

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Analýza faktorů hydroabrazivního soustružení niklových superslitin

Analysis of Factors Hydroabrasive Turning of Nickel Superalloys

Student:

Pavel Vacek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Sergej Hloch, PhD

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Vacek**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Analýza faktorů hydroabrazivního soustružení niklových superslitin**  
**Analysis of Factors Hydroabrasive Turning of Nickel Superalloys**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
3. Experimentální metodika a experimentální ověření.
4. Výsledky a diskuze.
5. Nový přístup k řešeným problémům.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [2] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Teoretické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2008, 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.
- [3] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Riadenie kvality povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením pomocou vibrácií a hluku*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2009, 99 s. ISBN 978-80-553-0316-1.
- [4] HLOCH, Sergej et al. *On-line identifikácia hydroabrazívneho delenia pomocou akustickej emisie a vibrácií*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2011, 124 s. ISBN 978-80-553-0698-8.
- [5] Summers, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.**

Konzultant bakalářské práce: Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 13.12.2013  
Datum odevzdání: 19.05.2014



Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

19. 5 2014



V Ostravě.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

19. 5 2014



V Ostravě:.....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Pavel Vacek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Charváty, Drahlov 267



## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VACEK, P. *Analýza faktorů hydroabrazivního soustružení niklových superslitin: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 50 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.

Bakalářská práce se zabývá soustružením abrazivním vodním paprskem. V úvodu je popsána metodika tvorby paprsku a druh paprsku. Dále je popsán princip fungování hydroabrazivního soustružení, nastavení paprsku vzhledem k obrobku, druhy abraziva, mechanismus úběru materiálu a faktory ovlivňující kvalitu procesu. Závislost faktorů na obráběný povrch vysvětluje erozivní model. Tento model, dokáže na základě znalosti meze kluzu, predikovat konečný průměr obrobku. Pro experimentální část byla osoustružena niklová slitina Incoloy 925 s průměrem 50 mm. Jednalo se o hydroabrazivní soustružení kontinuálním paprskem s tlakem 400 Mpa. Během procesu se měnila pouze hodnota posuvové rychlosti a zkoumala se drsnost povrchu. Bylo možné vidět, že při zvyšování posuvové rychlosti je větší nerovnoměrnost drsnosti obrobku.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

VACEK, P. *Analysis of Factors Hydroabrasive Turning of Nickel Superalloys: Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 50 p. Thesis head: doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.

The bachelor thesis deals with turning abrasive waterjet. The introduction describes the methodology of creating a kind of jet. Furthermore, the principle of operation is described hydroabrasive turning jet, setting jet relative to the workpiece, the types of abrasive material removal mechanism and the factors affecting the quality of the process. Dependence factors on machined surface erosion model explains. This model, based on the knowledge can yield point, to predict the final diameter of the workpiece. In the experimental part of the turning of Incoloy 925 nickel alloy with a diameter of 50 mm. This was a continuous abrasive waterjet with a pressure of 400 MPa. During the process, changing only the value of the traverse speed and examined with a surface roughness. It can be seen that by increasing the traverse speed is higher level unevenness of surface roughness of the workpiece.

## Seznam použitých značek a symbolů

AWJ – Abrasive water jet – abrazivní vodní paprsek

$C_d$  – koeficient rychlosti hrdla (-)

$C_v$  – rychlostní koeficient trysky (-)

$D$  – počáteční průměr obrobku (mm)

$D_k$  – průměr obrobku na začátku k-té otáčky (mm)

$D_{(k+1)}$  – průměr obrobku pro (k+1) otáčku (mm)

$E$  – Younguv modul (GPa)

$K$  – poměr horizontální a vertikální složky síly (-)

$M$  – celková hmotnost dopadajících částic (g)

$N$  – otáčky za minutu (ot./min)

$P$  – tlak vody (Mpa)

$Q$  – objem odstraněného materiálu jednou abrazivní částicí ( $m^3$ )

$Q_k$  – množství materiálu odstraněného během k-té otáčky ( $m^3$ )

$V_a$  – rychlost abrazivního vodního paprsku (m/s)

$V_w$  – rychlost vodního paprsku (m/s)

$V_{w(th)}$  – teoretická rychlost vodního paprsku (m/s)

$d_j$  – průměr paprsku (mm)

$d_o$  – průměr hrdla trysky (mm)

$d_{rk}$  – radiální hloubka průniku paprsku pro k-tou otáčku (mm)

$d_x$  – šířka proužku na obrobku (mm)

$l$  – hloubka kontaktu (mm)

$m$  – hmotnost abrazivní částice (g)

$m_p$  – průtok abraziva ( $m^3/s$ )

$m_w$  – průtok vody ( $m^3/s$ )

$n_p$  – počet řezných cyklů vykonaných paprskem na proužku nekonečně malé šířky (-)

$p$  – deformační napětí (MPa)

$t_d$  – čas za který paprsek projede vzdálenost  $d_j+dx$  (sec)

$u$  – rychlost posuvu (mm/min)

$v_t$  – hloubka řezu (mm)

$x$  – radiální pozice paprsku (mm)

$\varphi$  – koeficient přenosu hybnosti (-)

$\alpha$  – místní dopadový úhel paprsku ( $^\circ$ )

$\rho$  – hustota vody ( $kg/m^3$ )

$\psi$  – poměr hloubky kontaktu k hloubce řezu (-)



# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
0 Úvod .....	10
1 Analýza současného stavu .....	11
1.1 Rozdělení kapalinových paprsků .....	11
1.2 Charakteristika technologie AWJ .....	11
1.3 Vznik nástroje.....	12
1.4 Mechanismus úběru materiálu .....	13
1.5 Kontakt abrazivní částice s obrobkem .....	14
1.6 Princip soustružení abrazivním vodním paprskem .....	14
1.7 Abrazivní materiály .....	15
1.8 Nastavení polohy nástroje k obrobku .....	16
1.9 Faktory ovlivňující úběr materiálu .....	17
1.10 Erozní model pro abrazivní soustružení houževnatých materiálů vodním paprskem	19
2 Definování nedostatků a návrh řešení problému .....	35
3 Experimentální metodika a experimentální ověřování.....	36
3.1 Materiál a metoda soustružení.....	36
4 Výsledky a diskuze.....	39
5 Nový přístup k řešeným problémům. ....	44
6 Závěr.....	45
7 Seznam použité literatury .....	47
8 Seznam obrázků .....	51
9 Seznam tabulek.....	52

## 0 Úvod

V současné době rostou požadavky na obrábění těžko obrobitelných materiálů (např. titan, nikl, kompozitní materiály). Konvenční metody obrábění vždy nejsou ekonomicky a technicky výhodné pro obrábění těchto materiálů, tudíž se stále více do popředí dostávají tzv. „nekonvenční“ metody obrábění. Tyto metody nekonvenčního obrábění se používají právě tam, kde klasické metody obrábění mají nízkou účinnost, nebo dokonce účinnost nulovou. Používají se nejrůznější fyzikální způsoby jak obrábět materiál o vysoké pevnosti, jako je např. (elektro-chemické, chemické, optické, mechanické aj.). Hydroabrazivní dělení je jednou z těchto nekonvenčních metod, nebo také obrábění vysokorychlostním kapalinovým paprskem či vysokorychlostním paprskem s přísadou abrazivních látek (AWJ-Abrasive Water Jet). Vysoká rychlost proudu vody, ve které je abrazivo, umožňuje obrábět materiál efektivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Touto metodou je možné obrábět všechny průmyslové materiály od dřeva, papíru, stavebních hmot, plastů a hornin přes kovy a jejich slitiny až po tvrdokovy, kompozitní materiály, atd. Tato technologie je v současné době velice důležitá a moderní právě pro její univerzálnost a jelikož zde jde o vodu i šetrnost k životnímu prostředí a mnohé další vlastnosti, které pozitivně ovlivňují proces obrábění.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na obrábění těžko obrobitelných materiálu co nejefektivnějším a nejekonomičtějším způsobem. Cílem této bakalářské práce je obeznámení problematiky soustružení pomocí abrazivního vodního paprsku. Jde především o ofsetové soustružení.

Dále je pokus namodelovat abrazivní soustružení vodním paprskem (AWJ) a uvažuje odběr materiálu z obvodu rotujícího válcovitého vzorku. Metodologie zahrnuje Finnieho erozní teorii k odhadnutí množství materiálu odebraného dopadem abrazivních částic. Tento model uvažuje dopad vodního paprsku na povrch obráběné části pod úhlem k objasnění zakřivení obrobku. Oproti předchozím pracím, tento model zahrnuje souvislou změnu v lokálním úhlu dopadu, způsobenou změnou průměru obrobku. Deformační napětí obrobku je stanoveno s použitím experimentu zahrnujícího abrazivní materiál a obrobek. Adekvátnost navrženého modelu je ověřena s pomocí AWJ obráběcích testů s různými kombinacemi procesních parametrů. Finální průměry předpovězené modelem jsou v dobrém souladu s výsledky experimentu.

Experimentální část se zabývá tangenciálním soustružením použitím abrazivním vodním paprskem (AWJ) Incoloy slity 925. Jako experimentální materiál byla použita slitina Incoloy 925 s průměrem 50 mm. Experiment byl vyhotoven použitím kontinuálním abrazivním vodním paprskem s tlakem  $p = 400$  MPa. S postupnou změnou hodnoty posuvové rychlosti  $v_f = 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5; 9$  mm.min<sup>-1</sup> za stejných technologických podmínek. Abrazivní částice byli přidávány do vodního paprsku v množství 0,4 kg.min<sup>-1</sup> při otáčkách obrobku  $n = 60$  1/min.

## 1 Analýza současného stavu

### 1.1 Rozdělení kapalinových paprsků

Rozdělení kapalinových paprsků je zobrazeno na Obr. 1. Zvýrazněná pole v tomto obrázku ukazují technologii, jakou byly měřené vzorky osoustruženy.

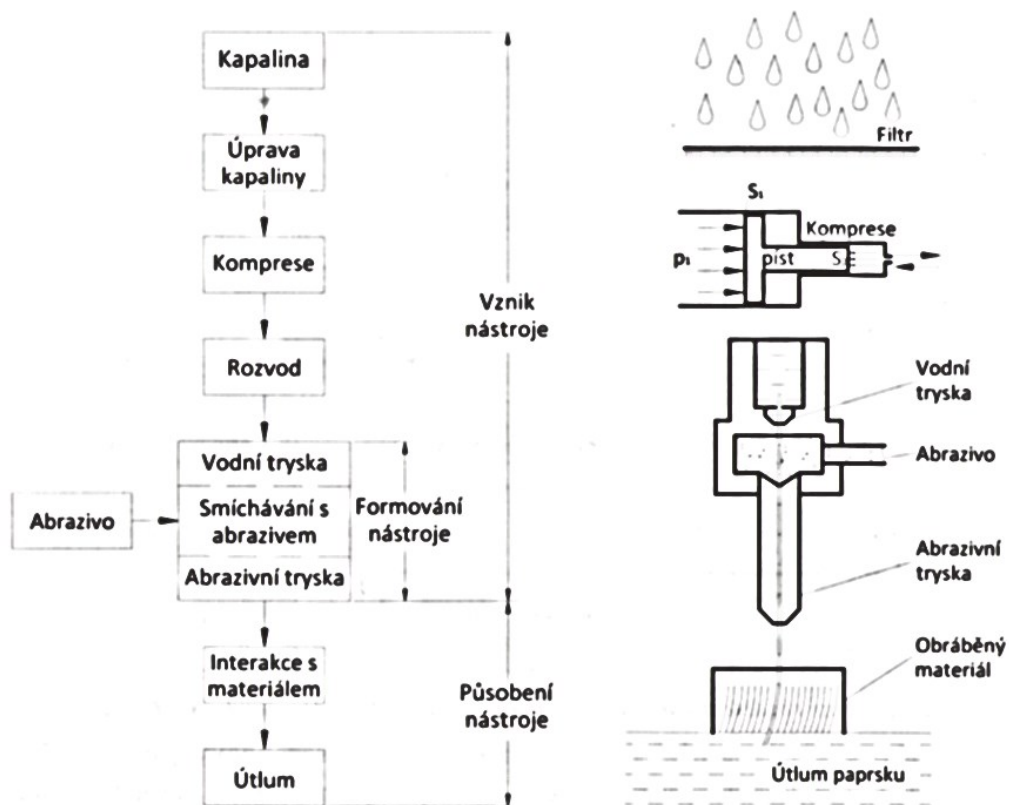


Obr. 1 Upravené rozdělení kapalinových paprsků dle [Hlaváč, L., 2000; Sitek, L., 2000]

V současné době nachází v praxi největší uplatnění čistý kapalinový paprsek (WJ) a abrazivní kapalinový paprsek (AWJ), nebo také hydroabrazivní proud. [Valíček, J., Hloch, S., 2008]

### 1.2 Charakteristika technologie AWJ

Hlavní oblasti procesu vzniku, působení nástroje na obráběný materiál a formování lze vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Schéma vzniku a působení AWJ na obráběný materiál [Hlaváček, P., 2007]

### 1.3 Vznik nástroje

Klíčový faktor je určení druhu pracovní kapaliny, faktor ovlivňující efektivnost technologie. Pracovní látka pro AWJ musí splňovat následující požadavky:

- nízkou viskozitu zabezpečující nízké ztráty výkonu toku pracovní kapaliny při průchodu hadicemi, potrubím apod.,
- dobrou přístupnost a ekonomickou výhodnost
- minimální ovlivnění korozi kovových části stroje
- možnost zabezpečovat nejlepší jakost obrábění při nejnižších energetických ztrátách pro formování vodního paprsku

Hodně z uvedených požadavků jsou v rozporu vůči sobě a při určitých aplikacích se mohou navzájem vylučovat. Ale z globálního hlediska uvedené požadavky nejvíce splňuje voda, která je nejlevnější, nejdostupnější a je šetrná k životnímu prostředí [Krajný, Z., 1998<sup>1</sup>].

<sup>1</sup> KRAJNÝ, Z. Vodný lúč v praxi WJM. In: VALÍČEK, Jan a HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením.*

Popis technologie a faktoru popisující odběr materiálu soustružením abrazivním vodním paprskem

Od roku 1900 je vodní paprsek používán pro obrábění materiálů. Prostřednictvím abrazivních částí, které jsou přidávány do vodního paprsku, se tato metoda může použít nejen na řezání plechů ale také pro řezání obrobků komplexních tvarů. Odběr materiálu probíhá bez tepelně ovlivněné oblasti a s vysokou přesností mikro-obrábění. Toto představuje vhodnou metodu pro řezání a obrábění materiálů, kde používání konvenčních metod může být problematické. [Hloch, S., Valíček, J., 2008<sup>2</sup>]

Význam obrábění s abrazivním vodním paprskem (AWJ) je pozoruhodný, zejména když je použit na kompozitní materiály, materiály o velké tloušťce a tvrdé materiály se speciálními vlastnostmi, které se používají zejména v leteckém průmyslu. [Zohourkari, I., Zohoor, M., 2010<sup>3</sup>]

Soustružení abrazivním vodním paprskem je alternativa ke konvenčnímu soustružení, používající nástroj s definovaným řezným ostřím. Nabízí celou řadu možností jak využít tuto technologii jako např. soustružení, frézování, řezání, tvorba děr do vysoce pevných materiálů (jako jsou kompozity, keramika, sklo a kámen). Při AWJ soustružení je problém s přesností, protože při vyšší hodnotě posuvové řezné rychlosti se většinou zvyšuje hodnota drsnosti, vlnitosti povrchu na průměru o dané délce a tím ohrožuje kruhovitost obrobku. [Manu, R., Babu, R. N., 2009<sup>4</sup>]

#### 1.4 Mechanismus úběru materiálu

Úběr materiálu je realizován vzájemným působením pevných abrazivních částic rozptýlených ve vysokorychlostním vodním paprsku při rotaci povrchu obrobku. Prostřednictvím kontaktu brusného zrna s povrchem obrobku vznikají deformace a následně dochází k tvrzení materiálu. Dopad částice dále způsobuje dělení a štěpení

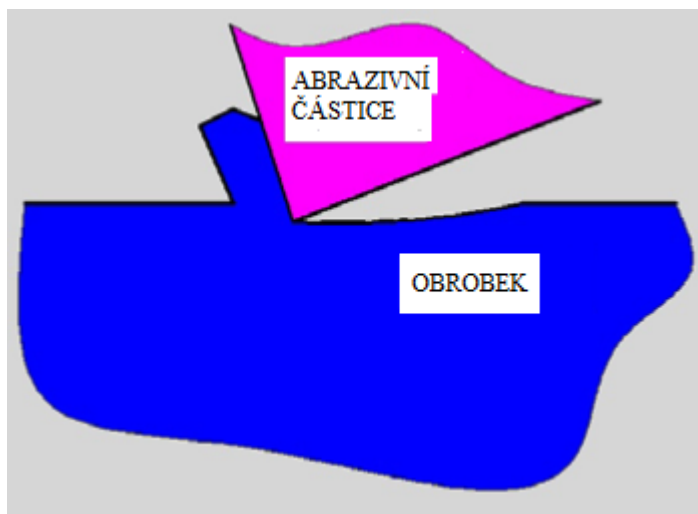
---

<sup>2</sup> HLOCH, S., VALÍČEK, J. Influence of Factors on Surface Topography Created by Abrasive Water Jet Cutting. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning.*

<sup>3</sup> ZOHOURKARI, I. a ZOHOOR, M. An Erosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning.*

<sup>4</sup> MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning.*

materiálu. To způsobuje rychlé šíření trhliny v křehkých materiálech. Omílání těchto částic vede k dalšímu odběru materiálu. [Āavodov, M., 2011<sup>5</sup>]



Obr. 3 Kontakt abrazivní častice s obrobkem [Cárach, J. et al., 2013]

### 1.5 Kontakt abrazivní častice s obrobkem

Jestli chceme dosáhnout rovnoměrného beru materiálu na cel dlce obráběného povrchu obrobku, musí být nastaveny sprvn technologick parametry podobn jako u konvenčního soustružení. [Manu, R., Babu, R. N., 2009<sup>6</sup>]

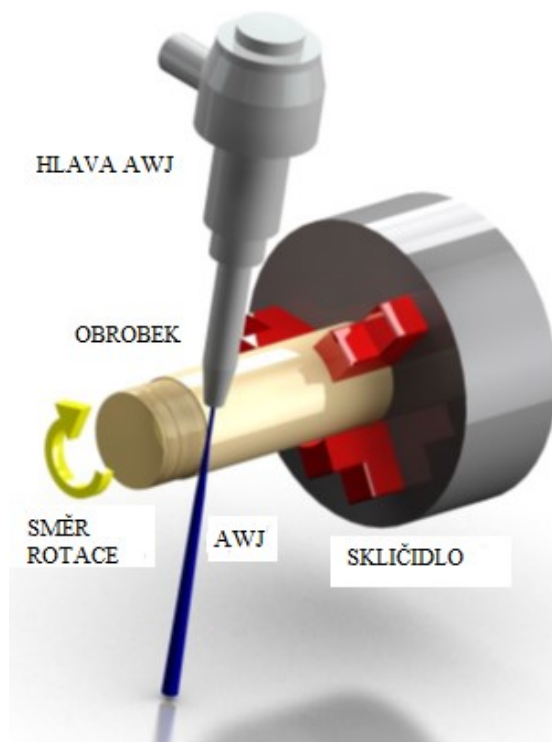
### 1.6 Princip soustružení abrazivním vodním paprskem

Při konvenčním soubnm soustružení hlavn rezn pohyb kon obrobek a nástroj s definovanm reznm ostřím kon pohyb posuvn. Na stejnm principu funguje i AWJ soustružení, v tomto případě nástroj reprezentován abrazivním vodním paprskem, dovoluťe velmi dobr ber materiálu. Tato metoda, kdy jsou dodrzeny nzk tolerance, tak dovolue obrbt polotovary o velk dlce a malm prmru. [Zohourkari, I., Zohoor, M., 2010<sup>7</sup>]

<sup>5</sup> ĀAVODOV, M. The quality of the cut surface after abrasive water jet cutting. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning*.

<sup>6</sup> MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning*.

<sup>7</sup> ZOHOURKARI, I. a ZOHOOR, M. "An Eerosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning" In: World Academy of Science, Engineering and Technology 38 2010. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning*.



Obr. 4 AWJ soustružení - 3D model [Cárach, J. et al., 2013]

Významnými výhodami této technologie jsou: relativně malá řezná síla (síla je pod 40 N) a studený odběr materiálu (bez tepelně ovlivněné oblasti), které dovolují obrábění speciálních materiálů (slitiny citlivé na teplo a kompozity), kde nelze použít konvenční metody. [Axinte, A. D., Stepanian, P. J., Kong, C. M., McGourlay, J., 2009<sup>8</sup>]

### 1.7 Abrazivní materiály

Pro zvýšení účinnosti úběru materiálu se využívá abraziva Indický, Bengálský a Australský granát, olivín nebo korund. Opatření usměrňovací trubice, způsobené průchodem abraziva vede k horší kvalitě řezání. Výhodou při používání přírodního granátu je schopnost ho rozdrtit na malé zrna s ostrými hranami. Navíc tento abrazivní materiál nezpůsobuje žádné chemické reakce v interakci s obrobkem. Velikost zrn je přibližně 0,18 až 0,35  $\mu\text{m}$ . Díky jeho trvanlivosti je granát vhodný pro recyklaci a může být používán opakovaně v několika cyklech. [Karková, M., Sobotová, L., 2013<sup>9</sup>]

<sup>8</sup> AXINTE, A.D., STEPANIAN, P.J., KONG, C.M. a MCGOURLAY, J. Abrasive waterjet turning – An efficient method to profile and dress grinding wheels. In: CÁCH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOČKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Abrasive Water Jet Turning*.

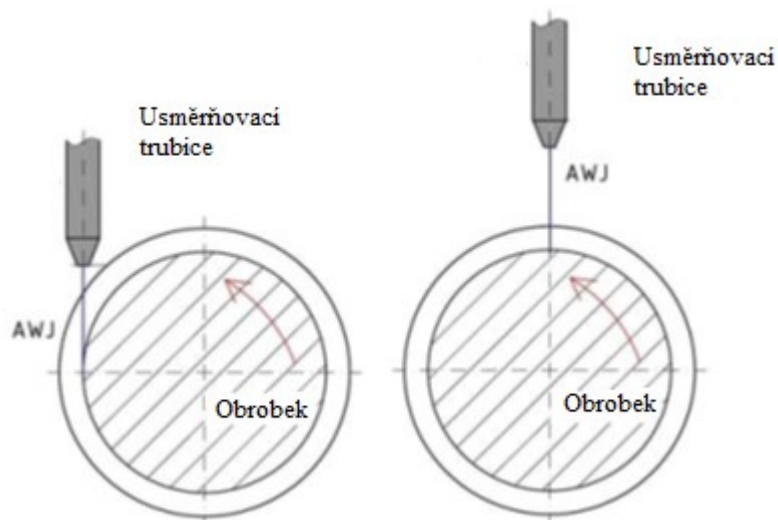
<sup>9</sup> KARKOVÁ, M. a SOBOTOVÁ, L. Abrasive materials used in AWJ cutting of material technology. In: CÁCH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOČKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Abrasive Water Jet Turning*.



Obr. 5 Přírodní granát [Cárah, J. et al., 2013]

### 1.8 Nastavení polohy nástroje k obrobku

Pro soustružení AWJ se používá stroj na řezání plechů s přídavným zařízením pro rotaci a upnutí obrobku. Správné nastavení technologických parametrů, ovlivňující finální kvalitu a přesnost obrobku je zde velmi důležité. Pro nastavení správné polohy obrobku a AWJ může být použit radiální a ofsetový mód. Obvykle je použito radiální nastavení s ofsetovým centrem. [Li, W., Zhu, H., 2013<sup>10</sup>]



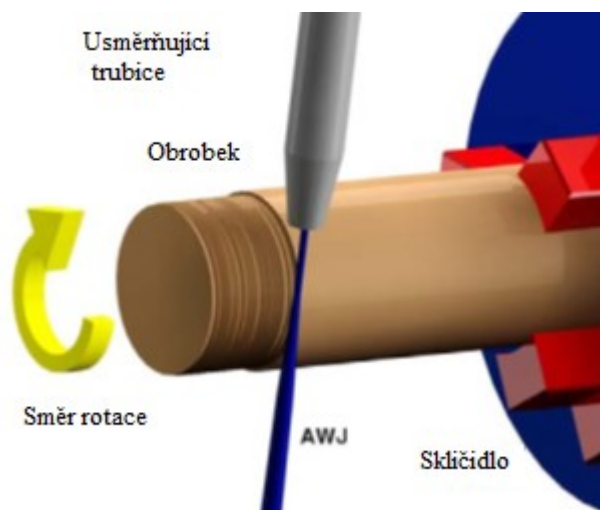
Obr. 6 Pozice AWJ směrem k obrobku [Cárah, J. et al., 2013]

<sup>10</sup> LI, W. a ZHU, H. et al. An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOČKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Abrasive Water Jet Turning*.

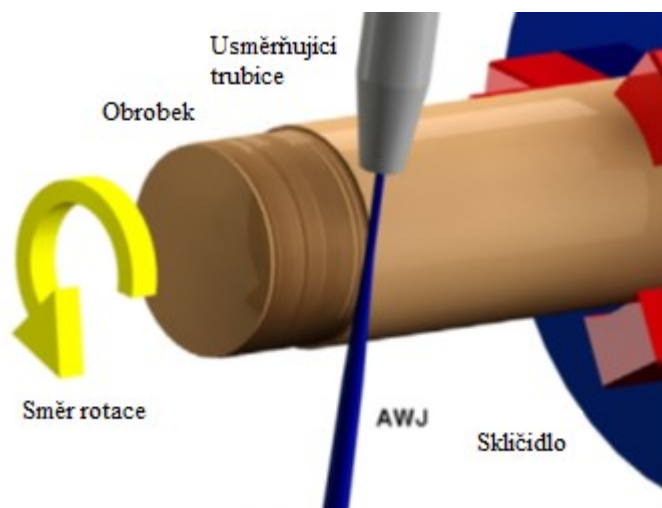


Vyrovnání nástroje a obrobku je realizováno podobně jako u konvenčního soustružení. Otáčející se obrobek je uchycen ve skličidle, které se otáčí rovnoběžně s osou rotace, přičemž se přibližuje k danému průměru obrobku směrem ke středu otáčení.

Při souběžném soustružení (Obr. 7) se obrobek otáčí ve stejném směru jako působí paprsek, zatímco při konvenčním protiběžném soustružení rotuje obrobek proti působení AWJ. (Obr. 8)



Obr. 7 AWJ Souběžné soustružení [Cárách, J. et al., 2013]



Obr. 8 AWJ Konvenční protiběžné soustružení [Cárách, J. et al., 2013]

### 1.9 Faktory ovlivňující úběr materiálu

Kvalitativní ukazatele obrobeného povrchu ovlivňuje mnoho technologických, hydraulických, míchacích a abrazivních činitelů.

Nejdůležitější činitelé:

Posuvová rychlost – vyšší hodnoty posuvové rychlosti znamenají menší množství abrazivních částic, přicházející do kontaktu s obráběným materiálem v daný čas.

Úhel sklony usměrňovací trubice – je to úhel mezi osou AWJ a osou povrchu obrobku. Podle nových studií nastavení úhlu sklonu má dopad na kvalitu obrobeného povrchu.

Výška – vzdálenost mezi povrchem obráběného materiálu a otvorem usměrňovací trubice

Počet přechodů – s vyšším počtem přechodů je dosažena větší hodnota hloubky řezu za stejných podmínek. Dále během procesu, zvětšení hloubky řezu klesá, díky odporu stěn, které zabraňují pronikání proudu a zabraňují erozivním účinkům

Tlak – s vyšší hodnotou tlaku je vyšší hodnota posuvové rychlosti, kterou ovlivňuje i hloubka řezu

Průměr vodní trysky- potom co opustí trysku se přidáná abrazivní materiál do vody a prochází přes zaměřující trubici. Pro dosažení potřebné výstupní rychlosti AWJ je potřeba určit správnou kombinaci průměrů vodní trysky a usměrňovací trubice.

Délka a průměr usměrňovací trubice – určuje schopnost soustředění vodního paprsku s abrazivními částicemi na určitý bod řezu. Díky usměrňování ubývá energie, kvůli kontaktu abrazivních částic procházejících skrz trubici.

Abrazivo – kvalita abraziva ovlivňuje rychlost úběru materiálu a možnost opakovaného použití a recyklace

Hmotnostní průtok abraziva – vyšší objem částic, obsažených ve vodě, může zaručit větší účinek na obráběný povrch. Když překročíme optimální objem abrazivních částic, kinetická energie bude klesat, kvůli srážkám a tím se snižuje i hloubka řezu.

Materiál obrobku – chemické vlastnosti a mechanické vlastnosti obrobku. [Hloch, S., Valíček, J., Hreha, P., Bednár, S. Petržel, V., Latová, A., 2011<sup>11</sup>]

---

<sup>11</sup> HLOCH, S., VALÍČEK, J., HREHA, P., BEDNÁR, S., PERŽEL, V. a LATOVÁ, A. Online-identification Hydroabrasive separation using acoustic emission and vibration. In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOČKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning*

Rychlost a směr rotace obrobku – faktory ovlivňující vlnitost a vyrovnanost odebraného materiálu.

Studie Zhong and Han, zkouší ovlivnitelnost technologických faktorů na kvalitu povrchu hydro abrazivním obráběním skla, při nižší hodnotě posuvové rychlosti abrazivního vodního paprsku a vyššími otáčkami obrobku. To vede ke snížení drsnosti a vlnitosti obrobeného povrchu. [Zohourkari, I., Zohoor, M., 2010<sup>12</sup>]

#### 1.10 Erozní model pro abrazivní soustružení houževnatých materiálů vodním paprskem

Abrazivní řezání vodním paprskem ( AWJ ) obrábění je univerzální proces schopný obrábět téměř jakýkoli materiál s přiměřenou úpravou obrobeného povrchu. Extrémně nízké řezné síly a zanedbatelné tepelné účinky jsou charakteristické rysy tohoto procesu. [Hoogstrate, A. M., Luttermvelt, C. A. van, 1997<sup>13</sup>] Nedávné úsilí zahrnuje použití abrazivních vodních paprsků pro soustružení válcových dílů pojezdem paprsku v radiálním a axiálním směru otáčení obrobku. Pokusy provedené s využitím soustružení AWJ zahrnují soustružení dlouhých dílců s malým průměrem a výrobu závitů u obtížně obrobitelných materiálů, jako je keramika, kompozity, sklo, nikl a jeho slitiny atd. [Kovacevic, R. et al., 1997<sup>14</sup>]

Práce Hashish a kol. týkající se využití vysokorychlostního abrazivního vodního paprsku pro soustružení různých materiálů, jsou pozoruhodné.

Z provedené vizualizační studie [Ansari, A. I., Hashish, M., Ohadi, M. M., 1992<sup>15</sup>] k pochopení makromechaniky AWJ obráběcího procesu, bylo uvedeno, že úběr materiálu se děje spíše na čele obrobku než na obvodě. Andari a Hashish provedli experimentální výzkum k prostudování vlivu různých parametrů AWJ na odstraňovaných objemech materiálu [Ansari, A. I., Hashish, M., 1995<sup>16</sup>]. Výsledky ukázaly, že množství materiálu

---

<sup>12</sup>HLOCH, S., VALÍČEK, J. Influence of Factors on Surface Topography Created by Abrasive Water Jet Cutting In: CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOČKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. *Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Anrasive Water Jet Turning.*

<sup>13</sup>HOOGSTRATE, A. M. a C. A. van LUTTERVELT. Opportunities in abrasive water-jet machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>14</sup>KOVACEVIC, R., HASHISH, M., MOHAN, R., RAMULU, M., KIM, T. J., GESKIN, E. S. State of the art of research and development in abrasive waterjet machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>15</sup>ANSARI, A. I., HASHISH, M., OHADI, M. M. Flow visualization study of the macrome- chanics of abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>16</sup>ANSARI, A. I., HASHISH, M. Effect of abrasive waterjet parameters on volume removal trends in turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

odebírané při AWJ soustružení a AWJ řezání je obdobné. Studie na přesnost soustružení s AWJ ukázaly, že přesnost soustružených dílů je ovlivněna odchylkou paprsku a odrazem paprsku. [Hashish, M., Stewart, J., 2000<sup>17</sup>; Hashish, M., 2001<sup>18</sup>] Nestabilita paprsku při vysokých rychlostech posuvu způsobuje hrubší povrch, rýhování, špatnou kruhovitost a nekonzistence dosaženého průměru.

V poslední době Zhong a Han [2002<sup>19</sup>] studovali vliv procesních parametrů na kvalitu skleněné části soustružené s AWJ. Tato studie ukázala, že nízké rychlosti posuvu proudu a vysoké rychlosti otáčení obrobku mají za následek nižší hodnoty drsnosti a vlnitosti na povrchu soustružené součásti.

Četné pokusy modelovat AWJ řezání houževnatých kovových materiálů a křehkých keramických materiálů lze nalézt v literatuře.

V poslední době byly provedeny též simulace AWJ řezání pomocí jednotky přístup události [Lebar, A., Junkar, M., 2003<sup>20</sup>; 2004<sup>21</sup>] a metody konečných prvků [Junkar, M., Jurisevic, B., Fajdiga, M., Grah, M., 2006<sup>22</sup>]. Nicméně, výsledky modelování procesu soustružení AWJ jsou velmi omezené. Zeng et al k předpovězení hloubky řezu při soustružení vyvinul polo-empirický přístup s použitím regresního modelu. [Zeng, J., Wu, S., Kim, T. J., 1994<sup>23</sup>] Na základě funkčního vztahu získaného z analytického modelu, byl vyvinut regresní model predikce parametrů. Exponenty byly získány regresní analýzou dat získaných z testů soustružení. Tento model používá parametry obrobitelnosti pro AWJ soustružení k vysvětlení odolnosti materiálů vůči erozi.

Byl zaveden pojem „index překrytí“, který reprezentuje vztah mezi rotační rychlostí obrobku, průměru paprsku a rychlosti posuvu. Menší hodnota indexu překrytí znamená větší překrývání a bylo zjištěno, že hodnota by měla být menší, nebo rovno 0,5, aby se zabránilo tvorbě závitů na povrchu obráběné plochy.

---

<sup>17</sup> HASHISH, M., STEWART, J. Observations on precision turning with AWJ. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>18</sup> HASHISH, M. Macro characteristics of AWJ turned surfaces. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>19</sup> ZHONG, Z. W., HAN, Z. Z. Turning of glass with abrasive waterjet. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>20</sup> LEBAR, A., JUNKAR, M. Simulation of abrasive waterjet machining based on unit event features. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>21</sup> LEBAR, A., JUNKAR, M. Simulation of abrasive water jet cutting process. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>22</sup> JUNKAR, M., JURISEVIC, B., FAJDIGA, M., GRAH, M. Finite element analysis of single- particle impact in abrasive water jet machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>23</sup> ZENG, J., WU, S., KIM, T. J. Development of a parameter prediction model for abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

V empirickém přístupu k modelu AWJ soustružení prezentovaném Henningem [1999<sup>24</sup>] se předpokládá, že úběr materiálu je kumulativní efekt množství odstraněného individuálními částicemi dopadnuvšími na obvodu obrobku. Byly vyvinuty vztahy pro stanovení řezné oblasti, řezného výkonu, ablační rychlosti a objemu odstraněného materiálu. Empirické přístupy [Zeng, J., Wu, S., Kim, T. J., 1994<sup>25</sup>; Henning, A., 1999<sup>26</sup>] používají matematické vztahy, které korelují příslušné proměnné parametry procesu a výsledky procesu. Empirické modely neposkytují jakékoliv náhledy „dovnitř“ mechaniky celého procesu. Také závisí na velkém počtu parametrů, nebo exponentů, které jsou určeny regresní analýzou. Ansari a Hashish [1992<sup>27</sup>] učinili pokus navrhnout analytický model, který dává do spojitosti množství odebraného materiálu a objem abraziva. Model bývá schopen predikovat finální průměr dílce soustruženého s danými procesními parametry. Tento model je v podstatě adaptace Hashishova modelu pro lineární AWJ řezání [Hashish, M., 1984<sup>28</sup>]. Uvažuje odběr materiálu z čela rotujícího dílce a je založen na předpokladu, že celková hloubka řezu se skládá ze dvou částí, řezné hloubky a deformační hloubky. Model používá Finnieho teorii eroze [1960<sup>29</sup>] k určení řezné hloubky pro velké úhly dopadu a Bitterovy teorie eroze [1963, part I<sup>30</sup>; 1963, part II<sup>31</sup>] pro výpočet deformační hloubky pro oblasti, kde abrazivní částice dopadnou kolmo. Celková hloubka řezu takto počítané slouží k predikci osoustruženého rádiusu. Tento model předpokládá, že úhel dopadu v řezné zóně (tupý úhel dopadu) je konstantní a je roven dopadovému úhlu na horní hraně obrobku. To vylučuje postupné snižování úhlu dopadu na nulu, což je právě důvod pro vznik kroků obdobných těm v AWJ řezání.

Jinými slovy, stávající analytický model AWJ neuvažuje kontinuální změnu úhlu dopadu, která je výsledkem redukce průměru obrobku. V deformační zóně (zóna vysokého úhlu dopadu) se předpokládá, že paprsek dopadne kolmo na schodek zformovaný řezným mechanismem. Je neobvyklé, že existují dvě odlišné zóny, které jsou charakterizovány dvěma diskrétními hodnotami úhlů dopadu.

---

<sup>24</sup> HENNING, A. Modelling of turning operation for abrasive waterjets. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>25</sup> ZENG, J., WU, S. a KIM, T. J. Development of a parameter prediction model for abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>26</sup> HENNING, A. Modelling of turning operation for abrasive waterjets. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>27</sup> ANSARI, A. I. a HASHISH, M. On the modeling of abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>28</sup> HASHISH, M. A modelling study of metal cutting with abrasive waterjets. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>29</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>30</sup> BITTER, J. G. A. A study of erosion phenomena—part I. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>31</sup> BITTER, J. G. A. A study of erosion phenomena—part II In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

Tento model založený na konceptu odebírání materiálu z čela obrobku nemohl vysvětlit případ drážkování v soustruhu. Odlišný přístup s ohledem na měnící se místní úhel dopadu byl použit pro predikci konečného průměru v případě drážkování [Hashish, M., Ansari, A. I., 1995<sup>32</sup>].

Dříve nebyly provedeny žádné systematické pokusy experimentálně ověřit předpokládané výsledky. Navíc existující teorie nedokážou vysvětlit některé pozorování, jako zvyšující se záporná chyba průměru [Hashish, M., Stewart, J., 2000<sup>33</sup>; Hashish, M., 2001<sup>34</sup>] při pokusu o velkou redukci průměrů pomocí AWJs. Proto je cílem této práce vyvinout a experimentálně ověřit komplexní procesní model pro AWJ soustružení.

V následujících odstavcích je popsána metodologie. Při AWJ soustružení se předpokládá, že paprsek s rychlostí  $V$  udeří do okraje obrobku který má počáteční průměr  $D$ , rotuje rychlostí  $N$  otáček za minutu. Vzdálenost mezi osou obrobku a bodem dopadu paprsku je vyjádřen jako radiální pozice paprsku  $x$ . Jak je uvedeno na obrázku Obr. 1, v místě dopadu vytvoří s tangentou k povrchu úhel  $\alpha$  [Henning, A., 1999<sup>35</sup>; Ansari, A. I., Hashish, M., 1992<sup>36</sup>, 1992<sup>37</sup>]. Místní dopadový úhel paprsku vzhledem k povrchu obrobku může být vypočítán jako

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{2x}{D} \quad (1)$$

---

<sup>32</sup> HASHISH, M. a ANSARI, A. I. Erosion modes during AWJ lathe slotting. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

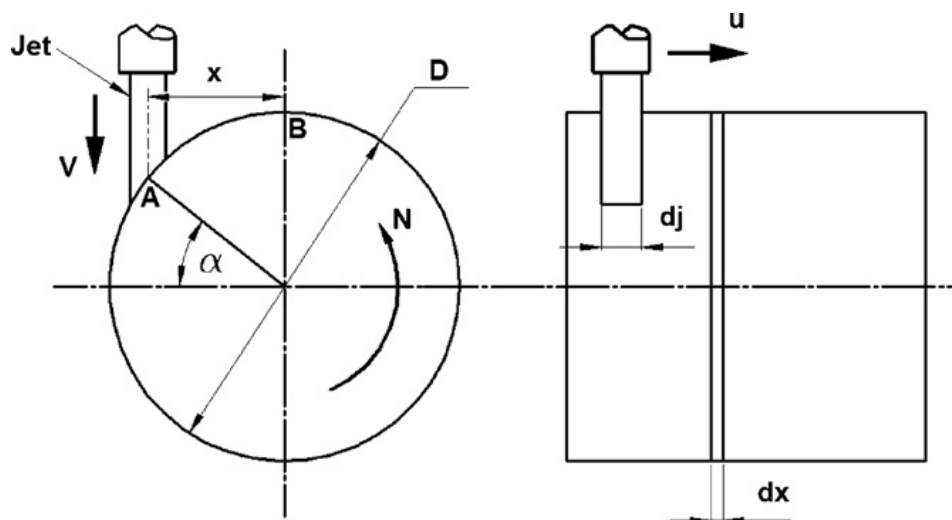
<sup>33</sup> HASHISH, M., STEWART, J. Observations on precision turning with AWJ. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>34</sup> HASHISH, M. Macro characteristics of AWJ turned surfaces. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>35</sup> HENNING, A. Modelling of turning operation for abrasive waterjets. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>36</sup> ANSARI, A. I. a HASHISH, M. On the modeling of abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>37</sup> HASHISH, M. a ANSARI, A. I. Erosion modes during AWJ lathe slotting. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*



Obr. 9 Schématické znázornění AWJ soustružení ukazující dopad paprsků na rotujícím válcovém vzorku [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Toto je ekvivalent k účinku paprsku, který je skloněn v příslušném úhlu dopadu na rovnou plochu a pohybující se relativní rychlostí, která se rovná tangenciální povrchové rychlosti rotujícího obrobku [Manu, R., Babu, N. R., 2005a<sup>38</sup>]. Dále, proud se pohybuje podél axiálního směru rotační části tak, aby se část obráběla po celé délce. Pro dosažení přijatelných výsledků soustružení, osová vzdálenost posuvu trysky během jedné otáčky obrobku by měla být zlomkem průměru paprsku [Zeng, J., Wu, S., Kim, T. J., 1994<sup>39</sup>].

Toto má za následek, že povrch obrobku je podroben určitému počtu řezacích průchodů během doby kdy se paprsek přesune o jednotku axiální vzdálenosti [Manu, R., Babu, N. R., 2005b<sup>40</sup>]. Cíl navrhovaného procesního modelu je predikovat konečný průměr dosažený při AWJ soustružení při použití daného souboru procesních parametrů. Metodologie zahrnuje odhad objemu materiálu odebraného dopadajícími abrazivními částicemi využitím vhodného erozního modelu.

Rozsah této práce je limitován na AWJ soustružení houževnatých materiálů a velké úhly dopadu. Uvažovaný materiál je aluminium 6063-T6. Efektivita navrženého modelu je prověřena souborem experimentů AWJ soustružení.

<sup>38</sup> MANU, R., Babu, N. R. Estimation of process parameters in abrasive water jet turning of parts. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>39</sup> ZENG, J., WU, S., KIM, T. J. Development of a parameter prediction model for abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>40</sup> MANU, R., Babu, N. R. Influence of focusing nozzle diameter on the quality of part produced by abrasive waterjet turning. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

Následující odstavce se týkají navrženého modelu AWJ soustružení, konkrétně rychlosti vysokorychlostního vodního paprsku. Vysokorychlostní vodní paprsek je vytvořen, když určité množství natlakované vody uniká tryskou. Aplikace Bernoulliho principu udává teoretickou rychlost vodního paprsku jako

$$V_{W(th)} = \left(\frac{2P}{\rho}\right)^{0,5} \quad (2)$$

Kde ‚P‘ je tlak vody, hustota vody ‚ρ‘ je uvažována 1000 kg/m<sup>3</sup>. Dále koeficient efektivit (rychlostní koeficient trysky) ‚C<sub>v</sub>‘ je zde zaveden pro zohlednění ztráty hybnosti v důsledku tření o stěny, nepravidelnosti v toku vody, a stlačitelnosti vody. Pak rychlost proudu vodního paprsku je

$$V_{W(th)} = C_v \left(\frac{2P}{\rho}\right)^{0,5} \quad (3)$$

AWJ je vytvořen jako výsledek přenosu hybnosti mezi vysokorychlostním vodním paprskem a abrazivními částicemi, které jsou vneseny do proudu. Pokud uvažujeme rovnováhu hybnosti mezi abrazivem a vodním paprskem ve vstupu do trysky, pak rychlost abrazivního vodního paprsku je dána

$$V_a = \phi \frac{V_w}{\left[1 + \left(\frac{m_p}{m_w}\right)\right]} \quad (4)$$

Kde ‚m<sub>p</sub>‘ and ‚m<sub>w</sub>‘ jsou průtok abraziva a vody, a ‚φ‘ je koeficient přenosu hybnosti, který charakterizuje ztráty během mixování a akceleračního procesu. Průtok vody ‚m<sub>w</sub>‘ je stanoven pomocí výrazu, který dává do vztahu průměr hrdla trysky ‚d<sub>0</sub>‘, rychlost vodního paprsku ‚V<sub>w</sub>‘, hustota vody ‚ρ‘ koeficientu rychlosti hrdla ‚C<sub>d</sub>‘

$$m_w = C_d \frac{\pi}{4} d_0^2 V_w \rho \quad (5)$$

dle experimentálních výsledků uvedených v literatuře jsou typické hodnoty ‚C<sub>v</sub>‘, ‚C<sub>d</sub>‘ a ‚φ‘ 0.98, 0.70 a 0.80, [Momber, A. W., Kovacevic, R., 1998<sup>41</sup> ; Hashish, M. 1993<sup>42</sup>].

<sup>41</sup> MOMBER, A. W. a KOVACEVIC, R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>42</sup> HASHISH, M. Prediction models for AWJ machining operations. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.



Pro predikci průměru musíme znát lokální dopadový úhel paprsku.

Lokální dopadový úhel paprsku pro k-tou otočku je dán

$$\alpha_k = \cos^{-1} \left( \frac{2x}{D_k} \right) \quad (6)$$

Jestliže je paprsek uvažován jako stacionární v jakémkoli radiálním bodě, pak množství odebraného materiálu během každé otáčky může být stanoveno z pravoúhlého proužku délky rovné obvodu obrobku, šířky rovné průměru paprsku a hloubky rovné radiální hloubce průniku během dané otáčky. Pak radiální hloubka průniku paprsku pro k-tou otáčku je dán

$$dr_k = \frac{Q_k}{\pi d_j D_k} \quad (7)$$

kde 'Q<sub>k</sub>' je množství materiálu odstraněného během k-té otáčky, 'D<sub>k</sub>' je průměr obrobku na začátku k-té otáčky a d<sub>j</sub>' je průměr paprsku. Průměr obrobku pro '(k + 1)'tou otáčku můžeme získat jako

$$D_{k+1} = D_k - 2dr_k \quad (8)$$

Mechanismus odběru materiálu v AWJ obráběcích procesech je chápáno jako eroze způsobená volně pohybujícími se abrazivními částicemi [Hoogstrate, A. M., Luttervelt C. A. van, 1997<sup>43</sup>; Kovacevic et al., 1997<sup>44</sup>]. Během posledních několika desetiletí byly navrženy různé teorie eroze. Finnieho teorie eroze [1960<sup>45</sup>] je jedna z pionýrských prací v této oblasti a stála u základů mnoha pozdějších výzkumných prací. Tato práce využívá Finnieho teorii eroze k určení množství odebraného materiálu dopadajícími částicemi. Hlavními omezením této teorie je její neschopnost objasnit erozní chování při použití velkých dopadových úhlů. AWJ soustružení využívá především počáteční nízké dopadové úhly, které se postupně snižují k nule, tak jak je postupně dosahováno požadovaného průměru obrobku. Mimo to, řízení hloubky průniku a tedy i finálního dosaženého průměru je obtížné, pokud je používáno kolmých dopadových úhlů. Nedávná experimentální studie

---

<sup>43</sup> HOOGSTRATE, A. M. a C. A. van LUTTERVELT. Opportunities in abrasive water-jet machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>44</sup> KOVACEVIC, R., HASHISH, M., MOHAN, R., RAMULU, M., KIM, T. J., GESKIN, E. S. State of the art of research and development in abrasive waterjet machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

<sup>45</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials*.

[Manu, R., Babu, N. R., 2008<sup>46</sup>] srovnávající přístupy využívající malé a kolmé (normálové) dopadové úhly poukázala na nízkou kvalitu obrobeného povrchu, který byl dosažen na vzorcích s normálovými dopadovými úhly. Hrubý povrch dosažený u vzorků z hliníkových slitin při AWJ soustružení s použitím normálových dopadových úhlů je u houževnatých materiálů pravděpodobně způsoben jejich sklonem k tečení (deformaci) při srovnání s úbytkem materiálu mikrořezem, který je převládajícím při malých dopadových úhlech.

Pak tedy pole působnosti tohoto modelování je omezeno na soustružení s využitím malých dopadových úhlů houževnatých materiálů, což odůvodňuje použití Finnieho teorie jako použitého erozního modelu.

Pro další výpočet je potřeba zjistit objem materiálu odebraného abrazivním vodním paprskem. Finnie [1960<sup>47</sup>] navrhnul model pro stanovení odběru materiálu dopadem částic za různých dopadových úhlů. Je založen na rovnicích pohybu jedné pevné abrazivní částice pohybující se rychlostí ' $V_a$ ' dopadnuvší na povrch pod úhlem ' $\alpha$ '. Předpokládá se, že částice je hranatá, s plochým čelem se stejnoměrnou tloušťkou. Pak tedy elastická deformace materiálu je zanedbatelná a předpokládá se, že abrazivní částice odstraní materiál kujně pomocí plastické deformace. Výsledný výraz pro objem odstraněného materiálu ' $Q$ ' jedinou abrazivní částicí o hmotnosti ' $m$ ' a rychlosti ' $V_a$ ' je dána [Finnie, I., 1960<sup>48</sup>]:

$$Q = \frac{mV_a^2}{pK\psi} \left( \sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \quad \text{když } \tan \alpha \leq \frac{K}{6} \quad (9)$$

$$Q = \frac{mV_a^2}{pK\psi} \left( \frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \text{když } \tan \alpha \geq \frac{K}{6} \quad (10)$$

Kde ' $p$ ' je deformační napětí, ' $K$ ' je poměr vertikální a horizontální složky síly a ' $\psi$ ' je poměr hloubky kontaktu ' $l$ ' k hloubce řezu ' $y_i$ '. Hodnoty ' $K$ ' byly uvažovány rovna 2 [Finnie, I., 1960<sup>49</sup>]. Pokud je uvažováno, že dopadá více částic, pak interakce mezi částicemi způsobí odchylku od předpokládaného množství materiálu odebraného v ideálním případě. Aby bylo toto zohledněno, byl zaveden koeficient ' $c$ ' jehož hodnota

<sup>46</sup> MANU, R. a BABU, N. R. Influence of jet impact angle on part geometry in abrasive waterjet turning of aluminium alloys. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>47</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>48</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

<sup>49</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. *An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.*

byla Finniem stanovena na 0,5. Pro celkovou hmotnost dopadajících abrazivních částic rovnou  $M$ , může být rovnice erozí odstraněného materiálu přepsána na

$$Q = \frac{cMV_a^2}{4p} (\sin 2\alpha - 3 \sin^2 \alpha) \text{ pro } \alpha \leq 18,5 \quad (11)$$

$$Q = \frac{cMV_a^2}{12p} \cos^2 \alpha \text{ pro } \alpha \geq 18,5 \quad (12)$$

Jedinou neznámou v rovnicích 11 a 12 je smykové napětí materiálu,  $p$ . Hashish [1989<sup>50</sup>] našel dobrou korelaci mezi předpokládanými a experimentálně zjištěnými hloubkami průniku, kdy mez kluzu byla předpokládána  $E/14$ , kde  $E$  je Youngův modul v GPa. Vzhledem k tomu, že eroze zahrnuje velmi vysoké hodnoty napětí a celkové deformace, pak hodnoty napětí získané konvenčními testy tahem a tlakem v tomto případě (eroze) nemohou být použity. Finnie [1960<sup>51</sup>] navrhnul, že hodnoty meze kluzu mohou být stanoveny pomocí erozního experimentu zahrnujícím stejný materiál pro abrazivum i pro opracovávaný materiál.

V této práci byl proveden experiment AWJ soustružení za účelem stanovení meze kluzu které mohou být použity v navrhovaném procesním modelu. Cíl experimentu je stanovení množství odebraného materiálu za podmínky, že je předem stanoven úhel dopadu, rychlost abrazivních částic a celková hmotnost abrazivních částic. Z naměřených hodnot množství odebraného materiálu, může být spočítána mez kluzu s pomocí vzorců 11 a 12 v závislosti na úhlu dopadu.

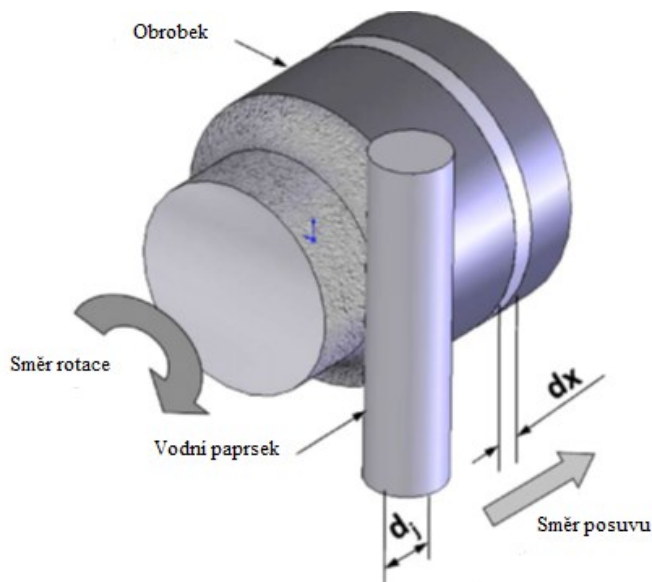
Díky interakci mezi vysokorychlostním AWJ a rotujícím obrobkem, se začne z povrchu dílce odebírat materiál, což se projeví vytvořením mělké drážky, jejíž hloubka je závislá na kombinaci procesních parametrů. Dále, paprsek je posouván podél axiálního směru dílce tak, aby řez byl proveden podél celé délky obrobku. Pro dosažení vhodných výsledků soustružení, axiální vzdálenost, o kterou se paprsek posune během jedné otáčky obrobku, musí být zlomkem průměru paprsku. Výsledkem je pak, že povrch obrobku je podroben konečnému počtu řezných cyklů, během doby kdy se paprsek pohybuje v axiálním směru. Jinými slovy, délka doby kdy je každá část obrobku vystavena vodnímu paprsku, je stanovena poměrem rychlosti posuvu za otočku.

Zvažte proud o průměru  $d_j$  procházející přes a proužek velmi malé šířky  $dx$  viz Obr. 10. Obrobek vykoná  $N$  otáček za minutu a paprsek se pohybuje podél osy obrobku

<sup>50</sup> HASHISH, M. A model for AWJ machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.

<sup>51</sup> FINNIE, I. Erosion of surfaces by solid particles. In: MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.

s rychlostí ' $u$ ' mm/min (rychlost posuvu). Paprsek musí urazit axiální vzdálenost ' $dx + dj$ ' aby pokryl proužek o šířce ' $dx$ '. Pak čas ' $t_d$ ' za který projde vzdálenost ' $d_j + dx$ ' je dán ' $(d_j + dx)/u$ '.



Obr. 10 Izometrický pohled AWJ soustružení, ukazující axiální pohyb přes rotující válcový vzorek [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Počet otáček vykonaných obrábekem během tohoto času je dán

$$n_p = N \left( \frac{d_j + dx}{u} \right) \quad (13)$$

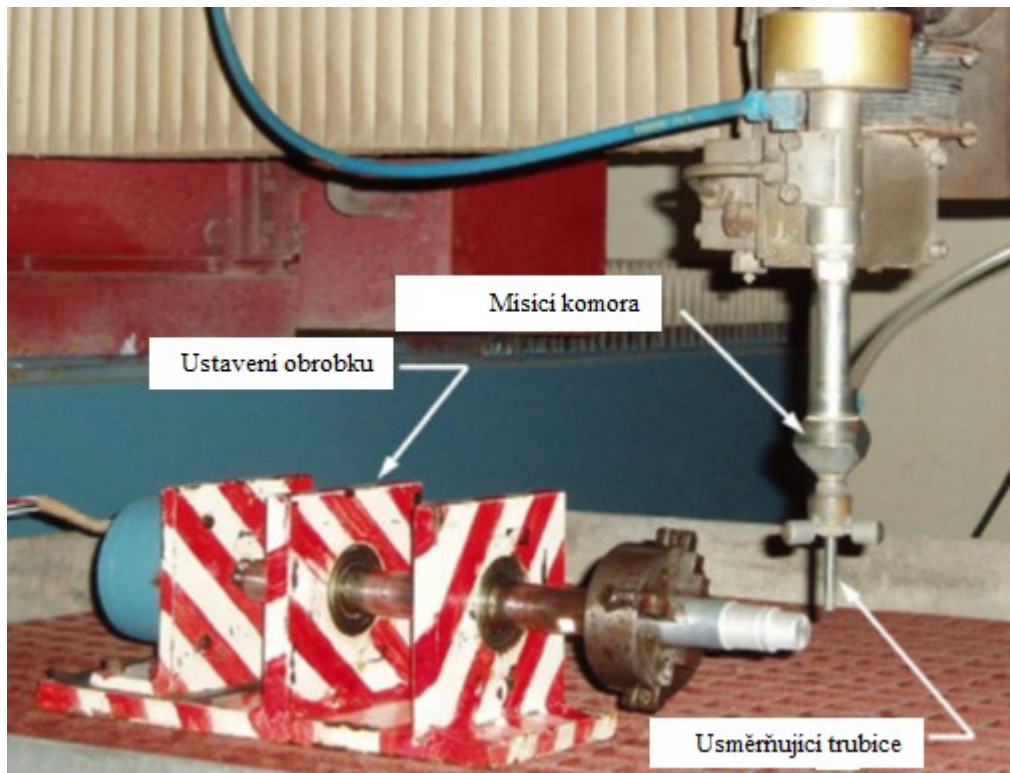
Jelikož vzdálenost ' $dx$ ' je velmi malá vzhledem k průměru paprsku ' $d_j$ ', ' $dx$ ' je ve vzorci (13) zanedbáno. Pak je počet řezných cyklů vykonaných paprskem na proužku nekonečně malé šířky

$$n_p = N \frac{d_j}{u} \quad (14)$$

Pak je tedy celý povrch obrábku vystaven paprsku  $n_p$  krát.

Během každé otočky se průměr změní a tedy se i změní lokální dopadový úhel. Aplikováním rovnic (2) až (12) může být stanoveno množství odebraného materiálu, radiální hloubka, a průměr obrábku po každé otáčce. Opakováním výše uvedeného postupu ' $n_p$ ' krát, jak je uvedeno v rovnici (14), může být stanoven průměr finálního průměru dosaženého za daného souboru procesních parametrů.

Byly provedeny dvě sady experimentů. První sada experimentů byla provedena proto, aby byly stanoveny hodnoty meze kluzu obrobku, které jsou použity v navrženém modelu pro AWJ soustružení. Druhá sada experimentů byly obráběcí testy zamýšlené pro ověření navrženého modelu pro AWJ soustružení. Experimenty byly provedeny na vzorcích z materiálu hliník 6063-T6 a na stroji s AWJ injekčního typu schopného generovat tlak v rozmezí 60–360 MPa a s průtokem 2.2 l za minutu. Byly použity: hrdlo o průměru 0,25mm a v řezné hlavě trysky o průměru 0,76mm, 1,2mm a 1,6mm. Jako abrazivum byl užit granát s hrubostí zrna 80. Všechny experimenty byly provedeny za vodního tlaku 250MPa, průtokem abraziva 5 g/s a s odstupem 2mm. Experimenty byly provedeny na cylindrických vzorcích o průměru 25,4mm s použitím speciálně vyrobeného držáku pro AWJ soustružení.



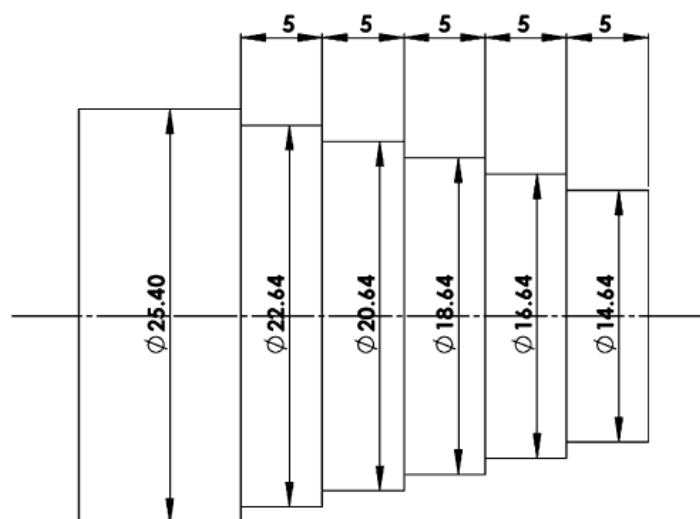
Obr. 11 Fotografie nastavení pro AWJ soustružení válcových vzorků [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Držák sestává ze čtyř čelistí, které drží obrobek. Sklíčidlo je upevněno ke hřídeli ovládanou krokovým motorem. Hřídel je uložena ve dvou kuličkových ložiscích. Krokový motor a hřídel motoru jsou upevněny na ocelovém rámu. Celá sestava je uzavřena do transparentního krytu, který zabraňuje vnik vody během experimentů. Byl zvolen vhodný řídicí systém umožňující změnu otáček krokového motoru mezi 8 a 250 otáčkami

za minutu. Na obrázku 3 je zobrazena sestava držáku na stroji pro provádění AWJ experimentů. Před provedením experimentů byla zajištěna souosost vzorku s osou krokového motoru pomocí čtyř-čelistového sklíčidla a ověřena úchylkoměrem. Dále pro zajištění rovnoběžnosti pohybu AWJ a obrobku byla provedena zkouška za nízkého tlaku: kontakt vodního paprsku s krajem rotujícího vzorku během posuvu v celém rozsahu axiálního směru vzorku. Smyslem byla minimalizace chyb, které by mohly vzniknout díky nerovnoběžnosti paprsku a rotujícího vzorku.

Za účelem stanovení meze kluzu, bylo zjištěno množství odstraněného materiálu za předem známých a stanovených parametrů: dopadového úhlu, rychlosti abraziva, a celkové hmotnosti abrazivních částic.

Dopadový úhel je dán radiálním uspořádáním paprsku a povrchem obrobku cylindrického tvaru. Pro provedení testů s nízkým úhlem dopadu, byl paprsek nastaven do vzdálenosti 1,7mm od povrchu vzorku. Toto uspořádání koresponduje s dopadovým úhlem  $30^\circ$  pro vzorek mající počáteční průměr 25.4mm. Rychlost abraziva závisí na použitém tlaku vody a je stanoven s použitím rovnice 4. Celková hmotnost abrazivních částic je výsledkem průtoku abraziva a doby expozice. Doba expozice je čas, kterou potřebuje paprsek, aby pokryl délku vzorku, a může být vypočítán jako poměr délky vzorku k rychlosti axiálního posuvu paprsku. Experimenty byly provedeny za rychlostí 13 ot./min. 25 ot./min. a 50 ot./min. tak aby byla dosažena rotační rychlost přibližně 1000, 2000, 3000 a 4000 mm/min. Experimenty byly opakovány s použitím tří různých průměrů trysky 0,76mm, 1,2mm a 1,6mm. Rychlost posuvu trysky podél vzorku byla vybrána na základě rotační rychlosti vzorku tak, aby paprsek urazil během jedné otáčky vzorku vzdálenost větší než je průměr paprsku. Toto má za následek vytvoření závitů na povrchu vzorku. Toto je nezbytné k udržení konstantního dopadového úhlu tak, že paprsek nedopadne na již obrobené místo.



Obr. 12 Odstupňované průměry pro validační test [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Axiální rychlosti posuvu byly 39 mm/min, 75 mm/min, 111 mm/min and 150 mm/min, a k nim příslušné rotační rychlosti 13 ot./min., 25 ot./min., 37 ot./min. a 50 ot./min.. Po vytvoření závitu je vzorek zarovnán na požadovanou délku. Přesné odebrané množství materiálu je spočítáno z rozměrů obrobeneho vzorku. Vzorek je poté zvážen a finální množství je stanoveno s použitím relačního vztahu hmotnost, objem a hustota. Množství odebraného materiálu je tedy vypočteno pro stanovení meze kluzu materiálu dle rovnice (12).

Pro validaci finálního průměru predikovaného s použitím navrženého modelu, byly provedeny testy na cylindrických vzorcích s průměrem 25,4 mm s použitím speciálně navrženého držáku pro AWJ soustružení. Dílec mající krokovité uspořádání viz. Obr. 12, byl obroben za účelem validace. Pozice paprsku vzhledem k ose obrobku, určuje dopadový úhel a radiální hloubku řezu. Za účelem lokalizace paprsku v konkrétní radiální pozici byl paprsek nejprve nastaven tak, aby se dotknul okraje vzorku a pak posunut na požadovanou vzdálenost k ose obrobku. Nejprve byl paprsek manuálně nastaven do pozice odpovídající maximální řezné hloubce. Aby byla dosažena požadovaná kroková geometrie, byl paprsek přesunut podél požadované trasy pomocí CNC programu. Každý vzorek byl osoustružen za jedné konkrétní rychlosti posuvu. Jak vidno z krokového tvaru, na jednom vzorku je možno pozorovat pět různých hloubek řezu.

Tabulka 1 Detaily k procesu [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Parametr	Hodnota
Tlak (MPa)	250
Průměr zaměřující trysky (mm)	0,76
Hmotnostní průtok abraziva (g/s)	5,0
Otáčky obrobku (1/min)	200
Radiální pozice trysky (x), (mm)	11,7;10,7;9,7;8,7;7,7
Axiální posuv (mm/min)	1,15;2;2,5;3;4;5;10;20;30;40;50

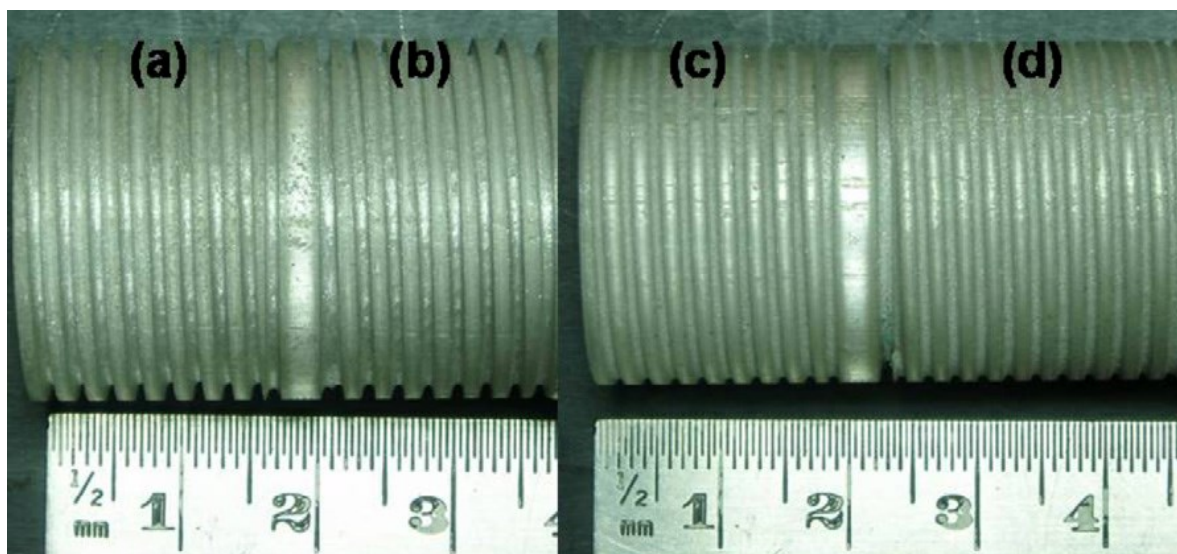
Parametry; radiální pozice paprsku a axiální rychlosti posuvu použité pro „krokové“ obráběcí testy. Po skončení každého experimentu, byl vzorek vyjmut z držáku a změřen průměr každého stupně s použitím posuvného měřítka s přesností 0,02 mm

Výsledky a diskuze pro tento experiment je popsán v následujícím odstavci. Obrázek 13. znázorňuje vzorek s vyrobenou závitovou drážkou, která byla použita pro měření množství odebraného dopadnuvšími abrazivními částicemi. Tabulka 2 ukazuje mez kluzu vypočtenou s použitím vzorce (12) předpokládajícího vícečásticový interakční faktor 0,5. Hodnoty meze kluzu (smykového napětí) získaného ze všech experimentů zahrnující tři různé průměry trysek mají střední hodnotu 874 MPa a standardní odchylku 215 MPa. Nicméně vzhledem k tomu, že soustružicí testy využívaly průměr trysky 0,76 mm, příslušná průměrná hodnota meze kluzu 1000 MPa byla vybrána pro využití v predikčním modelu. Rozdíl v hodnotách meze kluzu v této práci byly již dříve reportovány [Hashish, M., 1989<sup>52</sup>] a mohou být zapříčiněny rozdíly mezi erozními mechanismy nebo módy v řezání a soustružení. Při AWJ řezání se charakter odběru materiálu přesune od úvodní řezové zóny, do odběru materiálu v deformačním módu, který u kujných materiálů není příliš efektivní. Při AWJ soustružení za nízkých dopadových úhlů, se odběr materiálu děje výhradně díky mikro-řezu. Dále, odhadnutá rychlost abrazivních částic může být rozdílná od skutečných hodnot a díky rozptylu paprsku, odchylkám skutečného dopadového úhlu

<sup>52</sup> HASHISH, M. A model for AWJ machining. In: MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials.



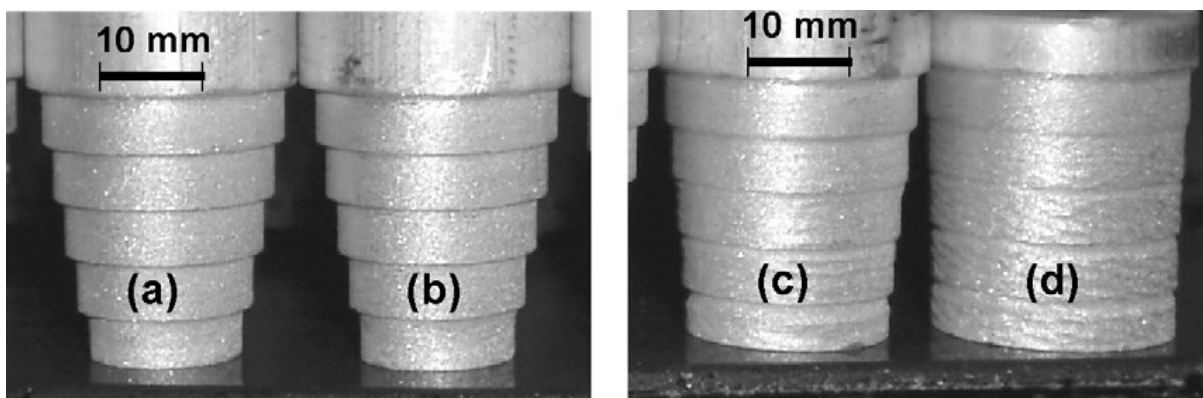
jednotlivých částic, které se mohou odlišovat od geometrického - ideálního uvažovaného dopadového úhlu. Vzhledem k tomu, že meze kluzu byly v této práci vypočítány díky experimentu, který používal stejné abrazivní a pracovní materiály jako v obráběcích testech, proto může být tento vliv považován za empirickou konstantu, která zahrnuje materiální vlastnosti a další efekty, které nejsou vzaty do úvahy v analytickém modelu. Navržený model byl užit pro predikci finálních průměru soustružených dílců dosažených za použití procesních parametrů uvedených v tabulce 1. Je zanedbána rozbíhavost paprsku a tedy i kompenzace jeho průměru. Fotografie vybraného vzorku z validačních testů jsou uvedeny na Obr. 14. Srovnání výsledných průměrů predikovaných navrženým modelem a těch dosažených experimentálně je zobrazen v Obr. 14. Predikované výsledky korelují velmi dobře s experimentálními výsledky, jak indikuje i korelační koeficient 0,97. Chyba v predikci se pohybuje od 1,3mm do -1,7mm, se střední hodnotou -0,2mm a standardní odchylkou 0,62mm. Za účelem dosažení přesných výsledků obráběných průměrů, je třeba uvažovat rozptyl paprsku a použít kompenzaci průměru paprsku.



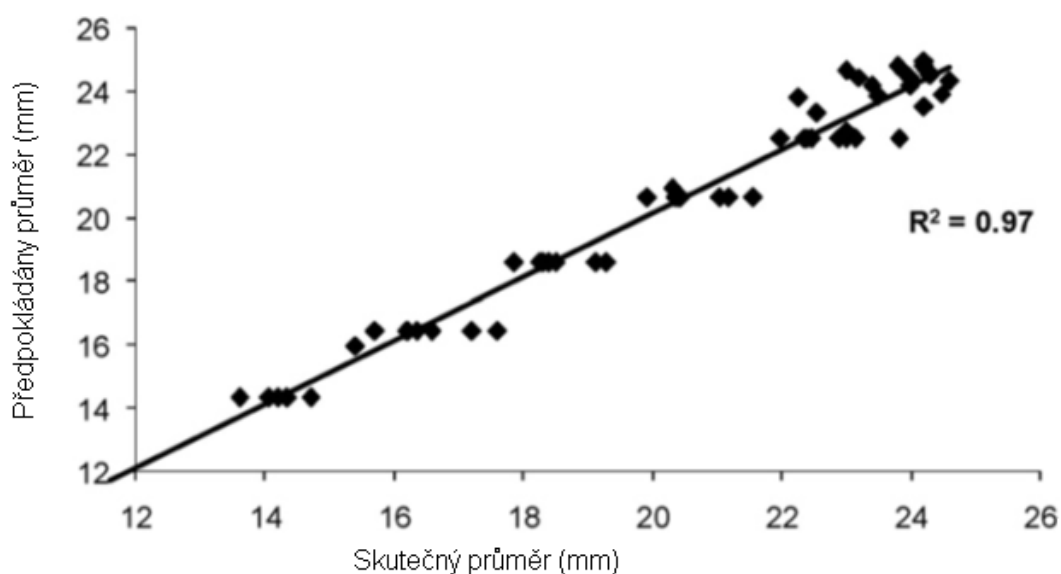
Obr. 13 Vzorek z testu meze kluzu, pro průměr trysky 0,76 mm a obvodovou rychlost (mm/min):(a) 1000; (b) 2000; (c) 3000; (d) 4000 [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Tabulka 2 Experimentální určování hodnoty meze kluzu [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

Průměr usměřňovací trubice (mm)	Obvodová rychlost obrobku (mm/min)	Odebraný objem (mm <sup>3</sup> )	Čas obrábění (s)	Mez kluzu (MPa)
1,6	1000	587,91	21,38	1136,68
	2000	474,04	11,30	744,67
	3000	340,76	7,02	643,44
	4000	186,64	3,93	657,70
1,2	1000	661,49	17,85	843,09
	2000	385,39	9,39	761,57
	3000	288,08	5,37	582,85
	4000	95,67	3,28	1071,42
0,76	1000	673,36	27,69	1285,18
	2000	454,79	12,40	852,04
	3000	360,72	11,54	999,32
	4000	290,74	8,28	889,89



Obr. 14 Vzorek z validačního testu s axiálním posuvem (mm/min); (a) 2; (b) 2,5; (c) 10; (d) 20 [Manu, R., Babu, N. R., 2009]



Obr. 15 Srovnání experimentálních a předpokládaných osoustružených průměrů [Manu, R., Babu, N. R., 2009]

## 2 Definování nedostatků a návrh řešení problému

V současnosti je snaha o obrábění těžko obrobitelných (např. titan, nikl, kompozitní materiály) co nejefektivnějším způsobem ale zároveň nejekonomičtější způsobem. Konvenční metody obrábění vždy nejsou ekonomicky a technicky výhodné pro obrábění těchto tvrdých a houževnatých materiálů z důvodu rychlého opotřebení nástroje, velké tepelně ovlivněné oblasti a nízké efektivity nástroje a proto se uchyluje k používání nekonvenčních metod. Jelikož řezání abrazivním paprskem je v dnešní době věc normální,

soustružení abrazivním vodním paprskem patří mezi věci nové, proto je snaha dozvědět se o této technologii co nejvíce a zařadit tuto technologii do provozu.

### 3 Experimentální metodika a experimentální ověření

Tangenciální obrábění slitin Incoloy 925 použitím hydroabrazivního vodního paprsku

Slitina Incoloy 925 je austenitická slitina. Její vlastnosti jsou vysoká pevnost a vysoká úroveň korozní rezistence. Chemické složení této slitiny je na bázi nikl-železo-chromu. Dále obsahuje: měď, molybden, titan a hliník. Tyto složky zaručují slitinám Incoloy 925 výbornou odolnost proti chemickým, oxidačním vlivům a odolnost proti chlor-iontovému koroznímu praskání. Tato slitina je používána na komponenty pro těžbu plynu, vysokopevnostní potrubní systémy a na lodní a čerpadlové hřídelové vedení. Využití této slitiny je výhodné v agresivním prostředí (H<sub>2</sub>S), které obsahuje například ropu, zemní plyn, mořskou vodu, kyselinu sírovou a kyselinu fosforečnou. Slitina Incoloy 925 má dobrou obrobiteľnosť. Nejčastěji používané nástroje pro soustružení jsou nástroje ze slitutých karbidů a rychlořezné oceli.

#### 3.1 Materiál a metoda soustružení

Pro test byla použita slitina Incoloy 925 s průměrem 50 mm a kontinuální hydroabrazivní vodní paprsek s granátovým abrazivem Barton). Experiment byl realizován na 2D X-y řezacím stole PTV WJ2020-2Z-lxPJ s nakloněnou řeznou hlavou, speciálně navrženou pro řezání abrazivní vodou pro Ústav geoniky AV ČR, v.v.i, Ostrava Poruba. Tlak vody byl generován čerpadlem PTV75-60 s dvěma tlakovými zesilovači (provozní tlak 40-415 MPa, maximální průtok 7,81 l.min<sup>-1</sup> při 415 MPa) a tlak  $p = 400$  MPa využívající usměrňovací trubici s průměrem  $d_f = 1,02$  mm. Bylo použito souběžné soustružení radiálním offsetovým režimem. Nastavení usměrňovací trubice a vzhled povrchu je na Obr. 16. Velikost granátových zrn je přibližně 0,18 až 0,35  $\mu\text{m}$  (MESH 80). [Karková, M., Sobotová, L. 2013<sup>53</sup>]

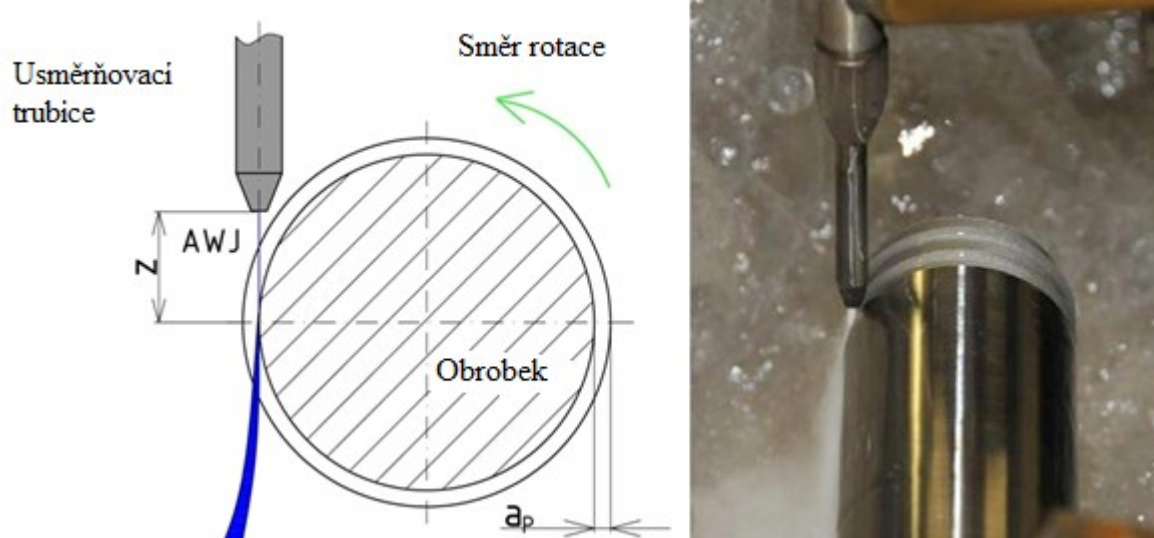
<sup>53</sup> KARKOVÁ, M. a SOBOTOVÁ, L. Abrasive materials used in AWJ cutting of material technology. In: Zlámal, T., HLAVÁČEK, P., CÁRACH, J., VASILKO, K., PetrŮ, J., SAMARDŽIĆ, I., KOZAK, D., Zelenák, M., KLICH, KLICHOVÁ, D., HLOCH, S. *Tangential turning of Incoloy alloy 925 using abrasive water jet.*

Chemické složení je popsáno v tabulce (Tabulka 3).

Tabulka 3 Chemické složení

Složka	Hodnota/%	Složka	Hodnota/%
Síra	0,03 max	Titan	1,9-2,4
Karbon	0,03 max	Měď	1,5-3,0
Niob	0,5 max	Molybden	2,5-3,5
Silikon	0,5 max	Železo	22 min
Mangan	1,0 max	Chrom	19,5-22,5
Hliník	0,1-0,5 max	Nikl	42,0-46,0

Obrobek ze slitiny Incoloy 925 byl sevřen do sklíčidla firmy Festo company. Jako abrazivum byl použit granát Barton (MESH 80).

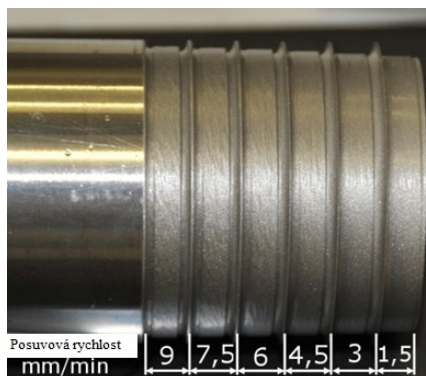


Obr. 16 Radiální nastavení Offsetového módu AWJ [Zlámal, T. et al.]

Tabulka 4 obsahuje Experimentální podmínky. Hodnoty a oblasti posuvové rychlosti ukazuje Obr. 17.

Tabulka 4 Experimentální podmínky

Faktory	Značka	Hodnota	Jednotka
Tlak	$p$	400	MPa
Průměr otvoru	$d_o$	0,33	mm
Průměr usměřovací trubice	$d_f$	1,02	mm
Hloubka řezu	$a_p$	2	mm
Odstup	$z$	10	mm
Hmotnostní průtok abraziva	$m_a$	0,4	kg/min
Průměr obrobku	$d_w$	50	mm



Obr. 17 Oblasti posuvové rychlosti [Zlámal, T. et al.]

Úběr materiálu byl realizován jako mikroerozní proces užívající abrazivní částice, obsažené ve vodě o velké rychlost (1000m.s-1) a rotaci povrchu obrobku (Obrázek 18.). [Manu, R., Babu, R. N., 2009<sup>54</sup>]



Obr. 18 Hydroabrazivní soustružení slitiny Incoloy 925 [Zlámal, T. et al.]

<sup>54</sup> MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. In: Zlámal, T., HLAVÁČEK, P., CÁRACH, J., VASILKO, K., PetrŮ, J., SAMARDŽIĆ, I., KOZAK, D., Zelenák, M., KLICH, KLICHOVÁ, D., HLOCH, S. *Tangential turning of Incoloy alloy 925 using abrasive water jet.*

#### 4 Výsledky a diskuze

Drsnost povrchu vytvořena kontinuálním vodním paprskem byla měřena optickým profilometrem MicroProf FRT. Senzor SEN 00 03 byl použit (Obrázek 19) v Ústavu geoniky AV ČR, v.v.i, Ostrava Poruba. 3D plocha povrchu byla sestavena z linek pro vzorek s následujícími parametry: měřící oblast 37x5,5 mm, vertikální rozlišení 4  $\mu$ , přesnost 1  $\mu$ m, linearita 0,1 %, boční rozlišení 5  $\mu$ m, počet měřících stop byl 1111.

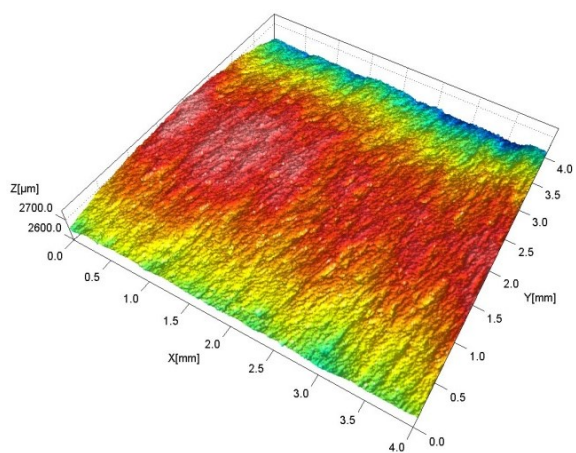
Tabulka 5 Měřící podmínky

Forma odběru	Line
Odřezek pro filtr zvuku , <i>ls</i>	25 $\mu$ m
ISO 4287	
Odřezek pro vlnovou délku, <i>lc</i>	2,5 mm
Počet odřezků	1
Měřená délka	2,5 mm

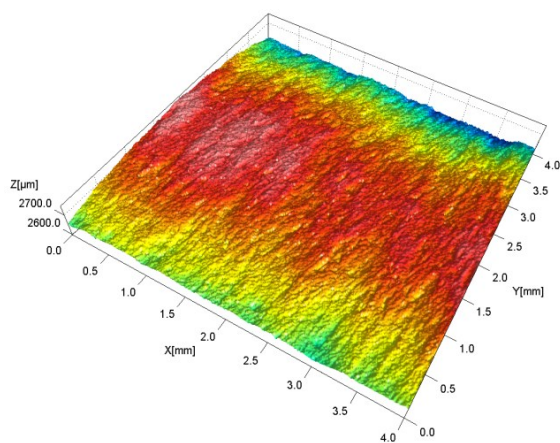


Obr. 19 Profilometr MicroProf FRT [Zlámal, T. et al.]

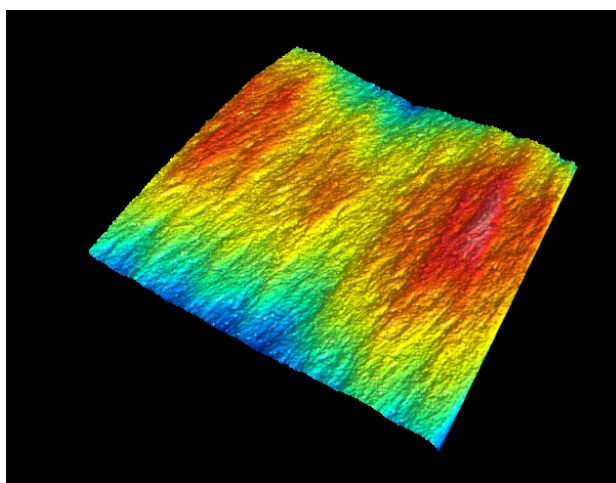
Použitý optický profilometr MicroProf FRT vytvořil 3D vizualizaci obrobeneho povrchu obrobku posuvovou rychlosti  $v_f = 1,5; 3; 4,5; 6; 7,5; 9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (Obrázek 20, 21, 22, 23, 24, 25).



Obr. 20 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $v_f=1,5 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámál, T. et al.]

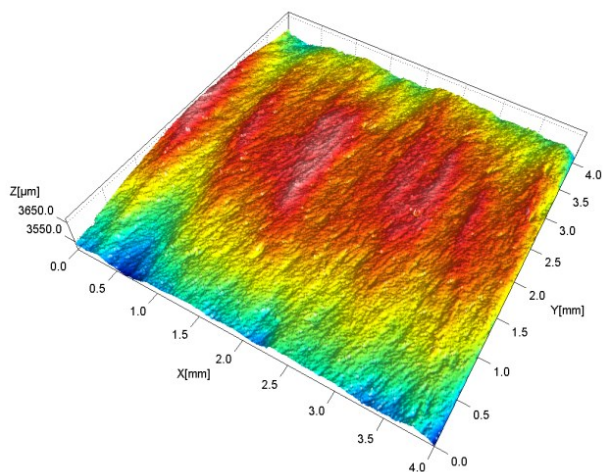


Obr. 21 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $v_f=3 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámál, T. et al.]

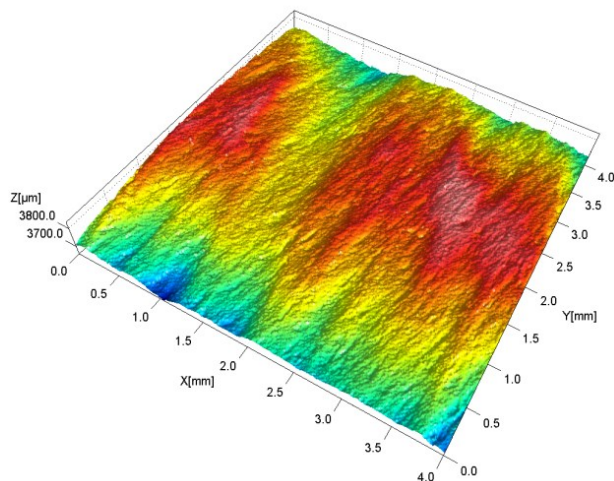


Obr. 22 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $v_f=4,5 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámál, T. et al.]

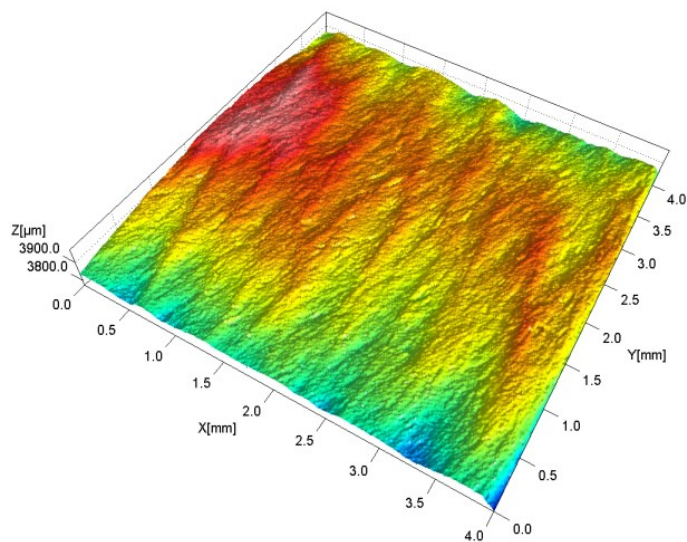




Obr. 23 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $\nu_f=6 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámal, T. et al.]

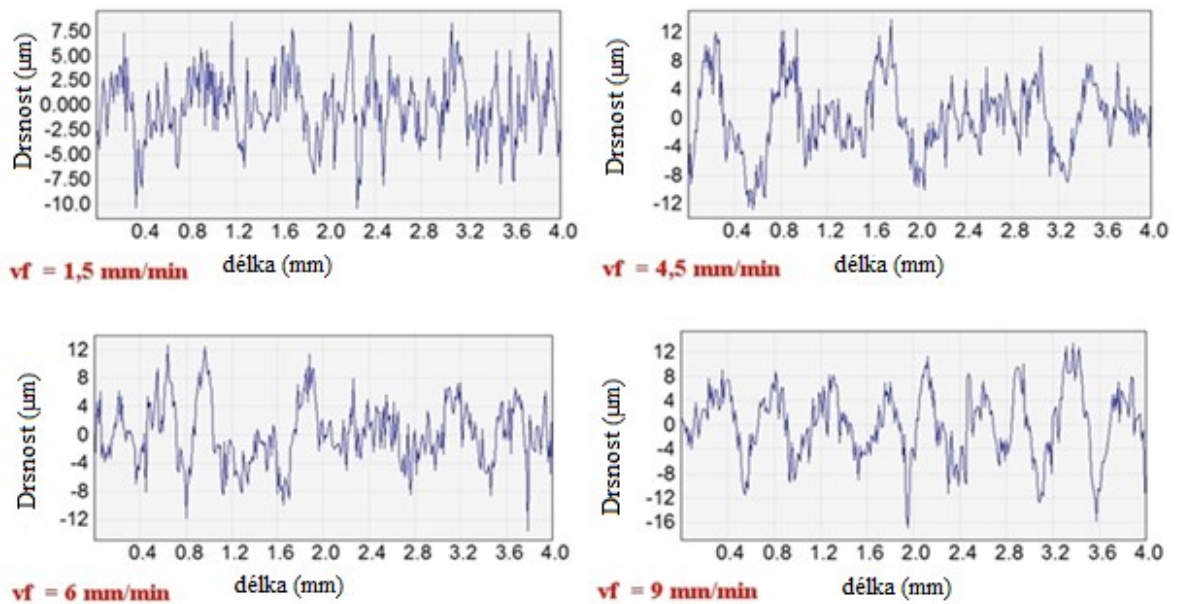


Obr. 24 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $\nu_f=7,5 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámal, T. et al.]



Obr. 25 Povrch profilu vytvořen vizualizací  $\nu_f=9 \text{ mm.min}^{-1}$  [Zlámal, T. et al.]

Měřicí oblast byla stejná na délce 4 mm pro všechny úseky. Výsledky měření ukazují nepravidelnost drsnosti zvyšující se s hodnotou posuvové rychlosti  $v_f = 1,5; 3; 4,5; 6; 9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  (Obrázek 25). Vlnitost při hodnotách posuvové rychlosti 1,5; 3; 4,5; 6  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je nepravidelná. Zatímco při posuvové rychlosti 9  $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je vlnitost pravidelná. Je možné, že při vyšších hodnotách posuvu bude pravidelná vlnitost povrchu, ale na úkor vyšší drsnosti povrchu.



Obr. 26 Drsnost povrchu slitiny Incoloy 925 při různých hodnotách posuvové rychlosti [Zlámal, T. et al.]

Experiment byl založen na tom, že při zvyšování posuvové rychlosti je větší nerovnoměrnost drsnosti povrchu obrobku. Hodnotou posuvové rychlosti  $v_f = 1,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je hodnota drsnosti povrchu nejnižší a to v rozmezí -10 až  $7,5 \mu\text{m}$ . Pro hodnoty posuvové rychlosti  $v_f = 4,5; 6 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je drsnost povrchu v rozmezí -12 až  $12 \mu\text{m}$ . Pro hodnotu posuvové rychlosti  $9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je drsnost povrchu nejvyšší a to v rozmezí -16 až  $12 \mu\text{m}$  a vlnitost povrchu je pravidelná. Z těchto poznatků lze usoudit, že při vyšších hodnotách posuvové rychlosti se zvyšuje hodnota drsnosti povrchu. To znamená, že pro dosažení nižší hodnoty drsnosti povrchu, potřebujeme nižší hodnoty posuvové rychlosti, což způsobuje vyšší strojní časy a nižší efektivitu procesu. Dále záleží na posouzení, zda je lepší použít vyšší hodnotu posuvové rychlosti na úkor drsnosti povrchu nebo nikoliv.

AWJ soustružení slitiny Incoloy 925 umožňuje hrubovací soustružení bez tepelně ovlivněné oblasti a s relativně malou řeznou silou (pod 40 N), proto může být tato metoda

vhodná pro mnoho přípravných operací, které nám zaručí větší efektivnost a ekonomičnost výrobního procesu.

Soustružení abrazivním vodním paprskem umožňuje obrábět materiály se speciálními vlastnostmi a velmi houževnaté materiály, takže je důležité vyvinout nové aplikace pro uplatnění této metody v materiálovém inženýrství. V tomto stadiu lze použít tuto metodu pouze pro přípravné operace, protože kvalita povrchu je poznatelně horší než při konvenčním soustružení.

Pro další výzkum je důležité zkoumat vliv dalších faktorů, jako jsou: MESH (topologie), úhel sklonu usměrňovací trubice, rotační frekvence obrobku, hloubka řezu a přechodové číslo.

## **5 Nový přístup k řešeným problémům.**

Soustružení těžkoobrobitelných materiálu je v současné době řešeno konvenčními metodami. Technologie soustružení abrazivním vodním paprskem umožňuje obrábění těchto materiálu mnohem efektivnějším způsobem bez tepelně ovlivněné oblasti. Bohužel je tato technologie vyvinuta pouze pro hrubování ale i přesto by se měla zařadit do provozu jak z důvodu ekonomických tak i z ekologických.

## 6 Závěr

V teoretické části je uvedeno, že jde o abrazivní vodní kontinuální paprsek s přídavkem přísávaného abraziva. Efektivnost vodního paprsku je ovlivněna druhem zvolené kapaliny. Prostřednictvím abrazivních částic přidávaných do vodního paprsku, se tato metoda používá na řezání plechů, řezání obrobků komplexních tvarů ale také pro soustružení rotačních obrobků. Odběr materiálu probíhá bez tepelně ovlivněné oblasti. Metoda se používá pro obrábění vysoce pevných materiálů i materiálů se speciálními vlastnostmi.

Při soustružení abrazivním vodním paprskem koná hlavní řezný pohyb obrobek a nástroj koná pohyb posuvný. Pro zvýšení účinnosti úběru materiálu se používají přírodní granáty, které se drtí na malé zrna s ostrými hranami.

Nastavení polohy nástroje k obrobku je realizováno buď radiálním, ofsetovým módem nebo radiálním nastavením s ofsetovým centrem. Obrobek je uchycen ve skličidle ve kterém se otáčí protiběžně nebo souběžně s nástrojem a podle toho se dělí na souběžné a konvenční protiběžné soustružení.

Mezi faktory, které ovlivňují kvalitu procesu patří posuvová rychlost, úhel sklonu usměrňovací trubice, výška, počet přechodů, tlak, průměr vodní trysky, délka a průměr zaostřovací trubice, abrazivo, hmotnostní průtok abraziva, materiál obrobku a rychlost a směr rotace obrobku.

V další části bakalářské práce byl učiněn pokus navrhnout nový analytický model pro AWJ soustružení, které bere v úvahu odběr materiálu z povrchu rotačního tělesa. Mechanismus odběru materiálu je eroze způsobená abrazivními částicemi ve vysokorychlostním vodním paprsku. Množství materiálu odebraného abrazivními částicemi během každé otáčky obrobku bylo stanoveno s pomocí Finnieho teorie eroze, která vyžaduje znalost meze kluzu materiálu obrobku. Mez kluzu materiálu stanovená standardními testy není vhodná pro situace zahrnující erozi. Proto byl použit původní experiment s použitím stejného držáku pro AWJ soustružení a stejného abrazivního i pracovního materiálu ke stanovení meze kluzu pro pracovního materiálu resp. obrobku. Navržený model s pomocí experimentálně stanovených hodnot predikuje finální hodnoty průměrů obrobků z hliníkové slitiny, které jsou soustruženy abrazivním vodním paprskem (AWJ) za různých kombinací procesních parametrů.

V experimentální části se jednalo o AWJ soustružení slitiny Incoloy 925 a to o hrubovací soustružení bez tepelně ovlivněné oblasti a s relativně malou řeznou silou (pod 40N), proto může být tato metoda vhodná pro mnoho operací.

Experiment byl založen na tom, že při zvyšování posuvové rychlosti je větší nerovnoměrnost drsnosti povrchu obrobku. S hodnotou posuvové rychlosti  $v_f=1,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je hodnota drsnosti povrchu nejnižší. Pro ostatní hodnoty posuvové rychlosti je drsnost povrchu podobná. Bylo možné vidět, že vlnitost povrchu se mění posuvovou rychlostí  $v_f=9 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  pravidelně.

Soustružení abrazivním vodním paprskem umožňuje obrábět materiály se speciálními vlastnostmi, takže je důležité vyvinout nové aplikace pro uplatnění této metody v materiálovém inženýrství. V tomto stadiu lze použít tuto metodu pouze pro přípravné operace, protože kvalita povrchu je poznatelně horší než při konvenčním soustružení.

Pro další výzkum je důležité zkoumat vliv dalších faktorů jako jsou: MESH (topologie), úhel sklonu usměrňovací trubice, rotační frekvence obrobku, hloubka řezu a počet přechodů.

## 7 Seznam použité literatury

- ANSARI, A. I., HASHISH, M. *Effect of abrasive waterjet parameters on volume removal trends in turning*. ASME Journal of Engineering for Industry 117 (4) (1995) 475–484.
- ANSARI, A. I. a HASHISH, M. On the modeling of abrasive waterjet turning. In: *Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology*, St. Andrews, Scotland, September 8–10, 1992, pp. 555–576.
- ANSARI, A. I., HASHISH, M., OHADI, M. M. *Flow visualization study of the macromechanics of abrasive waterjet turning*. Experimental Mechanics 32 (4) (1992) 358–364.
- AXINTE, A.D., STEPANIAN, P.J., KONG, C.M. a MCGOURLAY, J. Abrasive waterjet turning – An efficient method to profile and dress grinding wheels. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Issues 3-4, March 2009, Pages 351-356.
- BITTER, J. G. A. *A study of erosion phenomena—part I*. Wear 6 (1) (1963) 5–21.
- BITTER, J. G. A. *A study of erosion phenomena—part I*. Wear 6 (1) (1963) 5–21.
- CÁRACH, J., HLOCH, S., HLAVÁČEK, P., KLICH, J., ANDREJ, A., LEHOCKÁ, D. a ŠOMŠÁK, M. Description of Technology and Factors Influencing Material Removal by Abrasive Water Jet Turning. In: LEHOCKÁ, D., CÁRACH, J., KNAPČÍKOVÁ, L. a HLOCH, S., eds. *TEAM 2013 Proceedings: 5th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society: (Technique, Education, Agriculture and Management)*. Slavonski Brod, Croatia: TEAM Society, 2013. Prešov 4th-6th November 2013. Dostupné z: [http://www.teamsociety.eu/team\\_conferences/team\\_2013/default.aspx](http://www.teamsociety.eu/team_conferences/team_2013/default.aspx). ISSN 1847- 9065.
- FINNIE, I. *Erosion of surfaces by solid particles*. Wear 3 (2) (1960) 87–103.
- HASHISH, M. Macro characteristics of AWJ turned surfaces. In: *Proceedings of 2001 WJTA American Waterjet Conference*. Minneapolis, Minnesota, August 18–21, Paper no. 4, 2001, pp. 1–14.
- HASHISH, M. Prediction models for AWJ machining operations. In: *Proceedings of 7th American Water Jet Conference*, Seattle, Washington, August 28–31, 1993, pp. 205–216.
- HASHISH, M. A model for AWJ machining. ASME Journal of Engineering Materials and Technology 111 (2) (1989) 154–162.
- HASHISH, M. *A modelling study of metal cutting with abrasive waterjets*. ASME Journal of Engineering Materials and Technology 106 (1) (1984) 88–100.
- HASHISH, M. a ANSARI, A. I. *Erosion modes during AWJ lathe slotting*. Manufacturing Science and Engineering, ASME MED-2-2 (1995) 1263–1269.

- HASHISH, M., STEWART, J. Observations on precision turning with AWJ. In: *Proceedings of 15th International Conference on Jet Cutting Technology*. Ronneby, Sweden, September 6–8, 2000, pp. 367–380.
- HENNING, A. Modelling of turning operation for abrasive waterjets. In: *Proceedings of 10th American Waterjet Conference*, Houston, Texas, August 14–17, 1999, pp. 795–810.
- HLAVÁČ, L. *Model řízení parametrů kapalinového paprsku při porušování materiálů v pevné fázi*. Doktorská disertační práce. Katedra automatizace v hornictví, HGF VŠB-TUO, Ostrava, srpen 2000.
- HLAVÁČEK, P. *Měření distribuce výškových a podélných fluktuací povrchu kovových materiálů vytvořených abrazivním vodním paprskem a jejich analýza*. Bakalářská práce. FS VŠB TU, Ostrava, 2007, 55 s.
- HLOCH, S., VALÍČEK, J. *Influence of Factors on Surface Topography Created by Abrasive Water Jet Cutting*, Faculty of manufacturing technologies of Technical university of Košice with a seat in Prešov, Prešov, 2008, ISBN: 978-80-553-0091-7.
- HLOCH, S., VALÍČEK, J., HREHA, P., BEDNÁR, S., PERŽEL, V. a LATOVÁ, A. *Online-identification Hydroabrasive separation using acoustic emission and vibration*, Fakulta výrobných technologií TU v Košiciach so sídlom v Prešove, Prešov, 2011, ISBN: 978-80-553-0698-8.
- HOOGSTRATE, A. M. a C. A. van LUTTERVELT. *Opportunities in abrasive water-jet machining*. Annals of the CIRP 46 (2) (1997) 697–714.
- Incoloy alloy 925, In: *Special metals*, Publication Number SMC 070, Special Metals Corporation, 2004 (Sept 04) Available 20.12.2013. Dostupné z: <http://www.specialmetals.com/documents/Incoloy%20alloy%20925.pdf>
- KARKOVÁ, M. a SOBOTOVÁ, L. *Abrasive materials used in AWJ cutting of material technology*, Katedra environmentalistiky, Transfer inovácií 25/2013. [Online]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/25-2013/pdf/146-149.pdf>. [Accessed: 28-Sep-2013].
- KOVACEVIC, R., HASHISH, M., MOHAN, R., RAMULU, M., KIM, T. J., GESKIN, E. S. *State of the art of research and development in abrasive waterjet machining*. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 119 (1997) 776–785.
- KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi WJM*. Mračko – Bratislava, 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4.
- JUNKAR, M., JURISEVIC, B., FAJDIGA, M., GRAH, M. *Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining*. International Journal of Impact Engineering 32 (7) (2006) 1095–1112.



- LEBAR, A., JUNKAR, M. *Simulation of abrasive water jet cutting process*. Part 1. Unit event approach, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 12 (2004) 1159–1170.
- LEBAR, A., JUNKAR, M. *Simulation of abrasive waterjet machining based on unit event features*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217 (5) (2003) 699–703.
- LEHOČKÁ, D., CÁRACH, J., KNAPČÍKOVÁ, L. a HLOCH, S., eds. *TEAM 2013 Proceedings: 5th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society: (Technique, Education, Agriculture and Menegement)*. Slavonski Brod, Croatia: TEAM Society, 2013. Prešov 4th-6th November 2013. Dostupné z: [http://www.teamsociety.eu/team\\_conferences/team\\_2013/default.aspx](http://www.teamsociety.eu/team_conferences/team_2013/default.aspx) ISSN 1847- 9065.
- LI, W. a ZHU, H. et al. An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels. In: *International Journal of Mechanical Sciences*. May 2013.
- MANU, R. a BABU, R.N. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials. In: *Science Direct, Wear* 266 (2009), pp. 1091-1097 [online]. [cit. 10.2.2014]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164809000684> [Accessed: 28-Sep-2013].
- MANU, R. a BABU, N. R. Influence of jet impact angle on part geometry in abrasive waterjet turning of aluminium alloys. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 3 (1/2) (2008) 120–132.
- MANU, R., Babu, N. R. Estimation of process parameters in abrasive water jet turning of parts. In: *Proceedings of the Tehran International Congress on Manufacturing Engineering*, TICME 2005, Tehran, Iran, Article code: 2225, December 12–15, 2005a, pp. 1–8.
- MANU, R., Babu, N. R. Influence of focusing nozzle diameter on the quality of part produced by abrasive waterjet turning. In: *Proceedings of 4th National Conference on Precision Engineering*, COPEN 2005, December 16–17, Kolkata, India, 2005b, pp. 141–146.
- MOMBER, A. W. a KOVACEVIC, R. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. Springer-Verlag London Ltd., London, 1998, ISBN: 3-540-76239-6.
- SITEK, L. *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření*. Doktorská disertační práce. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2000. 110 s., 3 příl.

- ŤAVODOVÁ, M. The quality of the cut surface after abrasive water jet cutting. In: *Acta facultatis Technicae Zvolen- Slovakia*. 2011 [Online]. Dostupné z: [http://www.tuzvo.sk/files/FEVT/fakulta\\_fevt/tavodova-akta-fevt-2-2011-4.pdf](http://www.tuzvo.sk/files/FEVT/fakulta_fevt/tavodova-akta-fevt-2-2011-4.pdf) [Accessed: 27-Sep-2013].
- VALÍČEK, Jan. *Identifikace mechanických ekvivalentů z topografie povrchu generovaných hydroabrazivním flexibilním řezným nástrojem: teze inaugurační přednášky ke jmenovacímu řízení profesorem v oboru Strojírenská technologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. 62 s. Vědecké spisy Fakulty strojní. Habilitační a inaugurační spisy; sv. 68. ISBN 978-80-248-2975-3.
- VALÍČEK, Jan. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu: teze habilitační práce*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. 39 s. Vědecké spisy Fakulty strojní. Habilitační a inaugurační spisy; sv. 48. ISBN 978-80-248-1840-5.
- VALÍČEK, Jan a HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
- Vodní paprsek 2011 - výzkum, vývoj, aplikace: sborník přednášek konference o technologii vodního paprsku = Water Jet 2011 - Research, Development, Applications: proceedings of the conference on water jetting technology*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, [2009]- .
- Vodní paprsek 2009 - výzkum, vývoj, aplikace: sborník přednášek konference o technologii vodního paprsku = Water Jet 2009 - Research, Development, Applications: proceedings of the conference on water jetting technology*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, [2009]- .
- ZENG, J., WU, S., KIM, T. J. Development of a parameter prediction model for abrasive waterjet turning. In: *Proceedings of 12th International Conference on Jet Cutting Technology*, Rouen, France, October 25–27, 1994, pp. 601– 617.
- ZHONG, Z. W., HAN, Z. Z. *Turning of glass with abrasive waterjet*. *Materials and Manufacturing Processes* 17 (3) (2002) 330–349.
- ZLÁMAL, T., HLAVÁČEK, P., CÁRACH, J., VASILKO, K., PETRŮ, J., SAMARDŽIĆ, I., KOZAK, D., ZELENÁK, M., KLICH, KLICHOVÁ, D., HLOCH, S. *Tangential turning of Incoloy alloy 925 using abrasive water jet*.
- ZOHOURKARI, I. a ZOHOOR, M. An Erosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning. In: *World Academy of Science, Engineering and Technology* 38 2010. [Online]. Dostupné z: <http://www.waset.org/journals/waset/v38/v38-65.pdf>. [Accessed: 27-Sep-2013].

## 8 Seznam obrázků

Obr. 1 Upravené rozdělení kapalinových paprsků dle [Hlaváč, L., 2000; Sitek, L., 2000] .....	11
Obr. 2 Schéma vzniku a působení AWJ na obráběný materiál [Hlaváček, P., 2007].....	12
Obr. 3 Kontakt abrazivní částice s obrobkem [Cárách, J. et al., 2013].....	14
Obr. 4 AWJ soustružení - 3D model [Cárách, J. et al., 2013].....	15
Obr. 5 Přírodní granát [Cárách, J. et al., 2013].....	16
Obr. 6 Pozice AWJ směrem k obrobku [Cárách, J. et al., 2013] .....	16
Obr. 7 AWJ Souběžné soustružení [Cárách, J. et al., 2013].....	17
Obr. 8 AWJ Konvenční protiběžné soustružení [Cárách, J. et al., 2013] .....	17
Obr. 9 Schématické znázornění AWJ soustružení ukazující dopad paprsků na rotujícím válcovém vzorku [Manu, R., Babu, N. R., 2009] .....	23
Obr. 10 Izometrický pohled AWJ soustružení, ukazující axiální pohyb přes rotující válcový vzorek [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	28
Obr. 11 Fotografie nastavení pro AWJ soustružení válcových vzorků [Manu, R., Babu, N. R., 2009] .....	29
Obr. 12 Odstupňované průměry pro validační test [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	31
Obr. 13 Vzorek z testu meze kluzu, pro průměr trysky 0,76 mm a obvodovou rychlost (mm/min):(a) 1000; (b) 2000; (c) 3000; (d) 4000 [Manu, R., Babu, N. R., 2009] .....	33
Obr. 14 Vzorek z validačního testu s axiálním posuvem (mm/min); (a) 2; (b) 2,5; (c) 10; (d) 20 [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	35
Obr. 15 Srovnání experimentálních a přepokládaných osoustružených průměrů [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	35
Obr. 16 Radiální nastavení Offsetového módu AWJ [Zlámál, T. et al.].....	37
Obr. 17 Oblasti posuvové rychlosti [Zlámál, T. et al.] .....	38
Obr. 18 Hydroabrazivní soustružení slitiny Incoloy 925 [Zlámál, T. et al.].....	38
Obr. 19 Profilometr MicroProf FRT [Zlámál, T. et al.] .....	39
Obr. 20 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f= 1,5 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	40
Obr. 21 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f= 3 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	40
Obr. 22 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f=4,5 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	40
Obr. 23 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f=6 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	41
Obr. 24 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f=7,5 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	41
Obr. 25 Povrch profilu vytvořen vizualizací $v_f=9 \text{ mm.min}^{-1}$ [Zlámál, T. et al.] .....	41
Obr. 26 Drsnost povrchu slitiny Incoloy 925 při různých hodnotách posuvové rychlosti [Zlámál, T. et al.] .....	42

## 9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Detaily k procesu [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	32
Tabulka 2 Experimentální určování hodnoty meze kluzu [Manu, R., Babu, N. R., 2009].....	34
Tabulka 3 Chemické složení .....	37
Tabulka 4 Experimentální podmínky.....	38
Tabulka 5 Měřicí podmínky.....	39