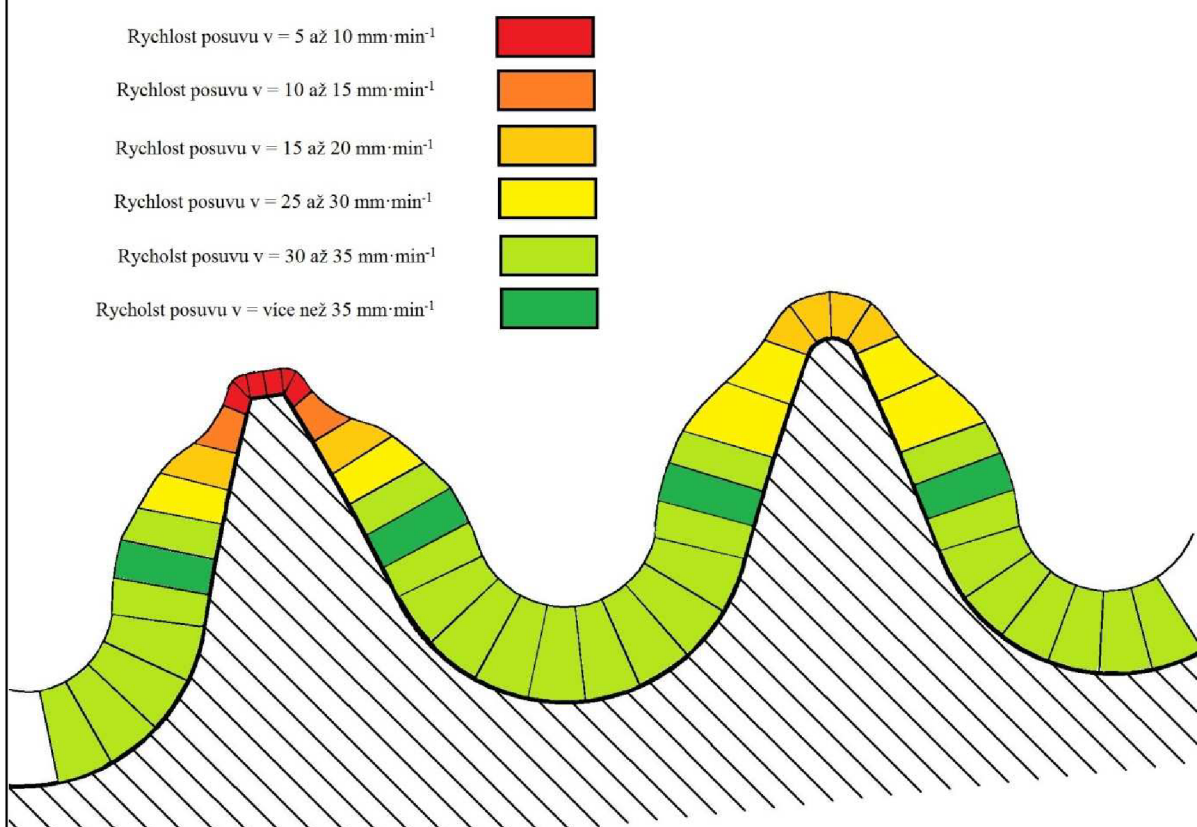
- doba řezu v oblasti  $t_1$  až  $t_2$  (doba řezu profilu zubu B):

$$T_{Z2} = t_4 - t_3 = 484 - 372 = 1 \text{ min } 52 \text{ s} \quad (31)$$

- rozdíl doby řezu zubu tvaru A vůči zubu tvaru B:

$$\Delta T_z = T_{z1} - T_{z2} = 160 - 112 = 48s \quad (32)$$

Celkový čas ušetřený na jednom zubu, změnou tvaru špičky vychází na 48 sekund. I když doba ušetřená přímo v místě špičky zubu vychází 26 sekund, čas ušetřený zvýšením řezné rychlosti se neprojevuje pouze v místě špičky zubu. Má vliv i na oblasti zpomalování k minimální řezné rychlosti a zrychlování z této oblasti. Pro lepší názornost slouží Obr. 6.22 a Obr. 6.23.

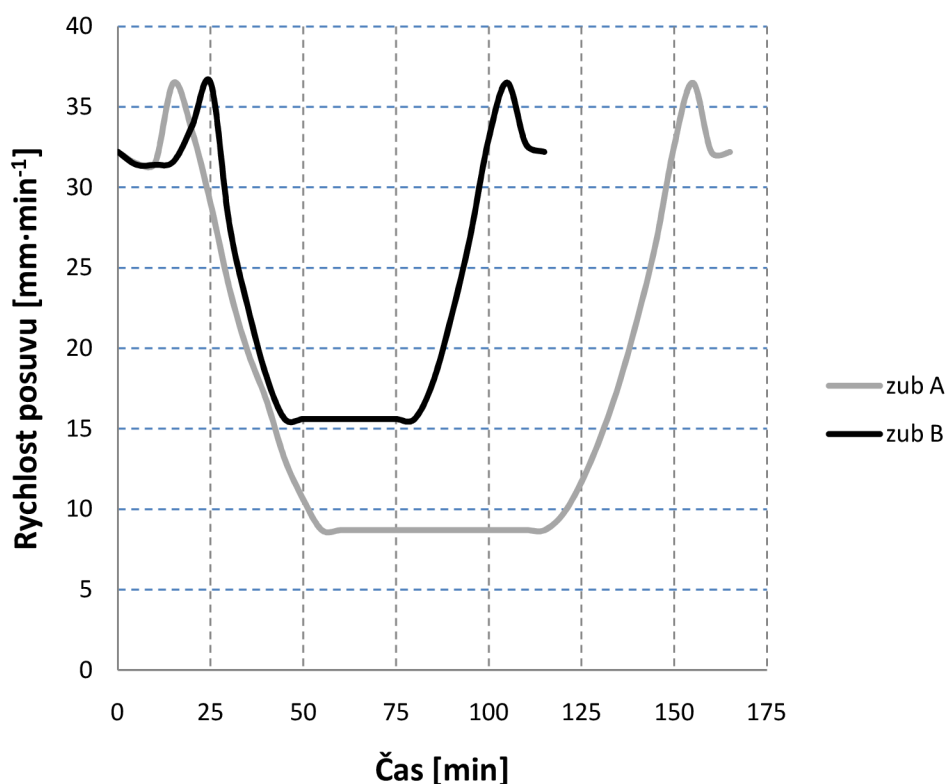


**Obr. 6.22** Okamžité rychlostní profily vztažené k poloze řezu

Z Obr. 6.22 lze získat představu o průběhu rychlostí posuvu abrazivního paprsku při řezání jednotlivých tvarů zubů. Je zřejmé, že změna tvaru špičky zubu ovlivnila nejen samotnou oblast špičky, ale měla za následek i mírnější profil poklesu rychlostí v okrajových oblastech špičky.

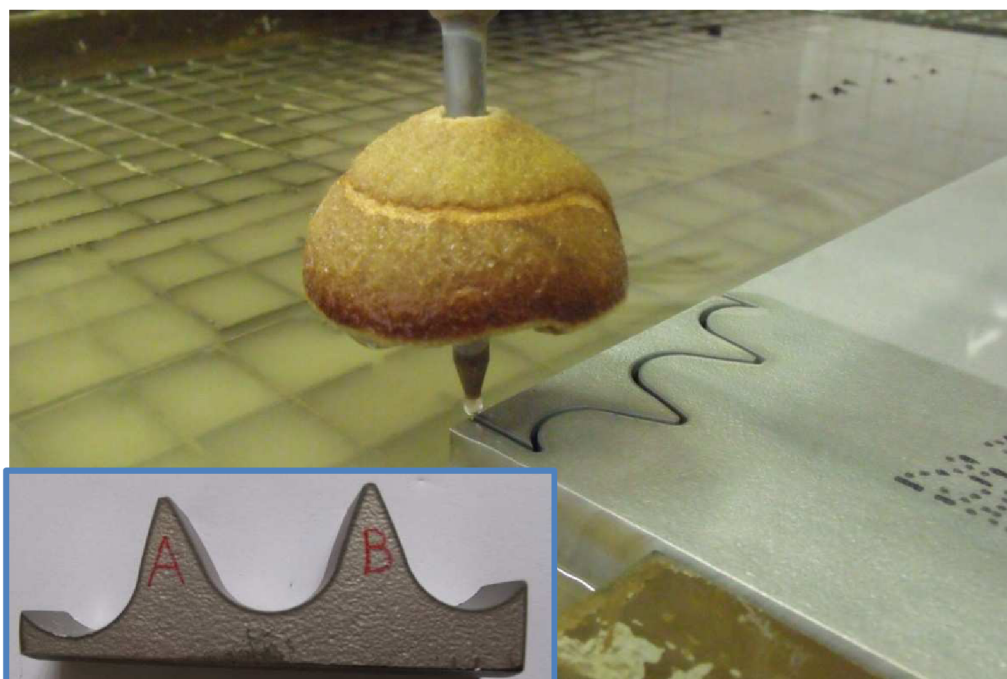
Celkový čas ušetřený na velkém ozubeném kole:

$$T = \Delta T_z \cdot z = 48 \cdot 61 = 48 \text{ min } 48s \quad (33)$$



Obr. 6.23 Rychlost posuvu v závislosti na čase pro tvar zubu A a B

Z výsledků vyplývá, že i zdánlivě složitější tvar zubu může mít za následek, díky lepšímu napojení uzlových bodů (rádius na místo ostrých hran), kratší řeznou dobu. Všeobecně se dá usuzovat, že pro rychlejší řezný proces je lepší volit rádiusy na místo ostrých či sražených hran.



Obr. 6.24 Zuby pro řetězové kolo tvaru A a B

## 7 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Vodní paprsek bývá výhodnou variantou pro firmy z hlediska pořizovací ceny. Ta se pohybuje v rozmezí 2.500.000,- až 3.500.000,- Kč. Náklady na montáž a demontáž zařízení se pohybují řádově v desítkách tisíc korun. Provozní náklady vysokotlakého vodního paprsku jsou popsány v tabulce 7.1. Tabulka 7.1 vychází z údajů získaných od firmy Fontana R, která odebírá jednotlivé komponenty vysokotlakého vodního paprsku od firmy PTV, s.r.o.

Při výpočtu nákladů na výrobu součásti technologií vodního paprsku se vychází ze vzorce (34). Náklady na hodinu provozu se liší s ohledem na vstupní parametry řezání (tloušťka materiálu, kvalita povrchu, atd.).

<b>Přehled nákladů vysokotlakého vodního paprsku</b>			
<b>Název dílu</b>	<b>Životnost</b>	<b>Cena</b>	<b>Náklady</b>
	<b>[mth]</b>	<b>[Kč]</b>	<b>[Kč·mth<sup>-1</sup>]</b>
<b>Čerpadlo</b>			
Vysokotlaké těsnění - sada	500	3700	7,4
Nízkotlaké těsnění - sada	1000	1350	1,4
Vysokotlaký válec	3000	24400	8,1
Nízkotlaký válec	2000	4950	2,5
Opravná sada Check Valve	500	3900	7,8
Tělo Check Valve	5000	14750	3,0
Opravná sada Bleed Down	1500	3800	2,5
Sada vodních filtrů	200	248	1,2
Olejový filtr	2000	2460	1,2
Hydraulický olej Shell Tellus 80	4000	8000	2,0
Ostatní nspecifikované díly	2000	900	0,5
<b>Řezací část a abrazivo</b>			
Opravná sada On-Off ventilu	1000	3950	4,0
Opravná sada ručního ventilu	3000	1450	0,5
Abrazivní tryska	130	1890	14,5
Řezací hlava s diamantovou vodní tryskou	500	19590	39,2
	<b>[kg·mth<sup>-1</sup>]</b>	<b>[Kč·kg<sup>-1</sup>]</b>	
Abrazivní materiál MESH 50, MESH 80 (500g·min <sup>-1</sup> )	31,25	6,6	206,25
Rošty	200	5000	25
<b>Energie a voda</b>			
	<b>[l·min<sup>-1</sup>]</b>	<b>[Kč·m<sup>-3</sup>]</b>	
Voda	4	36	8,6
	<b>[kW·hod<sup>-1</sup>]</b>	<b>[Kč·kWh<sup>-1</sup>]</b>	
El. energie	37	3,1	114,7
<b>Celkové náklady</b>			<b>C<sub>pn</sub> = 450,3 Kč·mth<sup>-1</sup></b>

**Tab. 7.1** Přehled nákladů vysokotlakého vodního paprsku

Vzorec pro výpočet nákladů na jednu hodinu provozu (34) zohledňuje pořizovací cenu stroje, náklady na montáž stroje, náklady na demontáž (po skončení životnosti stroje), likvidační hodnotu a dobu životnosti. Dále zahrnuje využitelnost stroje, mzdy obsluhy a náklady na provoz stroje (Tab. 7.1).

Náklady na hodinu provozu  $N_{hs}$ :

$$N_{hs} = \frac{C_s + N_d + N_i - L_h}{Z \cdot F_{ef}} + S_f \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (34)$$

zjednodušeně pak:

$$N_{hs} = X_s + S_f \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (35)$$

kde,

$$X_s = \frac{C_s + N_d + N_i - L_h}{Z \cdot F_{ef}} \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (36)$$

a fixní hodinová sazba:

$$S_f = H_m + C_{pn} \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}] \quad (37)$$

efektivní časový fond stroje za rok  $F_{ef}$ :

$$F_{ef} = d_r \cdot h_{sn} \cdot g_s \cdot g_{zp} \cdot \left(1 - \frac{z}{100}\right) \quad (38)$$

Výsledná cena na jednu hodinu provozu se dále přepočítává na minutu provozu stroje. V závislosti na celkovém čase řezu  $t_c$  získáme náklady na obrobek jednoho výrobku. Přičteme-li náklady na polotovary, získáme pak konečnou cenu výrobku.

Náklady na minutu provozu stroje  $N_{ms}$ :

$$N_{ms} = \frac{N_{hs}}{60} \quad [\text{Kč} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (39)$$

Náklady na obrobek jednoho výrobku  $c_{vo}$ :

$$c_{vo} = t_c \cdot N_{ms} \quad [\text{Kč}] \quad (40)$$

kde, celkový čas řezu  $t_c$ :

$$t_c = \frac{l_r}{v_p} + t_p \quad [\text{min}] \quad (41)$$

Konečná cena jednoho výrobku  $c_v$ :

$$c_v = c_{vo} + c_{pt} \quad [\text{Kč}] \quad (42)$$

Výsledné hodnoty výpočtu celkových nákladů na výrobu řetězového kola jsou zapsány v Tab. 7.2. Je zde porovnán náklad na výrobu řetězového kola, při výrobě zubů tvaru A i B (tvary zubů viz. Kap. 6.2).

	Počítané parametry	Symboly	Hodnoty	Jednotky
	Hodinová mzda	$H_m$	800	Kč·hod <sup>-1</sup>
	Provozní náklady	$C_{pn}$	450,3	Kč·mth <sup>-1</sup>
	Fixní hodinová sazba	$S_f$	1250,3	Kč·hod <sup>-1</sup>
	Hodinová sazba stroje	$X_s$	146,5	Kč·hod <sup>-1</sup>
	Náklady na hodinu provozu	$N_{hs}$	1396,8	Kč·hod <sup>-1</sup>
	Náklady na minutu provozu	$N_{ms}$	23,28	Kč·min <sup>-1</sup>
Tvar zubu A	Celková doba řezu	$t_c$	316	min
	Náklady na obrobení	$c_{vo}$	7356,48	Kč
	Cena polotovaru	$c_{pt}$	14000	Kč
	Celková cena řetězového kola	$c_{vA}$	21356,48	Kč
Tvar zubu B	Celková doba řezu	$t_c$	267	min
	Náklady na obrobení	$c_{vo}$	6215,76	Kč
	Cena polotovaru	$c_{pt}$	14000	Kč
	Celková cena řetězového kola	$c_{vB}$	20215,76	Kč
	Náklady ušetřené změnou tvaru zubu	$c_{vA}-c_{vB}$	<b>1140,72</b>	<b>Kč</b>

**Tab. 7.2** Výpočet nákladů na výrobu řetězového kola pro oba typy tvaru zubů (tvar zubu A, B)

Celková cena řetězového kola byla vypočtena na 21.356,5 Kč. Při změně tvaru zubu (z tvaru A na tvar zubu B) by došlo k více než 5% úspoře z konečné ceny ozubeného kola. Je tedy zřejmé, že správným nastavením technologie řezného procesu dochází ke zlepšení řezných podmínek. Lze tak dosáhnout nezanedbatelného snížení nákladů na výrobu součástí.

Jako ekonomicky nevýhodné, se jeví využití vodního paprsku pro řezání ostrých hran, které mají za následek rapidní pokles řezné rychlosti. Je tedy výhodné, pokud to situace dovoluje, nahrazovat veškeré ostré hrany radiusy. Přičemž platí, čím větší je radius trajektorie řezného paprsku, tím vyšších řezných rychlostí je dosaženo.

Dne 16.05.2011 bylo vedení firmy Fontana R seznámeno s výsledky diplomové práce. Po ověření výsledků byl vydán ze strany vedení příkaz k přezkoumání celé databáze řezacích plánů vodního paprsku se zaměřením na ostré hrany výrobků. Zároveň byla seznámena s výsledky konstrukční sekce se záměrem zachycení nevhodných řezných podmínek již na úrovni kreslení technických výkresů.



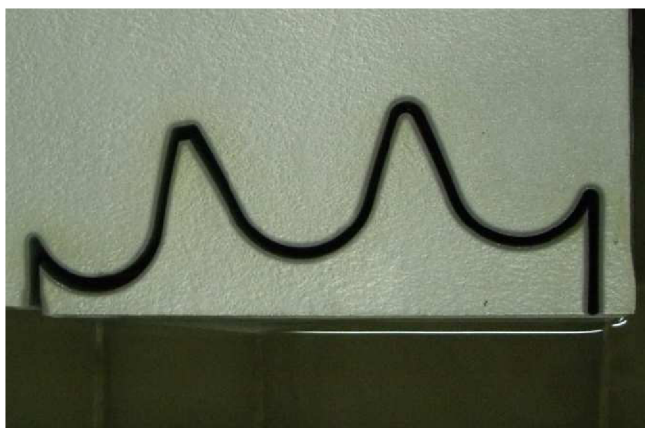
## ZÁVĚR

Diplomová práce se ve své teoretické části zabývala podrobným rozбором technologie vodního paprsku. Získané teoretické znalosti byly následně využity v praktické části při popisu postupu výroby řetězového kola ve výrobním areálu firmy Fontana R, s.r.o. v Říčanech u Brna. Na základě pozorování celého řezného procesu a ze získaných dat byla řešena ekonomická stránka výroby řetězového kola.

Při posuzování ekonomičnosti výroby byla zaměřena pozornost na technologické aspekty nastavení řezného procesu. Byly zjištěny a popsány, vlivy a závislosti řezných rychlostí s ohledem na tvar řezu. Především pak ostré hrany se jevily jako ekonomicky nevýhodné. Pro obhájení těchto výsledků byl proveden pokus, při kterém byl vytvořen řezný plán dvou zubů. Zatímco první zub (tvar A) tvarově odpovídal zubům již zmíněného řetězového kola. U druhého zubu (tvar B) byly změněny nefunkční plochy tak, aby se dosáhlo větší návaznosti přechodů v uzlových bodech. Po vyhodnocení všech hodnot bylo zjištěno, že tvar zubu B s lepší návazností přechodů měl za následek redukcí celkového času na výrobu jednoho zubu o 24 %. Cenová úspora nákladů na obrobení kola, by tak v případě výroby stejného ozubeného kola s tvarem zubu B, činila 1140,- Kč (snížení nákladů o 15,5 % z ceny na obrobení).

Při technologickém řešení výroby metodou vysokotlakého vodního paprsku je nutné přestat nahlížet na proces výroby stejně jako na výrobu konvenčním způsobem. Protože i zdánlivě složitější tvar může mít za následek ušetření řezných časů. Je to především z toho důvodu, že v nynější době je celý proces výroby podporován výpočetní technikou a tak není ve všech případech nutné přecházet ke zjednodušeným ISO tvarům (pokud se funkce a zaměnitelnost nezmění).

Vedení firmy Fontana R bylo seznámeno s výsledky diplomové práce. Po ověření výsledků byl vydán příkaz k přezkoumání celé databáze řezacích plánů vodního paprsku se zaměřením na ostré hrany výrobků. Zároveň byla seznámena s výsledky konstrukční sekce se záměrem zachycení nevhodných řezných podmínek již na úrovni kreslení technických výkresů.



**Obr. 8.1** Zhotovený profil zubů  
řetězových kol  
- tvar zubu A (levý)  
- tvar zubu B (pravý)

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MILLER, Richard. K. *Waterjet cutting: Technology and industrial applications*, USA: The Fairmont Press, 1991. 154 s. ISBN 0-88173-068-8.
2. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*, 1. vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
3. NOVÁKOVÁ, Alena, Lucie KOTYKOVÁ. Eroze vyvolaná stavbou dopravních komunikací.[online]. [cit 2011-04-25] Dostupné z WWW: <[http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/22\\_01\\_3.doc](http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/22_01_3.doc)>.
4. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 195s. ISBN 80-8057-091-4.
5. HASHISH, Mohamed. In Memoriam - Dr. Norman Charles Franz. WJTA Jet News [online]. Prosinec 2007, 12, [cit. 2011-05-23]. Dostupný z WWW: <[http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews\\_Dec07.pdf](http://www.wjta.org/images/wjta/JetNews/JetNews_Dec07.pdf)>.
6. Walstad, O. M, P. W. Noecker, *Blades That Never Dull or Create Dust*. NAVAL MATERIAL INDUSTRIAL RESOURCES OFFICE PHILADELPHIA PA Manufacturing Technology Bulletin. Number 35: 1972.
7. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*, 1. vyd. Košice: Technická univerzita Košice, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
8. BHUSHAN, Bharat, B. K. GUPTA, *Handbook of Tribology (part 2.2 Wear)*. 1.ed. New York: McGraw-Hill, 1991, ISBN 0-07-005249-2.
9. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*, 2.vyd. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta technologie obrábění, 1999. 102s. ISBN 80-7082-518-9.
10. Flow International Corporation [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Flow International Corporation. Dostupné z WWW: <<http://www.flowwaterjet.com/>>.
11. Corbis Images [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Hydraulic Mining During the Klondike Gold Rush. Dostupné z WWW: <<http://www.corbisimages.com/Enlargement/BE060176.html>>.
12. SUMMERS, David. A., P. N. WORSEY and J. G. BLAIN. *Waterjet cutting parameterization test for the programmed extraction of explosive and propellant from military casting*. University of Missouri-Rolla, High pressure waterjet laboratory rock mechanics and explosive research center Rolla, mo 65401.
13. HASHISH, Mohamed. *An Improved Model for Erosion by Solid Particle Impact*. In: Proc. Of the 7th International Conference on Erosion by Liquid and solid Impact, ELSI VII, Cambridge, England, Sept. 1987, 66/1-66/9.

14. HASHISH, Mohamed. *Experimental studies of cutting with abrasive waterjets*. Flow Industries, Inc., Kent, Washington.
15. HASHISH, Mohamed. *Machining of Hard Materials with Abrasive-Suspension Jets*. Proceedings of the 9th American Waterjet Conference, Dearborn, Michigan, 1997, pp. 267-280.
16. FABIAN, Stanislav, Sergej HLOCH. Príspevok k technickým možnostiam zvyšovania kvality produktov technológie vysokorýchlostného hydroabrazívneho prúdu. In: AT&P journal. 1335-2237: XII, 2005. 66-68.
17. JET EDGE [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. JET EDGE Waterjet systems. Dostupné z WWW: <<http://www.jetedge.com/>>.
18. *Flow International Corporation* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Flow czech web pages. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/>>.
19. *Abrasive Water Suspension Jet Technology* [online]. 2003 [cit. 2010-04-27]. Water jet Laboratory Hannover. EN. Dostupné z WWW: <<http://www.chinaweldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>>.
20. AROLA, Dwayne, Mamidala RAMULU. *Mechanism of material removal in abrasive waterjet machining of common aerospace materials*. In: Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, 1993, p. 43-64
21. HASHISH, Mohamed. *Optimisation Factors in Abrasive Waterjet Machining*. ASME J. of Engineering for Industry, 1991. pp. 51-56.
22. HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER, Dalimil ŠNITA a kol. *Chemické inženýrství*. 2. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. 348 s. ISBN 978-80-7080-002-7
23. *Vodovody a kanalizace* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Ukazatel kvality vody. Dostupné z WWW: <[www.vodakhu.cz/tvrdestvody.html](http://www.vodakhu.cz/tvrdestvody.html)>.
24. *Parameters and equipment* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Pressure generation systems. Dostupné z WWW: <<http://lyle.smu.edu/rcam/research/waterjet/par3.html>>.
25. *HAMMELMANN process pumps* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Pump design. Dostupné z WWW: <<http://www.hammelmann-process.de/wEnglish/products/process-pumps/pump-design.shtml?navid=3>>.
26. *WARDJet* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. WARDJet. Dostupné z WWW: <<http://www.wardjet.com/pumps.html>>.
27. *TÜV certificate* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Compressor certificate. Dostupné z WWW: <<http://www.wsp srl.com/risorse/image/att%20cert2.JPG>>.

28. *Waterjet RCAM* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. 27. Basic fluid mechanics behind the formation of high speed water jets. Dostupné z WWW: <<http://enr.smu.edu/rcam/research/waterjet/wj1.html>>.
29. HUTCHINGS, Ian. *Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals*. In: Levy A V (ed) 1979 Proc. Corrosion/Erosion of Coal Convers. Syst. Mat. Conf. Nat. Ass. Corr. Engrs., Houston, p. 393-428.
30. *PTV, spol. s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Vysokotlaký vodní paprsek - abrazivo. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>>.
31. ZOHOURKARI, Iman, Mehdi ZOHOOR. *An Erosion-based Modeling of Abrasive*, K. N. Toosi University of Technology, Iran, World Academy of Science, Engineering and Technology 62 2010  
Dostupné z WWW: <<http://www.waset.org/journals/waset/v62/v62-65.pdf>>.
32. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj>>.
33. *Řežem vodou* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Řežeme vodou - řezání vodním paprskem Ostrava. Dostupné z WWW: <<http://www.rezeme-vodou.cz/>>.
34. *MILCO Waterjet* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Advantages to Waterjet Cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.milcowaterjet.com/advantages.php>>.
35. *Global warming art* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Carbon Emission by Region. Dostupné z WWW: <[http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Carbon\\_Emission\\_by\\_Region\\_png](http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Carbon_Emission_by_Region_png)>.
36. MINAŘÍK, Květoslav. *Lao-c'ovo Tao-te-t'ing*. Svazek 7, Praha: Státní nakladatelství politické literatury. 1995. 160 s. ISBN 80-85202-27-1.
37. *CHPS s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Řezání vodním paprskem, laserem, zpracování kovů. Dostupné z WWW: <<http://www.chps.cz/>>.
38. HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan; GOMBÁR, Miroslav. *Hodnotenie významnosti faktorov technológie abrazivného vodného prúdu*. In Metal : 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů. Hradec nad Moravicí, 2007 [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.metal2010.com/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/180.pdf>>.
39. HLAVÁČ, Libor. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem*. Praha: České vysoké učení v Praze, Fakulta strojní. 2006. 31s.

40. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. CAD a CAM systémy na českém trhu. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/cad-a-cam-systemy-na-ceskem-trhu>>.
41. HASHISH, Mohamed. *Optimization Factors in Abrasive -Water.iet Machining*. Journal of Engineering for Industry, 1991' No. 1' s. 29.
42. KOTLANOVÁ, Anna. *Technická dokumentace*. Plzeň: Sylaby pro studenty kvalifikačního programu ÚVE v rámci CŽV. 2005. 62 s. Dostupné z WWW: <[http://www.fel.zcu.cz/akred2007/data/Technicka\\_dokumentace.pdf](http://www.fel.zcu.cz/akred2007/data/Technicka_dokumentace.pdf)>
43. *Strojnícka fakulta Technickej Univerzity v Košiciach* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Drsnosť povrchu súčiastok. Dostupné z WWW: <[http://www.sjf.tuke.sk/kkdal/prilohy/09109122327usi\\_0910\\_5.pdf](http://www.sjf.tuke.sk/kkdal/prilohy/09109122327usi_0910_5.pdf)>.
44. *Fontana R, s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Fontana R, s.r.o. Dostupné z WWW: <[www.fontanar.cz](http://www.fontanar.cz)>.
45. *Inox, spol. s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. NEREZOVÁ OCEL 1.4301 . Dostupné z WWW: <<http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>>.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
NTO	-	Nekonvenční technologie obrábění
CAD	-	Computer Aided Design - počítačem podporované navrhování - software (nebo obor) pro projektování či konstruování na počítači
CAM	-	Computer Aided Manufacturing - počítačem podporovaná výroba - software (nebo obor) pro řízení či automatizaci výroby, např. obráběcích strojů, robotů
WJM	-	Water Jet Machining - čistý vodní paprsek
AWJ	-	Abrasive Water Jet Machining - abrazivní vodní paprsek
ASJ	-	Abrasive Water Injection Jets - paprsek abrazivní suspenze
CNC	-	Computer Numerical Control - počítačem řízené obrábění stroje
$P_1$	Pa	tlak na ploše $S_1$
$P_2$	Pa	tlak na ploše $S_1$
$\mu$	-	výtokový součinitel
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	hustota vody
$v_p$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost pístu
$S_1$	$\text{m}^2$	plocha velkého pístu
$S_2$	$\text{m}^2$	plocha malého pístu
$S_0$	N	plocha průřezu otvoru
$Q$	$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	objem protékající vody
$Q_c$	$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	průtokové množství hydrogenerátoru
$P$	W	výkon hydrogenerátoru
$E_{\text{kin}}$	J	kinetická energie
$m$	kg	hmotnost
$W$	J	práce
$h_{\text{max}}$	m	maximální hloubka
$h_1$	m	hloubka rovnoměrného dělení
$h_2$	m	hloubka nerovnoměrného dělení
$h_3$	m	hloubka nerovnoměrného dělení
$\sigma_0$	-	kavitační číslo
$p_i$	Pa	impaktní tlak
$p_s$	Pa	stagnační tlak
$V_0$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost nárazu paprsku
$C_0$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost zvuku v řezné kapalině
$\eta_m$	N	hodnota mechanické účinnosti = 0,95
$V_M$	$\text{m}^3$	odebrané množství materiálu
$m_p$	kg	hmotnost částice
$v_p$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost částice
$\sigma_f$	Pa	napětí cílového materiálu
$K$	-	poměr vertikální a horizontální síly
$\Psi$	N	funkce úhlu, pod kterým abrazivní částice zasáhne

		cílová materiál
$F_x$	N	složka síly v ose x
$F_y$	N	složka síly v ose y
$h$	m	hloubka zóny řezného opotřebování materiálu
$h_c$	m	hloubka zóny deformačního opotřebování materiálu
$h_d$	mm	celková síla
$v_a$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost pohybu abrazivních částic
$C_k$	-	koeficient charakteristické rychlosti
$\rho_p$	$g \cdot cm^{-3}$	hustota abraziva
$u$	$m \cdot s^{-1}$	řezná rychlost
$d_j$	m	průměr AWJ
$m_a$	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní tok abraziva
$C_f$	-	koeficient odporu stěny materiálu vůči pronikajícímu vodnímu paparsku
$v_a$	$mm \cdot s^{-1}$	rychlost pohybu abrazivních částic
$v_e$	$mm \cdot s^{-1}$	kritická rychlost abrazivních částic
$C_1$	-	koeficient druhu řezaného materiálu
$R_z$	$\mu m$	výška nerovnosti profilu
$R_a$	$\mu m$	střední aritmetická odchylka profilu
$t_c$	min	celková doba řezání
$i$	-	převodový poměr
$z_1$	-	počet zubů hnacího řetězového kola
$z_2$	-	počet zubů hnaného řetězového kola
$n_1$	$min^{-1}$	otáčky hnacího řetězového kola
$n_2$	$min^{-1}$	otáčky hnaného řetězového kola
$Mk_1$	N·m	kroučící moment hnacího řetězového kola
$Mk_2$	N·m	kroučící moment hnaného řetězového kola
$\Psi_m$	-	celková účinnost
$P_1$	kW	výkon hnacího řetězového kola
$P_2$	kW	výkon hnaného řetězového kola
$N_{hs}$	Kč·hod <sup>-1</sup>	náklady na hodinu provozu
$X_s$	Kč·hod <sup>-1</sup>	hodinová sazba stroje
$C_s$	Kč	cena stroje
$N_d$	Kč	náklady na demontáž stroje
$N_i$	Kč	náklady na instalaci stroje
$L_h$	Kč	likvidační hodnota
$Z$	rok	doba životnosti - souvisí s dobou odepisování stroje
$F_{ef}$	hod	efektivní časový fond
$S_f$	Kč·hod <sup>-1</sup>	fixní hodinová sazba
$H_m$	Kč·hod <sup>-1</sup>	hodinová mzda
$C_{pn}$	Kč	provozní náklady
$d_r$	-	počet pracovních dnů
$h_{sn}$	hod	počet hodin jedné směny
$g_s$	-	směnnost
$g_{zp}$	-	počet vzájemně zaměnitelných pracovišť
$z$	%	časové ztráty (plánované prostoje z nominálního časového fondu)
$N_{ms}$	Kč·min <sup>-1</sup>	celková síla
$c_{vo}$	Kč	náklady na obrobení

$l_r$	mm	celková délka řezu
$v_p$	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	řezná rychlost
$t_p$	min	celkový čas průstřelů
$c_v$	Kč	celková cena řetězového kola
$c_{pt}$	Kč	cena polotovaru