

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technické fakulta**

**Obchod a podnikání s technikou**



**Diplomová práce**

**Dělení kovových materiálů vodním paprskem**

**Alexej Kolva**

© 2015 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Alexej Kolva

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Dělení kovových materiálů vodním paprskem**

Název anglicky

**Partition of metallic materials using water jet**

---

### Cíle práce

- shromáždit informace o metodách používaných pro dělení kovů,
- shromáždit informace o dělení kovů vodou,
- experimentálně zhodnotit proces dělení vodou vybraných kovových materiálů,
- provést technicko-ekonomické zhodnocení.

### Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- cíl práce a metody jejího zpracování,
- výsledky experimentů a jejich diskuse,
- závěry a přínos práce.

### Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

### Klíčová slova

dělení materiálu, řezání vodou, abrazivo

---

### Doporučené zdroje informací

AWAC, spol. s r. o., systémy dělení materiálu [online]. Dostupné z [www: http://www.awac.cz/](http://www.awac.cz/)  
Časopisy: Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM (Svařování, dělení, spojování materiálů), Strojírenská technologie, Strojárstvo / Strojírnoství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie / Svařování.  
Firemní literatura: katalogy, prospekty, prezentace.  
JIRKA, M. – BROŽEK, M. – CHMELÍK, V.: Řezání laserem. Strojírenská výroba. 43, 1995, č. 5 – 6.  
KŘENEK, J.: Dělení materiálů kapalinovým paprskem. Bakalářská práce. Praha, ČVUT FS 2010.  
MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Praha, ČVUT 1993.  
VALÍČEK, J. HLOCH, S. KOZAK, D.: Surface geometric parameters proposal for the advanced control of abrasive waterjet technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 41, 2009, č. 3 4.  
VALÍČEK, J. et al.: Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 2007.  
VLASTNÍK, J.: Dělení materiálů paprskem kapaliny. Kandidátská disertační práce. Praha, ČVUT FS 1983.  
VOMOČIL, L.: Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. In: Technik, 16, 2008, č. 9.  
WaterJets.org the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z [www: http://waterjets.org/](http://waterjets.org/)

---

### Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

### Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2013

**doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2013

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 05. 04. 2015

---

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Dělení kovových materiálů vodním paprskem" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne

---

## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za odborné vedení, připomínky a podporu při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval za zaškolení na zařízení použitém v experimentu doc. Ing. Rostislavu Chotěbor-skému, Ph.D. Děkuji také panu Milanu Březinovi za konzultaci a poskytnutí cenných informací firmy AWAC, spol. s r. o. v Praze. Též děkuji své rodině a zejména přítelkyni Veronice Hanušové za podporu a pevné nervy při zpracování této diplomové práce.

## **Souhrn**

Předmětem této diplomové práce bylo v první části shromáždit informace o metodách, používané pro dělení kovu a blíže prozkoumat a popsat technologii a zařízení potřebné pro dělení kovů vodním paprskem. Pro potřeby druhé části diplomové práce bylo provedeno několik experimentů, které zkoumají závislost šířky spáry řezu a velikost uhlové odchylky na rychlosti posuvu, tloušťce řezaného materiálu a množství přiváděného abraziva. Bylo provedeno také technicko ekonomické zhodnocení metody a výpočet nákladů spojených s experimentem. V závěru byly shrnuty a vyhodnoceny poznatky z obou částí práce.

**Klíčová slova:** dělení materiálu, ocel, vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek

## **Partition of metallic materials using water jet**

### **Summary**

The subject of this thesis was in the first part to gather information about the methods used for metal cutting and further explore and describe technologists and equipment needed for metal cutting waterjet. For the purposes of the second part of the thesis was conducted several experiments that explore the dependence of the gap cut and the size of the angular deviation at the feed rate, the thickness of the cut material and the quantity supplied abrasive. There was carried out technical and economic evaluation methods and calculation of costs associated with the experiment. In the conclusions were summarized and analyzed findings from both parts of the thesis.

**Keywords:** cutting, steel, water jet, abrasive waterjet

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>TECHNOLOGIE POUŽÍVANÉ PRO DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Konvenční metody obrábění.....</b>	<b>8</b>
2.1.1	Stříhání .....	8
2.1.2	Lámání.....	8
2.1.3	Řezání .....	8
2.1.4	Upichování .....	9
2.1.5	Rozbrušování .....	10
<b>2.2</b>	<b>Nekonvenční metody obrábění.....</b>	<b>10</b>
2.2.1	Ultrazvuk .....	10
2.2.2	Obrábění paprskem vody a abrazivním paprskem .....	10
2.2.3	Elektroerozivní .....	10
2.2.4	Obrábění paprskem plasmy .....	11
2.2.5	Obrábění paprskem laseru .....	11
2.2.6	Obrábění paprskem elektronů.....	12
2.2.7	Obrábění kyslíkovým plamenem.....	12
2.2.8	Elektrochemické obrábění .....	12
2.2.9	Chemické .....	13
<b>3</b>	<b>DĚLENÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Historie vodního paprsku .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Technologie dělení materiálu vodním paprskem.....</b>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Princip metody .....</b>	<b>14</b>
<b>3.4</b>	<b>Uspořádání .....</b>	<b>14</b>
<b>3.5</b>	<b>Řezání čistým vodním paprskem .....</b>	<b>16</b>
<b>3.6</b>	<b>Řezání abrazivním vodním paprskem.....</b>	<b>17</b>
<b>3.7</b>	<b>Obrábění vodním paprskem s ledovými krystali .....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>HLAVNÍ KONSTRUKČNÍ ČÁSTI STROJE .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1</b>	<b>Hydraulická jednotka .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Multiplikátor.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3</b>	<b>Plunžrové čerpadlo .....</b>	<b>20</b>
<b>4.4</b>	<b>Akumulátor tlaku .....</b>	<b>21</b>
<b>4.5</b>	<b>Filtr .....</b>	<b>21</b>

<b>4.6</b>	<b>Potrubí na rozvod vody a těsnění.....</b>	<b>22</b>
<b>4.7</b>	<b>Řezací hlava .....</b>	<b>22</b>
4.7.1	AWJ (abrasive water jet) .....	23
4.7.2	ASJ (abrasive slurry jet) .....	23
<b>4.8</b>	<b>Typy vodního paprsku .....</b>	<b>24</b>
4.8.1	Systém pulzujícího paprsku.....	24
4.8.2	Systém kontinuálního paprsku.....	24
4.8.3	Systém kavitačního paprsku .....	24
4.8.4	Ultravysokotlaký vodní paprsek.....	24
<b>4.9</b>	<b>Úprava vody .....</b>	<b>25</b>
<b>4.10</b>	<b>Lapač vody a opěrný rošt.....</b>	<b>25</b>
<b>4.11</b>	<b>Abrazivo .....</b>	<b>26</b>
<b>4.12</b>	<b>Dávkovač abraziva .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>KVALITA ŘEZU A VLASTNOSTI OPRACOVANÉHO POVRCHU.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Inovační technologie .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2</b>	<b>Tvar řezné spáry .....</b>	<b>33</b>
<b>5.3</b>	<b>Tvarové možnosti.....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>VÝHODY A NEVÝHODY .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1</b>	<b>Výhody.....</b>	<b>36</b>
<b>6.2</b>	<b>Nevýhody .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ POSOUZENÍ KVALITY ŘEZU KOVOVÉHO MATERIÁLU O RŮZNÝCH TLOUŠŤKÁCH ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPERU 37</b>	
<b>7.1</b>	<b>Zkušební materiál a jeho vlastnosti .....</b>	<b>38</b>
7.1.1	Popis ocelí .....	38
<b>7.2</b>	<b>Technologické podmínky prováděného experimentu .....</b>	<b>38</b>
<b>7.3</b>	<b>Měřicí přístroj a software .....</b>	<b>39</b>
<b>7.4</b>	<b>Závislost šířky spáry na objemu abraziva a rychlosti posuvu. ....</b>	<b>39</b>
<b>7.5</b>	<b>Metodika měření.....</b>	<b>40</b>
<b>7.6</b>	<b>Vyhodnocení naměřených výsledků .....</b>	<b>41</b>
7.6.1	Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 5 mm.....	41
7.6.2	Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 5 mm.....	42



7.6.3	Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 10 mm.....	43
7.6.4	Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 10 mm.....	43
7.6.5	Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 15 mm.....	44
7.6.6	Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 15 mm.....	45
7.6.7	Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 20 mm.....	46
7.6.8	Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 20 mm.....	47
<b>7.7</b>	<b>Poměrové hodnoty .....</b>	<b>47</b>
7.7.1	Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 5 mm....	48
7.7.2	Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 10 mm..	48
7.7.3	Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 15 mm..	49
7.7.4	Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 20 mm..	50
<b>7.8</b>	<b>Měření úhlů .....</b>	<b>50</b>
7.8.1	Metodika měření.....	50
7.8.2	Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 5 mm .....	51
7.8.3	Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 5 mm .....	52
7.8.4	Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 5 mm .....	52
7.8.5	Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 10 mm .....	53
7.8.6	Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 10 mm .....	54
7.8.7	Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 10 mm .....	54
7.8.8	Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 15 mm .....	55
7.8.9	Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 15 mm .....	55
7.8.10	Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 15 mm .....	56
7.8.11	Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 20 mm .....	57
7.8.12	Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 20 mm .....	57
7.8.13	Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 20 mm .....	58
<b>8</b>	<b>TECHNICKO - EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ .....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>69</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>71</b>
<b>13</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>72</b>

# 1 ÚVOD

Voda je unikátní životadárný prvek, který se vyskytuje v různém skupenství takřka všude na Zemi. Voda v oceánech tvoří až 71 % celkového povrchu planety, lze ji však nalézt velmi hojně i v lidském těle. Tato chemická sloučenina vodíku a kyslíku neustále ovlivňuje celý nám známý svět již od prvního zrodu života.

Voda je také spolehlivá nositelka energie, která je schopna díky své erozivní schopnosti vytvářet a měnit řeky, kaňony i údolí. Svoji sílu často demonstruje prostřednictvím změn počasí a živelným pohromám. Díky lidské vynalézavosti máme možnost tuto energii v jistém smyslu ovládnout a využít pro další průmyslový rozvoj. I přesto, že voda ve svém kapalném skupenství není ani hořlavý ani tvrdý materiál, má schopnost rozříznout a obrobit s lehkou výpomocí i ten nejtvrďší materiál. Toho lze docílit, když vodu vystavíme velkému tlaku a usměrníme její tok do otvoru menší než 1 mm.

Obrábění vodním paprskem je v dnešní době již hojně využívaná technologie, má velký potenciál a mnoho výhod, pomocí kterých se dostává stále více do oblasti zájmu. Průmyslová výroba ve všech odvětvích se snaží každým rokem zvyšovat kvalitu a jakost svých produktů, což klade stále větší požadavky na obráběcí stroje. Často již nestačí zaběhlé konvenční třískové či beztřískové metody obrábění, proto se stále častěji volí tzv. nekonvenční metody, mezi které patří i obrábění vodním paprskem.

Na rozdíl od jiných nekonvenčních technologií je vodní paprsek ekologicky příznivý a dosahuje při tom pozoruhodných kvalitativních výsledků. Lze tedy předpokládat rychlý vývoj a zdokonalování vodního paprsku, který bude již brzy určovat nový standard obráběcí technologie pro 21. století.

## 2 TECHNOLOGIE POUŽÍVANÉ PRO DĚLENÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

Technologii pro dělení kovových materiálu je velké množství a dá se dělit podle mnoha různých kritérií. Obecně lze však technologie rozdělovat na konvenční a nekonvenční způsoby obrábění.

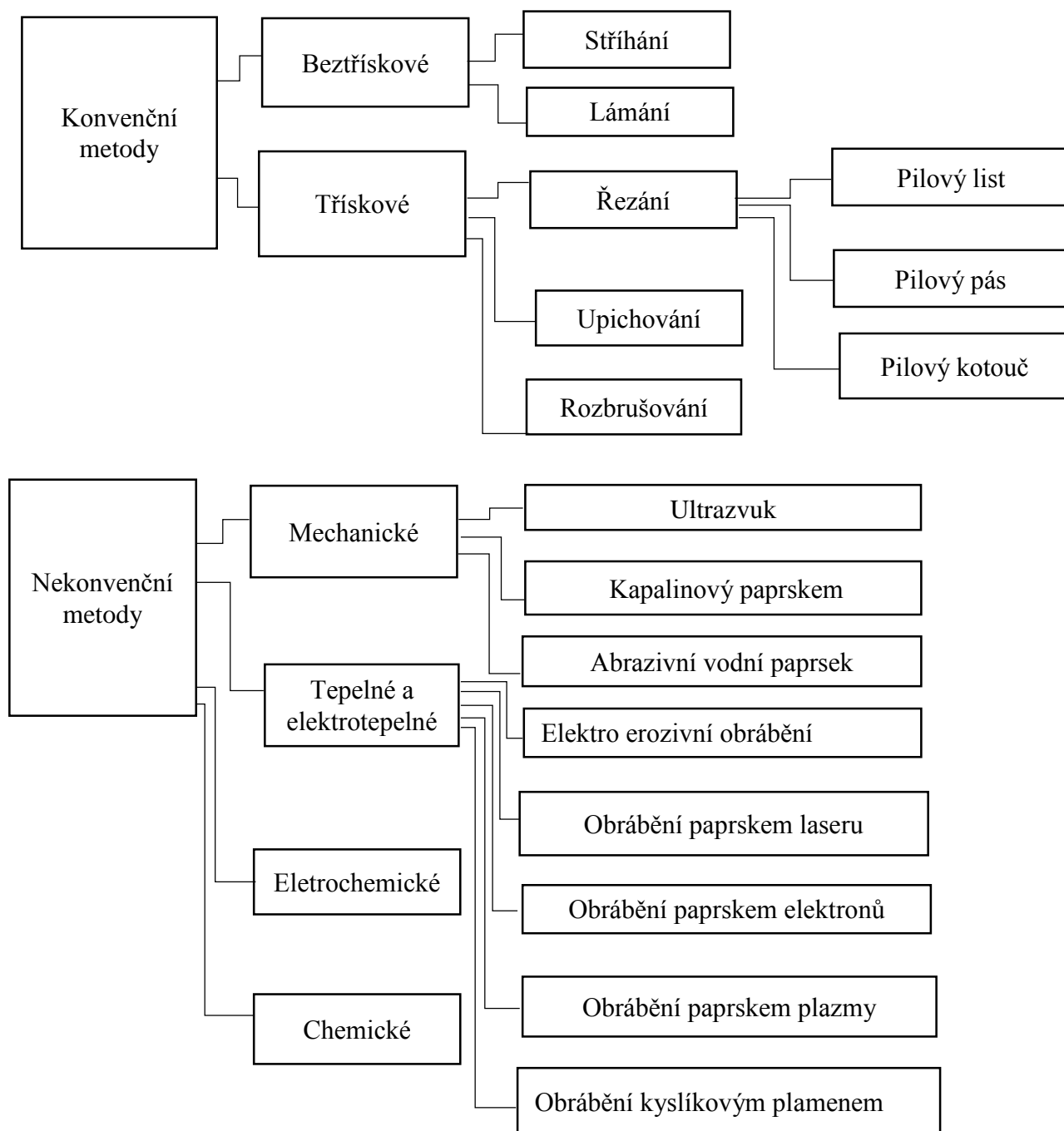
Konvenční obrábění je takové, kde působí na materiál mechanická síla pevného nástroje, jako je např. řezný nůž či ostří tvořené zuby. Patří mezi ně metody, které řezou jak bez tvorby třísky, tak i metody které třísku tvoří. Konvenční obrábění je omezeno mechanickými vlastnostmi řezného nástroje i materiálu, což má vliv na pracovní rychlost a možnosti využití. Ačkoliv jsou stále velmi hojně využívány, díky jednoduchosti a často také cenové dostupnosti mnohé průmyslové podniky volí inovativní nekonvenční způsoby obrábění.

Nekonvenční dělení materiálu jsou různorodé a často také diametrálně odlišné technologie, které však spojuje společný princip. Tyto metody využívají fyzikální a chemické vlastnosti materiálů. Základně je lze dělit na mechanické, tepelné, elektrotepelné, chemické a elektrochemické.

Každý způsob obrábění má svá specifika a výhody, respektivě nevýhody. Proto se v následující kapitole seznámíme s jednotlivými způsoby a přiblížíme si základní principy těchto technologií [14, 17].

Pro orientaci a správné zařazení jednotlivých technologií poslouží následující schema obr. 2.1.

Obr. 2.1 Schéma rozdělení jednotlivých technologií řezání kovových materiálů



## 2.1 Konvenční metody obrábění

V této kapitole jsou popsány jednotlivé metody technologií konvenčního obrábění jejich výhody i nevýhody a příklady použití v praxi.

### 2.1.1 Stříhání

Stříhání je nejrozšířenější operací při dělení materiálu. Jedná se o beztrískové dělení materiálu dvěma noži, které se proti sobě pohybují jako klín. Stříhání se používá na přípravu polotovarů, jako je stříhání tabulí plechu, dělení svitků, stříhání profilů, vývalků a další. [17, 20, 32]

Materiál lze dělit stříháním jak za tepla, tak i za studena. Za studena je možné stříhat oceli s pevností zhruba do 400 MPa, nebo plechy s tloušťkou do 25 mm. Tvrdé materiály s vyšší pevností je potřeba ohřát na teplotu 700 °C. Za tepla lze stříhat plechy s tloušťkou do 40 mm.

Pro dělení materiálu stříháním se používají rovnoběžné i různoběžné nože, skloněné nože či kotoučové nože. Dělit materiál lze v podélném i v příčném směru [17].

#### **Stroje a nástroje pro stříhání**

Univerzální tvářecí stroje se střížnými nástroji jako jsou klikové lisy, výstředníkové lisy, ohaňovací lisy (s mechanickým či hydraulickým pohonem), hydraulické lisy.

Přenosné nůžky s noži (ruční nebo elektrické ovládání), pákové a tabulové nůžky (ruční nebo motorové), nůžky s kotoučovými noži a speciální nůžky [20].

Výhody technologie stříhání, je vysoká produktivita a nízké provozní náklady, technologii lze při splnění požadavků na tloušťku a pevnost provádět za studena.

Nevýhody technologie je vznik otřepu a deformačního zpevnění v okolí stříhu. Stroje a nástroje jsou drahé, tloušťka stříhaného materiálu je omezena [37].

### 2.1.2 Lámání

Lámání se provádí na speciálních lámacích stojích. Před lámáním se polotovar nahřeje kyslíkoacetylenovým plamenem v určeném místě ulomení. Tím se vytvoří vrub a zmenší se plocha průřezu. Lámáním lze dělit pouze pevnější materiály s mezí pevnosti vyšší než 600 MPa. Nevýhodou je nízká kvalita lomové plochy, možnost vzniku trhlin a jejich šíření do materiálu. Dříve se metoda používala hlavně pro přípravu polotovarů pro tváření za tepla, v dnešní době se však již v průmyslu nepoužívá [17].

### 2.1.3 Řezání

Řezání je nejpoužívanější způsob dělení tyčového materiálu.

Řezat kovový materiál lze na kotoučových, rámových, nebo pásových pilách. Jedná se o třískové dělení materiálu. Hmotnost odpadu závisí na tvaru a velikosti řezného zubu nástroje. Řezat materiál lze jen do určité tvrdosti, jinak se musí předem vyžíhat. Touto technologií lze zajistit hladký řez a přesnou hmotnost řezaného polotovaru a kolmost řezu [17, 12].

### **Řezání pilovým listem**

Princip řezání pilovým listem spočívá ve vnikání břitu nástroje do materiálu obrobku, kdy nástroj koná přímočarý vratný pohyb. Pilové listy jsou ocelové pásy opatřené zuby na jedné či obou stranách. Vyrábějí se z rychlořezné oceli.

Volba pilového listu se správným počtem zubů závisí na rozměrech a druhu řezaného materiálu.

Řezat pilovým listem lze ruční pilkou, nebo strojně pomocí rámové pily [1].

### **Řezání pilovým pásem**

Pilové pásy lze rozdělit na bimetalické a z nástrojové oceli.

Bimetalické, jsou vyrobeny z ušlechtilé oceli speciálního složení, jsou velmi pružné s tvrdostí až 50 HRC (Rockwella).

Pásy z uhlíkové nástrojové oceli jsou vysokofrekvenčně kaleny a popouštěny na tvrdost až 65 HRC. Pilové pásy z nástrojové oceli se používají na řezání ocelí běžných jakostí do pevnosti v tahu 700 MPa.

Řezání se provádí na pásových pilách. Ty mohou být svislé, nebo vodorovné

### **Řezání pilovým kotoučem**

Pilové kotouče se používají na řezání kovu stejně jako pilové listy a pilové pásy na kov. Jsou určeny na řezání menších obrobků. Výhodou oproti strojním listům a pásům je vyšší produktivita, rychlost i přesnost. Řez mnohdy nevyžaduje další úpravy [32].

## **2.1.4 Upichování**

Používá se poměrně zřídka, neboť je to drahý způsob dělení na upichovacích automatech nebo univerzálních soustruzích. Nástrojem je upichovací nůž, který vniká do rotujícího obrobku, a odebírá třísku. Ztráty materiálu jsou poměrně značné, na druhé straně lze získat velmi hladké plochy. Používá se pro přesné rozměry polotovarů. Při řezu nedochází ke stlačení obrobku [17].

### 2.1.5 Rozbrušování

Při této metodě dělení materiálu se jako řezný nástroj používá tenký řezací kotouč, ten je zhotoven ze zrn karbidu křemíku, nebo syntetického korundu. Těleso kotouče je vyztuženo sklotextilem [14]. Rozbrušování je široce užívanou metodou dělení použitelnou pro všechny druhy ocelí, litin a neželezných kovových materiálů. Podle naměřených údajů renomovaného německého výrobce řezacích kotoučů Krebs & Riedel [30] lze rozbrušováním dosáhnout průměrné aritmetické úchylnosti profilu drsnosti Ra povrchů vzniklých dělením až 0,8  $\mu\text{m}$  [34, 45].

## 2.2 Nekonvenční metody obrábění

V této kapitole si jednotlivě přiblížíme dnes již běžně používané nekonvenční technologie dělení materiálu a stejně jako v předešlé kapitole si popíšeme jejich výhody i nevýhody a použití v praxi.

### 2.2.1 Ultrazvuk

Je to způsob používaný pro obrábění tvrdých a křehkých materiálů a materiálů elektricky nevodivých.

Úběr materiálů vzniká abrazivním účinkem brusiva, které se přivádí ve formě suspenze mezi ultrazvukem rozkmitaný nástroj a obráběný materiál.

Tlakem kmitajícího nástroje jsou zrna brusiva vtlačována do materiálu, kde odebírají jeho drobné částice. Druh brusiva volíme dle druhu obrobku. Pro měkký materiál zvolíme karbid křemíku a pro tvrdší materiál karbid boru.

Nevýhodou je, že abrazivní účinek zrn působí nejen na obrobek, ale i na nástroj [31].

### 2.2.2 Obrábění paprskem vody a abrazivním paprskem

Využívá k oddělování materiálu kinetickou energii vysokotlakého a vysokorychlostního vodního proudění, nebo kombinovanou s kinetickou energií abrazivních částic.

K úběru materiálu dochází erozivním procesem v důsledku působení řezného media, usměrněného do úzkého paprsku, který prochází přes trysku do obrobku.

Kapalina stlačená na 380 MPa prochází tryskou a dopadá na dělený materiál. Běžně lze dělit materiál o tloušťce až 150 mm [31, 44].

### 2.2.3 Elektroerozivní

Zahrnuje řadu metod, jejímž charakteristickým znakem je úběr materiálu vyvolán periodicky se opakujícími elektrickými výboji mezi nástrojem a obrobkem. Z obráběného materiálu

jsou tavením a odpařováním oddělovány velmi malé částice, které jsou odplavovány dielektrickou kapalinou. Jedná se tedy o elektrickou erozi, jev založený na odebrání částic povrchových vrstev materiálů účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů [31, 19].

### **Elektrojiskrové hloubení**

Jedná se o základní metodu elektroerozivního obrábění. Vytváří se tak zejména vnitřní plochy složitých tvarů, zápustek, střížných nástrojů apod. Jednu elektrodu tvoří nástroj, který je negativem obráběné plochy, druhou tvoří obrobek.

Výhodou je možnost obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti, žádné mechanické zatížení nepůsobí na obrobek, jednoduchá výroba nástrojových elektrod, na hranách obrobků nezůstávají otřepy a automatizace výrobního procesu. Nevýhodou je nutnost ponoření obrobku do kapaliny v průběhu obrábění, materiál je vystaven teplotnímu namáhání, čímž mohou vzniknout trhliny [31, 19].

### **Elektrojiskrové řezání**

Tato metoda se vyznačuje minimální šířkou řezu a uplatňuje se při výrobě střížných a lisovacích nástrojů. Elektrodou je tenký drát, který se průběžně odvíjí z cívky a přes vodící zařízení prochází místem řezu. Drát je napínán konstantní silou a prostor mezi obrobkem a drátem je zaplněn dielektrickou kapalinou. Elektrody jsou vyráběny z mědi a jejich slitin, molybdenu, případně povlakované dráty obsahující vysoké procento zinku [31, 19].

## **2.2.4 Obrábění paprskem plasmy**

Při tomto způsobu obrábění je materiál odtavován, odpařován a rozprašován paprskem plasmy, která vystupuje z hořáku vysokou rychlostí. Plasma je vodivý stav plynu, který obsahuje směs volných elektronů a má vysokou teplotu – až 30 000 °C. Proces obrábění je tak intenzivní, že se částice obráběného materiálu odtavují velmi rychle a tepelně ovlivněná vrstva nepřesáhne 1 mm. Vzhledem k velké rychlosti odpovídá přesnost hrubovacím operacím [31, 44].

## **2.2.5 Obrábění paprskem laseru**

Při obrábění dochází k úběru materiálu účinkem silného paprsku monochromatického světla na velmi malou plochu. Působením laserového paprsku dochází k místnímu ohřevu na velmi vysokou teplotu až 10 000 °C, která způsobí jeho roztavení. Mohou se obrábět různé materiály od plastů až po těžkoobrobitelné materiály. Výhodou je vysoká přesnost a úzké řezy. Laserové světlo vzniká v prostředí elektromagnetického záření. Princip je založen na vysoké koncentraci elektromagnetického záření viditelného světla na malou plochu obrobku, čímž se



přemění na tepelnou energii přesahující teplotu tavení obráběného materiálu, který se v místě dopadu roztaví a vypaří. Zdrojem záření jsou lasery, jejichž paprsky se přes optickou čočku soustřeďují na malou plochu, čímž se zvýší teplota, která způsobí vypaření kovu [31, 45].

### 2.2.6 Obrábění paprskem elektronů

Obrábění elektronovým paprskem je založeno na využití kinetické energie proudu urychlených elektronů. V místě dopadu paprsku elektronů se jejich kinetická energie mění v energii tepelnou. Materiál obrobku se taví a následně odpařuje. Paprsek vniká do materiálu do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie koncentrovaná pod povrchem způsobuje erupční odpařování materiálu. Částičky vypařujícího se materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Vzniklé páry odpařeného materiálu jsou zionizovány a způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. Opakováním tohoto procesu dojde k úběru materiálu. Výhodou metody je možnost obrábět libovolný materiál bez ohledu na jeho fyzikální vlastnosti, tepelně ovlivněná vrstva je minimální a lze ji zautomatizovat. Nevýhodou je umístění, celé zařízení musí být ve vakuové komoře z korozi-vzdorné oceli, je to velice drahé a prostorově náročné [5].

### 2.2.7 Obrábění kyslíkovým plamenem

Je vhodné pro tlustší materiály a tvarování, spočívá v ohřátí kovu na teplotu jeho spalování v proudu čistého kyslíku při teplotách pod teplotou tavení, aniž by došlo k roztavení kovu. Řezání plamenem může být prováděno ručními řezacími hořáky, přenosnými řezacími stroji, nebo stacionárními řezacími stroji. Dobře řezatelné jsou všechny nelegované, nevytvrzené konstrukční oceli s obsahem uhlíku do 0,3 %, nízkolegované oceli i litiny.

Při vyšším obsahu uhlíku je potřeba materiál předehřát, nebo žíhat. Teplota předehřevu je dána obsahem uhlíku a tloušťkou řezaného materiálu [1].

### 2.2.8 Elektrochemické obrábění

Je to řízený proces oddělování materiálu prostřednictvím anodického rozpouštění v elektrolytu, který proudí mezerou mezi elektrodami. Vyrábí se takto tvarově složité součásti (zápustky, lisovací formy apod.) Nástroj má tvar negativu vyráběné součásti.

Základní způsoby: v proudícím elektrolytu, rotující elektrodou, nebo proudícím elektrolytem, to se používá převážně pro tvarové obrábění, pracovní elektroda je katoda, anoda. K obrábění je využito vysoké hustoty proudu. Pro odstranění pasivní vrstvy používáme elektrolyt

proudící mezi elektrodami. Při obrábění se součástka nezahřívá (jen 100 °C), nevzniká nebezpečí změny struktury obráběného materiálu. Další způsob je s otáčející se elektrodou, zde se pasivní vrstva z obrobku (anody) soustavně odstraňuje otáčejícím se nástrojem (diamantový brusný kotouč), mezi nějž se přivádí proud elektrolytu s rozptýleným brusivem. Tato metoda se používá k broušení nástrojů s břitovými destičkami ze slinutých karbidů a také k dělení tvrdých materiálů [31].

### 2.2.9 Chemické

Podstatou metody je řízené odleptávání vrstev materiálu a tloušťce od několika setin mm do několika mm z povrchu obrobku. Obrábění je založeno na chemické reakci obráběného povrchu s pracovním prostředím. Místa, která nemají být obráběna, jsou chráněna speciálním povlakem. V praxi se uplatňují dvě metody:

chemické prostřihování – umožňuje zhotovovat tenké a složité výlisky z tenkého plechu, nebo fólie bez otřepů

chemické rozměrové leptání – je označováno jako chemické frézování, tvar se přenáší pomocí šablon [31].

## 3 DĚLENÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPSKEM

V této kapitole se zaměříme na technologii dělení materiálu vodním paprskem. V první kapitole je uvedena stručná historie v dalších kapitolách také princip a funkce.

### 3.1 Historie vodního paprsku

Kořeny této technologie jsou zasazeny na Novém Zélandu a v Sovětském svazu, kde při hydraulické těžbě uhlí, byla odebírána a shromažďovaná voda z potoků kterou se posléze omývali odstřelené kusy skal s cílem odstranit nečistoty a malé kusy uhlí. Tento způsob těžby byl přepracován v Jihoafrických zlatých dolech. Zde byla voda použita pro přepravu odstřelených kusů skal z pracovní plochy. Zlatokopové v Kalifornii v letech 1853 – 1886 používali vodní paprsek k oddělování měkké horniny od zlata při jeho těžbě. Využití vodního paprsku přímo pro dělení materiálu se začalo zkoumat až ve 20. století. Sovětský svaz se roku 1930 pokusil o řezání skály tlakovou vodou. Dokázali vyvinout tlak až 7000 barů. Nebyl ale použit vodní paprsek, nýbrž vodní dělo, které možný potenciál takového tlaku nedokázal naplno využít [41].

Roku 1950 profesor Norman Franz inženýr lesního hospodářství z Michiganu, který spolupracoval s výrobní společností McCartney, instaloval první řezačku na řezání vodním paprskem. Řezaný materiál bylo dřevo [27].

Jeho experimenty napomohli vývoji vodního paprsku do dnešní podoby. V sedmdesátých letech 20. století bylo ve Spojených státech možné vytvořit tlak až 40 000 barů. V této době se vodní paprsek používal zejména v kombinaci s vrtačkou. V roce 1972 profesor Norman Franz představil plně funkční přístroj pro dělení materiálu vodním paprskem. Stále se však jednalo o čistý vodní paprsek. Byla to firma Flow Industries spolu s profesorem Franzem, která první přidala do stroje písek pro lepší čištění a povrch řezu. Posléze byl prokázán pozitivní účinek abrazivního řezu na řezání skla a keramiky. Od roku 1980 se dělí abrazivním vodním paprskem také beton a ocel [21].

Roku 1983 společnost Flow v čele s doktorem M. Hashish, představuje první komerční systém abrazivního vodního paprsku pro řezání automobilového skla. Letecký a kosmonautický průmysl, považují tuto technologii ideální pro řezání titanu, kompozitních materiálů i uhlíkových vláken. Stálý pracovní tlak se postupně zvyšoval z hodnot 2400 barů až do dnešních hodnot 6000 barů. Tyto hodnoty tlaku posouvají technologii mnohem dál, než tomu bylo doposud, řeší některé nedostatky a v některých případech zvyšují efektivitu provozu [21, 38].

## **3.2 Technologie dělení materiálu vodním paprskem**

Když obyčejnou vodu stlačíme zhruba na 4000 barů a posléze ji vypouštíme otvorem menší než 1 milimetr, získáme tím rychlost průtoku překračující 3-4 krát rychlost zvuku. Pokud tento proud vody namíříme na materiál, dostaneme výkonný řezací nástroj. Přidáním abrazivních částic jeho řezací schopost několiksetkrát znásobí. Takový vodní abrazivní paprsek je posléze schopen řezat téměř jakýkoliv materiál [43].

## **3.3 Princip metody**

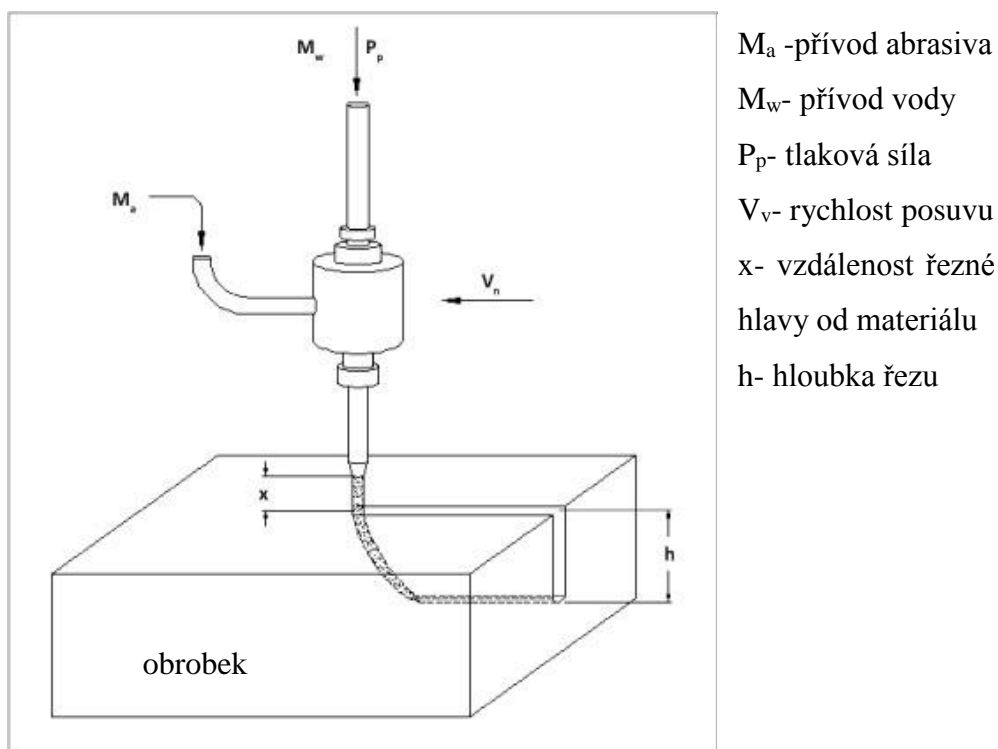
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2, metoda využívá kinetickou energii vysokotlakého a vysokorychlostního proudění na jednotku plochy. Abrazivní částice znásobuje mechanický účinek. Materiál je vystaven úzkému vysokotlakému paprsku vody (až několik set MPa), který se přes trysku dostává do obrobku. Dochází k erozivnímu procesu v důsledku působení vody - hydrodynamické obrábění, nebo vody s abrazivními částicemi - přidaná kinetická energie.

## **3.4 Uspořádání**

Vysokotlaké čerpadlo připravuje vodu o tlaku typicky 4000 barů. Ta je přiváděna soustavou trubek k trysce o průměru od cca 0,1 mm do 0,5 mm. Z trysky proudí paprsek rychlostí okolo

1000 m/s. Pro zvýšení účinnosti prochází paprsek směšovací tryskou, kde se do vody přimíchává abrazivní materiál. Na výstupu směšovací trysky máme tedy „vysokotlaký abrazivní paprsek“. Kinetická energie směsi vody a abraziva dopadá na materiál a odtrhává jeho jednotlivé částičky. Jak takový řez vypadá, znázorňuje obr. 3.1. Tento princip předurčuje vysokotlaký paprsek k široké škále použití. Neexistuje materiál, který by paprsku odolal. Omezení však přinášejí praktické aspekty. Některé materiály nesnesou styk s vodou, jiné se tříští v důsledku vznikajících vibrací, některé kompozitní materiály se separují atd. I tak zůstává překvapivě široké pole použití [13].

Obr. 3.1 Schématické znázornění řezného procesu



Zdroj: [http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S0038-23532012000500018&script=sci\\_art-text](http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S0038-23532012000500018&script=sci_art-text)

Je třeba rozlišovat dva základní typy této technologie:

Water Jet Machinig (WJM) - obrábění čistým vodním paprskem

Abrasive Water Jet Machining (AWJM) - obrábění vodním paprskem s abrazivními částicemi

### 3.5 Řezání čistým vodním paprskem

Jedná se o původní metodu, která se začala používat komerčně už v 1. polovině 70 let 20. století na řezání vlnitého kartonu.

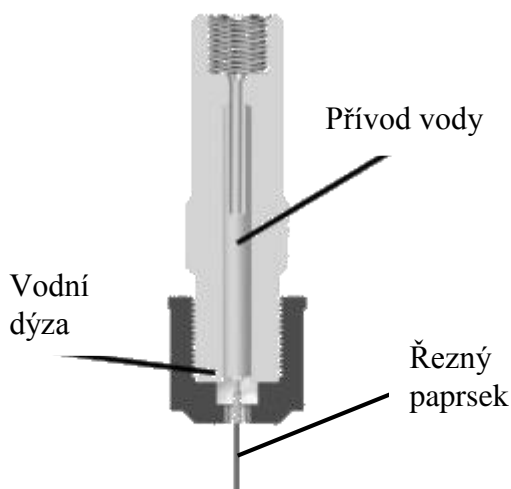
V dnešní době se technologie využívá zejména na řezání jednorázových plen, hedvábného papíru a vybavení interiéru automobilů.

Rychlost řezu se pohybuje u pevnějších materiálů jako je laminát a kevlar v hodnotách kolem  $5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , u jemných materiálů jako papír, lepenka apod. lze dosáhnout rychlosti až  $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  [8].

Během procesu řezání nevznikají žádné jedovaté páry, prach, nebo plyny, proto se metoda hodí také pro řezání potravin, jako jsou koláče, buchty, ovoce, zelenina, maso a hluboce zmražené výrobky [10].

Jako řezný nástroj zde figuruje velmi tenký proud vody (obr 3.2) o průměru 0,1016 až 0,254 mm (0,004 palce až 0,01 palce). Díky tomu je možné řezat mimořádně složitou geometrii. Další výhodou je minimální odpad materiálu při řezání [8].

Obr. 3.2 Schéma řezné hlavy vodní trysky



Zdroj: [http://www.waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53](http://www.waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53)

Vodní dýza je vyrobena ze safíru, rubínu, nebo diamantu. Jejich životnost je přímo úměrná množství minerálů obsažených ve vodě a pohybuje se v rozmezí 50 až 500 provozních hodin [8, 10, 42].

### 3.6 Řezání abrazivním vodním paprskem

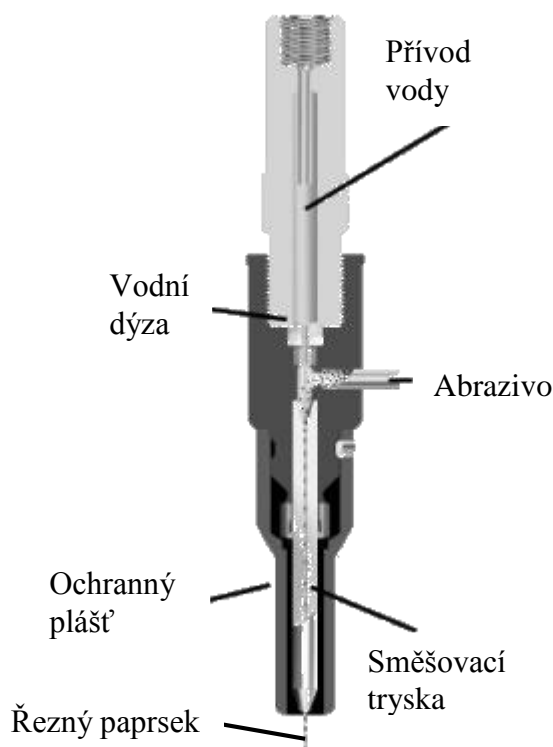
Abrazivní vodní paprsek se liší od čistého vodního paprsku jen v několika málo aspektech. Hlavním rozdílem je řezné médium. Zatímco u čistého paprsku je to voda, u abrazivního paprsku se jedná o abrazivní částice. Ty jsou přidávány do trysky neboli dýzy a posléze urychlovány a vedeny vodním paprskem na materiál (obr 3.3). Materiál je rozrušován právě těmito částicemi a nikoliv vodou, ta v tomto případě funguje jako podpůrný prostředek [7, 10].

Abrazivní paprsek je 100 až 1000 krát výkonnější než čistý paprsek vody. Řezný potenciál této technologie je tak téměř neomezený, co se děleného materiálu týče. Abrazivní paprsek je schopen řezat materiály s tvrdostí rovnající se, nebo mírně převyšující tvrdost keramiky s vysokým obsahem oxidu hlinitého (tzv. korundu), proto se dnes používá zejména pro dělení oceli, litiny, kámenů, kompozitů i keramiky.

Jedná se o mimořádně všestranný technologický proces, ve kterém nejsou žádné tepelně ovlivněné zóny a žádné mechanické namáhání, navíc se dá snadno programovat.

Proud abrazivního paprsku je o průměru 0,5 až 1,3 mm, díky tomu je stejně jako v případě čistého vodního proudu možné řezat složitou geometrii a odpadní materiál je minimální. Lze řezat jak tenké materiály, tak i materiály o tloušťce až 254 mm (10 palců). Lze také řezat ve svazcích, což má velmi pozitivní vliv na úspory nákladů [7, 42].

Obr. 3.3 Schéma řezné hlavy abrazivní vodní trysky



Zdroj: [http://www.waterjets.org/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53](http://www.waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=4&id=46&Itemid=53)

Obě popsané technologie mají v průmyslu své místo, abrazivní paprsek je však univerzálnější technologie. Jedno nastavení paprsku je vyhovující pro téměř všechny druhy práce. Je možné snadno přepínat mezi použitím jedné a více hlav, navíc lze jednoduše přepnout obráběcí jednotku z abrazivního paprsku na čistý paprsek vody.

### 3.7 Obrábění vodním paprskem s ledovými krystaly

Existuje také technologie Ice Jet Machining (IJM). Jedná se o novou technologii podporovanou od roku 2010 Evropskou unií. Ačkoliv je technologie stále ve stádiu výzkumu lze předpokládat, že v budoucnu technologie vyplní prostor mezi vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem, který ji částečně nahradí.

Krystaly ledu obsažené v kapalině nahrazují abrazivo a umožňují tak obrábět mnohem pevnější materiály, na které by klasický vodní paprsek nestačil. Paprsek je znázorněn na obr. 3.4. Dalším kladem této technologie je ekologická a částečně i ekonomická výhoda oproti AWJM. Led je po použití rozpuštěn společně s vodou a její následná recyklace je jednoduchá. Pro abrazivní vodní paprsek je k separaci vody a abrazivních částic potřeba použít další technologii [40, 11, 36].

*Obr. 3.4 Řez ledovým paprskem*



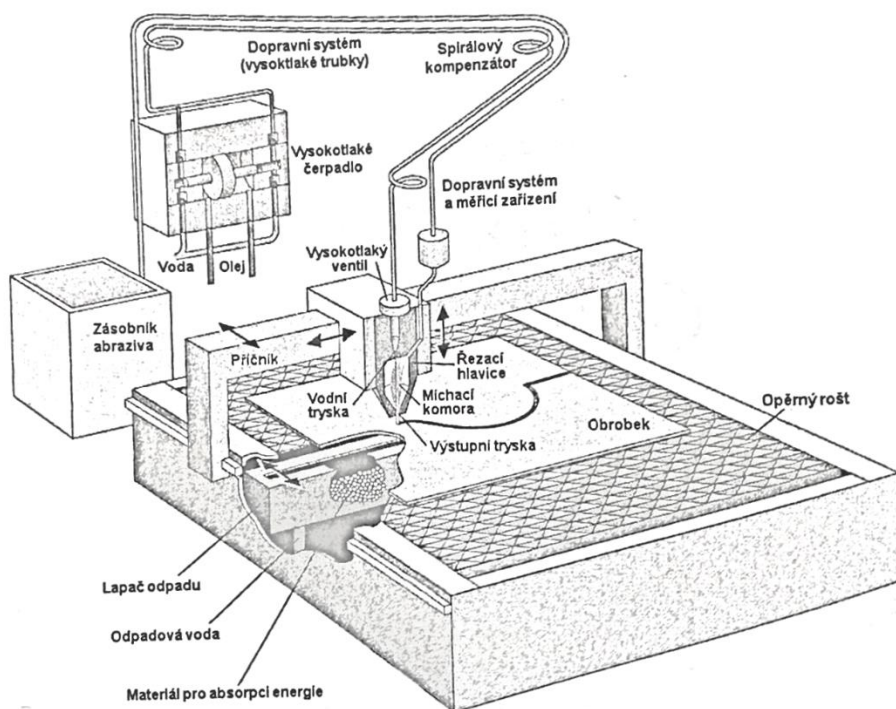
Zdroj: <http://www.icejet.eu/descriptionTechnology.php>

## 4 HLAVNÍ KONSTRUKČNÍ ČÁSTI STROJE

Řezání vodním paprskem i vodním abrazivním paprskem se může jevit z technologického hlediska jako prosté, z konstrukčního však nikoliv (obr. 4.1). Stroje pro tyto technologie jsou konstrukčně složité a velice náročné na přesnost a výdrž jednotlivých materiálů vzhledem ke

značnému tlakovému namáhání, které je pro tento způsob řezání typické. V této kapitole se podíváme a popíšeme základní části stroje.

Obr. 4.1 Schéma konstrukčních částí stroje AWJM



Zdroj: [http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP\\_STROJ\\_ST05\\_003\\_004.jpg](http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST05_003_004.jpg)

## 4.1 Hydraulická jednotka

Slouží k čerpání vody do systému pomocí hydraulických čerpadel. Vysokotlaký vodní paprsek je posléze generován multiplikátorem, nebo přímo čerpadlem s triplexovým plunžrem. Výrobci používají rozdílnou technologii. Stroje s Multiplikátorem vyrábí Flow systems. Japonské firmy, např. Sugino Machina, dávají přednost druhé popsané technologii.

## 4.2 Multiplikátor

Je součástí hydraulické jednotky a používá se pro zvýšení tlaku vody na běžných 380 Mpa (obr 4.2). Dnes má tato technologie největší potenciál díky schopnosti vygenerovat tlaky až do 700 MPa, a dosahovat tak výkonu téměř 90 kW při průtoku 12 l.m<sup>-1</sup>. Znásobení tlaku vody vychází z Pascalova zákona a závisí na poměru pracovních ploch dvou vzájemně spojených pístů.

Působením tlaku  $p_1$  na píst, vyvolá tlak  $p_2$  tolikrát větší, kolikrát je menší plocha  $S_2$ . vzhledem k ploše  $S_1$  [33].

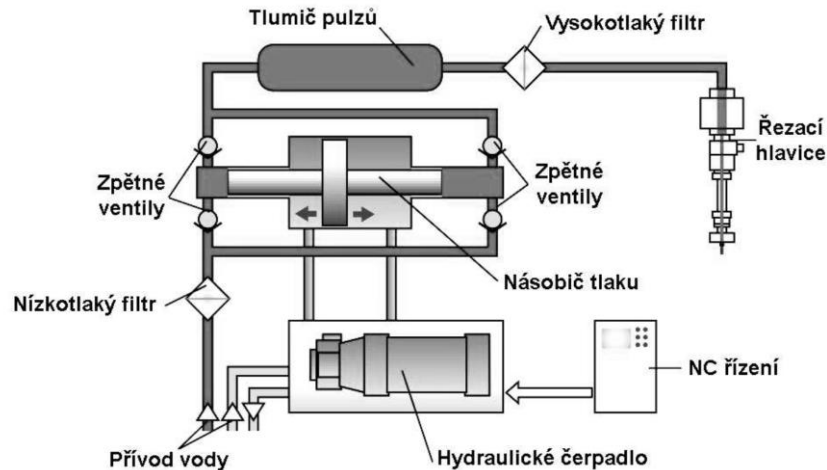


$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \text{ [Pa]} \quad (1)$$

V praxi se používají dvojčinné multiplikátory, pro které platí:

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \text{ [Pa]} \quad (2)$$

Obr. 4.2 Schema multiplikačního zařízení

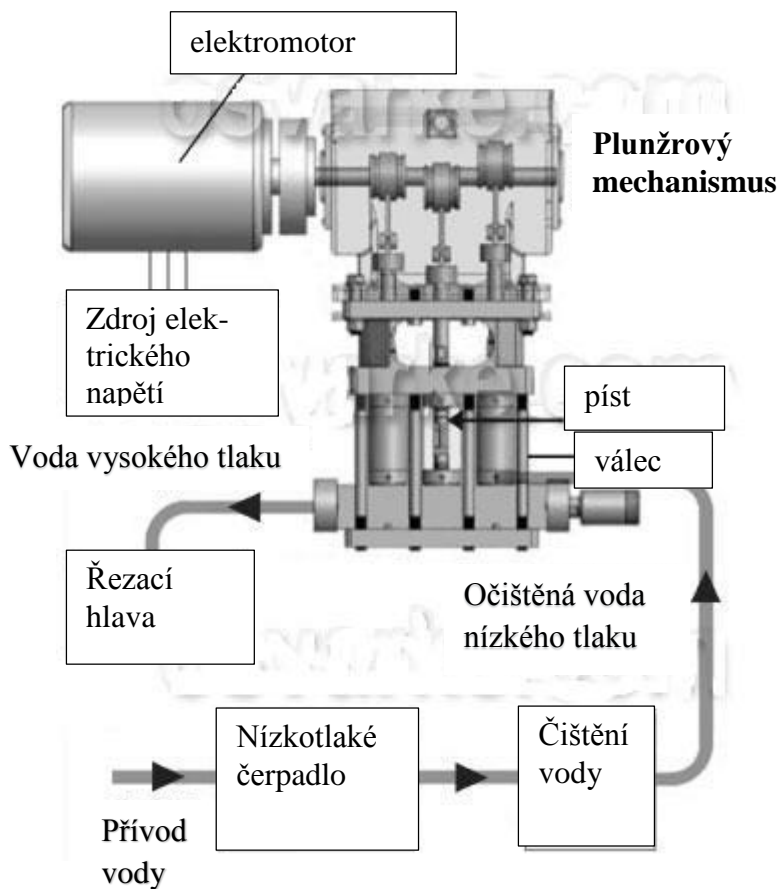


Zdroj: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28867](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28867). Diplomová práce.

### 4.3 Plunžrové čerpadlo

Může být použité bez multiplikátoru. Tato čerpadla pracují na stejném principu, jako čerpadla pístová (Obr. 4. 3). Dříve se tento druh čerpadel používal na odstraňování vrstev, čištění povrchů, sanací betonových povrchů, atd. Byl schopen vyvinout tlak o hodnotách 200 MPa. Dnes jsou schopna tyto čerpadla pracovat s tlakem do 350 Mpa při výkonu 750 kW a průtoku dosahující až 400 l.m<sup>-1</sup>. Velkou výhodou je také vysoká účinnost čerpadla (až 95 %) [16, 28, 23].

Obr. 4.3 Schéma práce plunžrového čerpadla



Zdroj: <http://weldingcertificates.blogspot.cz/2012/02/install-water-jet-cutting.html>

#### 4.4 Akumulátor tlaku

Je vysokotlaké zařízení, které tlumí rázy v kapalině vyvolané oscilačním pohybem pístu. Zařízení je umístěno v systému za multiplikátorem. Účelem akumulátoru je eliminace tlakových špiček v multiplikátoru a zajištění distribuce stabilního a plynulého toku vysokotlakého paprsku do řezací hlavy pro maximální efektivitu a bezpečnost celého systému [16, 4, 18].

#### 4.5 Filtr

Filtry jsou neoddělitelnou součástí zařízení, filtrují kapalinu a odplavují nečistoty do velikosti 1,2 až 0,5  $\mu\text{m}$ , zároveň chrání trysku před možným poškozením cizími příměsemi.

## 4.6 Potrubí na rozvod vody a těsnění

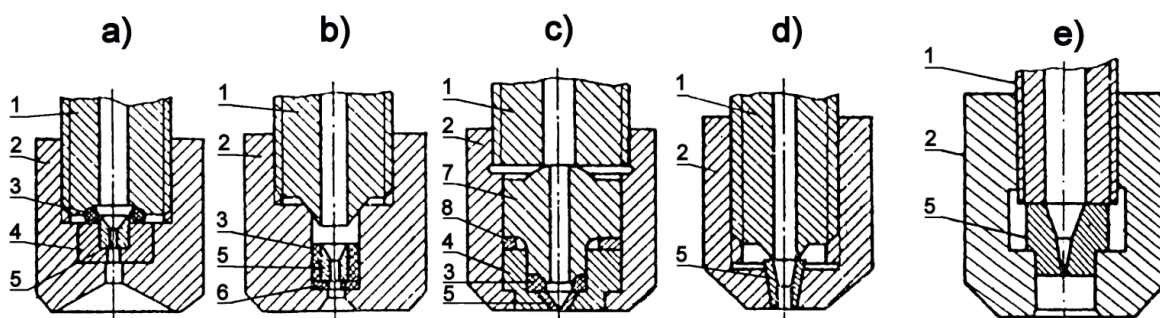
Skládá se z různých druhů armatury o průměru 6 až 14 mm a spojovacích elementů vyrobených z korozi-vzdorné oceli. Potrubí je přispůsobené flexibilnímu pohybu řezací hlavy. V současnosti jsou tyto komponenty normalizované a standardizované [18].

## 4.7 Řezací hlava

Je to základní a nejdůležitější část zařízení. Ovlivňuje kvalitu řezného paprsku i kvalitu řezu. Řezací hlavy se vyrábějí s bajonetovým uzávěrem pro snadnou montáž a efektivnější upínání. Velký důraz je také kladen na hmotnost hlavy, aby nezatěžovala nosné rameno, což by mohlo snížit přesnost řezání. Konstrukce řezací hlavy je odlišná pro každou z popsaných metod řezání vodním paprskem. Hlavní částí řezací hlavy je dýza [18].

Rozlišujeme 5 základních tvarů řezacích hlav s vodními dýzami obr. 4. 4

Obr. 4.4 Tvary dýz řezací hlavy



Zdroj: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53397](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53397)

- 1- přívodní potrubí, 2- těleso držáku, 3- pružný člen, 4- oporná podložka, 5- vodní dýza, 6- pružné těsnění, 7- stabilizátor, 8- těsnění

Tvary dýz: a) válcová, b) kuželová s přechodem do válce, c) kuželová, d) kónická, e) složená

Vodní dýza, ve které je úzký výtokový otvor o průměru 0,075 mm se vyrábí z tvrdokovu, safíru, rubínu, slinutého karbidu či diamantu. Materiál se volí dle působících tlaků. Pro střední a vysoké tlaky se doporučují rubínové, safírové popřípadě diamantové dýzy [39].

Diamantová dýza má v porovnání se safírem 10 x vyšší životnost, což je velmi výhodné z hlediska údržby. Průměrná pracovní doba safírové dýzy je 200 hodin, po této době se dýza zaneše nečistotami a minerálními složkami obsaženými ve vodě. Diamantovou dýzu je možné od

nečistot očistit a opětovně plnohodnotně použít. Cena diamantové dýzy je 7 až 10 krát vyšší než ze safíru či korundu.

Podle konstrukce dýzy se rozlišuje také způsob řezání abrazivním vodním paprskem (Obr. 4. 5). Ten tak lze dále rozdělit na dvě hlavní technologie:

#### 4.7.1 AWJ (abrasive water jet)

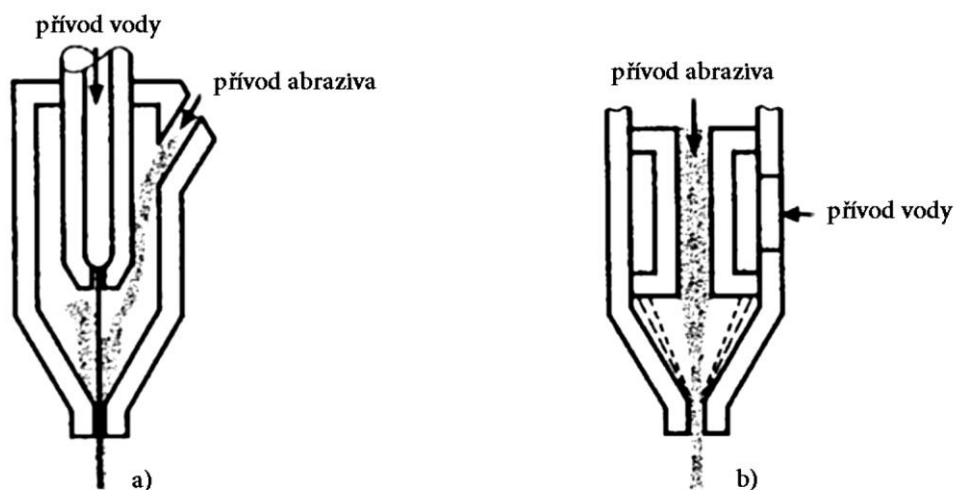
Brusivo je vedené ze zásobníku do mísící komory, ve které je vysokotlakým vodním paprskem strháváno a urychlováno na materiál. Systém tak používá vodní paprsek pro smíchání a následné vytvoření vodního abrazivního paprsku. Používané tlaky vody jsou 7 až 400 MPa, přítok abraziva se pohybuje v rozmezí 1 až 20 kg.min<sup>-1</sup>.

#### 4.7.2 ASJ (abrasive slurry jet)

Systém s přímým vstřikováním. V tomto případě se do dýzy přivádí stlačená suspenze smíchaná s vodou v tlakové nádobě. Používané tlaky jsou do 100 Mpa, přítok suspenze je kolem 20 kg.min<sup>-1</sup>. Pro přesné řezání se udává 1 až 3 kg.min<sup>-1</sup>.

Podrobné hodnocení obou technologií z hlediska své výkonosti podává Hashish [18].

Obr. 4.5 Konstrukce dýzy



a) Abrasive water jet

b) Abrasive slurry jet

Zdroj: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53397](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53397)

Z porovnání kvality řezu obou technologií přívodu abraziva vychází, že ASJ system má vyšší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic, než AWJ, zároveň system ASJ

umožňuje použití užšího průměru paprsku a dýzu kompaktní konstrukce jedná se však o dražší technologii.

## **4.8 Typy vodního paprsku**

Podle konstrukčních možností zařízení a požadavku použití existují tři nejčastěji využívané druhy paprsků.

### **4.8.1 Systém pulzujícího paprsku**

Používá opakované a krátkodobé působení impulzního paprsku, vznikají tlakové špičky, které urychlují rozšíření řezné mezery. Metoda je vhodná k vrtání, řezání, lámání a drobení hornin, uplatňuje se v těžbě nerostných surovin.

### **4.8.2 Systém kontinuálního paprsku**

Je charakterizován stálou energií hladiny paprsku během pracovního procesu, je to nejvíce rozšířená metoda pro dělení materiálů, používá se pro řezání prakticky všech druhů materiálů

### **4.8.3 Systém kavitačního paprsku**

Pracuje na principu lokálního porušení materiálu destrukční silou kavitačních bublin, kavitační paprsek je paprsek kontinuální s obsahem kavitačních bublinek.

Ultravysokotlaký paprsek

### **4.8.4 Ultravysokotlaký vodní paprsek**

Dnešní technologie nám dovoluje vytvářet také tzv. ultravysokotlaký vodní paprsek, jedná se o kontinuální paprsek pod tlakem až 6000 barů.

Tato technologie je podle [38] zásadní krok ke zvýšení kvality řezání, zvýšení rychlosti řezu a snížení jednotkových nákladů. To vše díky vyššímu tlaku vody, což dovoluje snížit množství abraziva a snížení spotřeby vody díky použití úzké trysky.

Dnešní zkušenost kvality této technologie potvrzuje, je však stále častěji poukazováno na nevýhody této technologie.

Pořizovací cena a servis těchto strojů je vyšší a je taky pozorována mnohem větší spotřeba elektřiny. Životnost náhradních dílů je díky ultravysokým tlakům v systému nižší než u běžných 4000 barů. To vše má za následek mnohem vyšší jednotkové náklady. Nákup takového stroje se proto nemusí pokaždé vyplatit [25, 35].

Firma Omax porovnávala stroje s tlakem až 9000 barů s dnes již běžnějšími 6000 barů. Ve výsledku se potvrdilo tvrzení, že více tlaku nemusí znamenat lepší výsledky. Všichni kdo technologii testovali, dali přednost 6000 barům a to hlavně díky nižším nákladům na provoz při srovnatelných řezných podmínkách. Cestou k nejlepším výsledkům je podle tohoto srovnání využití 6000 barů v kombinaci s moderním řídicím systémem [2].

## 4.9 Úprava vody

Voda z vodovodní sítě obsahuje mnoho nežádoucích látek, minerálů a jiných látek, které mají nežádoucí vliv pro funkčnost a bezpečnost systému.

Největší hrozbou je především pro část dýzy z hlediska zanášení otvoru dýzy. Otvor dýzy musí být chráněn před různými příměsemi vody, které mají tendenci se usazovat ve štěrbině o průměru 0,075 mm [16].

Existují tři základní postupy pro úpravu vody:

- Fyzikálně chemická úprava vody,
- Biologická úprava vody,
- Mechanická úprava vody,

Podle poznatků [16] je obecně nejvýhodnější demineralizovaná a deionizovaná voda.

Kvalita pracovního media respektivě úprava vody závisí na konkrétním výrobcí. Každá firma si udává své požadavky, v závislosti na dodávaném zařízení. Na příklad pro metodu WJM se doporučuje používat filtraci, změkčování vody, system deionizace a další. Dodržení kvality vody přímo ovlivňuje životnost dýzy, těsnění i ventilů. Úprava vody má také vliv na rychlost řezání, kvalitu finálního opracování a celkové náklady [39].

Přísady do vody jsou přísady různých polymérů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymery typu PAA (polyakrylamid), nebo PEO (polyetyloxyd) vytváří souvislý proud a i při styku s materiálem se paprsek neroztříští. Paprsek je díky tomu účinnější, energie koncentrovější a paprsek si zachovává kompaktní jádro (polymery zabraňují nadměrné turbulence proudění). Úprava vody se vyžaduje například pro vytvoření ostrých hran na dělených dílech.

## 4.10 Lapač vody a opěrný rošt

Lapač vody je nádoba na zachytávání vodního paprsku, který projde přes materiál, slouží také k tlumení hluku a zároveň zachytává třísku. Hladina hluku při použití AWJ paprsku je vysoká a může dosahovat hodnoty více než 105 db. Lapač musí být dostatečně hluboký, aby bylo zabezpečené lámání paprsku ještě před dosažení dna, požadovaná hloubka nádoby je 300

až 600 mm. V případě nedostatku prostoru se může použít i nižší nádoby naplněné keramzitem [22].

Opěrný rošt podpirá obráběný materiál. Je vyroben z ocele, nebo z nerez ocele. Vzdálenost jednotlivých lamel roštu je zhruba 25 mm. Vodní paprsek postupně poškozují lamely, ty však mají velmi malou tloušťku a jsou velmi pevné ve svislém směru. Díky tomu se paprsek částečně odrazí o hranu lamel a ztratí tak svoji sílu. Rošt se i přes to postupně poškozují. Pokud je poškozena část roštu, tak se pootočí na místo, které je vyhovující, v případě, že je poškozena celá strana, otočí se úplně a použije se spodní strana roštu [42].

## 4.11 Abrazivo

Hraje velkou roli v AWJ technologii. Abrazivní částice zvyšují možnosti dělení materiálu a jsou taktéž významný technologický parameter. Výběr vhodného abraziva má vliv na rychlost řezu, jeho hloubku, kvalitu a v neposlední řadě také cenu. Abrazivo se až z 50 % podílí na celkových nákladech řezání [22, 15].

Základní kritéria posuzované u abraziva jsou:

- **Řezivost**

je dána krystalickou strukturou mřížky, což zaručuje částicím nižší hodnotu otupění. Při dopad na hranu řezného materiálu dochází k vytvoření nových hran na ploše částic, díky tomu lze abrazivo recyklovat je však třeba počítat s poklesem řezného výkonu až o 30 % v závislosti na recyklovaném materiálu [4, 18].

Recyklace abraziva je složitý proces a nelze jej aplikovat pro každé abrazivo. Tento proces ovlivňuje dokonce i způsob a místo těžby. Při tlaku 4000 barů lze zrecyklovat až 60% abraziva při tlaku 6000 barů je již tato možnost zcela nulová. Cena za kg recyklace je zhruba 4 Kč. Někteří výrobci v čele s firmou Flow metodu recyklace nedoporučují [45].

- **Zrnitost**

Jedná se o velikost abraziva, udává se v jednotkách MESH, které vyjadřují počet ok síta na čtvereční palec. Dělí se na jemnou (MESH více než 100), střední (MESH 60 až 100) a hrubou (MESH menší než 60). Velikost zrn se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5 mm. Čím menší velikost zrna tím nižší hodnota drsnosti Ra, ale také nižší řezná rychlost.

- **Tvrlost**

Vhodná tvrdost abraziva zvyšuje maximální efektivitu řezného procesu. Oblasti strojírenství lze rozdělit abraziva na kovové materiály (ocelový granulát, ocelová drť, korozivzdorný granulát) a nekovové materiály (balotina, hnědý a bílý korund, keramické plastické abrazivo, křemičitý písek, granát, olivín).

- **Hmotnostní tok**

je parametr, u kterého je potřeba hledat optimální bod. Podle Hashishe má každé abrazivo rozdílnou hodnotu optimálního hmotnostního toku. Neplatí tedy pravidlo čím vyšší tok tím hlubší řez, po překročení optimálních hodnot se hloubka řezu snižuje

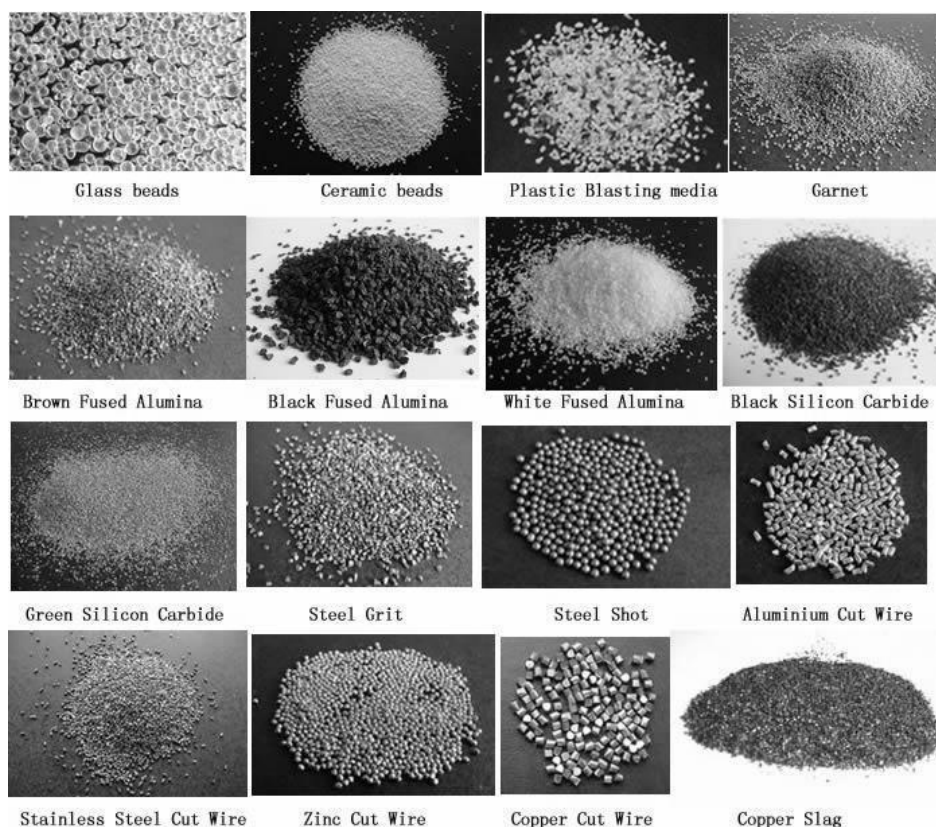
- **Cena**

Je to důležitý faktor při výběru vhodného abraziva. Obecně platí, že levná abraziva mají nižší účinnost. Je však nutné pokaždé uvážit, pro jaký materiál a jakou tloušťku materiálu je abrazivo využito. Cena není v lineárním poměru s řeznými charakteristikami brusiva. Jako příklad lze porovnat křemíkový písek a granát, ten je o 20 - 40 % dražší než křemíkový písek. Při řezání hliníku je však křemíkový písek pomalejší než granát pouze o 20 - 40 %. Což v závislosti na dalších parametrech, jako je např. opotřebení řezné hlavy, je ekonomičtější varianta než použití granátu.

V praxi je dnes nejvíce využíváno abrazivo na bázi granátu (Obr. 4. 9). Největší producenti tohoto minerálu jsou Indie, Rusko, Čína a Austrálie, která má nejkvalitnější granát. Dále se používají směsi s olivínem případně křemičité písky (Obr. 4.7) [18].



Obr. 4.6 Druhy abraziv



Zdroj: [http://img.diytrade.com/smimg/834163/7541203-870630-0/garnet\\_for\\_sand\\_blast\\_and\\_water\\_jet\\_cutting/cf74.jpg](http://img.diytrade.com/smimg/834163/7541203-870630-0/garnet_for_sand_blast_and_water_jet_cutting/cf74.jpg)

Granát (Obr. 4.8) je dnes nejrozšířenější brusivo, proto se níže podíváme na jeho charakteristiku:

Speedblast/ Garnet (Granát-oxid křemíku  $\text{SiO}_2$ ) Technický název vychází ze zrnitosti: MESH 80.

Obr. 4.7 Zrnko granátu



Zdroj: <http://www.universalminerals.com/garnet-abrasive-sharpjet.shtml>

Chemické složení: SiO<sub>2</sub> - 37,08 %, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 22 %, CaO – 1,55%  
MgO – 2.32%, TiO<sub>2</sub> – 1,8 %, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 34,2 %, MnO – 1,05 %

*Tab. 1 Specifikace abraziva MESH 80*

Tvar zrna	hranatý
Typ	inertní
Barva	červená
Tvrдость	7,5 Mohs
Sypná hmotnost	2,4 kg.dm <sup>3</sup>
Měrná hmotnost	4,10 kg.m <sup>3</sup>
Velikost zrn:	
	A = 0,2 – 0,6 mm
	B = 0,4 – 0,8 mm
	C = 0,7 – 1,2 mm
	D = 0,1 – 0,3 mm

*Obr. 4.8 Ostřívo pro vodní paprsek MESH80 a abrazivní tryska*



Zdroj: <http://www.prime-tech.ca/garnet.htm>

#### **4.12 Dávkoř abřaziva**

V provozech, kde je více řezacích stolů, nebo více řezných hlav, je zapotřebí rovnoměrně dopravovat abřazivo pro všechny řezací hlavy zároveň. K tomuto účelu se používá dávkoř abřaziva (obr. 4. 10). Dálková dopřava abřaziva je uskutečněna pomocí stlačeného vzduchu, ten posouvá abřazivo potrubím do dávkořace, který je umístěn nad suporem řezacích stolů.

Použití dávkovače umožňuje plynule měnit průtok abraziva řezu, bez nutnosti zastavit řezání. Díky vhodné regulaci lze tak snížit spotřebu abraziva, ale i zvýšit kvalitu řezu [15].

*Obr. 4.9 Dávkovač abraziva*



*Zdroj: <http://www.piskovacky.cz/jina-zarizeni/davkovac-abraziva/>*

## **5 KVALITA ŘEZU A VLASTNOSTI OPRACOVANÉHO POVRCHU**

Z hlediska technologie řezu a jeho vlivu na materiál lze charakterizovat řez jako studený, bez viditelných tepelně ovlivněných zón, proces je bezprašný a nedochází k uvolňování plynu či jiných látek z materiálu, nejsou pozorovány tepelné změny ve struktuře materiálu a na řezné ploše se nevyskytují trhlinky. Řez je jen s minimální ztrátou materiálu a řezná hrana po dokončení operace má otřepy.

Řezání vodním paprskem, nebo abrazivním vodním paprskem je přesná metoda řízená CNC stroji. Stejně jako ostatní vysokoenergetické paprskové technologie zanechává na obráběné ploše rýhování. Ačkoliv je tento jev nežádoucí a jeho eliminace má nezanedbatelný význam pro snížení celkových nákladů na výrobek, je mechanismus vytváření rýh stále ne zcela pochopen. Výzkum založený na vizualizaci odhalil, že příčinou je změna způsobu destrukce materiálu [9].

Obecně lze řez rozdělit na dvě až tři části. Hladká zóna, která se nachází v horní části řezu v místech prvotního proniknutí paprsku a rýhovaná zóna, která nabývá společně s hloubkou řezu (Obr 5.1). Některé zdroje uvádějí třetí tzv. přechodovou zónu, ta se vyznačuje stále poměrně kvalitním povrchem, ale blíže k dolní hraně řezu se již tvoří rýhování (Obr. 5. 2).

Do určité míry lze za pomoci správného nastavení stroje zabránit tvorbě rýh, má to však negativní vliv na vyšší výrobních nákladů [9].

Obr. 5.1 Oblasti kvality znázorněné na fotografii řezu vodním paprskem

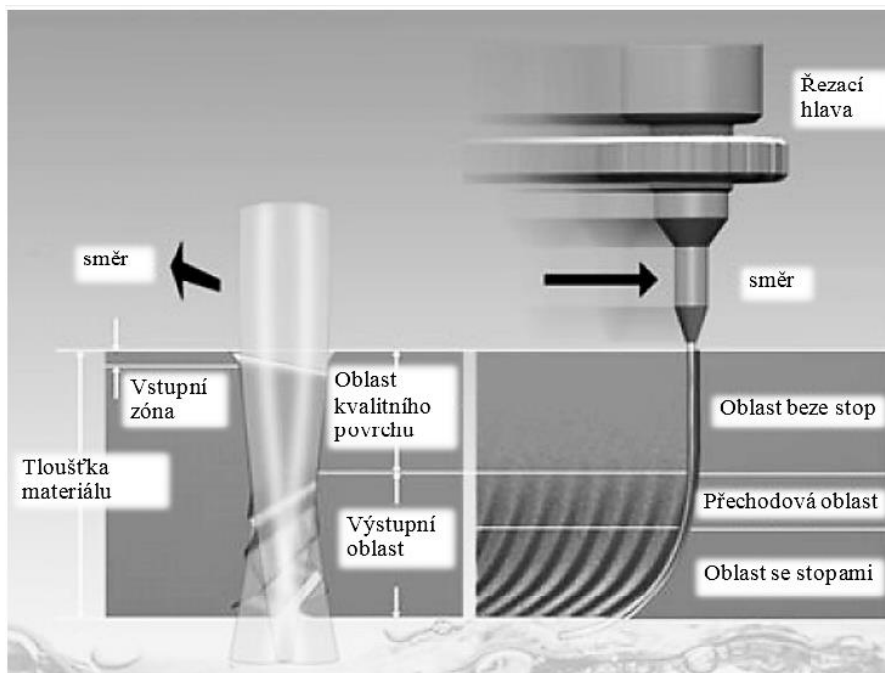


Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>

Dosažení kvalitních výsledků závisí na několika základních faktorech a podmínkách:

- Udržení trysky ve stejné vzdálenosti k materiálu během delého procesu,
- Vlastnosti a tloušťka řezaného materiálu,
- Rychlost posuvu,
- Tlak vody,
- Rychlost proudění,
- Průměr trysky,
- Druh abraziva,
- Použití aditiv,
- Přesnost polohování stroje.

Obr. 5.2 Schema kvalitativních oblastí řezu vodního paprsku.



Zdroj: <http://www.vytech.cz/clanky/technologie/>

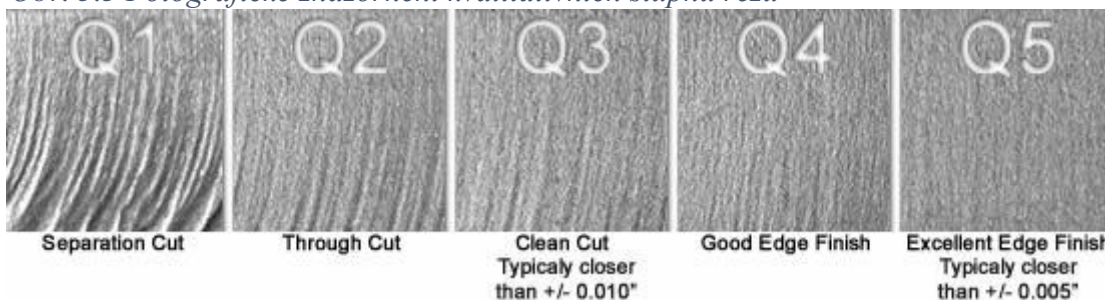
Paprsek při průniku do obrobku ztrácí svoji energii a vychyluje se z původního směru. To je způsobeno vzájemným třením rezného média a obráběného materiálu.

Kvalitu lze hodnotit pomocí pěti kvalitativních stupňů. Q1 je nejméně jakostní řez a Q5 řez nejvyšší jakosti. Toto hodnocení je pouze orientační, jelikož doposud neexistují žádné normy, které by určovaly přesný postup a způsob hodnocení kvality řezu. Výrobci vytvořili tento praktický přehled, pro přiblížení možností technologie zákazníkovi [15].

Tab. 2 Kvalitativní stupně obrobené plochy

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra (μm)	Tvarová přesnost (mm) v horní/spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	Pod 3,2/ 3,2	± 0,1 / ± 0,1	Mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	3,2 / 6,3	± 0,1 / ± 0,2	Většinou minimální
Q3	Střední řez	4,0/ 12,5	± 0,15 / ± 0,1	Dle typu a tloušťky materiálu
Q2	Hrubý řez	4,0/ 25	± 0,2 / dle typu materiálu	Dle typu a tloušťky materiálu
Q1	Dělicí řez	6,3/ 40	± 0,2 / výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

Obr. 5.3 Fotografické znázornění kvalitativních stupňů řezu



Zdroj: [http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/01-Waterjet-Cutting-Characteristics\\_files/image005.jpg](http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/01-Waterjet-Cutting-Characteristics_files/image005.jpg)

Technologie využívající vysokotlaký paprsek pracuje standartně s přesností  $\pm 0,1$  mm a opakovatelnou přesností  $\pm 0,05$  mm

## 5.1 Inovační technologie

Firmy dnes vedou tvrdý konkurenční boj, což má pozitivní vliv na vývoj a zkvalitnění technologie. Firma Flow dnes nabízí technologii s názvem Dynamic Water Jet, kde se pomocí malého kloubu automaticky naklání řezací hlava v libovolném směru až o 10 stupňů, díky tomu nedochází ke spoždění vodního paprsku a chybě úkosu drážky. Výsledkem jsou minimální tolerance součástí a maximální řezné rychlosti. Obdobnou technologii s názvem Progress Jet nabízí také firma PTV. Díky těmto inovacím již není problém řezat s tvarovou přesností až  $\pm 0,04$  mm [7, 26, 3].

## 5.2 Tvar řezné spáry

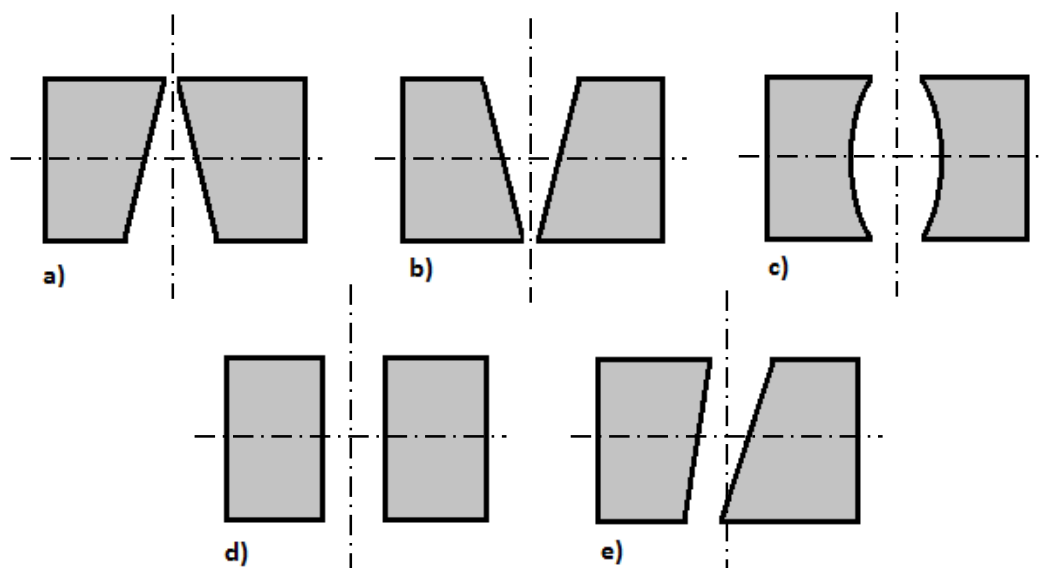
Samotný nástroj, což je vodní proud, svým tvarem a celkovým způsobem chování dá označit za pružný, nepevný a volně visící nástroj s širokým okrajem [9]. Odchylka proudu paprsku od kolmého směru negativně ovlivňuje geometrii řezaných částí, zejména při tvarovém dělení. Po výstupu proudu z dýzy dochází k prudkému uvolnění naakumulované energie do okolního prostředí. Koherentní proud se s narůstající vzdáleností od výstupu řezné hlavy čím dál více rozpadá. Úbytek soudržnosti se projevuje narůstající šířkou proudu a poklesem erozivního výkonu dolní části proudu, to může mít za následek kromě výše popsaného rýhování také vliv na kolmost řezu.

Odchylka kolmosti je zúžení stěn obrobené plochy v různých částech řezu. Základní typy odchylek kolmosti jsou:

- **Odchylka tvaru V** (obr 5.4b)- je to v případě, že horní erozní řez je širší než dolní. Vzniká jako důsledek odlišného působení proudu, horní vrstva materiálu je více obrobená než dolní. Příčinou může být mimo jiné odraz vody od materiálu. Tento typ odchylky je nejrozšířenější.
- **Odchylka tvaru A** (obr. 5.4a) – je to v případě, že dolní řez je širší než horní. Vzniká zejména u měkkých materiálů, kde je rapidně ubírán, nebo také v případě příliš pomalého posuvu nástroje. Přesto, že se proud rozšiřuje směrem dolů, je zde více obrobená dolní část řezu.
- **Soudková odchylka kolmosti** (obr. 5.4c) – je to v případě, že střed řezu je širší než horní a dolní erozní báze. Vzniká při obrábění velmi tlustých materiálů.
- **Kosodélníková, či lichoběžníková odchylka kolmosti** (obr 5.4e) – jedná se v podstatě o klasickou V odchylku, která je odkloněná důsledkem nesprávného úhlu řezné hlavy.

Druh a velikost odchylky je opět podmíněn zejména pružností, tvrdostí materiálu či jeho obrobiteľností. Existuje mnoho způsobů jak minimalizovat odchylku kolmosti. Lze použít kvalitnější abrazivo, zmenšit průměr dýzy, naklonit řezací hlavu, změnit zdvih, nebo rychlost posuvu [18, 9].

Obr. 5.4 Schematické znázornění možných odchylek řezu



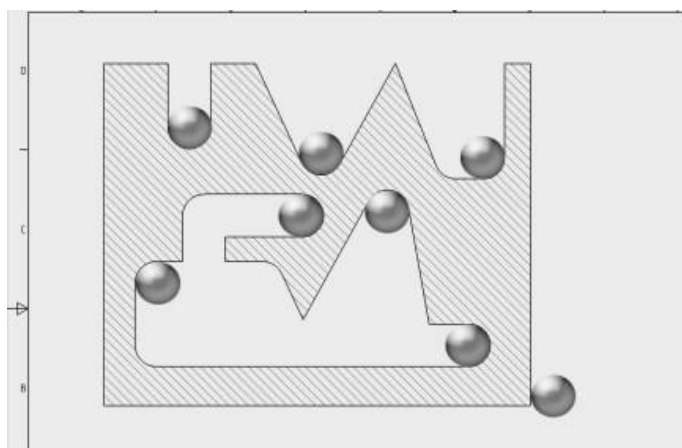
a) odchylka tvaru „A“, b) odchylka tvaru „V“, c) soudková odchylka, d) ideální kolmý řez, e) kosodélníková, lichoběžníková odchylka

### 5.3 Tvarové možnosti

Vodním paprskem lze vyřezávat jakékoliv tvary, které lze následně převést do počítačového CAD formátu \*.dwg, které respektují kruhový průřez paprsku. Složitost geometrie ovlivňuje volbu řezných podmínek. Pro jednodušší tvary se používá konstantní posuv po celou dobu řezání, pro složitější tvary se parametry dynamicky mění v průběhu řezného procesu. Na obrázku 5.5 lze vidět tvarová omezení ostrých úhlů vlivem kruhového průřezu paprsku.



Obr. 5.5 Tvarová omezení ostrých úhlů vlivem kruhového průřezu paprsku



Zdroj: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/geometrie-rezu>

Přesnost zaoblení vnitřních rohů je v případě čistého vodního paprsku o průměru kolem 0,3 mm, v případě abrazivního vodního paprsku je tato hodnota 1 až 2 mm.

Tvarové možnosti jsou tedy ovlivněné druhem obráběného materiálu a druhem použitého paprsku.

Dnešní moderní stroje nabízí také možnost 3D řezu, díky pohyblivé řezné hlavě. To je významný pokrok, který otevírá nové možnosti použití vodního paprsku a to nejen jako plošného obrábění, ale také jako frézování či soustružení.

Na obrázku 5.6 lze vidět možnosti 2D řezu v praxi. Obrázek 5.7 znázorňuje možnosti 3D řezání [42, 3].

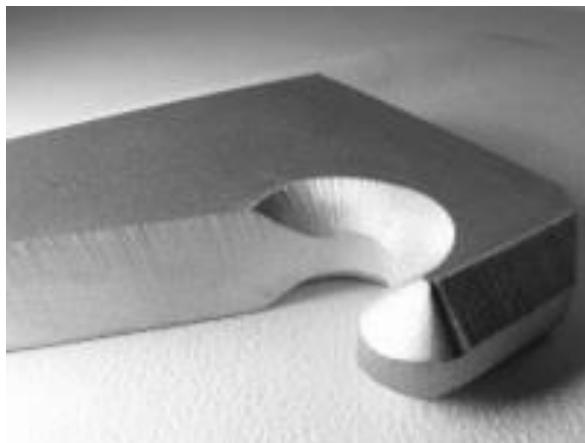
Obr. 5.6 Možnosti 2D řezu



Zdroj: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vodni-paprsek-reze-filigranske-tvary.html>



Obr. 5.7 Možnosti 3D řezu



Zdroj: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/geometrie-rezu>

## 6 VÝHODY A NEVÝHODY

V této kapitole jsou díky poznatkům z předešlých kapitol vyjmenované výhody a nevýhody použití technologie.

### 6.1 Výhody

- Energetická účinnost je 80 % (ve srovnání s laserem),
- Relativně studený řez, který umožňuje řezat materiály citlivé na teplo,
- Řezné hrany nevykazují tepelnou a mechanickou deformaci,
- V řezu nevznikají mikrotrhliny,
- Proces řezání je bezprašný a nevznikají při něm žádné plyny a páry, jako např. při mechanickém způsobu řezání,
- Malé ztráty materiálu v řezu, které jsou výsledkem průměru výtokové štěrbině vodní dýzy,
- Jedním vysokotlakým čerpadlem je možné napájet až 70 současně pracujících dýz vodního paprsku, nebo až 8 pracujících dýz abrazivního vodního paprsku,
- Životnost dýz je 50 až 500 hodin podle použitého materiálu.
- Možnost řezání pod vodní hladinou,
- Řezat je možné bez omezení ve všech směrech, obrysů, tvarů a úkosů,
- Mimořádná provozní spolehlivost a relativní jednoduchost obsluhy,
- Změnou tlaku je možné v průběhu několika sekund materiál oplachovat, otryskávat, čistit a řezat,
- Možnost řezat vlnité materiály, malá citlivost na vzdálenost dýzy od materiálu,
- Řezání problémových materiálů, jako jsou síťované materiály, vata a další,

- Vysoká flexibilita, dokonce i při složité geometrii řezu,
- Ideální pro automatizaci provozu,
- Není potřebné pevné upínání obrobků [42, 26, 3].

## 6.2 Nevýhody

- Problémy s řezáním materiálů, které neodolávají vlhkosti,
- Hlučnost řezného procesu,
- Potřeba speciálně ošetřit materiály, které podléhají korozi,
- Nutnost vysoušení savých materiálů a případné čištění apod,
- Chyba úkosu,
- Horší kvalita řezu tlustších materiálů ve spodní části na výstupu paprsku, vlivem výběhu paprsku,
- Náběh (průstřel materiálu),
- Relativně malá řezná rychlost u tvrdých a tlustých materiálů,
- Ekonomicky nevhodné pro řezání ocelových plechů do tloušťky 10 mm. Z důvodu nízké produktivity a vysokým nákladům,
- Omezená možnost výroby hodně malých dílů pod 3-5 mm – možno řešit můstky [42, 26, 3].

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ POSOUZENÍ KVALITY ŘEZU KOVOVÉHO MATERIÁLU O RŮZNÝCH TLOUŠŤKÁCH ABRAZIVNÍHO VODNÍHO PAPRSKU

Řezání vodním paprskem je stále více populární ve strojním průmyslu. Běžným obráběným materiálem je v tomto odvětví konstrukční ocel, a právě na tu se v tomto výzkumu soustředíme. Paprsek při styku s obráběným materiálem postupně ztrácí svoji kinetickou energii, což významně ovlivňuje tvar řezné spáry a celkovou kvalitu řezu. Kvalita řezu abrazivního paprsku je dána několika základními faktory. Jsou to mechanicko-fyzikální vlastnosti obráběného materiálu, objem přidaného abrazivního písku a rychlost posuvu řezné hlavy. Tyto 3 proměnné faktory jsou tedy hlavním předmětem zkoumání této práce.

Experiment se v první části zaměřuje na zkoumání šířky spáry na vstupu a výstupu řezného paprsku, při různém objemu abraziva a různé řezné rychlosti.

V druhé části je zkoumán tvar řezné spáry a jeho uhlové odchytky, při různém objemu abraziva a různé řezné rychlosti.

## **7.1 Zkušební materiál a jeho vlastnosti**

Na experiment byly použity ocelové plechy o tloušťkách 5, 10, 15 a 20 mm.

Z každého plechu jsme vytvořili 3 zkušební vzorky čili celkem 12 zkušebních vzorků. Tvar a rozměr vzorků stanovil vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Brožek, CSc. Řezání vodním paprskem prováděl vedoucí práce a řemeslník Miroslav Marek.

Materiál je v případě 5, 10 a 15 mm ocel jakostní třídy S235JR. Pro ocel tloušťky 20 mm byla použita ocel jakostní třídy S355J2. Oceli jsou svými vlastnostmi podobné ne však zcela stejné, vzhledem k použité technologii řezu je však možné rozdíly zanedbat a oba druhy posuzovat mezi sebou

### **7.1.1 Popis ocelí**

#### **Ocel S235JR**

Svařitelná nelegovaná konstrukční ocel. S235JR oproti 11373 a 11375 zaručuje vyšší stupeň jakosti, protože se dodává pouze jako uklidněná. Plnohodnotně a s širším rozsahem záruk na jakost a volitelných parametrů pro srovnatelné výrobky podle EN 10025-2:2004, nahrazuje 11373 i 11375 [24].

#### **Ocel S355J2**

Svařitelná nelegovaná konstrukční ocel. Shodný stupeň jakosti s 11 503, kterou plnohodnotně nahrazuje avšak s možností využít širší rozsah záruk na jakost a volitelných parametrů pro srovnatelné výrobky podle EN 10025 [24].

## **7.2 Technologické podmínky prováděného experimentu**

Pro provedení experimentu byl použit CNC řezací stroj firmy AWAC spol, s. r. o. který byl pořízen katedrou Materiálu a strojírenskou technologií na technické fakultě ČZU., v rámci projektu financovaném MŠMT.

#### **Parametry stroje:**

- Tlak vody: 380 MPa
- Průměr vodní trysky: 0,28 mm
- Poloha paprsku: paprsek působil kolmo na řeznou hranu vzorku

- Vzdálenost abrazivní trysky nad obrobkem: 3 mm
- Hmotnostní tok abraziva:
  - 213 g.min<sup>-1</sup>
  - 297 g.min<sup>-1</sup>
  - 414 g.min<sup>-1</sup>
- Velikost abraziva: 80 MESH
- Materiál abraziva: granát
- Použité rychlosti posuvu:

Tab. 3 Rychlosti posuvu

Tloušťka plechu	Rychlosti posuvu (mm.min <sup>-1</sup> )									
	5 mm	150	200	250	300	325	350	375	400	425
10 mm										
15 mm	20	40	60	80	90	100	110	120	130	140
20 mm										

Tyto parametry a podmínky pro experiment byly stanoveny rovněž vedoucím diplomové práce v rámci systematického zkoumání parametrů řezání vodním paprskem železných a nezelezných kovů prováděných na katedře.

### 7.3 Měřicí přístroj a software

Měření bylo prováděno na stereoskopickém mikroskopu s označením SZP 11-T ZOOM. Ten je vybaven digitální CMOS kamerou, která je napojena na PC.

Počítač je vybaven programem Quick Photo Industrial. Tento software je určen pro záznam digitálního obrazu z mikroskopu. Živý obraz je promítán z mikroskopu na obrazovku počítače, obraz je tak možné jednoduše ostřit a exponovat pro nejlepší možnou požadovanou kvalitu snímku. Na pořízeném snímku lze posléze provádět měření různého charakteru, např. měření ploch, úhlů, délek či dokonce měření tvrdosti a mikrotvrdosti.

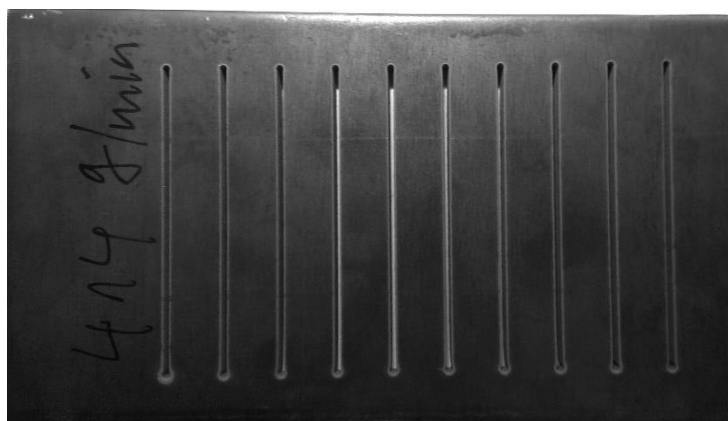
Program je potřeba před použitím zkalibrovat pro konkrétní druh měření podle etalonu, díky tomu je definovaná velikost jednotlivého pixelu a dovoluje tak programu měřit rozměry na obrázku ve správném měřítku.

### 7.4 Závislost šířky spáry na objemu abraziva a rychlosti posuvu.

První část experimentu zkoumá závislost šířky spáry na vstupu a výstupu řezného paprsku v závislosti na objemu přidávaného abraziva a různou rychlostí posuvu. Jak již bylo zmíněno,

zkušební vzorky jsou oceli s tloušťkou 5, 10, 15 a 20 mm. Od každé tloušťky byly řezány 3 zkušební vzorky. Celkem je tedy 12 zkušebních vzorků. Jednotlivý vzorek má vždy konstantní objem ostřiva a je v něm vytvořeno 10 řezných spár, rozdílnou rychlostí posuvu. Pro ocel o tloušťkách 5 a 10 mm byly použity rychlosti v rozmezí 150 až 450 mm.min<sup>-1</sup>. Pro zbylé dvě oceli tloušťky 15 a 20 mm byly použity rychlosti nižší a to v rozmezí 20 až 140 mm.min<sup>-1</sup>. Množství přiváděného abraziva je však u všech ocelí shodné. Na obr 8.1 je fotografie zkušebního vzorku.

*Obr. 7.1 Fotografie zkušebního vzorku*



## 7.5 Metodika měření

U každého zkušebního vzorku se měřila šířka spáry. Vzorek obsahoval celkem 10 spár vytvořené různou rychlostí posuvu. Měřená oblast se nacházela 15 mm od počátku a konce řezné spáry. Pro každou spáru byly vytvořeny 3 fotografie, na každé fotografii bylo provedeno 10 měření. Celkem tedy bylo pro každou spáru naměřeno 30 hodnot šířky. Z těchto hodnot se vypočítala výsledná hodnota pomocí aritmetického průměru (3). Měření se provádělo z obou stran vzorku. Pro bližší znázornění postupu poslouží schématický obr. 8.2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (3)$$

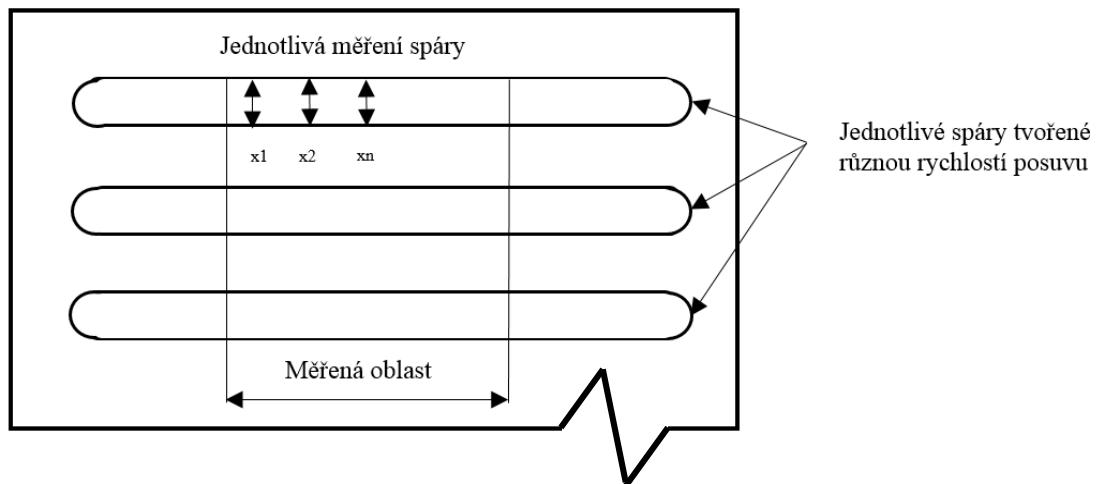
Kde:

$\bar{x}$ ... aritmetický průměr

$x_i$ ... jednotlivá měření šířky spáry

$n$ ... počet měření (v našem případě 30)

Obr. 7.2 Postup při měření šířky řezné spáry



Tímto způsobem byly postupně změřeny všechny vzorky. Výsledné hodnoty se vynesli do grafů a byla posuzována jejich závislost na rychlosti posuvu a množství přidávaného abraziva. Pro potřebu dalšího vyhodnocení byly vytvořeny poměrové hodnoty mezi šířkami spáry na vstupu materiálu a výstupu (4). Díky tomu lze pozorovat poměrový rozdíl šířky spáry na vstupu a výstupu paprsku a tyto hodnoty posléze vyhodnotit ve sloupcovém grafu.

$$p = \frac{\bar{x}_h}{\bar{x}_d} \quad (4)$$

Kde:

$p$  ... poměrové číslo

$\bar{x}_h$  ... aritmetický průměr horní (vstupní) spáry.

$\bar{x}_d$  ... aritmetický průměr dolní (výstupní) spáry.

## 7.6 Vyhodnocení naměřených výsledků

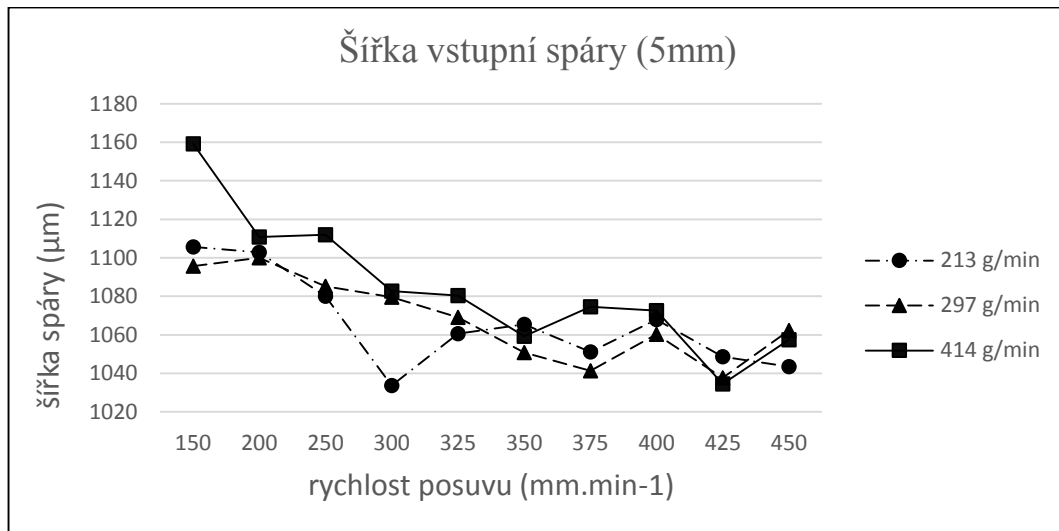
V této kapitole postupně prozkoumáme grafické vyhodnocení naměřených hodnot šířky spáry v závislosti na množství přidávaného abraziva a rychlosti posuvu pro jednotlivé tloušťky zkušebních vzorků oceli.

### 7.6.1 Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 5 mm

Vzhledem k fyzikálně mechanickým vlastnostem ocele lze předpokládat, že s rostoucí rychlostí se sníží kinetická účinnost řezného paprsku a díky tomu se bude šířka spáry zmenšovat. Zmenšení šířky spáry lze předpokládat také při snižování obsahu přiváděného abraziva. Z grafu

vyplývá, že nejmarkantnější rozdíl je při nejnižší rychlosti. Řez s objemem brusiva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  je na hodnotě  $1,16 \text{ mm}$ , a zbylé dva řezy mají při stejné rychlosti hodnotu  $1,1 \text{ mm}$ . S rostoucí rychlostí posuvu se postupně snižují rozdíly přiváděného abraziva. V rychlosti  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je tak rozdíl šířky kolem  $0,015 \text{ mm}$ .

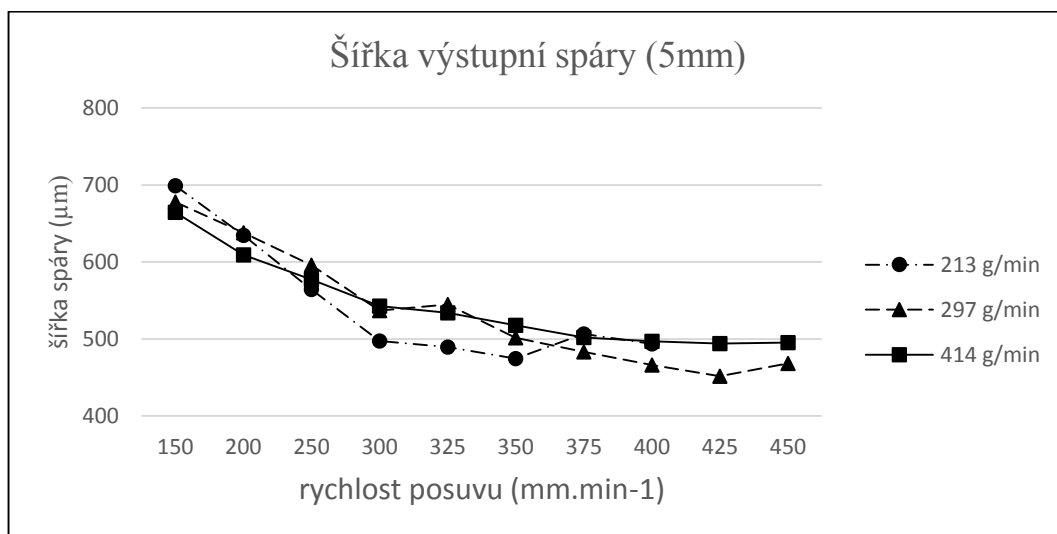
Obr. 7.3 Vstupní strana paprsku ocel 5mm



### 7.6.2 Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 5 mm.

Spodní spára na výstupu řezu by měla prokazovat ještě větší závislost na rychlosti a přiváděného objemu abraziva, vzhledem k tomu, že se kinetická energie paprsku postupně s hloubkou řezu snižuje. Křivky na výstupu řezu se již minimálně liší, kopírují takřka stejnou dráhu. Zlom však nastává v rychlosti  $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Řez s objemem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  na několika místech nedokázal zcela rozdělit materiál což díky aritmetickému výpočtu výrazně snížilo naměřené hodnoty v rychlosti  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  byly až z poloviny nulové. Řez s objemem  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  lze tedy doporučit pouze do rychlosti  $375 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

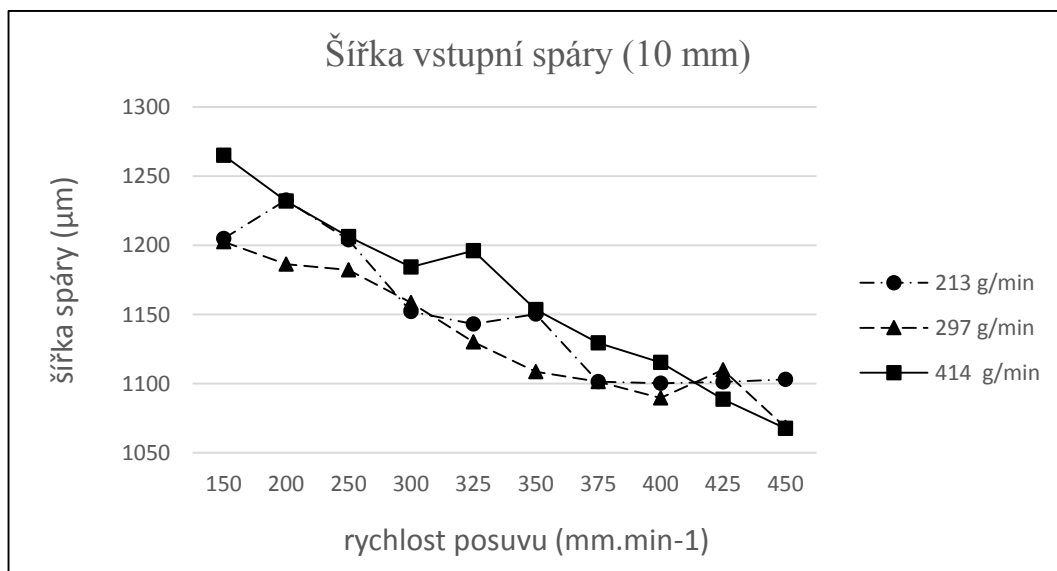
Obr. 7.4 Výstupní strana paprsku ocel 5mm



### 7.6.3 Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 10 mm

U oceli o tloušťce 10 mm lze pozorovat podobný jev, jako u 5 mm tlusté ocele. Na vstupu paprsku má řez s největším objemem abraziva při nejmenší rychlosti hodnotu 1,26 mm, ostatní řezy jsou na hodnotě 1,20 mm. I v tomto případě se s větší rychlostí ztrácí rozdíly mezi přiváděným objemem abraziva. Při nejvyšší rychlosti je tak rozdíl mezi řezy pouze 0,03 mm.

Obr. 7.5 Vstupní strana paprsku ocel 10mm



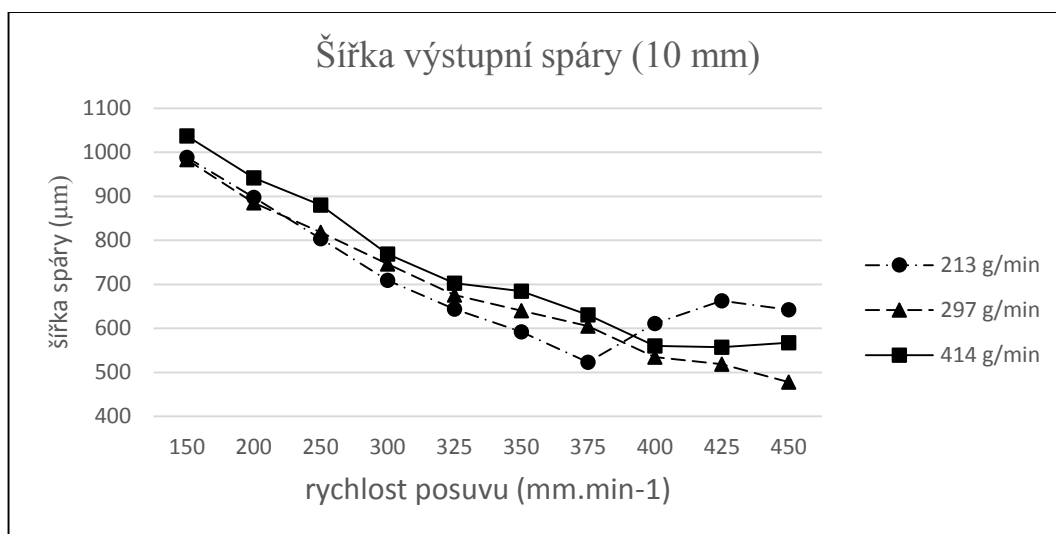
### 7.6.4 Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 10 mm.

Spodní spára v tomto případě vykazuje téměř lineární závislost. Opět lze pozorovat zmenšení závislosti na přidávaném objem abraziva. Největší těsnost křivek je při nejnižší rychlosti. Zajímavý jev nastává u řezu s objemem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup>, který vykazuje od rychlosti 375



mm.min<sup>-1</sup> vyšší hodnoty než zbylé dva řezy. V rychlosti 425 mm.min<sup>-1</sup> je spára s objemem 213 g.min<sup>-1</sup> o 0,013 mm širší, než spára s nejvyšším objemem abraziva

Obr. 7.6 Výstupní strana paprsku ocele 10mm

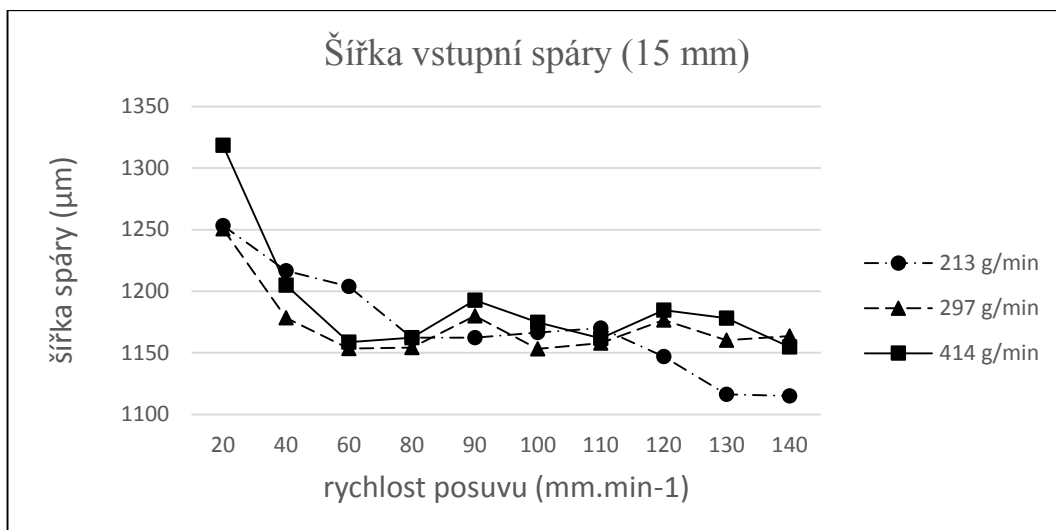


### 7.6.5 Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 15 mm

U oceli o tloušťce 15 mm jsou již jiné řezné rychlosti než u materiálů o tloušťce 5 a 10 mm. Pokud by byla zanechaná rychlost v rozmezí 150 až 450 mm.min<sup>-1</sup>, nebyla by 15 mm ocel rozříznutá. Proto jsou vzorky 15 a 20 mm řezány rychlostmi v rozmezí 20 až 140 mm.min<sup>-1</sup>.

V grafickém znázornění lze opět pozorovat jev, kdy má spára s objemem 414 g.min<sup>-1</sup> při nejnižší rychlosti vyšší hodnotu než zbylé dva řezy s menším obsahem abrasiva, ty jsou v tomto případě téměř totožné. V rychlostech 40 až 80 mm.min<sup>-1</sup> lze pozorovat vyšší hodnoty u řezu s abrazivem 213 g.min<sup>-1</sup> šířka spáry je v tomto případě o 0,040 mm větší, než u zbylých řezů. Při rychlostech 80 až 110 mm.min<sup>-1</sup> jsou pak hodnoty velice podobné. Další větší odchylka je při rychlostech 120 až 140 mm.min<sup>-1</sup>, zde však mají širší spáry řezy s obsahem abrasiva 297 a 414 g.min<sup>-1</sup>, řez s nejnižším množstvím abrasiva zde vykazoval o 0,045 mm nižší hodnoty.

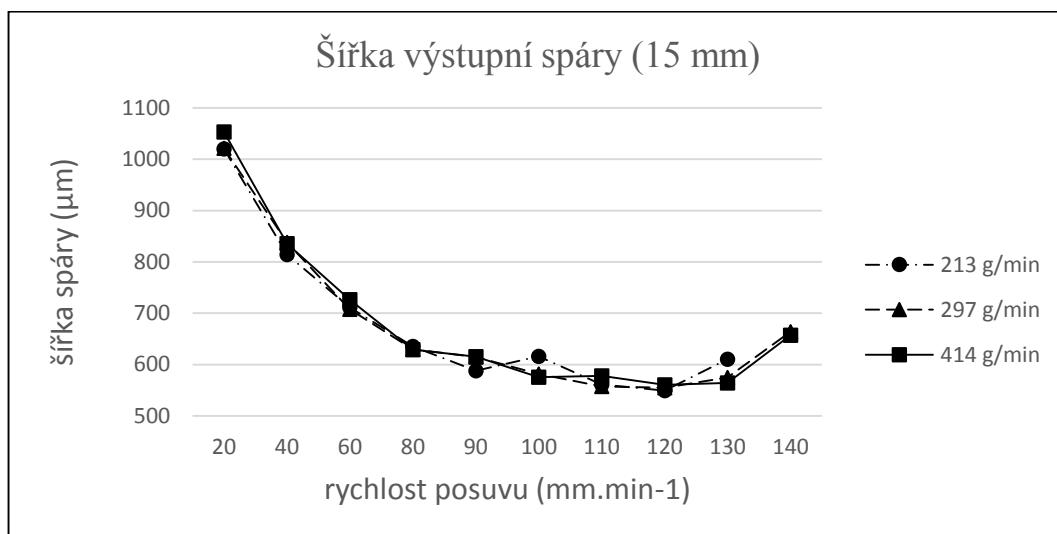
Obr. 7.7 Vstupní strana paprsku oceli 15 mm



### 7.6.6 Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 15 mm

Na výstupu řezu oceli je i v tomto případě vidět minimální vliv objemu abrasiva na šířku spáry. Spára s objemem abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> však měla problém rozříznout materiál při rychlostech 120 a 140 mm.min<sup>-1</sup>, zatímco v rychlosti 120 mm.min<sup>-1</sup> byla nulová hodnota naměřená pouze jednou, v případě rychlosti 140 mm.min<sup>-1</sup> byla nulová hodnota naměřená 8 krát. Z tohoto důvodu bych řez v této rychlosti a tomto obsahu abraziva nedoporučoval.

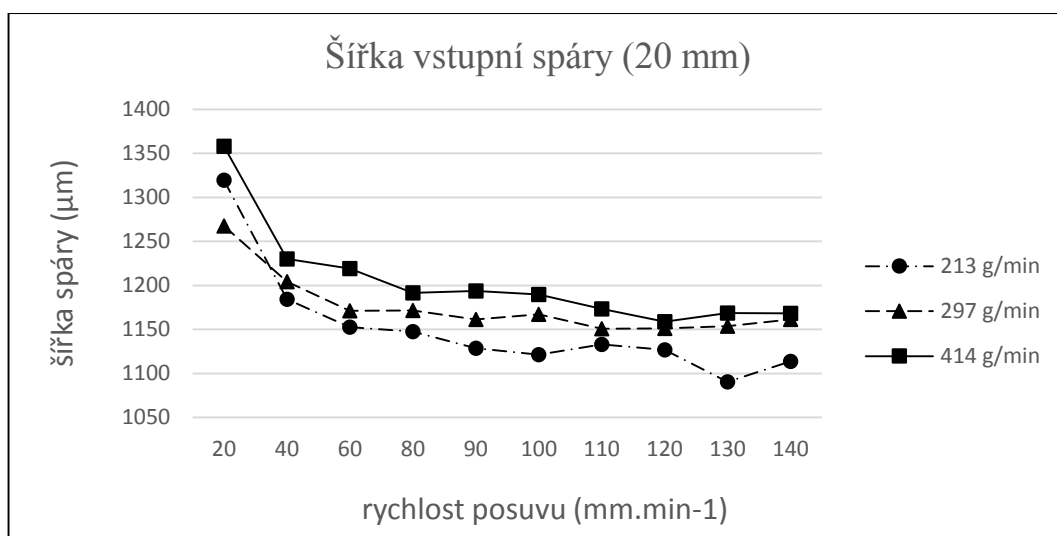
Obr. 7.8 Výstupní strana paprsku ocel 15 mm



### 7.6.7 Šířka spáry řezu u vstupu řezného paprsku oceli tloušťky 20 mm

Při této tloušťce materiálu lze již snadno pozorovat průběh jednotlivých křivek, které se takřka neprotínají. Zajímavý jev zde opět vykazuje křivka s objemem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup>, která se při nejnižší rychlosti s hodnotou 1,32 mm zařadila za řez s množstvím abraziva 414 g.min<sup>-1</sup> a hodnotou 1,36 mm. Řez s množstvím abraziva 297 g.min<sup>-1</sup> má v tomto případě hodnotu 1,27 mm. Při rychlosti 40 mm.min<sup>-1</sup> se již hodnoty srovnávají do předpokládaného pořadí, kde nejširší spáru má řez s největším obsahem abraziva a nejužší spáru má řez s nejmenším obsahem abraziva. Při maximální zkoušené rychlosti posuvu se křivky o obsahu abrasiva 297 a 414 g.min<sup>-1</sup> takřka shodují, křivka s obsahem abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> vykazuje hodnoty o 0,05 mm menší než zbylé dvě.

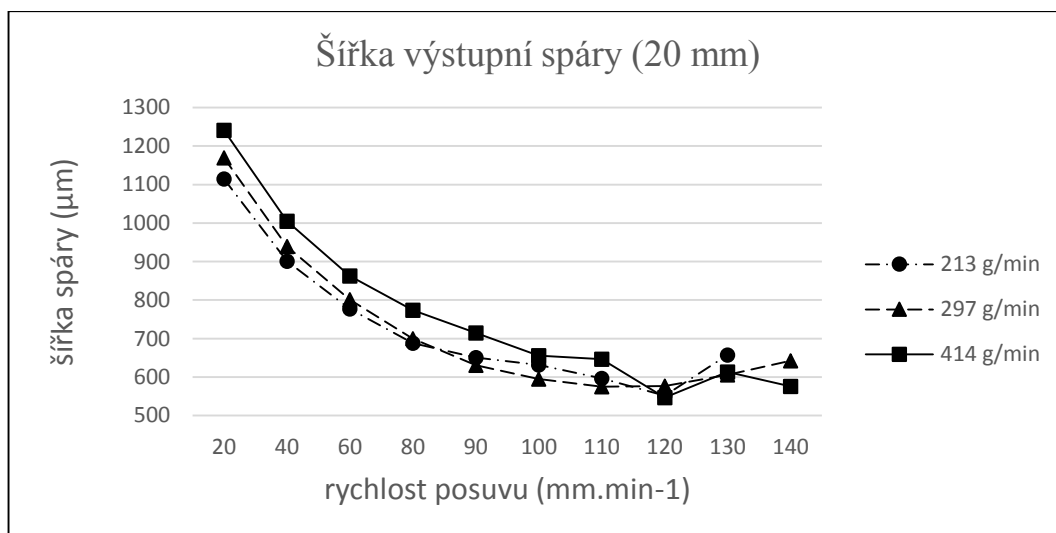
Obr. 7.9 Vstupní strana paprsku ocel 20 mm



### 7.6.8 Šířka spáry řezu u výstupu řezného paprsku oceli tloušťky 20 mm

Křivky výstupních hodnot šířky spáry vykazují takřka exponenciální závislost. Hodnoty při nejnižší rychlosti jsou u řezu s největším obsahem abrasiva 1,24 mm, u řezu se střední hodnotou abrasiva 1,17 a u řezu s nejnižší hodnotou abrasiva 1,11 mm. Ačkoliv je i v tomto případě vidět menší závislost na přidávaném abrasivu, lze opět snadno rozpoznat jednotlivé křivky, které se takřka neprotínají až do rychlosti  $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , ve které mají všechny křivky skoro stejnou hodnotu šířky spáry a to  $0,55 \text{ mm}$ . Velký skok i v tomto případě vykazuje řez s obsahem abrasiva  $213 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ , který při rychlosti  $140 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  nebyl schopen materiál zcela rozdělit. Nulová hodnota byla v tomto případě naměřena až 23 krát. Z tohoto důvodu bych řez za těchto podmínek nedoporučoval.

Obr. 7.10 Výstupní strana paprsku ocel 20mm



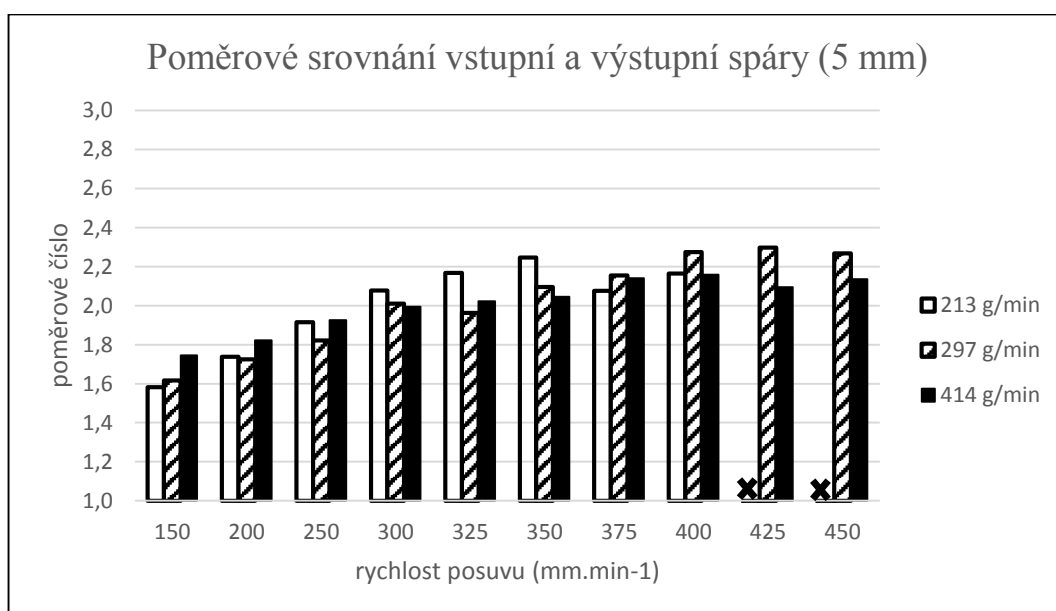
## 7.7 Poměrové hodnoty

Tyto grafy znázorní poměr hodnot (4) mezi šířkami řezu na vstupu a výstupu řezného paprsku, ideální kolmý řez by vykazoval hodnotu 1, při běžném řezání se však často objevují tvarové vady řezu. Nejčastější vada je do písmene V, kdy na vstupu řezného paprsku je spára širší než na výstupu, to je zapříčiněno postupným zeslabováním kinetické energie s hloubkou řezu a odrazem řezných částic od řezaného materiálu. Pokud jsou požadavky na tvarovou přesnost vysoké, tak i náklady na řez jsou vyšší vzhledem k pomalé rychlosti posuvu a většího objemu přidávaného abrasiva.

### 7.7.1 Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 5 mm

Na grafu lze pozorovat pozvolný růst tvarové nepřesnosti se zvyšující se rychlostí posuvu. Větší objem abrasiva však neznamená vždy vyšší přesnost řezu. Při rychlosti 375 mm.min<sup>-1</sup> je dosaženo lepší tvarové přesnosti s objemem abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> než u řezu s větším objemem abrasiva. Podobný jev lze pozorovat i u rychlosti 400 mm.min<sup>-1</sup> zde je poměrové číslo řezu s objemem abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> přibližně stejně velké jako u řezu s objemem 414 g.min<sup>-1</sup>. V rychlosti 425 a 450 mm.min<sup>-1</sup> a množstvím abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> nebyl materiál rozdělen, v grafu tedy tyto hodnoty neuvažujem.

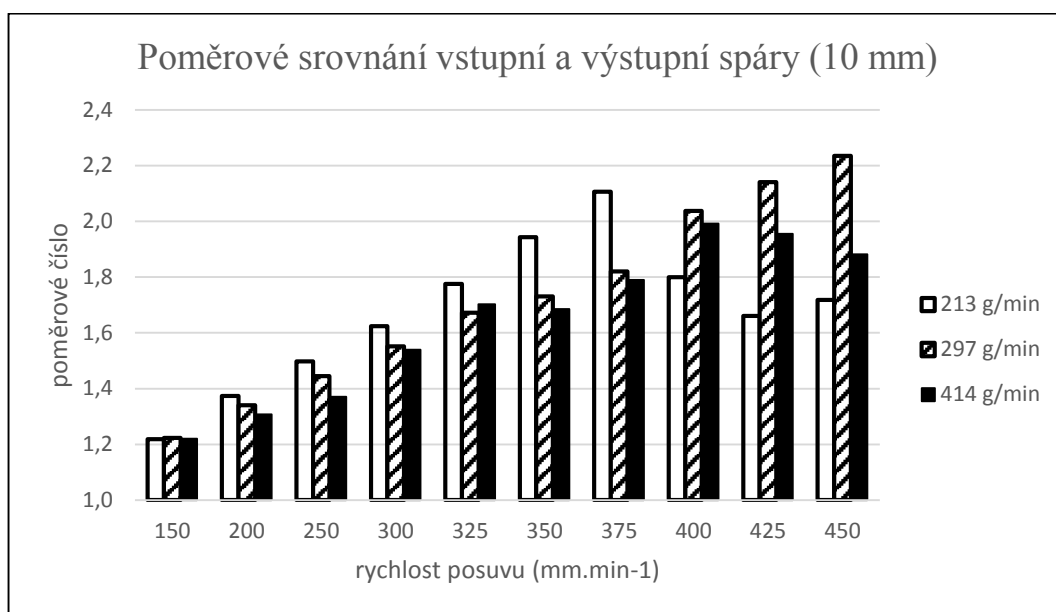
Obr. 7.11 Poměrové hodnoty ocel 5 mm



### 7.7.2 Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 10 mm

U oceli s tloušťkou 10 mm lze pozorovat v případě řezu s obsahem abrasiva 213 g.min<sup>-1</sup> lineární závislost až do rychlosti 375 mm.min<sup>-1</sup> poměrové číslo vystoupá z hodnoty 1,2 až na číslo 2,1. Při rychlosti 400 mm.min<sup>-1</sup> se však tvarová přesnost zlepšila na hodnotu 1,8 při zvýšení rychlosti na 425 mm.min<sup>-1</sup> se tvarová přesnost zlepšila dokonce na hodnotu 1,7. Řez s obsahem abrasiva 297 g.min<sup>-1</sup> vykazuje lineární průběh od nejnižší rychlosti s hodnotou 1,2 až po nejvyšší rychlost s hodnotou 2,2. Poměrové číslo řezu s množstvím abrasiva 414 g.min<sup>-1</sup> má rostoucí tendenci až do rychlosti posuvu 400 mm.min<sup>-1</sup> s vrcholem v čísle 2, u zbylých dvou rychlostí se poměrové číslo snižuje až na hodnotu 1,9.

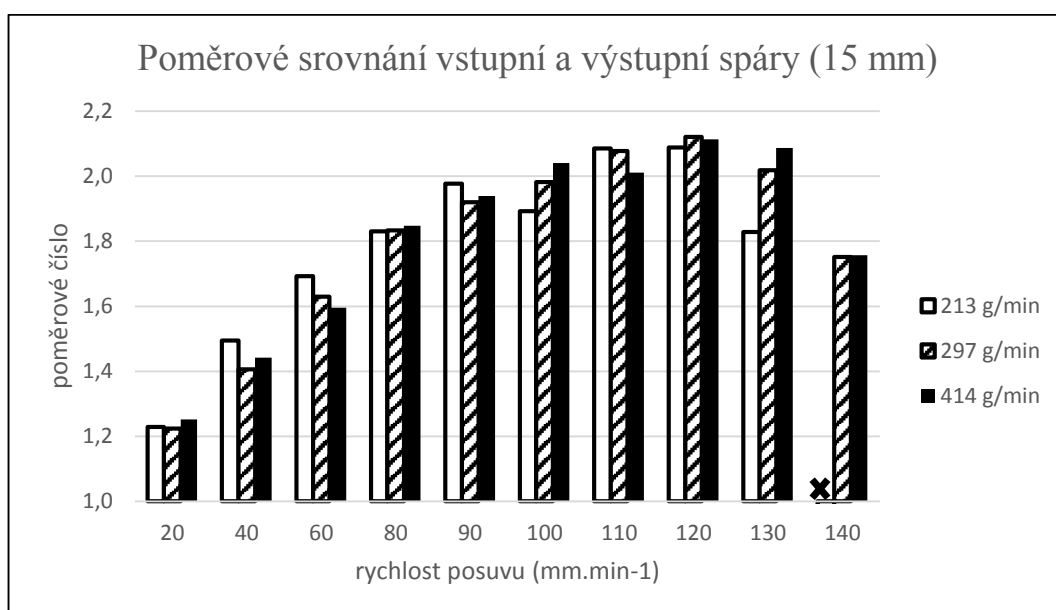
Obr. 7.12 Poměrové hodnoty ocel 10 mm



### 7.7.3 Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 15 mm

U oceli s tloušťkou 15 mm lze pozorovat nárůst poměrového čísla až do rychlosti 120 mm.min<sup>-1</sup> u, hodnot 130 a 140 mm.min<sup>-1</sup> pozorujeme snížení hodnoty poměrového čísla a zlepšení tvarové přesnosti zejména u řezu s obsahem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup>, který při rychlosti 130 mm.min<sup>-1</sup> vykazuje menší poměrové číslo než řезы s větším obsahem abraziva. V rychlosti 140 mm.min<sup>-1</sup> a množstvím abraziva 213 g.min<sup>-1</sup> nebyl materiál rozdělen → neuvažujem do grafu.

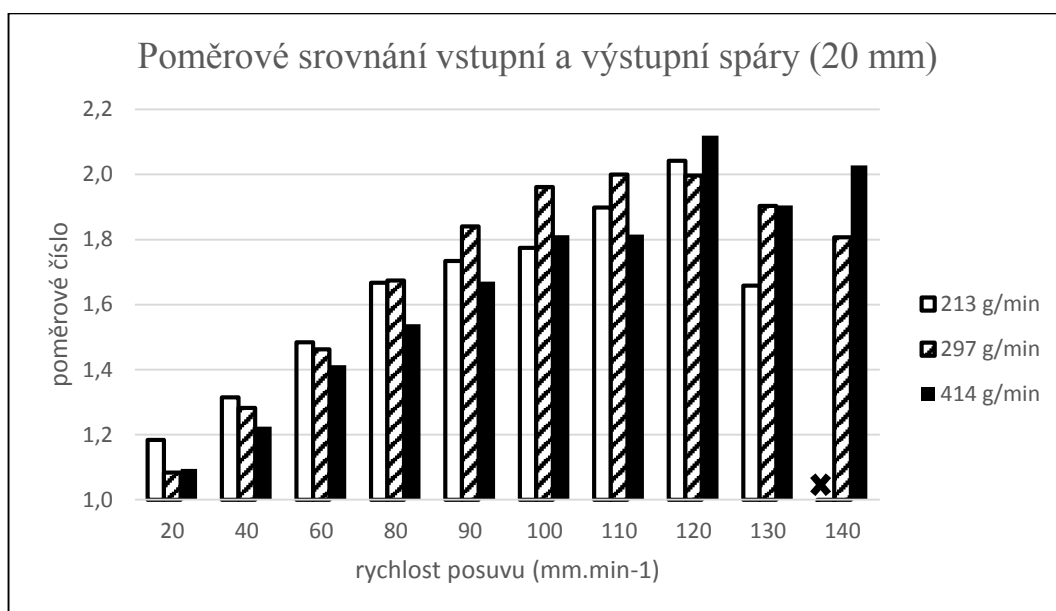
Obr. 7.13 Poměrové hodnoty ocel 15 mm



#### 7.7.4 Poměrové hodnoty mezi vstupem a výstupem šířky řezu u oceli tloušťky 20 mm

Poměrová čísla u oceli 20 mm mají opět rostoucí tendenci s vrcholem při rychlosti 130 mm.min<sup>-1</sup>. Poměrové číslo při nejnižší rychlosti začíná v případě řezů s obsahem abraziva 297 a 414 g.min<sup>-1</sup> na hodnotě 1,1. Vrcholové hodnoty poměrového čísla jsou v rychlosti 120 mm.min<sup>-1</sup> u řezů 213 a 297 g.min<sup>-1</sup> na hodnotě 2,0 u řezu s nejvyšším obsahem abraziva je poměrové číslo ještě o desetinu vyšší. V rychlosti 130 mm.min<sup>-1</sup> je patrný skok poměrového čísla řezu s obsahem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup> na hodnotu 1,7. U zbylých dvou řezů je skok na hodnotu 1,9. V rychlosti 140 mm.min<sup>-1</sup> a množství abraziva 213 g.min<sup>-1</sup> materiál nebyl rozdělen, proto v grafu neuvažujem.

Obr. 7.14 Poměrové hodnoty ocel 20 mm



## 7.8 Měření úhlů

V této části experimentu se zaměříme na velikost úhlové odchylky vodního paprsku, která je ve všech případech do písmene „V“. Má však z každé strany jiný úhel sklonu.

### 7.8.1 Metodika měření

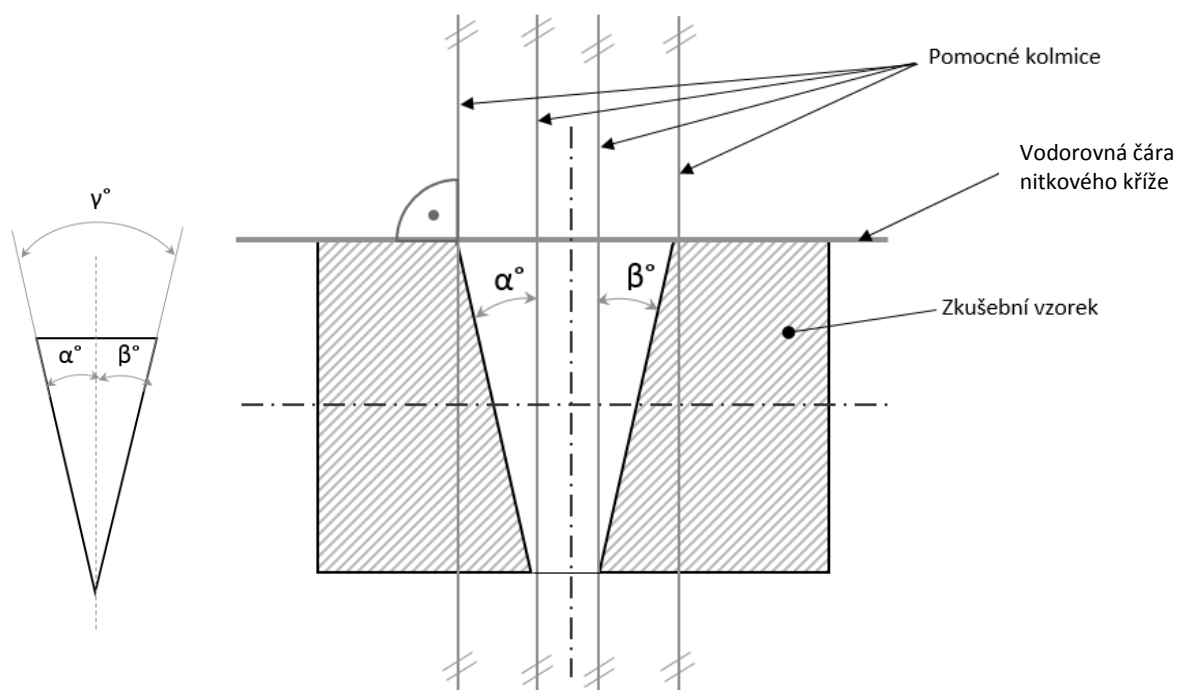
Pro tuto část experimentu byly použity stejné vzorky, bylo však potřeba provést podélný řez, který odhalil úkoso jednotlivých řezných spár. Jak takovýto vzorek vypadal lze vidět na obr. 7.15.

Obr. 7.15 Ukázka vzorku pro měření úhlů skosení



Pro měření úhlu těchto úkosů byl použit stejný software jako u předešlého měření. Pro každou spáru byla vytvořena fotografie, která se následně vyhodnotila. Za pomoci nitkového kříže bylo možné na monitoru srovnat horní hranu měřeného vzorku s vodorovnou čarou středníku, k této čáře dále stačilo vytvořit několik pomocných kolmic v místě hrany řezu a posléze pomocí funkce měření úhlů provést jednotlivá měření úhlů. Levý úhel je označen písmenem  $\alpha$  a pravý písmenem  $\beta$ . Jejich součet posléze vyjádří úhel  $\gamma$ . Postup měření je znázorněn na obr. 7.16.

Obr. 7.16 Schéma postupu měření úhlů skosení

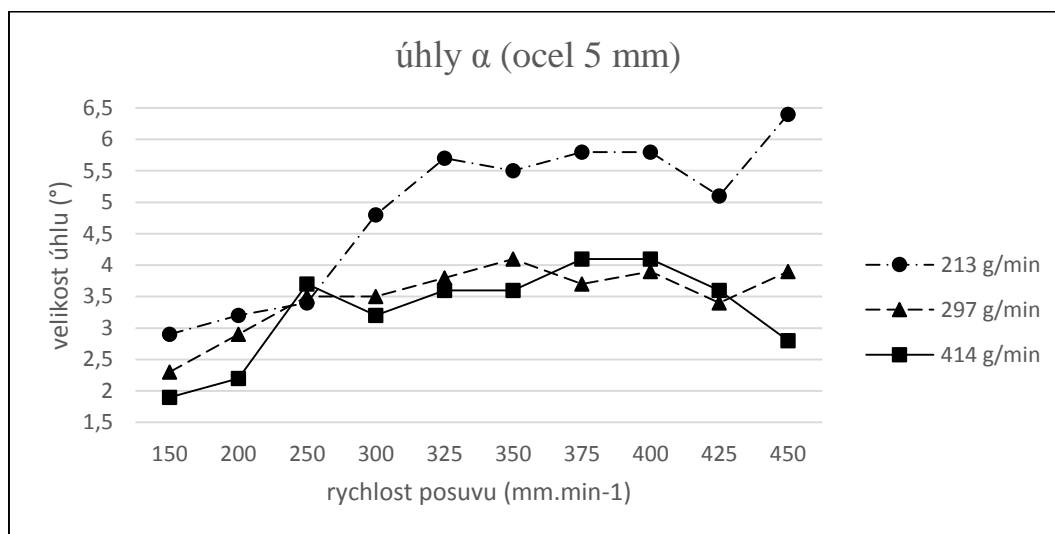


### 7.8.2 Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 5 mm

Nejmenší úhel  $\alpha$  byl  $1,9^\circ$ , naměřen u řezu s obsahem abraziva  $414 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  a rychlostí  $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Největší pak s hodnotou  $6,4^\circ$  u řezu s obsahem abraziva  $213 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  při rychlosti  $450 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . U řezu s nejmenším obsahem abraziva lze také pozorovat největší nárůst úhlu  $\alpha$ . V rychlosti  $250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  jsou hodnoty úhlu všech řezů podobné na hodnotě  $3,6^\circ$ .



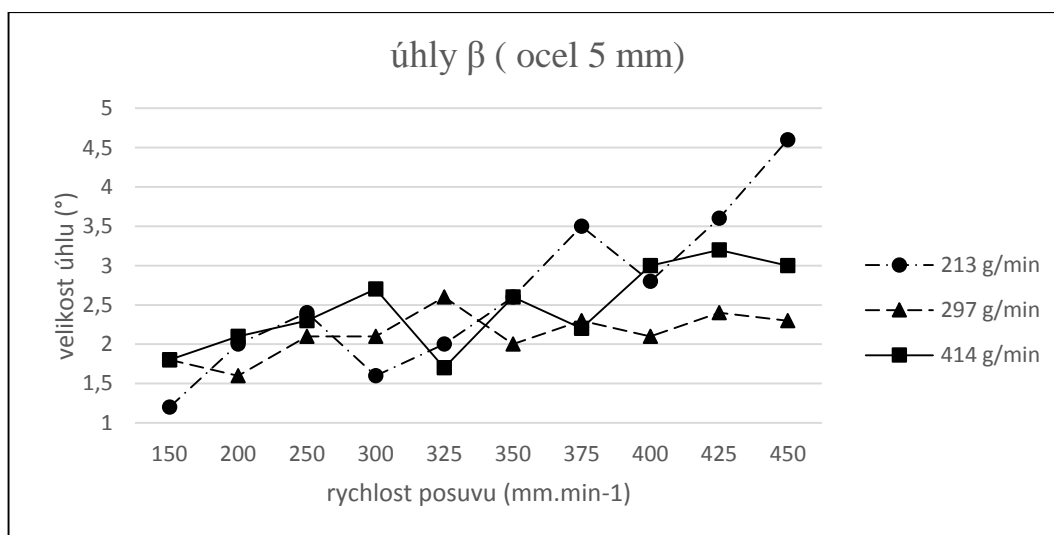
Obr. 7.17 Naměřené úhly  $\alpha$  ocel 5 mm



### 7.8.3 Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 5 mm

V případě úhlu  $\beta$  jsou výsledky všech řezů podobné ne však zcela stejné. Pozorovat závislost na obsahu přidávaného abraziva lze zejména u řezu s nejmenším obsahem abrasiva. Nejmenší hodnota byla u tohoto řezu naměřena při rychlosti  $150 \text{ mm.min}^{-1}$  a to  $1,2^\circ$  největší pak při rychlosti  $450 \text{ mm.min}^{-1}$  a to  $4,6^\circ$ .

Obr. 7.18 Naměřené úhly  $\beta$  ocel 5 mm

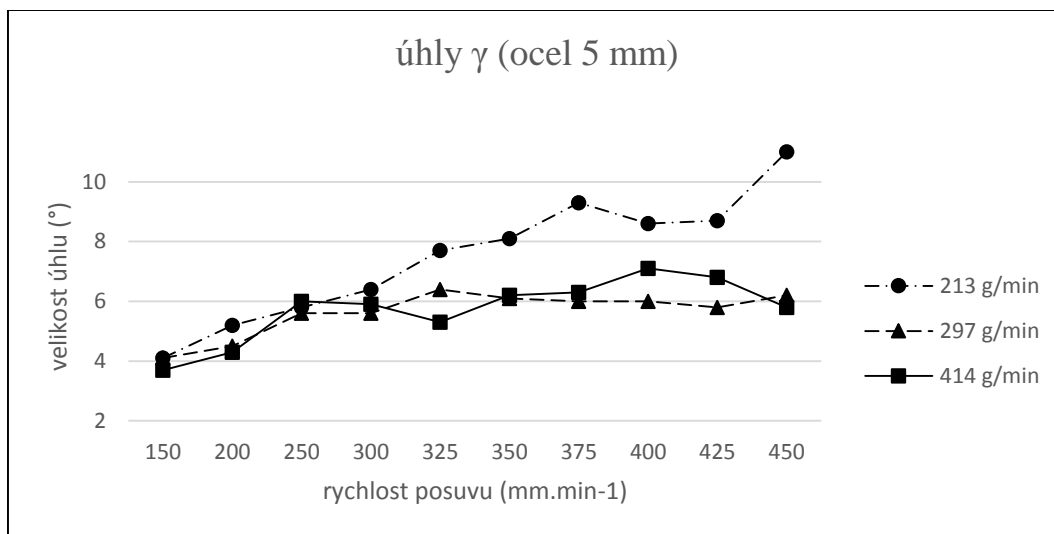


### 7.8.4 Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 5 mm

Při sečtení úhlů lze konstatovat, že až do rychlosti  $300 \text{ mm.min}^{-1}$  nemá obsah abrasiva velký vliv na změnu celkového úhlu skosení. Nejhorší výsledek je pozorován u řezu s obsahem abrasiva  $213 \text{ g.min}^{-1}$ , který při rychlosti  $450 \text{ mm.min}^{-1}$  dosahuje hodnot skosení  $\gamma$  až  $11^\circ$ . Ostatní dva řезы vykazují maximální hodnoty v rozmezí  $6,3^\circ$  při rychlostech  $325 \text{ mm.min}^{-1}$

v případě řezu s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  a  $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  v případě řezu s obsahem abraziva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ .

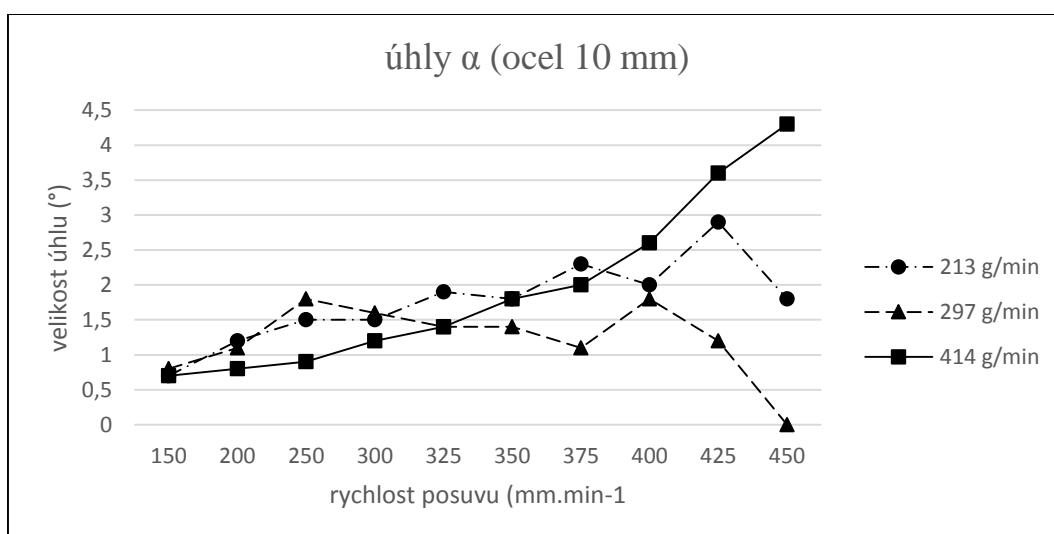
Obr. 7.19 Naměřené hodnoty  $\gamma$  ocel 5 mm



### 7.8.5 Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 10 mm

U oceli o tloušťce 10 mm je vidět exponenciální růst křivky zejména u řezu s obsahem abraziva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ . Nejmenší hodnota tohoto řezu je  $0,7^\circ$  při rychlosti  $150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  největší pak  $4,3^\circ$  při rychlosti  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Druhý největší naměřený úhel je v případě řezu s obsahem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  v rychlosti  $425 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je velikost úhlu  $\alpha$   $2,9^\circ$ . Nejlepší výsledek v tomto případě pozorujeme u řezu s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  v rychlosti  $400 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a to  $1,8^\circ$

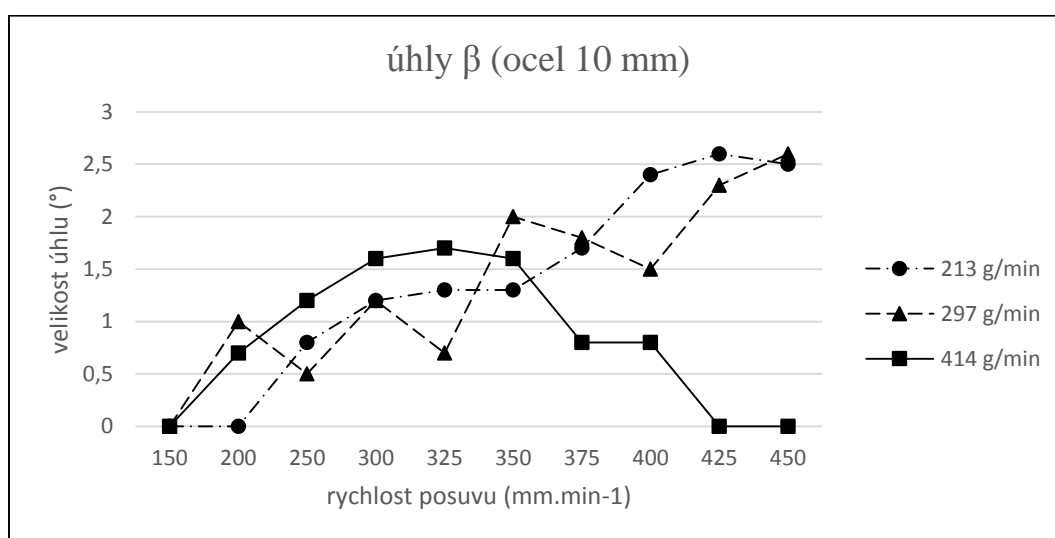
Obr. 7.20 Naměřené hodnoty  $\alpha$  ocel 10 mm



### 7.8.6 Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 10 mm

Při měření úhlu  $\beta$  je zřejmý růst křivky s obsahem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , ta má při rychlostech  $150$  a  $200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  ideální nulovou hodnotu, při postupném zrychlování se však v maximální rychlosti  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  dostává na hodnotu  $2,6^\circ$ . Podobný jev lze pozorovat i u křivky s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  zde je však nulová hodnota naměřená pouze v rychlosti  $150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Zajímavý konkávní průběh lze pozorovat u křivky s obsahem abraziva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  která má vrchol v rychlosti  $325 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a následně klesá na nulovou hodnotu v rychlostech  $425$  a  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

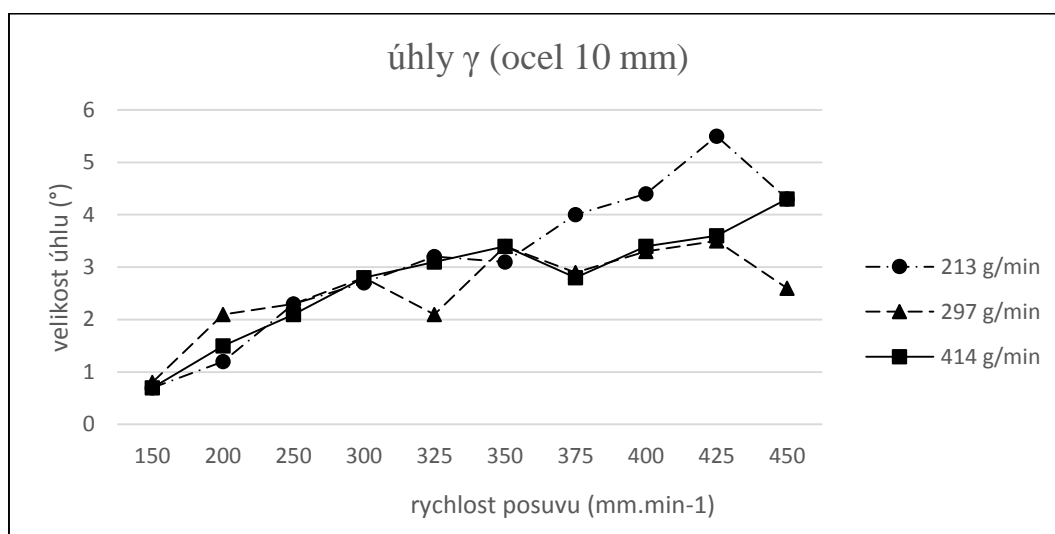
Obr. 7.21 Naměřené hodnoty  $\beta$  ocel 10 mm



### 7.8.7 Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 10 mm

Při součtu úhlů je i v tomto případě vidět pouze minimální závislost celkového úhlu skosení  $\gamma$  na množství přidávaného abraziva. Křivky do rychlosti  $350 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  takřka opisují stejný tvar s výjimkou křivky s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , která v rychlostech  $200$  a  $325 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  lehce vybočuje. Při vyšší rychlosti posuvu je posléze opět možné pozorovat odklon křivky s obsahem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , která dosáhne vrcholové hodnoty  $5,5^\circ$  v rychlosti  $425 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Zbylé dvě křivky mají takřka identický průběh až do rychlosti  $425 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  s hodnotou  $3,6^\circ$ . Při nejvyšší rychlosti pak křivka s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  klesne na hodnotu  $2,6^\circ$ . Zbylé dvě křivky při této rychlosti vykazují velikost úhlu  $4,3^\circ$ .

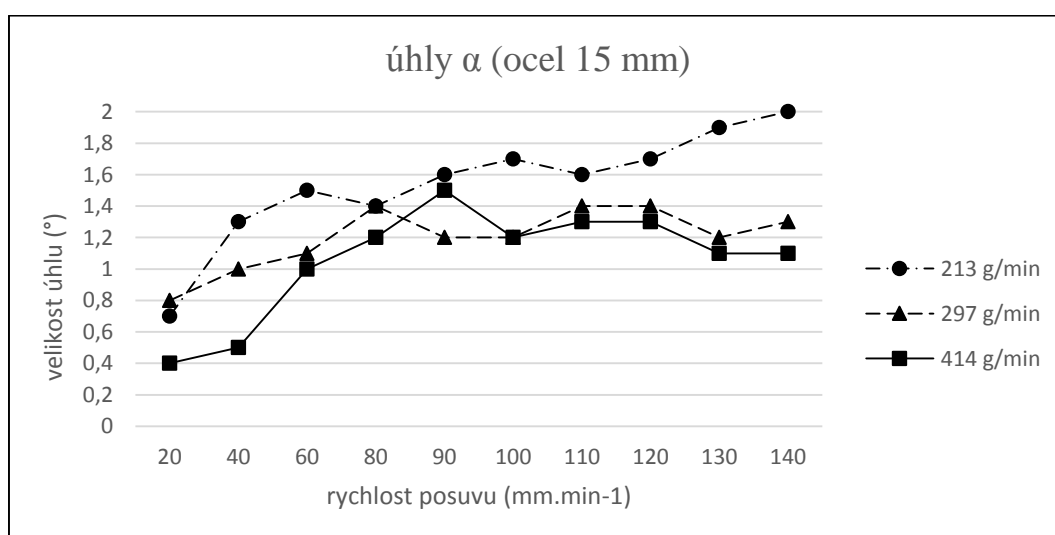
Obr. 7.22 Naměřené hodnoty  $\gamma$  ocel 10 mm



### 7.8.8 Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 15 mm

U oceli o tloušťce 15 mm je vidět menší rozpětí mezi největším a nejmenším naměřeným úhlem. Řez s obsahem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup> vykazuje u většiny řezných rychlostí největší naměřený úhel. Nejlepší výsledky jsou u řezu s obsahem abraziva 414 g.min<sup>-1</sup> s hodnotami 0,4 ° až 1,2 ° a to do rychlosti 80 mm.min<sup>-1</sup> při vyšší rychlosti je již pozorovaná podobnost s křivkou řezu s obsahem abraziva 297 g.min<sup>-1</sup>.

Obr. 7.23 Naměřené hodnoty  $\alpha$  ocel 15 mm

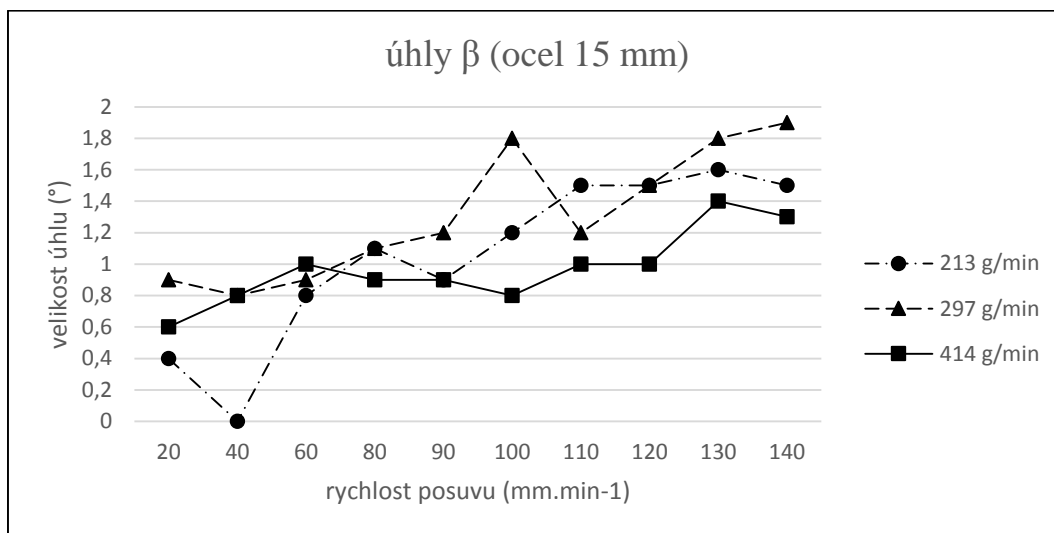


### 7.8.9 Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 15 mm

V tomto grafu vykazuje největší hodnoty křivka s obsahem abrasiva 297 g.min<sup>-1</sup>. Křivka s nejmenším obsahem abraziva má v tomto případě nejlepší výsledky v rychlostech od 20 do

60 mm.min<sup>-1</sup> v rychlosti 40 mm.min<sup>-1</sup> je dokonce naměřena nula. Křivka řezu s největším obsahem abraziva má nejvíce lineární průběh a v rychlostech 90 až 140 mm.min<sup>-1</sup> vykazuje nejnižší naměřené hodnoty v rozmezí 0,9 ° až 1,3°.

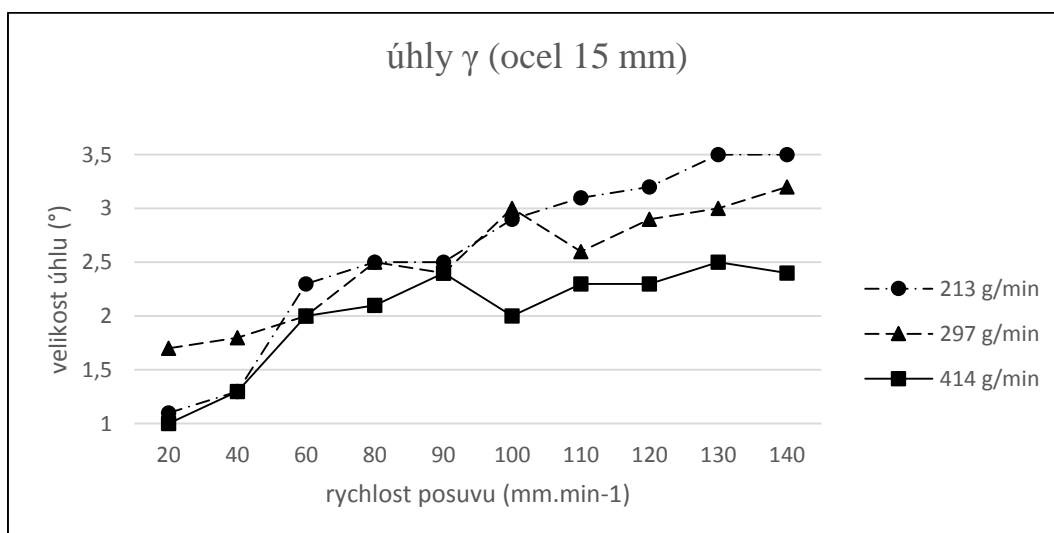
Obr. 7.24 Naměřené hodnoty  $\beta$  ocel 15 mm



### 7.8.10 Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 15 mm

Při součtu úhlů je rostoucí průběh vidět u všech křivek, opět tedy vidíme závislost na rychlosti řezu. Při nižších rychlostech posuvu od 20 do 90 mm.min<sup>-1</sup> nelze jednoznačně pozorovat závislost na přidaném abrazivu u rychlostí 100 až 140 mm.min<sup>-1</sup> je však již vidět, že křivka řezu s obsahem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup> vykazuje největší hodnoty, křivka řezu s obsahem abraziva 297 g.min<sup>-1</sup> má zhruba 0,5 ° lepší výsledky a křivka řezu s obsahem abraziva 414 g.min<sup>-1</sup> má o celý 1 ° lepší výsledky.

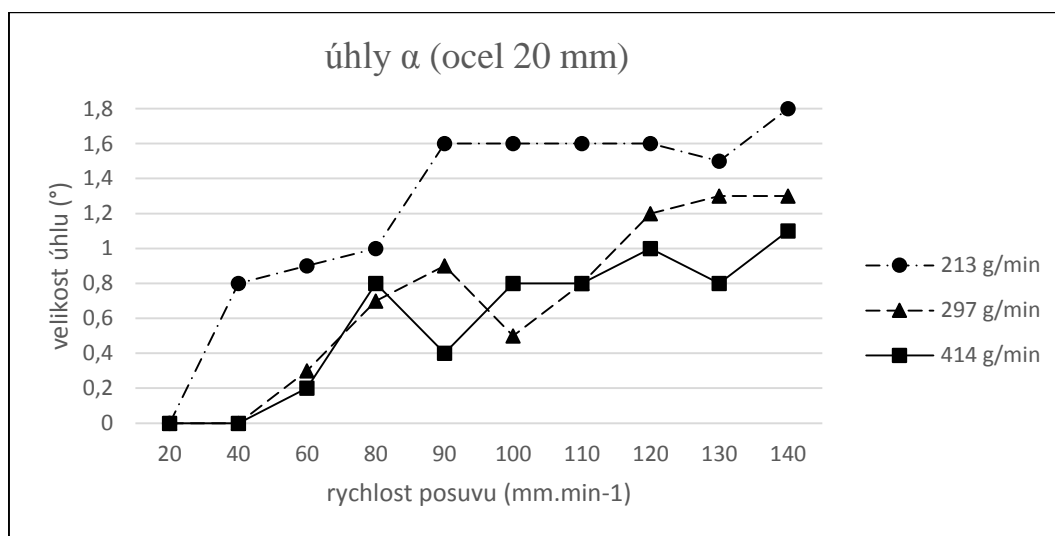
Obr. 7.25 Naměřené hodnoty  $\gamma$  ocel 15 mm



### 7.8.11 Naměřené hodnoty úhlu $\alpha$ u oceli o tloušťce 20 mm

U posledních zkušebních vzorků oceli o tloušťce 20 mm lze opět pozorovat zřetelně vyšší hodnoty u křivky řezu s obsahem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ . Ostatní dvě křivky s větším obsahem abrasiva se proplétají a pohybují se na podobných hodnotách. Nejlepší výsledek vykazuje křivka řezu  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , v rychlostech 20 a  $40 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je úhel  $\alpha$  roven nule. Při větších rychlostech postupně vystoupá na maximální hodnotu  $1,1^\circ$  v rychlosti  $140 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

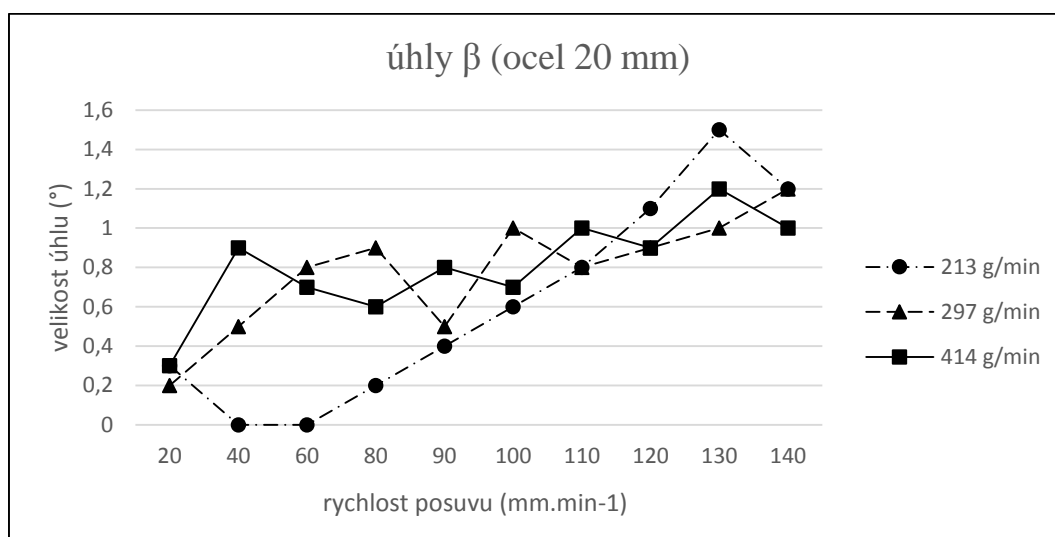
Obr. 7.26 Naměřené hodnoty  $\alpha$  ocel 20 mm



### 7.8.12 Naměřené hodnoty úhlu $\beta$ u oceli o tloušťce 20 mm

Při měření úhlu  $\beta$  pozorujeme opačný jev, než v případě úhlu  $\alpha$ . Nejnižší hodnoty vykazuje křivka řezu s obsahem abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  a to až do rychlosti posuvu  $110 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Vrchol má tato křivka při rychlosti  $130 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  kde její hodnota činí  $1,5^\circ$ . Ostatní dvě křivky jsou opět velmi obdobné, mají propletený tvar, ale na rozdíl od křivky řezu s nejmenším obsahem abrasiva, nemají tak strmý nárůst. Maximální naměřenou hodnotu mají totožně  $1,2^\circ$ . V případě křivky řezu s obsahem abraziva  $297 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  je nejvyšší hodnota dosažena v rychlosti  $140 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , v případě křivky řezu s obsahem abrasiva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$  je nejvyšší hodnota dosažena v rychlosti  $130 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

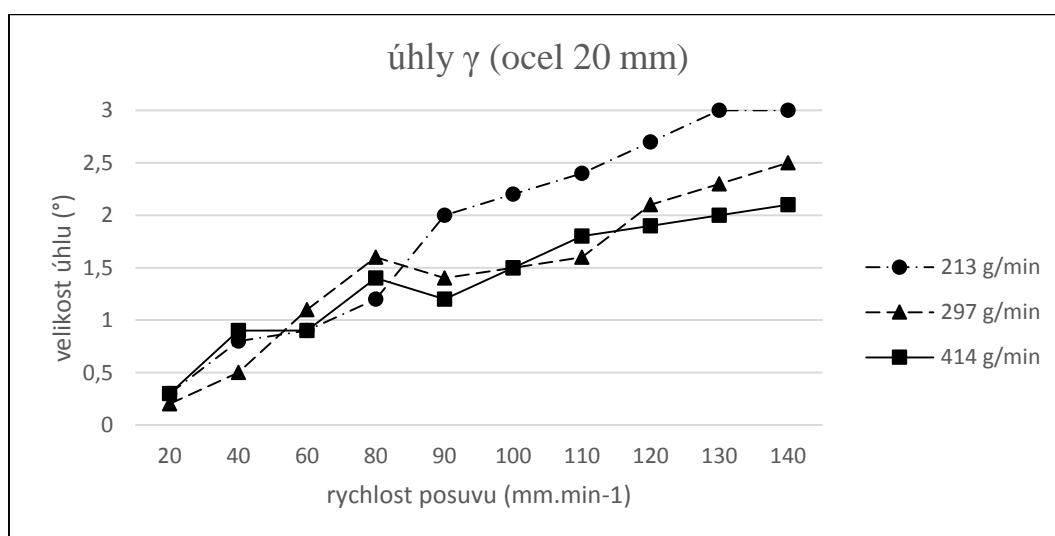
Obr. 7.27 Naměřené hodnoty  $\beta$  ocel 20 mm



### 7.8.13 Naměřené hodnoty celkového úhlu $\gamma$ u oceli o tloušťce 15 mm

Při součtu úhlů je v tomto případě pozorován téměř lineární růst všech křivek. Průběh křivek lze rozdělit do 2 částí. První část v rychlostech 20 až 90 mm.min<sup>-1</sup>. V této části vidíme křivky propletené mezi sebou. Při rychlosti 90 mm.min<sup>-1</sup> je však patrný nárůst hodnoty křivky řezu s obsahem abraziva 213 g.min<sup>-1</sup>. Křivky řezu s obsahem abrasiva 297 a 414 g.min<sup>-1</sup> naopak v rychlosti 90 mm.min<sup>-1</sup> klesají na nižší hodnotu. V druhé části grafu v rychlostech 90 až 140 mm.min<sup>-1</sup> vidíme další nárůst celkového úhlu  $\gamma$  u všech křivek. Křivka řezu s nejmenším obsahem abrasiva má však min o 0,5 ° vyšší hodnoty než křivky zbylých dvou řezů.

Obr. 7.28 Naměřené hodnoty  $\gamma$  ocel 20 mm



## 8 TECHNICKO - EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

V této kapitole je v první části spočten hodinový náklad provozu stroje. V druhé části je proveden výpočet provozních nákladů vodní řezačky pro potřeby experimentální části této diplomové práce.

### Hodinový náklad nejběžněji používaných náhradních dílů.

Tab. 4 Náklady na běžné náhradní díly podle firmy AWAC, spol. s r. o.

název dílu	Cena v Kč:	Průměrná životnost v hod. :	Náklady na 1 hodinu
10" Water Filter; .45 Micron	924,50 Kč	400	2,31 Kč
10" Water Filter; .1 Micron	129,00 Kč	400	0,32 Kč
10" Water Filter; .10 Micron	122,00 Kč	400	0,31 Kč
On/Off Valve Repair Kit	1 672,00 Kč	500	3,34 Kč
HP Seal Kit 1"	2 841,00 Kč	500	5,68 Kč
Hydraulic cylinder LP	4 170,00 Kč	10000	0,42 Kč
HP cylinder	16 342,00 Kč	2500	6,54 Kč
Check Valve Body	9 675,00 Kč	2500	3,87 Kč
LP Poppet basket	1 075,00 Kč	1000	1,08 Kč
LP Poppet	989,00 Kč	1000	0,99 Kč
HP Seat	324,00 Kč	1000	0,32 Kč
HP Poppet spring	59,00 Kč	1000	0,06 Kč
O-Ring, 70 Duro Buna	30,00 Kč	1000	0,03 Kč
O-Ring, 70 Duro Buna	30,00 Kč	1000	0,03 Kč
Filter Element Coreless	3 750,00 Kč	3000	1,25 Kč
AS BleedDown Valve II Kit	1 419,00 Kč	1000	1,42 Kč
Dialine Ruby Orifices	545,00 Kč	50	10,90 Kč
Dialine Diamond Orifice	12 500,00 Kč	500	25,00 Kč
Nozzle 0,300x0,040x3,00"	2 599,00 Kč	100	25,99 Kč
Hydraulic Oil Shell Tellus 46	5848 Kč	3000	1,95 Kč
Suma celkem			91,80 Kč



**Pozn:** Průměrná životnost náhradních dílů je garantovaná výrobcem, některé díly mají však běžně i dvojnásobnou životnost. Dle zkušeností firmy AWAC, spol. s. r. o je možné pro stejné náhradní díly počítat s nákladem 51,6 Kč.

**Hodinový náklad na amortizaci:**

Pro tento modelový příklad uvažujeme cenu 2 000 000 Kč a standartní 5 letou dobu odpisů (5).

$$jN_a = \frac{C_p \cdot P_s}{T_o \cdot P_{hsr}} \quad (5)$$

$$= \frac{2\,000\,000 \cdot 1}{5 \cdot 2\,024} = 197,6 \text{ Kč}$$

$jN_a$ ... hodinový náklad na amortizaci

$C_p$ ... kupní cena stroje (Kč)

$P_s$ ... počet pracovních směn (1)

$T_o$ ... doba odepisování (rok)

$P_{hsr}$ ... počet hodin ve směně za rok (hod)

**Pozn:** Pro tento modelový příklad se počítá s prací na jednu směnu, v praxi stroje pracují na 2 i 3 směny, což může významně snížit tuto nákladovou položku.

**Náklady na hodinovou spotřebu elektrické energie:**

Tento náklad tvoří součet všech příkonů strojních částí v závislosti na době provozu a ceně elektřiny (6).

$$jN_e = \frac{W_{\check{c}} + W_{ch} + W_{cnc} + W_k}{60} \cdot T_p \cdot C_e \quad (6)$$

$$= \frac{23,08 + 0,9 + 4,5 + 0}{60} \cdot 50 \cdot 3,83 = 90,89 \text{ Kč}$$

$jN_e$ ... Náklady na hodinovou spotřebu elektřiny (Kč)

$W_{\check{c}}$ ... příkon čerpadla (kW.hod<sup>-1</sup>)

$W_{ch}$ ... příkon chlazení (kW.hod<sup>-1</sup>)

$W_{cnc}$ ... příkon CNC stolu (kW.hod<sup>-1</sup>)

$W_k$ ... příkon kompresoru (kW.hod<sup>-1</sup>)

$T_p$ ... doba provozu (min)

$C_e$ ... cena elektrické energie (kWh)

### **Náklady na hodinovou spotřebu vody**

Tato hodnota se odvíjí hlavně od množství a ceny vody, která se v různých regionech liší podle místního dodavatele, od použitého druhu čerpadla a pracovního tlaku který určuje spotřebu vody (7).

$$\begin{aligned} jN_v &= \frac{S_v \cdot T_p}{1000} \cdot C_v & (7) \\ &= \frac{2,3 \cdot 50}{1\,000} \cdot 77,65 = 8,9 \text{ Kč} \end{aligned}$$

$S_v$ ... spotřeba vody ( $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$T_p$ ... doba provozu (min)

$C_v$ ... cena vody ( $\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}$ )

### **Náklady na abrazivo**

Jsou vypočteny podle aktuálního množství přiváděného abraziva a délky provozu stroje (8), pro tento modelový příklad je množství abraziva  $213 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$  délka provozu 50 min.

$$\begin{aligned} jN_{ab} &= \frac{M_a}{1\,000} \cdot T_p \cdot C_a & (8) \\ &= \frac{213}{1\,000} \cdot 50 \cdot 8,6 = 91,6 \text{ Kč} \end{aligned}$$

$M_a$ ... množství abraziva ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$T_p$ ... doba provozu (min)

$C_a$ ... cena abraziva ( $\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

### **Náklad na úpravu vody**

Tato hodnota je dlouhodobě sledovaná firmou AWAC, spol. s. r. o, činí  $1,5 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$

### **Náklady na servis**

Dle poskytnutých materiálů firmy AWAC, spol. s. r. o, je servis prováděn po každých 500 hodinách provozu stroje. Konkrétní výpočtové hodnoty se odvíjí od počtu techniků potřebných na servisní prohlídku, rozsahu servisní práce, množství materiálu a dalších nákladových položek spojené se servisem. Pro tento modelový příklad je hodnota servisního nákladu stanovena na  $30 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ .

### Celkový hodinový náklad na provoz stroje

Při sečtení všech dílčích nákladů dospějeme k celkové ceně za hodinu provozu vodní řezačky (Tab. 5).

Tab. 5 Součet nákladů na hodinový provoz stroje.

Druhy nákladů	Cena za hodinu
Náklady na amortizaci	197, 6 Kč
Náklady na náhradní díly	91, 8 Kč
Náklady na vodu	8, 9 Kč
Náklady na úpravu vody	1, 5 Kč
Náklady na elektřinu	90, 9 Kč
Náklady na abrazivo	91, 6 Kč
Náklady na Servis	30 Kč
<b>Celkem</b>	<b>513 Kč</b>

Pokud stroj neobsluhujeme osobně, je potřeba přičíst k nákladům také mzdu zaměstnance, která je dle [15] stanovena na 500 Kč.hod<sup>-1</sup>. Celkový náklad na hodinu provozu stroje včetně obsluhy se tak zvedne zhruba na 1 000 Kč za hodinu práce.

### Výpočet ceny provedeného experimentu

Pro výpočet celkových nákladů spojené s experimentem je potřeba stanovit čas potřebný k řezu 70 mm materiálu (šířka každé spáry), ten se vypočítá dle (9) :

$$t_c = \frac{l_r}{v_p} + t_p \quad (9)$$

Kde:

$t_c$ ... čas řezu (min)

$l_r$ ... délka řezu (mm)

$v_p$ ... rychlost posuvu (mm.min<sup>-1</sup>)

$t_p$ ... doba prorážení obrobku paprskem (min)

Konečná cena 70 mm řezu se tedy spočte dle (10)

$$C_v = t_c \cdot C_p \quad (10)$$

Kde:

$C_v$ ... cena 70 mm řezu (Kč)

$t_c$ ... čas řezu (min)

Součet nákladů na řezání jednotlivých zkušebních vzorků vypočítaný z výše uvedených matematických vztahů je uveden v tabulce č. 6.

*Tab. 6 Součet nákladů pro řezání jednotlivých vzorků.*

Název vzorku	Náklady na vzorek
Vzorek č. 1 (5 mm, 213 g.min <sup>-1</sup> )	<b>59 Kč</b>
Vzorek č. 2 (5 mm, 297 g.min <sup>-1</sup> )	<b>61 Kč</b>
Vzorek č. 3 (5 mm, 414 g.min <sup>-1</sup> )	<b>64 Kč</b>
Vzorek č. 4 (10 mm, 213 g.min <sup>-1</sup> )	<b>66 Kč</b>
Vzorek č. 5 (10 mm, 297 g.min <sup>-1</sup> )	<b>68 Kč</b>
Vzorek č. 6 (10 mm, 414 g.min <sup>-1</sup> )	<b>72 Kč</b>
Vzorek č. 7 (15 mm, 213 g.min <sup>-1</sup> )	<b>256 Kč</b>
Vzorek č. 8 (15 mm, 297 g.min <sup>-1</sup> )	<b>265 Kč</b>
Vzorek č. 9 (15 mm, 414 g.min <sup>-1</sup> )	<b>278 Kč</b>
Vzorek č. 10 (20 mm, 213 g.min <sup>-1</sup> )	<b>284 Kč</b>
Vzorek č. 11 (20 mm, 297 g.min <sup>-1</sup> )	<b>294 Kč</b>
Vzorek č. 12 (20 mm, 414 g.min <sup>-1</sup> )	<b>308 Kč</b>
Celkem náklady na experiment	<b>2 075 Kč</b>

**Pozn:** V přílohách je přiložena tabulka znázorňující ceny jednotlivých řezů každých vzorků a jejich celková kalkulace.

Celkové náklady na provedení řezu experimentální části diplomové práce jsou dle výpočtů 2 075 Kč. Tato částka předpokládá mzdový hodinový náklad 500 Kč a neobsahuje cenu řezaného materiálu.

## 9 ZÁVĚR

V teoretické části diplomové práce jsou shromážděny a popsány všechny dostupné metody používané pro dělení kovového materiálu. Dále je blíže popsána historie a technologie řezání čistým vodním paprskem a vodním paprskem s příměsí abrazivních částic. Bylo poukázáno také na novou metodu řezání s příměsí ledových krystalů jako abrazivních částic, která má velký budoucí potenciál. Posléze byly shromážděny základní informace o jednotlivých konstrukčních částech stroje, které dohromady generují řezný vodní paprsek. V závěru teoretické části jsou popsány kvalitativní možnosti řezu, které spolu s předešlými poznatky udávají podklady pro závěrečnou sumarizaci výhod a nevýhod této technologie.

Praktická část diplomové práce byla věnována experimentálnímu posouzení vlivu rychlosti posuvu, množství abraziva a tloušťky oceli na šířku spáry a na úhlovou odchylku řezné hrany. Parametry experimentu stanovil vedoucí diplomové práce v rámci systematického zkoumání parametrů řezání vodou železných a neželezných kovů, prováděných na katedře.

Při měření šířky spáry řezu byla z vytvořených grafů zjištěna primární závislost šířky na rychlosti posuvu. Množství abraziva má při nižších rychlostech zanedbatelný vliv na šířku spáry, při vyšších rychlostech je naopak množství důležité, což potvrzují spáry u ocelí tloušťky 5, 15 a 20 mm, které při vysoké rychlosti s nejmenším množstvím abraziva nebyly zcela rozděleny. Je zajímavé, že u oceli o tloušťce 10 mm se tato skutečnost nepotvrdila.

Poměrové grafické srovnání šířky spáry na vstupu a výstupu paprsku ukazuje, že množství abraziva při zkoumaných rychlostech posuvu nemá vždy jednoznačně kladný vliv na velikost odchylky. Opět je pozorovaná závislost zejména na rychlosti a tloušťce oceli.

Z hlediska měření úhlů bylo zjištěno, že úhel  $\alpha$  a  $\beta$  jsou u oceli o tloušťce 5 a 10 mm velmi rozdílné. To by se nemělo dít v případě, že je řezná hlava umístěna kolmo k řezanému materiálu. U oceli o tloušťce 15 a 20 mm jsou již hodnoty  $\alpha$  a  $\beta$  podobné. Je možné, že problém způsobuje nepřesné směřování abraziva a vodního paprsku. Tyto rozdílné výsledky doporučuji dále zkoumat, aby byly zjištěny a popsány příčiny takového chování abrazivního vodního paprsku.

Cena řezu je často hlavním rozhodujícím faktorem pro výběr technologie, proto je závěrečná část věnována technicko-ekonomickému vyhodnocení, ve kterém byla díky spolupráci se společností AWAC, spol. s r. o. spočtena nákladnost hodinového provozu stroje. Dále díky předešlým poznatkům byly vypočteny provozní náklady stroje spojené s provedením experimentální části této diplomové práce. Dle výpočtu byla nákladnost experimentu 2075 Kč.

## 10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. 6 способів різки металу: від гильотини до води. [online]. 2012 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://tools-expert.ru/articles/theory/250/>
2. AWAC, spol. s. r. o. Firemní materiály
3. AWAC, SPOL. S. R. O. *Systémy dělení materiálu* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.AWAC, spol. s. r. o.cz/cz>
4. BRYM, Radek. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Diplomová práce. Brno, 2008. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5167](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5167)
5. Časopis MM 2008/6, 3. Února 2015 v rubrice / inovace/, str. 58, obráběcí stroje a technologie
6. DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem. [online]. 2007 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6113&cid=6.html>
7. FLOW. *ŘEZÁNÍ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPERSEM* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/abrasive-waterjet.aspx>
8. FLOW. *ŘEZÁNÍ ČISTÝM VODNÍM PAPERSEM* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/technologie-%C5%99ez%C3%A1n%C3%AD-vodn%C3%ADm-paprskem/pure-waterjet.aspx>

9. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. prvé. Ostrava, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
10. HORÁČEK, Lukáš. *VYUŽITÍ NEKONVENČNÍCH PAPERKOVÝCH TECHNOLOGIÍ (LASER/VODNÍ PAPERSEK) VE STROJÍRENSTVÍ*. Brno, 2008. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=566](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=566)  
3. Diplomová práce.
11. ICE JET. *ICE CUTTING SYSTEMS* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.icejet.eu/>
12. J. ŘASA, J. V. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-718-3337<sup>-1</sup>.
13. JIROUŠEK, Pavel. *NEJDE TO UŘÍZNOUT DIAMANTEM? ZKUSTE TO VODOU!*. 2009. Dostupné z: [http://www.arempro.cz/resources/wj\\_article.pdf](http://www.arempro.cz/resources/wj_article.pdf)
14. KAŠPAR, Ladislav. *Analýza konveční technologie dělení materiálu*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, CSC.
15. KLEPSA, Pavel. *Dělení kovových materiálů vodním paprskem*. Praha, 2013. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Brožek, CSc.
16. KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 384s. ISBN 80-8057-091-4.
17. LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů: Dělení materiálu* [online]. Liberec [cit. 2015-01-24]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm#0118](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#0118)

18. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Vienaľa Košice, 2000. 270s. ISBN 80-7099-430.3.
19. Nekonvenční způsoby obrábění. *Učíme v prostoru: Encyklopedie - Drtič kamene* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z:[http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2573](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573)
20. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980, 213 s.
21. *Our history* [online] [citováno 23. března 2015]. Dostupný z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>
22. PLAYER, Martin. *Dělení kovových materiálů vodním paprskem*. Praha, 2012. Bakalářská práce. ČZU. Vedoucí práce prof. Ing. Brožek Milan, CSc.
23. Plunžrové čerpadlo. [online],[vid. 2012-05-20]. Dostupné z: <<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>>.
24. Porovnání konstrukčních ocelí. [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z:[http://www.bolzano.cz/assets/files/HM%20nove/Porovnan\\_i\\_konstrukcnich\\_oci.pdf](http://www.bolzano.cz/assets/files/HM%20nove/Porovnan_i_konstrukcnich_oci.pdf)
25. Porovnání řezného výkonu v závislosti na tlaku a množství abraziva. [online]. 2014 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:[http://www.ptv.cz/porovnan\\_i-rezneho-vykonu-v-zavislosti-na-tlaku-a-mnozstvi-abraziva/](http://www.ptv.cz/porovnan_i-rezneho-vykonu-v-zavislosti-na-tlaku-a-mnozstvi-abraziva/)
26. PTV. *Výroba strojů pro řezání vysokotlakým vodním paprskem specializace na individuální řešení*[online]. 2014 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/>
27. *Řezání vodním paprskem* [online] [citováno 23. března 2015]. Dostupný z: <http://rezani-vodnim-paprskem.divoce.cz/historie/>



28. SIGMA PUMPY HRANICE s.r.o., Hranice [online],[vid. 2012-05-20].  
*Plunžrová čerpadla*. Dostupné z: <[http://www. sigma. sk/program/pcd.htm](http://www.sigma.sk/program/pcd.htm) >.
29. SITEK, Libor a Dagmar KLICHOVÁ. *Vodní paprsek 2013: výzkum, vývoj, aplikace*. Ostrava: Ústav geoniky, 2013. ISBN 978-80-86407-43-2.
30. Stationäre Trennscheiben. [Bad Karlshafen]: KREBS & RIEDEL GmbH & Co. KG., 2010. 1. Auflage. 40 s.
31. STAVINOHA, Zdeněk. Nekonvenční metody obrábění. [online]. 2012, s. 8 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z:<http://coptel.coptkm.cz/index.php?doc=33788&docGroup=4931&instance=2>
32. STEEL UNION. *Механические способы резки металла, их преимущества и недостатки* [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z:<http://www.steelunion.ru/mekhanicheskie-sposobi-rezki-metalla>
33. ŠINDELÁŘ, Jiří. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2007. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Habán.
34. Technologie dělení materiálu rozbrušováním. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. JAROSLAV PROKOP, CSc.
35. Úvaha nad celkovými náklady provozu čerpadel o rozdílném tlaku. [online]. 2014 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z:<http://www.ptv.cz/uvaha-nad-celkovymi-naklady-provozu-cerpadel-o-rozdilnem-tlaku/>
36. VASAVA, Virendra. *Ice jet machining* [online]. Indie [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/VirendraVasava/ice-jet-machining>
37. Vliv nekonvenčních metod přípravy přístřihů na jejich následné plastické vlastnosti. Liberec. Prezentace. Technická univerzita Liberec.

38. VOMOČIL, Libor. Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. [online]. 2008 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://ihned.cz/c1-27298090-vodni-paprsek-nyni-dokaze-rezat-se-stalym-pracovnim-tlakem-6000-baru>
39. VRÁNA, Lukáš. *VÝROBA NÁHRADNÍHO DÍLU ČERPADLA PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
40. WATER JET USING ICE PARTICLES. 2011. Dostupné z: <http://www.tecnalia.com/en/industria-transporte/news/water-jet-using-ice-particles.htm>
41. Waterjet Cutting: History. [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: [http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining/non\\_trad/waterjet/](http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining/non_trad/waterjet/)
42. WATERJETS. [online]. 2015 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://waterjets.org/index.php>
43. Гидроабразивная резка. [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.osvarke.com/gidroabrazivnaya-rezka.html>
44. Резка листового металла — станки, инструменты и технологии. In: [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://rezhemmetall.ru/rezka-listovogo-metalla.html>
45. Технологии и виды резки металла. In: [online]. [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://rezhemmetall.ru/tehnologii-i-vidy-rezki-metall.html>

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1 Schéma rozdělení jednotlivých technologií řezání kovových materiálů</i> .....	7
<i>Obr. 3.1 Schématické znázornění řezného procesu</i> .....	15
<i>Obr. 3.2 Schéma řezné hlavy vodní trysky</i> .....	16
<i>Obr. 3.3 Schéma řezné hlavy abrazivní vodní trysky</i> .....	17

Obr. 3.4 Řez ledovým paprskem .....	18
Obr. 4.1 Schéma konstrukčních částí stroje AWJM .....	19
Obr. 4.2 Schema multiplikačního zařízení.....	20
Obr. 4.3 Schéma práce plunžrového čerpadla .....	21
Obr. 4.4 Tvary dýz řezací hlavy.....	22
Obr. 4.5 Konstrukce dýzy .....	23
Obr. 4.7 Druhy abraziv .....	28
Obr. 4.8 Zrnko granátu .....	28
Obr. 4.9 Ostřívo pro vodní paprsek MESH80 a abrazivní tryska .....	29
Obr. 4.10 Dávkoč abraziva.....	30
Obr. 5.1 Oblasti kvality znázorněné na fotografii řezu vodním paprskem.....	31
Obr. 5.2 Schema kvalitativních oblastí řezu vodního paprsku. ....	31
Obr. 5.3 Fotografické znázornění kvalitativních stupňů řezu .....	32
Obr. 5.4 Schematické znázornění možných odchylek řezu .....	34
Obr. 5.5 Tvarová omezení ostrých úhlů vlivem kruhového průřezu paprsku.....	35
Obr. 5.6 Možnosti 2D řezu .....	35
Obr. 5.7 Možnosti 3D řezu .....	36
Obr. 7.1 Fotografie zkušební vzorku .....	40
Obr. 7.2 Postup při měření šířky řezné spáry .....	41
Obr. 7.3 Vstupní strana paprsku ocel 5mm .....	42
Obr. 7.4 Výstupní strana paprsku ocel 5mm .....	43
Obr. 7.5 Vstupní strana paprsku ocel 10mm .....	43
Obr. 7.6 Výstupní strana paprsku ocele 10mm .....	44
Obr. 7.7 Vstupní strana paprsku ocel 15 mm .....	44
Obr. 7.8 Výstupní strana paprsku ocel 15 mm .....	46
Obr. 7.9 Vstupní strana paprsku ocel 20 mm .....	46
Obr. 7.10 Výstupní strana paprsku ocel 20mm .....	47
Obr. 7.11 Poměrové hodnoty ocel 5 mm .....	48
Obr. 7.12 Poměrové hodnoty ocel 10 mm .....	49
Obr. 7.13 Poměrové hodnoty ocel 15 mm .....	49
Obr. 7.14 Poměrové hodnoty ocel 20 mm .....	50
Obr. 7.15 Ukázka vzorku pro měření úhlů skosení .....	51
Obr. 7.16 Schéma postupu měření úhlů skosení.....	51
Obr. 7.17 Naměřené úhly $\alpha$ ocel 5 mm.....	52
Obr. 7.18 Naměřené úhly $\beta$ ocel 5 mm .....	52
Obr. 7.19 Naměřené hodnoty $\gamma$ ocel 5 mm .....	53
Obr. 7.20 Naměřené hodnoty $\alpha$ ocel 10 mm.....	53
Obr. 7.21 Naměřené hodnoty $\beta$ ocel 10 mm .....	54
Obr. 7.22 Naměřené hodnoty $\gamma$ ocel 10 mm .....	55
Obr. 7.23 Naměřené hodnoty $\alpha$ ocel 15 mm.....	55
Obr. 7.24 Naměřené hodnoty $\beta$ ocel 15 mm .....	56
Obr. 7.25 Naměřené hodnoty $\gamma$ ocel 15 mm .....	56
Obr. 7.26 Naměřené hodnoty $\alpha$ ocel 20 mm.....	57
Obr. 7.27 Naměřené hodnoty $\beta$ ocel 20 mm .....	58
Obr. 7.28 Naměřené hodnoty $\gamma$ ocel 20 mm .....	58
Obr. 13.1 Měření jedné ze tří fotografií pro vstupní řeznou spáru oceli o tloušťce 10 mm, množstvím abraziva 213 g.min <sup>-1</sup> , rychlost posuvu 350 mm.min <sup>-1</sup> .....	77
Obr. 13.2 Měření jedné ze tří fotografií pro vstupní řeznou spáru oceli o tloušťce 20 mm, množstvím abraziva 213 g.min <sup>-1</sup> , rychlost posuvu 100 mm.min <sup>-1</sup> .....	77

<i>Obr. 13.3 Měření úhlů oceli o tloušťce 10 mm, množstvím abraziva 213 g.min<sup>-1</sup>, rychlost posuvu 325 mm.min<sup>-1</sup>.....</i>	78
<i>Obr. 13.4 Měření úhlů oceli o tloušťce 15 mm, množstvím abraziva 414 g.min<sup>-1</sup>, rychlost posuvu 100 mm.min<sup>-1</sup>.....</i>	78

## 12 SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Specifikace abraziva MESH 80.....</i>	29
<i>Tab. 2 Kvalitativní stupně obrobené plochy.....</i>	32
<i>Tab. 3 Rychlosti posuvu.....</i>	39
<i>Tab. 4 Náklady na běžné náhradní díly podle firmy AWAC, spol. s. r. o.....</i>	59
<i>Tab. 5 Součet nákladů na hodinový provoz stroje.....</i>	62
<i>Tab. 6 Součet nákladů pro řezání jednotlivých vzorků.....</i>	63
<i>Tab. 7 Aritmetické průměry hodnot šířky spáry na vstupu u oceli o tloušťce 5 a 10 mm. ....</i>	72
<i>Tab. 8 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na vstupu u oceli o tloušťce 15 a 20 mm .....</i>	72
<i>Tab. 9 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na výstupu u oceli o tloušťce 5 a 10 mm .....</i>	73
<i>Tab. 10 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na výstupu u oceli o tloušťce 15 a 20 mm ....</i>	73
<i>Tab. 11 Poměrové hodnoty vstupní a výstupní šířky spáry u oceli o tloušťce 5 a 10 mm.....</i>	74
<i>Tab. 12 Poměrové hodnoty vstupní a výstupní šířky spáry u oceli o tloušťce 15 a 20 mm.....</i>	74
<i>Tab. 13 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 5 mm.....</i>	75
<i>Tab. 14 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 10 mm.....</i>	75
<i>Tab. 15 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 15 mm.....</i>	76
<i>Tab. 16 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 20 mm.....</i>	76
<i>Tab. 17 Výpočet nákladů jednotlivých řezů prováděného experimentu .....</i>	79

## 13 PŘÍLOHY

### Příloha č. 1 : Aritmetický průměr z naměřených hodnot šířky spáry na vstupu a výstupu paprsku.

Tab. 7 Aritmetické průměry hodnot šířky spáry na vstupu u oceli o tloušťce 5 a 10 mm.

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	5 mm			10 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
150	1105,73	1095,73	1159,27	1204,97	1202,73	1265,20
200	1102,83	1100,03	1110,73	1232,70	1186,53	1232,17
250	1080,00	1085,13	1111,90	1204,10	1182,27	1206,40
300	1033,63	1079,50	1082,67	1152,30	1158,77	1184,30
325	1060,53	1069,13	1080,30	1143,27	1130,27	1196,13
350	1065,33	1050,83	1059,23	1150,30	1108,67	1153,53
375	1051,17	1041,30	1074,57	1101,53	1101,60	1129,47
400	1067,93	1060,23	1072,60	1100,37	1089,80	1115,37
425	1048,63	1037,57	1034,40	1101,23	1110,03	1088,83
450	1043,50	1062,23	1057,47	1103,23	1068,30	1067,77

Tab. 8 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na vstupu u oceli o tloušťce 15 a 20 mm

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	15 mm			20 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
20	1253,23	1250,77	1318,50	1319,47	1267,53	1358,23
40	1216,63	1178,43	1204,80	1184,27	1204,33	1230,17
60	1203,90	1153,37	1158,73	1152,70	1171,27	1219,23
80	1162,27	1154,13	1162,27	1147,50	1171,50	1191,40
90	1162,40	1180,10	1192,73	1128,47	1161,50	1193,70
100	1166,53	1153,33	1174,77	1121,37	1167,17	1189,60
110	1170,17	1157,93	1161,87	1132,93	1150,70	1173,50
120	1147,03	1176,63	1184,77	1126,77	1151,17	1158,83
130	1116,43	1160,23	1178,10	1090,27	1153,53	1168,43
140	1115,03	1163,60	1154,83	1113,77	1161,30	1168,20

Tab. 9 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na výstupu u oceli o tloušťce 5 a 10 mm

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	5 mm			10 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
150	699,10	677,97	664,43	988,60	983,47	1037,20
200	634,53	638,00	609,30	897,80	885,33	942,23
250	564,10	595,83	577,30	804,03	818,43	880,27
300	497,50	536,90	542,77	709,47	746,70	769,27
325	489,33	544,73	533,93	643,80	675,70	702,47
350	474,30	501,40	517,70	591,90	640,40	684,37
375	506,53	483,20	501,77	522,90	605,10	630,90
400	493,43	466,00	496,87	611,33	534,83	559,93
425	384,67	451,47	493,80	662,97	518,37	556,87
450	234,43	468,40	495,10	642,27	477,87	567,43

Tab. 10 Aritmetický průměr hodnot šířky spáry na výstupu u oceli o tloušťce 15 a 20 mm

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	15 mm			20 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
20	1020,10	1021,70	1053,17	1114,67	1169,60	1240,93
40	814,20	838,30	835,73	900,60	939,03	1004,73
60	711,20	707,60	726,20	776,90	801,20	862,67
80	635,10	629,63	629,13	688,13	699,87	773,87
90	588,03	614,67	615,20	650,87	631,13	714,47
100	616,33	581,93	575,77	631,83	594,97	655,90
110	561,03	557,30	577,83	596,63	575,40	646,53
120	549,27	554,77	560,57	551,70	576,37	546,67
130	610,47	574,93	564,47	657,53	605,93	613,30
140	486,83	664,17	657,37	177,30	642,63	576,13

## Příloha č. 2 Poměrové hodnoty šířky spáry na vstupnu a výstupu řezného paprsku

Tab. 11 Poměrové hodnoty vstupní a výstupní šířky spáry u oceli o tloušťce 5 a 10 mm

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	5 mm			10 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
150	1,6	1,6	1,7	1,2	1,2	1,2
200	1,7	1,7	1,8	1,4	1,3	1,3
250	1,9	1,8	1,9	1,5	1,4	1,4
300	2,1	2,0	2,0	1,6	1,6	1,5
325	2,2	2,0	2,0	1,8	1,7	1,7
350	2,2	2,1	2,0	1,9	1,7	1,7
375	2,1	2,2	2,1	2,1	1,8	1,8
400	2,2	2,3	2,2	1,8	2,0	2,0
425	2,7	2,3	2,1	1,7	2,1	2,0
450	4,5	2,3	2,1	1,7	2,2	1,9

Tab. 12 Poměrové hodnoty vstupní a výstupní šířky spáry u oceli o tloušťce 15 a 20 mm

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	15 mm			20 mm		
	objemy ostřiva			objemy ostřiva		
	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>	213 g.min <sup>-1</sup>	297 g.min <sup>-1</sup>	414 g.min <sup>-1</sup>
20	1,2	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1
40	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2
60	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4
80	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
90	2,0	1,9	1,9	1,7	1,8	1,7
100	1,9	2,0	2,0	1,8	2,0	1,8
110	2,1	2,1	2,0	1,9	2,0	1,8
120	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,1
130	1,8	2,0	2,1	1,7	1,9	1,9
140	2,3	1,8	1,8	6,3	1,8	2,0

### Příloha č. 3 Naměřené úhly úkosů řezné hrany

Tab. 13 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 5 mm.

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	5 mm								
	objemy ostříva								
	213 g.min <sup>-1</sup>			297 g.min <sup>-1</sup>			414 g.min <sup>-1</sup>		
	α	β	γ	α	B	γ	α	β	γ
150	2,9	1,2	4,1	2,3	1,8	4,1	1,9	1,8	3,7
200	3,2	2	5,2	2,9	1,6	4,5	2,2	2,1	4,3
250	3,4	2,4	5,8	3,5	2,1	5,6	3,7	2,3	6
300	4,8	1,6	6,4	3,5	2,1	5,6	3,2	2,7	5,9
325	5,7	2	7,7	3,8	2,6	6,4	3,6	1,7	5,3
350	5,5	2,6	8,1	4,1	2	6,1	3,6	2,6	6,2
375	5,8	3,5	9,3	3,7	2,3	6	4,1	2,2	6,3
400	5,8	2,8	8,6	3,9	2,1	6	4,1	3	7,1
425	5,1	3,6	8,7	3,4	2,4	5,8	3,6	3,2	6,8
450	6,4	4,6	11	3,9	2,3	6,2	2,8	3	5,8

Tab. 14 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 10 mm.

Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	10 mm								
	objemy ostříva								
	213 g.min <sup>-1</sup>			297 g.min <sup>-1</sup>			414 g.min <sup>-1</sup>		
	α	β	γ	α	B	γ	α	β	γ
150	0,7	0	0,7	0,8	0	0,8	0,7	0	0,7
200	1,2	0	1,2	1,1	1	2,1	0,8	0,7	1,5
250	1,5	0,8	2,3	1,8	0,5	2,3	0,9	1,2	2,1
300	1,5	1,2	2,7	1,6	1,2	2,8	1,2	1,6	2,8
325	1,9	1,3	3,2	1,4	0,7	2,1	1,4	1,7	3,1
350	1,8	1,3	3,1	1,4	2	3,4	1,8	1,6	3,4
375	2,3	1,7	4	1,1	1,8	2,9	2	0,8	2,8
400	2	2,4	4,4	1,8	1,5	3,3	2,6	0,8	3,4
425	2,9	2,6	5,5	1,2	2,3	3,5	3,6	0	3,6
450	1,8	2,5	4,3	0	2,6	2,6	4,3	0	4,3



Tab. 15 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 15 mm.

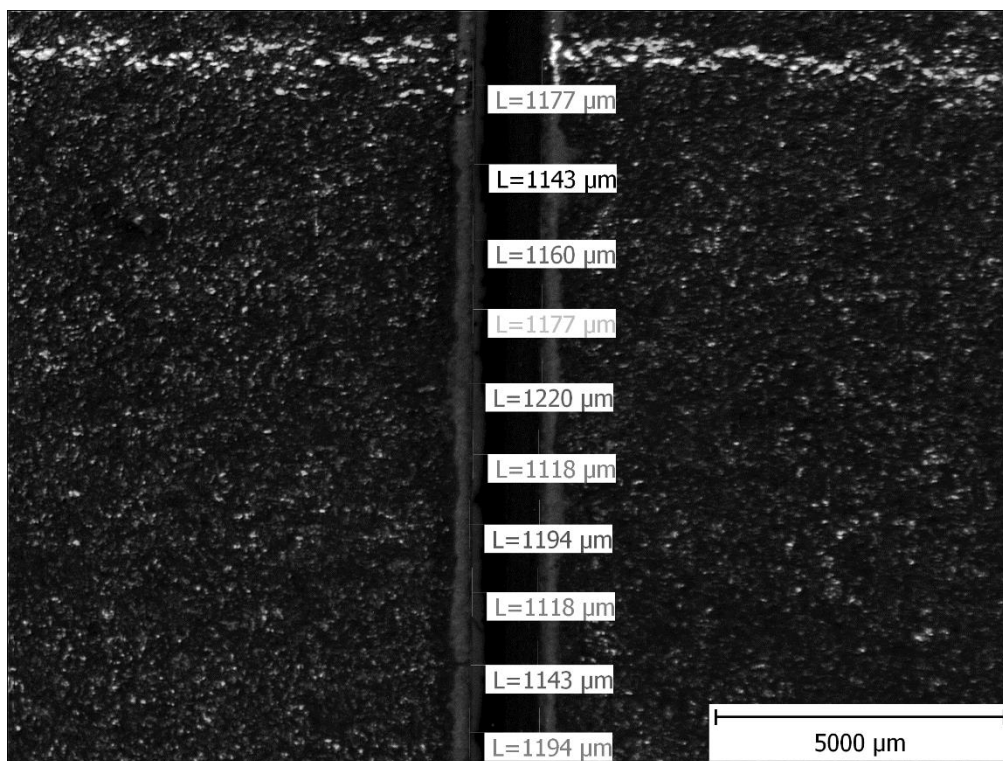
Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	15 mm								
	objemy ostřiva								
	213 g.min <sup>-1</sup>			297 g.min <sup>-1</sup>			414 g.min <sup>-1</sup>		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
20	0,7	0,4	1,1	0,8	0,9	1,7	0,4	0,6	1
40	1,3	0	1,3	1	0,8	1,8	0,5	0,8	1,3
60	1,5	0,8	2,3	1,1	0,9	2	1	1	2
80	1,4	1,1	2,5	1,4	1,1	2,5	1,2	0,9	2,1
90	1,6	0,9	2,5	1,2	1,2	2,4	1,5	0,9	2,4
100	1,7	1,2	2,9	1,2	1,8	3	1,2	0,8	2
110	1,6	1,5	3,1	1,4	1,2	2,6	1,3	1	2,3
120	1,7	1,5	3,2	1,4	1,5	2,9	1,3	1	2,3
130	1,9	1,6	3,5	1,2	1,8	3	1,1	1,4	2,5
140	2	1,5	3,5	1,3	1,9	3,2	1,1	1,3	2,4

Tab. 16 Naměřené úhly úkosů řezné hrany oceli o tloušťce 20 mm.

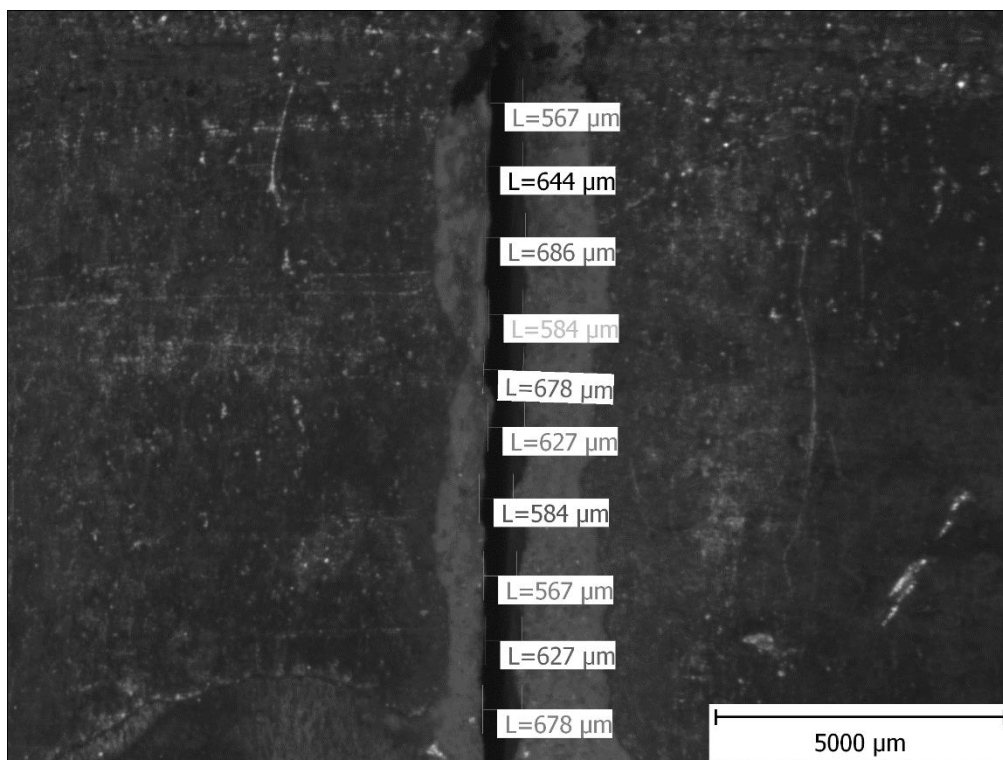
Rychlosti (mm.min <sup>-1</sup> )	20 mm								
	objemy ostřiva								
	213 g.min <sup>-1</sup>			297 g.min <sup>-1</sup>			414 g.min <sup>-1</sup>		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
20	0	0,3	0,3	0	0,2	0,2	0	0,3	0,3
40	0,8	0	0,8	0	0,5	0,5	0	0,9	0,9
60	0,9	0	0,9	0,3	0,8	1,1	0,2	0,7	0,9
80	1	0,2	1,2	0,7	0,9	1,6	0,8	0,6	1,4
90	1,6	0,4	2	0,9	0,5	1,4	0,4	0,8	1,2
100	1,6	0,6	2,2	0,5	1	1,5	0,8	0,7	1,5
110	1,6	0,8	2,4	0,8	0,8	1,6	0,8	1	1,8
120	1,6	1,1	2,7	1,2	0,9	2,1	1	0,9	1,9
130	1,5	1,5	3	1,3	1	2,3	0,8	1,2	2
140	1,8	1,2	3	1,3	1,2	2,5	1,1	1	2,1

#### Příloha č. 4 Ukázka měření v program Quick Photo Industrial

Obr. 13.1 Měření jedné ze tří fotografií pro vstupní řeznou spáru oceli o tloušťce 10 mm, množstvím abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , rychlost posuvu  $350 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

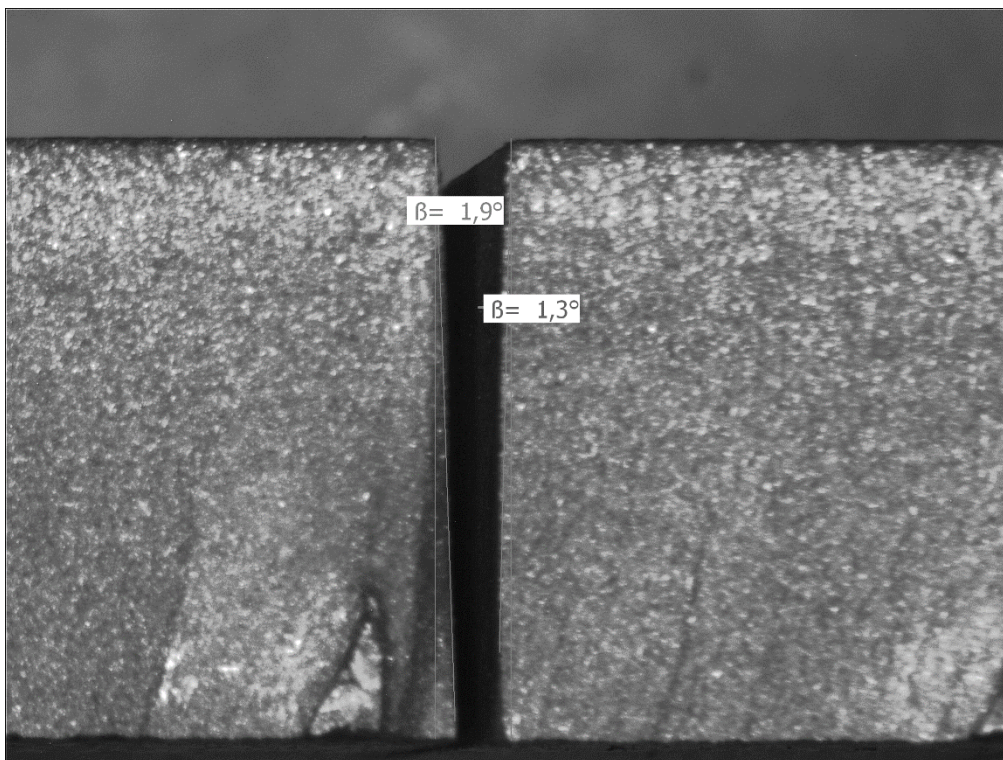


Obr. 13.2 Měření jedné ze tří fotografií pro vstupní řeznou spáru oceli o tloušťce 20 mm, množstvím abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , rychlost posuvu  $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

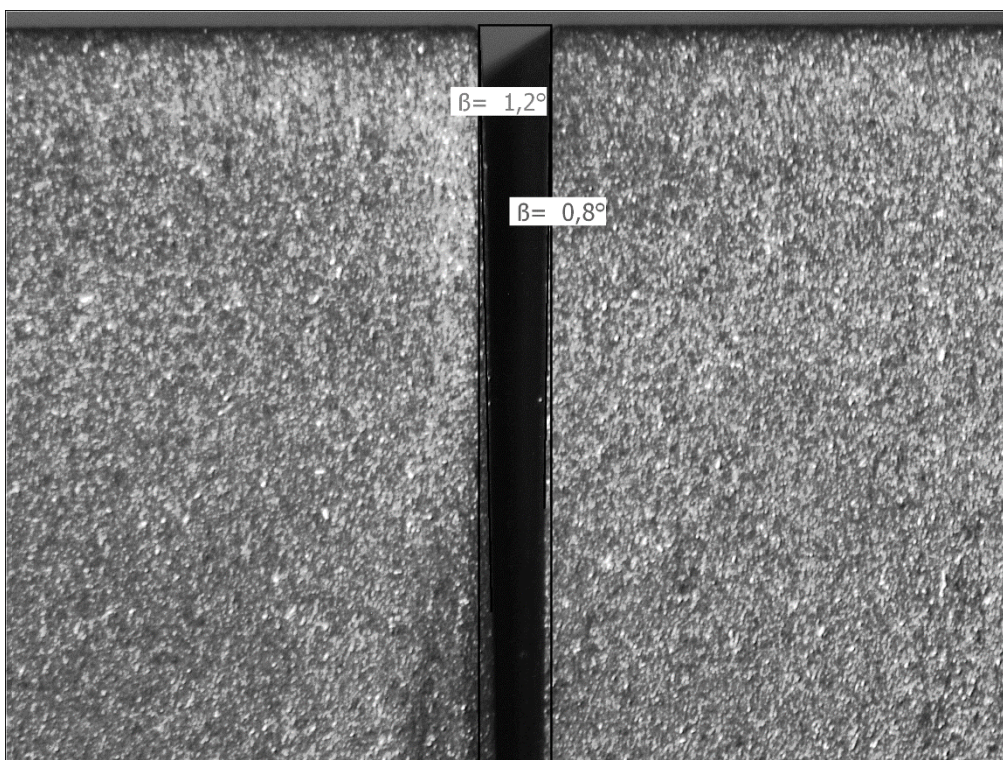




Obr. 13.3 Měření úhlů oceli o tloušťce 10 mm, množstvím abraziva  $213 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , rychlost posuvu  $325 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$



Obr. 13.4 Měření úhlů oceli o tloušťce 15 mm, množstvím abraziva  $414 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ , rychlost posuvu  $100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$



## Příloha č 5 Výpočet nákladů jednotlivých řezů prováděného experiment

Tab. 17 Výpočet nákladů jednotlivých řezů prováděného experimentu

			rychlost posuvu (mm.min <sup>-1</sup> )										Cena řezání jednotlivých vzorků	
			150	200	250	300	325	350	375	400	425	450		
Hodnota t <sub>p</sub> (min)	Tloušťka materiálu (mm)	množství abraziva (g.min <sup>-1</sup> )	Cena každého řezu											
0,05	5	213	10 Kč	8 Kč	7 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	4 Kč	4 Kč	59 Kč
		297	11 Kč	8 Kč	7 Kč	6 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	4 Kč	61 Kč
		414	11 Kč	9 Kč	7 Kč	6 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	64 Kč
0,083	10	213	11 Kč	9 Kč	7 Kč	6 Kč	6 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	66 Kč
		297	12 Kč	9 Kč	8 Kč	7 Kč	6 Kč	6 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	5 Kč	68 Kč
		414	12 Kč	10 Kč	8 Kč	7 Kč	7 Kč	6 Kč	6 Kč	6 Kč	6 Kč	5 Kč	5 Kč	72 Kč
			rychlost posuvu (mm.min <sup>-1</sup> )										Cena řezání jednotlivých vzorků	
			20	40	60	80	90	100	110	120	130	140		
Hodnota t <sub>p</sub> (min)	Tloušťka materiálu (mm)	množství abraziva (g.min <sup>-1</sup> )	Cena každého řezu											
0,16	15	213	74 Kč	39 Kč	27 Kč	21 Kč	19 Kč	17 Kč	16 Kč	15 Kč	14 Kč	13 Kč	13 Kč	256 Kč
		297	77 Kč	40 Kč	28 Kč	22 Kč	20 Kč	18 Kč	17 Kč	16 Kč	15 Kč	14 Kč	14 Kč	265 Kč
		414	80 Kč	42 Kč	29 Kč	23 Kč	21 Kč	19 Kč	18 Kč	16 Kč	15 Kč	15 Kč	15 Kč	278 Kč
0,3	20	213	77 Kč	42 Kč	30 Kč	24 Kč	22 Kč	20 Kč	19 Kč	18 Kč	17 Kč	16 Kč	16 Kč	284 Kč
		297	80 Kč	43 Kč	31 Kč	25 Kč	23 Kč	21 Kč	20 Kč	19 Kč	18 Kč	17 Kč	17 Kč	294 Kč
		414	84 Kč	45 Kč	32 Kč	26 Kč	24 Kč	22 Kč	21 Kč	19 Kč	18 Kč	18 Kč	18 Kč	308 Kč
<b>Celková cena experimentu</b>														<b>2 075 Kč</b>