



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM

CUTTING OF WATER JET

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ZOUHAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL OSIČKA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Zouhar

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

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

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

Řezání vodním paprskem

v anglickém jazyce:

Cutting of Water Jet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozbor nekonvenční metody vodního paprsku z hlediska přesnosti obrábění, jakosti povrchu a způsobů zadávání technologických parametrů.

Cíle diplomové práce:

Rozbor technologických možností vodního paprsku.

Rozbor možných způsobů řízení a zadávání technologických dat.

Vliv technologických parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění.

Kompletní řešení technologie pro konkrétní součást.

Technicko-ekonomické vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

1. BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění, Skriptum FSI ČVUT, Praha : Vydavatelství ČVUT, 1989.
2. KOČMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
3. MAŇKOVÁ, I. Progresivní technologie, 1 vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
4. HÍREŠ, O., HATALA, M., HLOCH, S., Delenie kovových materiálův okružnou pílou, vodným proudem a plazmovým oblúkom, 1. vyd. Jirí Pustina: Ostrava - Poruba 2007. ISBN 978-80-8073-769-6
5. OBERG, E., JONES, F.D., HORTON, H.L., RYFFEL, H.H. Machinery's hand-book. 25th Edition. New York: Industrial Press Inc., 1996. 2547 s. ISBN 0-8311-2595-0.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce vypracovaná v rámci magisterského studia popisuje technologii řezání vodním paprskem. Teoretická část práce se zabývá popisem této technologie a jsou v ní vysvětleny základní pojmy používané v této oblasti. Část praktická měla za cíl ověření některých teoretických poznatků. Proto bylo provedeno několik experimentů, během kterých byl zkoumán vliv abraziva na výslednou kvalitu povrchu a na hladinu vytvářeného hluku. Praktická část byla zakončena výrobou zvolené součásti a provedením jejího technicko-ekonomického zhodnocení.

Klíčová slova

řezání vodním paprskem, vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek

ABSTRACT

The work developed in the master's program, describes the technology of water jet cutting. The theoretical part deals with the description of this technology and it explains the basic concepts used in this field. The practical part was designed to verify some theoretical knowledge. Therefore, several experiments were performed, while there was studied the influence of abrasives on the final quality of the surface and the level of the generated noise. The practical part was completed by the production of the selected component and its technical and economic evaluation.

Key words

cutting of water jet, water jet, abrasive water jet

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZOUHAR, O. *Řezání vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 93 s., 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Řezání vodním paprskem“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který je součástí této práce.

V Brně dne 19.5.2011

.....
Ondřej Zouhar

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, cenné připomínky a rady týkající se zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanu Chloupkovi, jednatele společnosti ZMS s.r.o., za pomoc a vstřícnost při zhotovení experimentů prováděných v rámci dané práce.

OBSAH

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	6
Úvod	8
1 ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ VODNÍHO PAPRSKU	9
1.1 Historie.....	9
1.2 Podstata metody.....	9
1.3 Druhy vodních paprsků	11
1.4 Metody řezání vodním paprskem.....	13
1.5 WJM metoda.....	14
1.6 Abrazivní metody	15
1.6.1 Metoda AWJ.....	17
1.6.2 Metoda ASJ.....	17
1.6.3 Abraziva.....	18
1.6.4 Recyklace abraziva	20
1.7 Části zařízení WJM a AWJ	21
1.7.1 Hydraulická jednotka	21
1.7.2 Hydraulické čerpadlo	22
1.7.3 Multiplikátor	22
1.7.4 Akumulátor	23
1.7.5 Řezací hlava.....	23
1.7.6 Vodní tryska.....	24
1.7.7 Abrazivní (fokusační) tryska	24
1.7.8 Filtry.....	25
1.7.9 Pracovní kapalina	25
1.7.10 Potrubí pro rozvod vody.....	26
1.7.11 Systém úpravy vody	26
1.7.12 Aditiva.....	26
1.7.13 Lapač vody	27
1.8 Přednosti technologie vodního paprsku	27
1.9 Nevýhody technologie vodního paprsku	28
1.10 Použití vodního paprsku v průmyslu	29
1.11 Porovnání vodního paprsku s ostatními technologiemi.....	29
2 ROZBOR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ	
TECHNOLOGICKÝCH DAT.....	30
2.1 Řídicí systém CNC886	32
2.2 Software pro řezací stoly	33
2.2.1 IGEMS R9	33
2.2.2 FlowMaster	35
2.2.3 Další softwary.....	35
3 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA JAKOST POVRCHU	
A PŘESNOST OBRÁBĚNÍ	36
3.1 Mechanismus vytváření nástroje.....	36

3.2	Mechanismus odebrání materiálu	37
3.2.1	Makroskopický pohled na úběr materiálu	37
3.2.2	Mikroskopický pohled na úběr materiálu.....	40
3.3	Rýhy na řezaném povrchu	42
3.4	Topografie obrobeného povrchu	45
3.5	Drsnost povrchu.....	46
3.5.1	Profily drsnosti	47
3.6	Geometrie řezné hrany	48
3.6.1	Odchylka kolmosti	48
3.6.2	Odchylky stopy řezu	49
3.6.3	Neúplný řez	49
3.7	Vady na povrchu způsobené AWJ	50
3.7.1	Opotřebenění v okolí řezu	50
3.7.2	Koroze	51
3.8	Hluk při řezání.....	52
3.9	Experimenty	53
3.9.1	Experiment představující 5 různých kvalit řezu.....	53
3.9.2	Experiment na ověření závislosti mezi množstvím abraziva a výslednou strukturou povrchu – hrubý řez	57
3.9.3	Experiment na ověření závislosti mezi množstvím abraziva a výslednou strukturou povrchu – nejjemnější řez	60
3.9.4	Experiment na zjištění hlukové hladiny	68
4	KOMPLETNÍ ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE PRO KONKRÉTNÍ SOUČÁST	70
4.1	Součást a její rozměry	70
4.2	Vytvoření řezné geometrie	70
4.3	Program	72
4.4	Příprava stroje na řezání.....	72
4.5	Řezání	73
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ.....	75
5.1	Výpočet ceny součásti	76
5.1.1	Náklady na řezání.....	76
5.1.2	Náklady na materiál	76
5.1.3	Celkové náklady na vyráběnou součást	77
	Závěr.....	78
	Seznam použitých zdrojů.....	79
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	84
	Seznam příloh.....	87

ÚVOD

Voda už po několik tisíciletí svým tokem formuje reliéf zemského povrchu. Tento fakt byl lidem po dlouhou dobu známý, ale do technické praxe byl přenesen až v 19. století. Voda, která je běžně dostupná, což je její velká výhoda, se tedy začala prosazovat v průmyslu jako nástroj používaný k opracování nejrůznějších materiálů. Postupným zkoumáním bylo zjištěno, že voda přiváděná pod vysokým tlakem do trysky s malým otvorem má za následek vyšší erozní opotřebení a tím i zvýšení účinnosti při odebrání materiálu. V dnešní době jsou součásti vyráběné nebo opracované vodním paprskem nedílnou součástí nejrůznějších odvětví průmyslu, počínaje strojírenstvím a konče kosmickým průmyslem. Tento široký rozsah použitelnosti technologie vodního paprsku je především dán univerzálností a technologickými možnostmi vyplývajícími z této technologie.¹

Řezání vodním paprskem v sobě zahrnuje moderní poznatky z hlediska automatizace, ekonomiky, ochrany životního prostředí a energetické účinnosti. I přes neustálý vývoj a výzkum v této oblasti je stále ještě co zdokonalovat a tudíž není divu, že firmy zabývající se touto problematikou neustále na trh dodávají nové a ještě dokonalejší stroje.

Vodní paprsek je flexibilní nástroj umožňující zpracování širokého spektra materiálů, aniž by došlo ke vzniku deformace v řezaném dílci (obr. 1). V blízké budoucnosti se dá očekávat expanze této technologie zejména v odvětvích, která si žádají dělení materiálů s vynikajícími vlastnostmi, jež však v průběhu dělení nesmí být znehodnoceny. Právě u takových materiálů nachází vodní paprsek své uplatnění. Řezání za pomoci vodního paprsku je netradiční technologie, která může nahradit velké množství jiných obráběcích metod.



Obr. 1 Využití vodního paprsku⁴¹⁻⁴⁵

1 ROZBOR TECHNOLOGICKÝCH MOŽNOSTÍ VODNÍHO PAPRSKU

Technologie vodního paprsku je velice progresivní technologií s velkou oblastí využití, a tudíž v této kapitole budou rozebírány její technologické možnosti.

1.1 Historie

Samotná technologie dělení materiálů vodním paprskem se začala v historii objevovat v druhé polovině devatenáctého století. Tehdy se vodního paprsku využívalo v důlním průmyslu při těžbě drahocenných kovů. Voda byla stříkána na masivy, čímž se odplavovaly měkké horniny a zůstávaly pouze drahocenné kovy.¹

V 60. letech Dr. Norman Franz přišel na princip vytvoření vysokotlaké vody a to tak, že pouštěl těžké závaží na sloupce vody, což vedlo k vyvinutí vysokého tlaku ve vodě. Vodu následně hnal přes trysku s malým průměrem a získával tak řezací medium, které používal k řezání dřeva, lepenky a dalších materiálů.^{2,6}

Dělení materiálů vodním paprskem je lidstvu známo už několik desetiletí, avšak teprve počátkem 70. let minulého století došlo k použití spolehlivého, stabilního a hlavně účinného paprsku. V těchto letech se používal převážně pro dělení plastů a dřeva.¹

Roku 1979 byl vynalezen abrazivní vodní paprsek, jímž se dají řezat všechny tvrdé materiály jako jsou sklo, ocel a beton. Tlak vody dosahoval hodnoty 380 MPa.²

V devadesátých letech se tato technologie začala používat v automobilovém průmyslu pro řezání autoskel, dále pak v letectví a kosmickém průmyslu pro řezání vysocepevnostních materiálů (titan, nerezová ocel) a pro řezání karbonových vláken.²

Koncem minulého století už má vodní paprsek tlak 670 MPa a umožňuje řezání ve třech osách. Nyní jsou už běžně používány systémy, které eliminují vznik kuželovitého paprsku a přispívají tak ke zvýšení rezné rychlosti a přesnosti řezu. Vodní paprsek nachází své uplatnění, mimo jiné, také v civilním sektoru, kde se používá jako mobilní čistič kanalizací, průmyslový čistič, frézovač vozovky, atd.²

1.2 Podstata metody

Metoda řezání vodním paprskem je v současnosti už běžnou součástí technologických postupů, a tudíž se s ní můžeme setkat nejen ve strojírenství ale také v nejrůznějších průmyslových odvětvích.

Při řezání vodním paprskem se k oddělování materiálu využívá kinetická energie vysokotlakého, vysokorychlostního vodního paprsku. V případě abrazivního vodního paprsku ke kinetické energii přistupuje ještě kinetická energie abrazivních částic. Materiál je ubírán vysokorychlostním erozivním

procesem díky působení abrazivních částic usměrněných do úzkého paprsku s vysokým řezným účinkem. Rychlost proudění paprsku je $600\div 900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.³

Dělení hydroabrazivní erozí se uskutečňuje pomocí vysokorychlostního hydroabrazivního paprsku, který v tomto případě představuje nástroj. Narozdíl od klasických technologií ovšem nedochází během používání k jeho degradaci. Dochází však k opotřebením zaostřovací trubice v důsledku nárazů abraziva.¹

Oddělování částic materiálu při řezání vodním paprskem je mikrorozměrové a dochází k němu na velkém počtu míst. Proud vody nevytváří v materiálu žádné tepelné ovlivnění ani žádnou deformaci.¹ Pracovní tlak u této metody je $60\div 400 \text{ MPa}$, u řezání čistým vodním paprskem je pracovní tlak až 690 MPa .³ Výkon řezacího zařízení se pohybuje od 7 do 45 kW.⁴ Tolerance rozměrů zhotovené součástky se odvíjí od přesnosti polohovacího mechanismu, tedy pojezdů v jednotlivých osách. Obvykle dosažitelné tolerance se pohybují okolo $\pm 0,25 \text{ mm}$. Drsnost vytvořeného povrchu dosahuje rozmezí $1,6\div 6,3 \mu\text{m}$. Rychlost řezání je v porovnání s řezáním plamenem nižší, avšak vodní paprsek poskytuje lepší kvalitu řezaného povrchu.¹⁷

Kvalitu řezu ovlivňují následující faktory:

- tlak vody,
- rychlost pohybu paprsku,
- úhel sklonu paprsku,
- rychlost proudění paprsku,
- výtokový průměr trysky,
- vzdálenost trysky od povrchu materiálu,
- druh aditiva,
- druh abraziva (v případě abrazivního řezání).³

Hlavními částmi zařízení pro řezání vodním paprskem jsou hydraulická jednotka obsahující čerpadlo a multiplikátor. Zde dochází ke zvýšení tlaku ve vodě. Dalšími částmi jsou filtry, ventily, rozvodné potrubí, řezací hlava a zařízení pro její pohyb v osách X, Y a Z, opěrný rošt, lapač nečistot, systém úpravy a recyklace vody, řídicí CNC systém. Jestliže se jedná o abrazivní řezání, tak je stroj vybaven ještě systémem pro dávkování abraziva.³

Voda používaná v zařízení musí být dle normy před vstupem náležitě vyčištěna, protože jinak by docházelo k zanášení řezací hlavy a dalším problémům. Systém přípravy vody se dá rozdělit do několika subsystémů, a sice do systému pro úpravu vody, generování tlaku, nosného systému a řezací hlavy.¹ Do vody jsou přidávána aditiva, což jsou polymery s lineárními molekulami, která zabraňují turbulenci vodního paprsku a pomáhají tak vytvořit vysoce účinný paprsek s kompaktním jádrem, jenž se při styku s obráběným materiálem tolik netříští.³

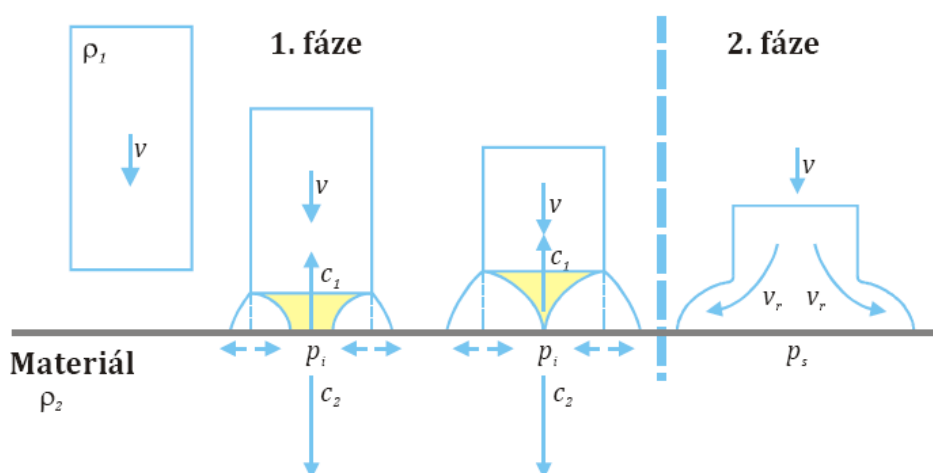
Řezání pomocí vodního paprsku má některá omezení, která ovlivňují výsledný povrch řezu. Zejména se jedná o zpoždění proudu paprsku a kuželový tvar paprsku. Zpoždění na rovných řezech není podstatné, na rozích však dochází ke vzniku podřezání. Mimo to způsobuje zpoždění chyby na obloucích a vytváří úkosoř na řezných hranách. Použitím nových technologií ve způsobu řízení se dají tyto chyby odstranit.⁶

Ve srovnání s ostatními způsoby dělení materiálu má vodní paprsek několik předností, díky nimž je tak hojně používán:

- proces řezání je bezprašný, poskytuje řeznou hranu bez otřepů,
- řez se vyznačuje dobrou kvalitou a malou šířkou (výhodné pro drahé materiály),
- nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu – tato metoda může dělit materiály s malým odvodem tepla (kompozity, plasty),
- možnost dělení materiálů, u nichž dochází při jiných způsobech dělení k uvolňování nebezpečných, jedovatých látek.⁴

1.3 Druhy vodních paprsků

Vodní paprsek při dopadu na povrch materiálu vyvoluje prudký nárůst tlaku v materiálu. Dopad můžeme rozdělit do dvou fází, jak ukazuje obrázek (obr. 1.1). V první fázi kapalina vytváří impaktní tlak, který způsobuje velké poškození materiálu, a kapalina se jeví jako nestlačitelná. Jakmile přestane působit impaktní tlak p_i , nastává druhá fáze. Kapalina začíná proudit kolmo ke směru dopadu paprsku a chová se nestlačitelně, čímž dochází k poklesu tlaku paprsku na tzv. stagnační tlak p_s .



Obr. 1.1 Dopad kapaliny na materiál²³

Zároveň dochází k nárůstu rychlosti šíření kapaliny po povrchu (až 5-ti násobně vyšší než rychlost dopadu paprsku). Rychlost se odvíjí od tvaru čela kapky. Aby došlo k nárůstu rychlosti, tak musí mezi kapkou a povrchem materiálu být úhel větší jak 0° . Díky smykovým silám, způsobených právě radiálním tokem, dochází v materiálu k vytvoření lokálních trhlin podepisujících se na rychlejšímu dělení materiálu. Pro tyto smykové síly je důležitý i povrch řezaného materiálu, který umocňuje jejich účinky.²³

Rozeznáváme tři systémy vodních paprsků:

- a) systém kontinuálního paprsku,
- b) systém kavitačního paprsku,
- c) systém pulzujícího paprsku.

Ad a)

Systém kontinuálního paprsku má stálou energetickou hladinu během procesu. Tento systém se používá při řezání všech druhů materiálů, z čehož vyplývá, že je nejpoužívanější metodou při dělení. Jeho nevýhodou je vytváření povrchu s horší kvalitou.

Ad b)

Kavitační paprsek je též kontinuální, ale obsahuje v sobě kavitační bubliny. Jeho princip dělení je založen na lokálním porušování materiálu destrukční silou právě od kavitačních bublin.

Ad c)

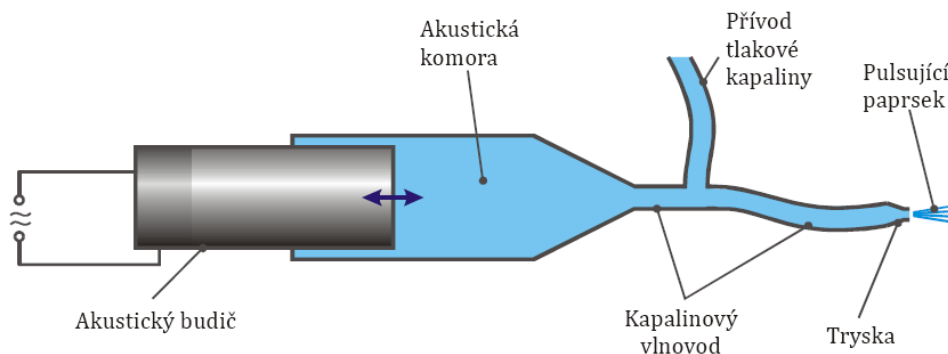
Systém pulzujícího paprsku (obr. 1.2) používá krátkodobé, opakované impulzy paprsku, které zapříčiňují vznik tlakových špiček příznivě působících na rychlost rozšiřování řezné mezery. Tato metoda byla používána zejména v důlním průmyslu, dnes se však dostává i do běžného strojírenství.⁴



Obr. 1.2 Pulzující vodní paprsek²⁴

Pulzující paprsek je vytvořen pomocí tzv. modulace paprsku (vytváření tlakových pulzací v tlakové kapalině). Paprsek má tu vlastnost, že při výstupu z trysky je kontinuální, avšak v určité vzdálenosti od trysky dochází k jeho formování do paprsku pulzujícího. Protože kapka pulzujícího paprsku má tvar koule (svírá s povrchem materiálu určitý úhel, který není rovný nule), tak způsobuje vznik smykových sil. Velkou výhodou pulzujícího vodního paprsku oproti kontinuálnímu je to, že na dopadové ploše dochází k cyklické generaci impaktního tlaku působením jednotlivých pulsů paprsku. Pulzující paprsek má, v důsledku cyklického působení únavového a smykového namáhání při zachování stejných hydraulických parametrů, vyšší účinnost než paprsek kontinuální.^{23,24}

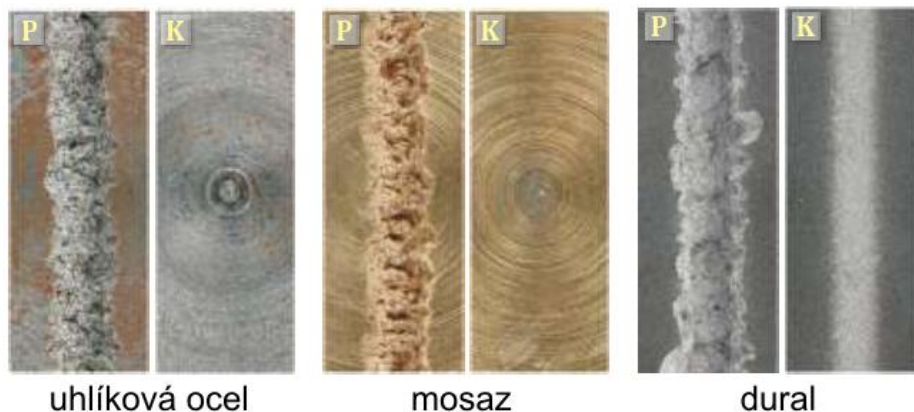
Jedno z možných řešení pro vytváření pulzujícího paprsku ukazuje následující obrázek (obr. 1.3):



Obr. 1.3 Schéma principu generace tlakových pulzací²³

K vysokotlakému systému se připojuje akustická komora, v níž je implementován akustický budič. Akustický budič složený z elektromechanického měniče a válcového vlnovodu generuje tlakové pulzace, které jsou pak ještě zesilovány mechanickým zesilovačem. Tlaková kapalina s vytvořenými pulzacemi jde přes kapalinový vlnovod do trysky, kde dochází k transformaci tlakových pulzací na pulzace rychlostní, a zároveň se zde vytváří pulzující paprsek.²³

Rozdíl v použití pulzujícího (P) a kontinuálního (K) paprsku u různých materiálů znázorňuje obrázek 1.4.



Obr. 1.4 Prezentace pulzujícího a kontinuálního paprsku²³

1.4 Metody řezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem se dá rozdělit do dvou základních metod:

- WJM (water jet machining) – řezání čistým vodním paprskem,
- AWJ (abrasive water jet) – řezání abrazivním vodním paprskem (vodní paprsek s přísadou abraziva).

Rozdíl mezi těmito metodami je v přidávání jemného brusiva (abraziva) do proudu vody. Obě dvě metody mohou řezat i v případě, že je materiál umístěn pod hladinou vody.⁴ Řezaný materiál je většinou ve formě tabulí o maximálních rozměrech vycházejících z rozměrů pracovní plochy stolu. Při kusové výrobě se může řezat i z nejrůznějších odpadů z tabulí, musí se však zajistit dostatečné a bezpečné ustavení.¹⁷

Zvýšení teploty při řezání je v místě řezu asi o 20 °C oproti původní teplotě materiálu a lze tedy tvrdit, že obě metody nemají žádný tepelný vliv na obráběný materiál. Při řezání dochází sice ke zvýšení teploty řezaných dílců, což je potvrzeno odpařováním vody v okolí paprsku a vznikem jisker, avšak tento nárůst teploty není nikterak velký, aby díky němu došlo k ovlivnění struktury a tudíž vlastností děleného materiálu. Tento fakt platí u kovových a nekovových materiálů. U materiálů plastických, kompozitních a biomateriálů může i tak malé navýšení teploty znamenat změnu struktury, či vyvolání trhlin vedoucích k degradaci děleného materiálu.⁴

Při řezání se začínají uplatňovat technologie vedoucí k vyšší produktivitě a řízení kvality výroby, mezi které patří online sledování řezného procesu a následná optimalizace řezných podmínek přímo během procesu řezání.¹⁰

1.5 WJM metoda

Řezání vodním paprskem tedy spočívá v obrobení materiálu mechanickým účinkem dopadajícího vodního paprsku působícího vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy.⁴

Paprsek se generuje až v řezací hlavě, kde voda stlačená na vysoký tlak prochází přes trysku s otvorem o průměru 0,3 mm (0,75÷2,5 mm)³ a transformuje se v paprsek o průměru 0,1÷1,5 mm. Poté dopadá na obrobek, v němž dochází ke zpomalování rychlosti paprsku v důsledku tření mezi povrchem paprsku a povrchem materiálu obrobku. Kromě zpomalování dochází také, kvůli poklesu kinetické energie, k vychylování.⁴

V případě řezání touto metodou musíme docílit tlaku až 690 MPa. Tlak vody nelze v dnešní době zvyšovat do nekonečných hodnot, protože vysoký tlak má za následek vyšší tlakové ztráty, vyšší hluk, stoupají ekonomické náklady spojené s úpravou a čištěním vody. Výstupní rychlost paprsku je mezi 600÷900 m·s⁻¹. Rychlost posuvu řezací hlavy se pohybuje od 5 m·min⁻¹ (lamináty) až po 400 m·min⁻¹ (lepenky, papír). Šířka řezu bývá přibližně o 0,3 mm větší, než je průměr otvoru v trysce.^{1,27}

Důležitým faktorem při řezání je také vzdálenost mezi řezací hlavou a obráběným materiálem, jenž bývá od 2,5÷6,35 mm, nebo i 10÷25 mm.^{4,12,17} U vzdáleností nad 10 mm dochází k významnému rozptylování paprsku, což je pro řezání nepřijatelné.¹ K rozptylování paprsku dochází i kvůli výrobním nepřesnostem komponent řezací hlavy.³³

Čistý vodní paprsek se používá pro řezání tenkých, měkkých, málo pevných a nekovových materiálů. S výhodou se používá na řezání polystyrenu, polyuretanu, gumy, překližky, lepenky, sádrokartonu, pěnových materiálů a různých laminátů a termoplastů.^{17,26} Pro své kavitační schopnosti se využívá

i při odstraňování starých nátěrů a koroze z již používaných součástí a zařízení.²⁰ U kovových materiálů s vyšší tvrdostí způsobuje čistý vodní paprsek pouze zanedbatelné odstranění materiálu a proto je lepší použít pro dělení těchto materiálů, a všeobecně všech kovových materiálů, paprsek abrazivní, v němž abrazivo zvyšuje jeho účinnost.^{1,4,8}

1.6 Abrazivní metody

Metoda abrazivního vodního paprsku byla vynalezena, jak už bylo zmíněno v historii, roku 1979, avšak do komerčního používání se dostala až o čtyři roky později. V současné době je tato metoda aplikována v nejrůznějších odvětvích průmyslu.¹

Řezání za pomoci abrazivních vodních paprsků je považováno za obrábění flexibilním rezným nástrojem, u něhož nedochází během rezného procesu k opotřebení, jako je tomu u konvenčních metod. Tyto metody slouží k získání přesných, čistých a tepelně neovlivněných řezů. Celé řezání je počítačem řízené, nedochází při něm k deformaci řezaných součástí, jsou u něho kladeny vysoké požadavky na produktivitu a kvalitu. Funkce člověka ve výrobním procesu je přesunuta od namáhavé práce ke kontrole a řízení provozu řezacích zařízení.¹²

Dělení pomocí abrazivních metod se dá popsat jako vysoce erozivní proces nebo také jako řízený proces erozivního opotřebení, při němž abrazivní vodní paprsek vykazuje vysokou dělicí účinnost.¹

Jako rezný nástroj je zde tedy používán vysokorychlostní, vysokotlaký, abrazivní vodní paprsek.⁴ Obecně by se tato metoda dala popsat jako technologický proces objemového odstraňování částic obrobku, k němuž dochází při vzájemném styku obrobku s abrazivem.¹

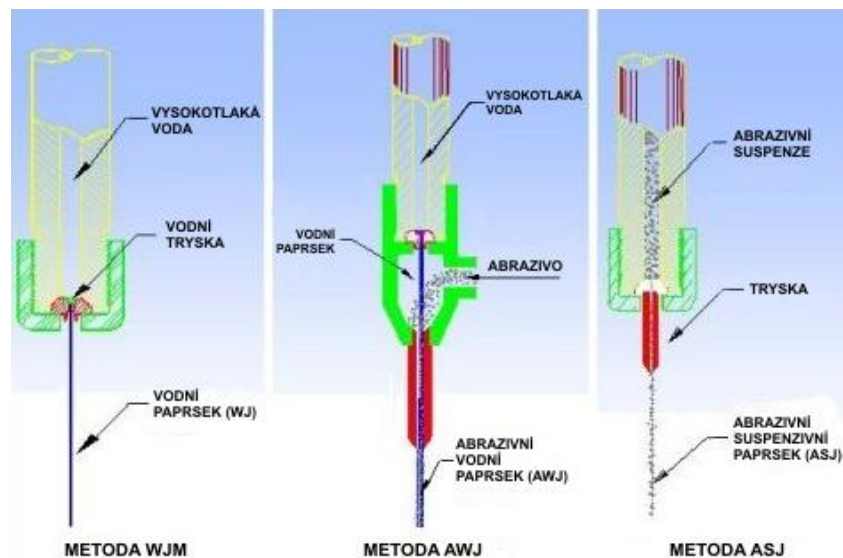


Obr. 1.5 Řezací stroj⁴⁶

Řezací zařízení, viz. obr. 1.5, se od zařízení pro metodu WJM liší v některých částech. Řezací hlava je vybavena směšovací komorou, do níž je přiváděno ze zásobníku abrazivo anebo suspenze.¹

Podle konstrukce řezací hlavy můžeme rozdělit abrazivní způsob řezání na dvě hlavní technologie (obr. 1.6):

- a) Systém s přímým přívodem brusiva, tzv. AWJ (abrasive water jet),
- b) Systém s přímým vstřikováním abraziva, tzv. ASJ (abrasive slurry jet).⁴



Obr. 1.6 Srovnání jednotlivých metod⁴⁷

Materiály, které jsou v dnešní době používány, jsou z velké části vyvíjeny pro danou aplikaci, což však s sebou nese problémy v případě dělení, obrábění, atd.⁶ Abrazivní metody dělení materiálu se dají úspěšně použít pro dělení právě těchto materiálů, dále pak pro dělení tuhých, tvrdých materiálů, jako jsou titan, grafit, sklo, keramika, kovové voštiny, lepené materiály a dnes i kompozitní a sendvičové materiály.¹¹ Pomocí abrazivního vodního paprsku je tedy možno řezat prakticky všechny konstrukční materiály.⁴

Tradiční způsoby dělení ničí strukturu voštin z vytvrzených vláken, ničí sendvičové materiály, způsobují znečištění prostředí (prach) a i samotná rezná plocha není dostatečně kvalitní. Díky tomu, že při řezání abrazivními metodami působí na obrobek nízké rezné síly (~500 N), tak je možno řezat i materiály křehké, aniž by došlo k jejich rozpadu. Materiály, které při řezání uvolňují zdraví nebezpečné jemné částice, je možno řezat touto metodou, neboť částice jsou odstraňovány proudem paprsku z materiálu do lapače, kde jsou zachyceny a nedochází tak k jejich šíření a kontaminaci okolí.⁶

Abrazivní vodní paprsek se oproti ostatním technologiím – plazma, laser, kyslíko-acetylenový plamen, vyznačuje některými přednostmi:

- minimální tepelné ovlivnění řezané oblasti,
- vysoká rychlost řezání,
- možnost řezat v různých směrech bez zmenšení účinnosti paprsku,

- možnost řezat rovinné i tvarové plochy ve velmi úzkých tolerancích,
- malé deformační napětí v řezaném povrchu.¹

1.6.1 Metoda AWJ

Stejně jako u technologie WJM se i u metody AWJ využívá při odebrání materiálu dopadových účinků úzkého paprsku působícího na malou plochu. Avšak abrazivo, obsažené v paprsku, zvětšuje mechanický účinek dopadu.¹

U této metody je abrazivo vedeno ze zásobníku do směšovací komory, kde dochází podtlakem vytvořeným průchodem paprsku k jeho zachycování a urychlování vysokorychlostním vodním paprskem. Abrazivo je nejprve zachyceno paprskem, čímž je mu uděleno zrychlení a poté naráží na stěnu fokusační trysky tak dlouho, dokud nemá směr své rychlosti téměř rovnoběžný se směrem rychlosti paprsku. Pak teprve dojde ke konečnému stažení paprskem vody, se kterým pak vystupuje z řezací hlavy ven. Přisun abrasiva je u tohoto systému od 1 do 20 kg·min⁻¹. Směšovací výkon závisí na geometrii abrazivní (fokusační) trysky.^{4,6,25}

Pracovní tlak u metody AWJ je od 250 do 400 MPa.⁶ Průměr paprsku je kvůli abrazivním částicím větší než u WJM a vytváří řeznou mezeru, jejíž šířka je 0,8÷2,2 mm. Šířka spáry se odvíjí od použité výstupní trysky a abrasiva.¹ Hladina hluku se pohybuje od 80 do 100 dB, někdy se však může vyšplhat až na 105 dB, a proto je důležitá sluchová ochrana obsluhy.^{4,11}

Posuvová rychlost řezací hlavy je pro tvrdé materiály (kobalt, slinutý karbid, titan a další) od 10 mm·min⁻¹, materiály jako sklo a hliník je možno řezat s posuvovou rychlostí až 2 500 mm·min⁻¹.²⁷

Řezný proces této metody je založen na přidávání jemného brusiva (abrasiva) do vysokotlakého vodního paprsku. Při přidávání ovšem dochází ke zpomalení paprsku až na 50 % původní rychlosti, což sebou nese i snížení řezného výkonu. Zároveň dochází ke ztrátám v celkové energii paprsku, které mohou činit až 70 %. Na hodnotu ztrát má největší vliv rychlost paprsku.^{3,4,5,6,31}

Abrazivo musí mít menší rozměry, než je průměr díry v trysce, jinak by došlo k jejímu ucpání. Je vhodné volit průměr trysky 5x i víckrát větší než je rozměr abrasiva. Platí zde, že čím je menší průměr díry ve trysce, tím je více energie koncentrované v jednom místě na obrobku.^{3,4,5,6}

1.6.2 Metoda ASJ

U metody ASJ je do trysky přiváděna stlačená suspenze (disperzní soustava složená z pevných částic abrasiva rozptýlenými v kapalině), jež je smíchána s vodou v tlakové nádobě. Průtok suspenze je cca 20 kg·min⁻¹, u přesného řezání je menší (1÷3 kg·min⁻¹).⁴ Tato metoda je užívána zejména v případech, v nichž je používáno velmi jemné brusivo (MESH 220). Směšovací schopnost je menší, což se odstraňuje zvýšením výkonu čerpadla, potažmo tlaku.⁶ U této metody se díky vysokému tlaku suspenze erozně opotřebovávají všechny komponenty vysokotlakého systému.¹⁴

Díky lepšímu rozložení abraziva v paprsku se použitím uváděné metody dostane kvalitnější povrch, jenž vykazuje lepší drsnost povrchu než povrch vytvořený metodou AWJ.⁸

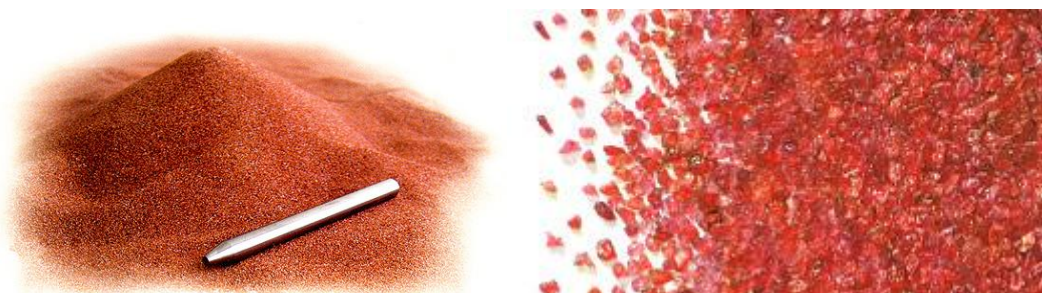
U metody ASJ dochází k tomu, že plyn (vzduch) zachycený ve směšovací komoře způsobuje vznik mlhy na výstupu z výstupní trysky. Mlha může být pro obsluhu škodlivá, pokud se do vody přidávají chemické sloučeniny pro zlepšení řezacích účinků paprsku. V takových případech je potřeba dbát na bezpečnost a ochranu zdraví.^{14,20}

Při porovnání obou dvou systémů vyplývá, že systém ASJ je výhodnější zejména v těchto bodech:

- umožňuje použít užší průměr paprsku a trysku s kompaktnější konstrukcí,
- má vyšší účinnost,
- má vyšší proudovou hustotu abrazivních částic.⁴

1.6.3 Abraziva

Na jakost povrchu řezané plochy a na výkon řezání má podstatný vliv dodávané množství abraziva (udáváno v $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$), druh abraziva, ale také velikost a tvar jeho zrn, tzv. zrnitost. Neplatí však, že čím je větší nebo menší velikost zrna, tím je vyšší či menší hloubka řezu. Při experimentech bylo zjištěno, že největší hloubky řezu se dosahuje při použití abraziva se střední velikostí zrn.^{3,4,5}



Obr. 1.7 Granátová abraziva^{48,49}

Při zvyšování rychlosti abraziva dochází v důsledku nárazu v abrazivní (zaostřovací) trubici, ale i v důsledku vzájemného nárazu částic, k rozpadu abraziva. To má za následek zmenšování rozměrů zrna a tím snižování řezné hloubky i účinnosti řezného procesu.^{4,6}

Abraziva se většinou používají uměle vyrobená. Je u nich možno lépe kontrolovat chemické složení, krystalickou strukturu, tvrdost, velikost, řezné vlastnosti, což u přírodních není možné. Jediným používaným přírodním abrazivem je granát.^{9,15}

Mezi abraziva používaná v zařízeních patří:

- Granát:

Granát (obr. 1.7) se používá ve dvou modifikacích:

- a) $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3]$ – železo hliníkový granát (almandin)
- b) $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ – yttrium hliníkový granát

Granát je nejvíce používané abrazivo pocházející z Austrálie, Číny nebo Indie, kde se získává rozdrčením vytěžené horniny anebo z naplavenin v řekách. Drcený granát má ostřejší hrany, což se projevuje na jeho řezivosti, oproti tomu říční granát má hrany zaoblenější. Díky své tvrdosti a pevnosti zrn poskytuje nejvyšší produktivitu a perfektní kvalitu řezu. Jeho řezací účinek je tedy dobrý, což sebou nese i vyšší opotřebení abrazivní trysky. Jeho hlavní nevýhodou je obtížná recyklace.

- Olivín – $(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_4)$

Olivín je minerál složený ze dvou komponent, z nichž je pro řezání více důležitější fosterit (Mg_2SiO_4). Olivínové abrazivo je levnější a měkčí abrazivní materiál, díky čemuž má ale nízký řezný výkon. Olivínová abraziva se používají při výrobě, u níž se praktikuje spíše větší ziskovost z řezání než výkonnost.

- Oxid hlinitý – Al_2O_3 (korund)

Oxid hlinitý má poměrně tvrdá (Al_2O_3 – druhý nejtvrdší minerál po diamantu), ostrá a stabilní zrna s vysokou řezací schopností a proto při jeho použití dochází také k vyššímu opotřebování abrazivní trysky. Je dražší a dobře recyklovatelný.

- Křemičitý písek – SiO_2

Toto abrazivo je poměrně levné, poskytuje nižší řezací účinek i opotřebení trysky a je nevhodné k recyklaci. Velkou nevýhodou je to, že jeho zrna uvolňují karcinogenní křemičitý prach nebezpečný pro životní prostředí a okolí vůbec. Z tohoto důvodu je jeho používání prakticky zakázáno.^{3,4,5,6,21,22,29}

- Ocelová drť, ocelové broky

Ocelová drť se vyrábí ohřevem oceli na bílou teplotu a následným zakalením do vody. Takto získané segmenty jsou rozdrčeny do jemného prášku o rozměrech 1/16 v průměru.^{3,9}

Volba druhu abraziva se řídí podle následujících kritérií:

- Abraziva je nutné volit s ohledem na zdravotní nezávadnost a bezpečnostní požadavky.

- Recyklace je jedním z hlavních faktorů při rozhodování o typu abraziva. Pro recyklaci není příliš vhodný křemičitý písek a granát, protože se během řezného procesu mění na špatně recyklovatelný prášek.
- Měkčí a levnější abraziva způsobují menší opotřebení trysky.
- Levnější abraziva mají nižší účinnost, ale náklady na abrazivo nejsou lineárně závislé na provozních charakteristikách.
- Použité abrazivo má vliv na okolní životní prostředí.
- Ne vždy je technologicky nejvhodnější abrazivo vhodné k životnímu prostředí.⁴

V současnosti je vyvíjeno abrazivo, které je rozpustné ve vodě. Při dopadu tohoto abraziva na povrch obrobku dojde k jeho roztržení na jemný prášek následně rozpustitelný ve vodě. U tohoto abraziva odpadají problémy s čištěním vany i recyklací. Zároveň se uvažuje o nahrazení granátu skleněným abrazivem. Granát má sice vyšší tvrdost, ale náklady spojené s použitím skla jsou o 90 % nižší.⁶

1.6.4 Recyklace abraziva

Důležitou otázkou při volbě druhu abraziva je jeho následná recyklace. K recyklaci slouží tzv. recyklační jednotky. Například u granátů jsou použitím recyklační jednotky sníženy celkové náklady až o jednu třetinu.⁶

Recyklace abraziva je jedním ze základních faktorů mající vliv na výslednou cenu řezu. Recyklace je smysluplná, protože se pouze 30÷50 % z celkového množství abraziva podílí na řezném procesu a je přímo ve styku s řezaným materiálem. Zbytek abraziva, které většinou vytváří jádro paprsku, přechází do nádrže, aniž by se jeho zrna jakkoli deformovala. Právě proto byly zavedeny recyklační jednotky, díky nimž lze zpět získat z nádrže nepoužité abrazivo. Naopak některá zrna abraziva i přesto, že nejsou ve styku s materiálem, své rozměry zmenšují, čímž se zamezuje recyklaci. Procentuelně se množství znovupoužitelného abraziva pohybuje kolem 50÷60 %.²⁹

Princip recyklační jednotky (obr. 1.8) je následující. Z nádrže (lapače) se odsává směs vody a abraziva, která jde na síta vibračního separátoru, v němž dochází k jejímu prvotnímu čištění a primárnímu třídění. Síta mají otvory (oka) zajišťující propad jemného, rozdrčeného abraziva, které již nelze dále používat. Toto abrazivo padá do odpadní nádrže, popř. velkoobjemového pytle (tzv. big bagu), odkud je pak odstraněno. Naproti tomu abrazivo použitelné je ze síta přepravováno do sušičky, v níž se vlhké abrazivo usuší. Následně projde usušené abrazivo ještě jedním tříděním, během něhož se rozdělí na jemná a hrubá zrna. Poté se přečerpá pomocí vzduchového dopravníku do zásobníku a je tak připraveno k dalšímu použití.^{29,30}



Obr. 1.8 Recyklační jednotka⁵⁰

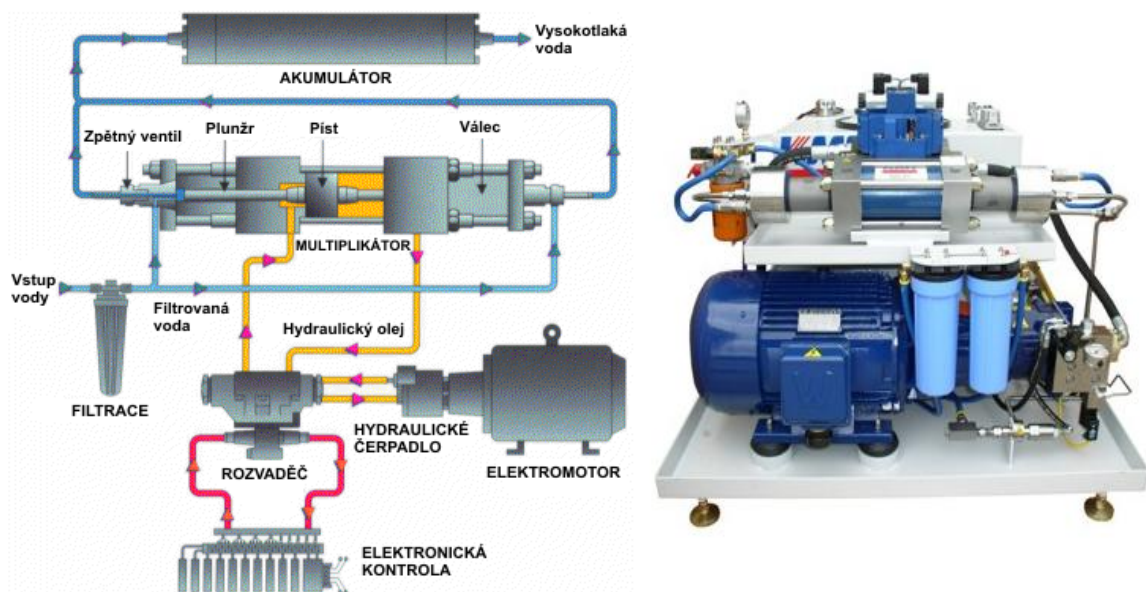
Pořízení recyklační jednotky ale není levnou záležitostí, a proto se vyplatí až při použití velkého množství abraziva. Pod pojmem velké množství se skrývá 30 a více tun abraziva spotřebovaného za měsíc. Pro spotřebitele nemající tak velkou spotřebu je však možnost recyklace ve specializovaných firmách. Některé z firem prodávající abraziva dokonce použítá abraziva i zpětně vykupují a recyklují, což je pro spotřebitele výhodnější, protože by případný odprodej použitého abraziva na skládku vyšel na několikanásobně vyšší sumu.²⁹

1.7 Části zařízení WJM a AWJ

Řezací zařízení se skládá z komponent, jejichž popis je uveden dále. Při výrobě jednotlivých částí zařízení jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu a přesnost, které se posléze odráží v celkové účinnosti a efektivnosti.

1.7.1 Hydraulická jednotka

Hydraulická jednotka se rozděluje do hydraulického a vodního okruhu. Hydraulický okruh se skládá z 18÷150 kW elektromotoru, hydraulického čerpadla, multiplikátoru a olejové nádrže. Do vodního okruhu zahrnujeme nízkotlaký a vysokotlaký filtr, jednocestné ventily, multiplikátor, akumulátor a řezací hlavu. Jednotlivé části jednotky jsou k vidění na obrázku 1.9. Úkolem hydraulické jednotky je vytvoření vysokého tlaku vodního paprsku pomocí hydraulických pump.⁴



Obr. 1.9 Hydraulická jednotka schematicky (vlevo) a reálně (vpravo)^{51,52}

1.7.2 Hydraulické čerpadlo

Hydraulické čerpadlo, které je poháněno elektromotorem s velmi vysokým výkonem, žene olej stlačený na tlak až 21 MPa do multiplikátoru. Vysokotlaký vodní paprsek se pak generuje hydraulickým zařízením s multiplikátorem nebo triplexovým plunžrem.^{4,6}

Triplexová čerpadla se používají pro nízké a střední tlaky do 280 MPa. Nad těmito tlaky čerpadla ztrácí svoji spolehlivost. Tlaků nad 280 MPa se docílí spojením triplexů s multiplikátorem.⁶

1.7.3 Multiplikátor

Multiplikátor převádí tlak oleje na vysoký tlak vody, jehož hodnota je běžně 380 MPa i více, záleží na poměru pracovních ploch multiplikátoru. Olej je přes elektronicky řízený rozvaděč přiváděn na jednu činnou plochu pístu. Jakmile dojde k posunu pístu do úvratí, sepne se koncový spínač, který je propojen s rozvaděčem. Rozvaděč přepne tok hydraulického oleje do druhé větve a dojde tak k působení oleje na druhou činnou plochu pístu, což vyvolá posun pístu v opačném směru. Během stlačování kapaliny na jedné straně multiplikátoru, dochází na straně druhé k nasávání čisté, odfiltrované vody. Poté dochází k obrácení směru pohybu pístu, což způsobí vytlačení vody i z této strany. Tento princip se neustále opakuje.^{4,6}

Z celkového zdvihu se kvůli stlačitelnosti vody zhruba prvních 15 % spotřebuje na kompresi vody, aniž by se nějaká stlačená voda dodávala do systému. Tím dochází v tlakovém systému ke značným tlakovým rázům, což se nepříjemně podepisuje na životnosti některých komponent systému.⁶

Z multiplikátoru jde voda do akumulátoru.⁴

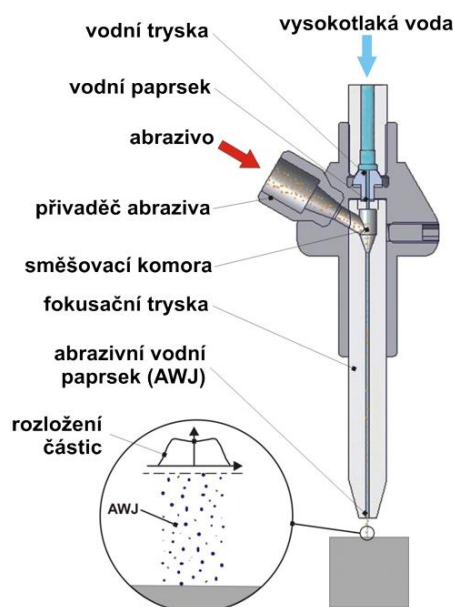
1.7.4 Akumulátor

Akumulátor tlaku, někdy též nazývaný jako tlumič pulzů, je důležitou částí nacházející se ve vysokotlakém okruhu. Tlumí rázy v kapalině vznikající pulsací vody při jejím stlačování. Jeho úkolem je tedy zajištění konstantního, rovnoměrného tlaku a rychlosti proudící vody.⁴

Obecně platí, že akumulátor zajišťuje rovnoměrnou dodávku vody v momentě, kdy se píst čerpadla nachází v jedné z úvratí a přechází do úvratě druhé. Bez použití akumulátoru by tedy docházelo k nepravidelné dodávce a následnému zanechání rýh na povrchu řezaného materiálu.⁶

1.7.5 Řezací hlava

Řezací hlava (obr. 1.10) je základní a klíčovou částí zařízení. Převádí vysokotlakou vodu na řezný nástroj, má vliv na kvalitu vodního paprsku i kvalitu řezu. Podle toho, o který způsob řezání se jedná, rozlišujeme řezací hlavy pro čistý vodní paprsek a řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek s radiálním nebo axiálním přívodem abraziva.⁴



Obr. 1.10 Řez řezací hlavou⁵³

Princip trysky s radiálním přívodem abraziva (obr. 1.11) je takový, že proudící paprsek na sebe strhává radiálně přiváděné abrazivo. Tyto trysky jsou snadněji vyrobitelné než trysky s axiálním přívodem a mohou se též používat pro WJM (vypne se pouze přísun abraziva).⁴

Trysky s axiálním přívodem abraziva mají velkou výhodu právě v axiálním přívodu. Tento způsob dávkování zlepšuje míšení s vodou, což zajišťuje menší opotřebení obvodu trysky. Abrazivo, které je přiváděno axiálně, se ve směšovací komoře mísí s vysokotlakým proudem vody,

jenž vstupuje do komory radiálně. Směs vysokotlaké vody a abraziva poté prochází přes trysku s průměrem $0,75 \pm 2,5$ mm.^{3,4}



Obr. 1.11 Opotřebená směšovací komora a diamantová tryska

Úpravy řezací hlavy a jejích součástí jsou důležité pro dosažení maximální účinnosti řezacího procesu. Právě proto je řezací hlava výrobcí neustále vylepšována. Je snaha o co nejdůkladnější promíchání abraziva s vodním paprskem. Je však obtížné sledovat tento turbulentní jev z blízké vzdálenosti, protože probíhá při velkých rychlostech paprsku, částice abraziva jsou poměrně malé a voda vytváří kolem paprsku vodní clonu, přes níž je špatně vidět.^{6,7}

1.7.6 Vodní tryska

Řezací hlava je osazena vodní tryskou, jejíž průměr se pohybuje od 0,075 mm.⁴ V trysce dochází k transformaci vysokotlaké vody na vodní paprsek s velmi vysokou rychlostí. Způsob a hlavně kvalita transformace se pak odráží v celkové účinnosti řezání.^{1,25}

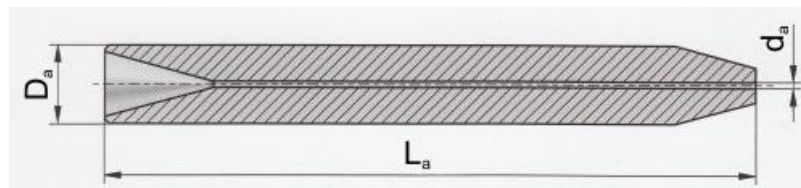
Vodní tryska z korozivzdorné oceli se používá při tlacích do 150 MPa, tryska ze slinutého karbidu či keramiky do 250 MPa. Tryska pro tlaky nad 250 MPa je vyráběna ze safíru, spékaného karbidu nebo diamantu. Safírová tryska má průměrnou životnost okolo 200 hodin. Po uplynutí této doby dochází k zanesení minerálními usazeninami a nečistotami. Diamantová tryska má narozdíl od safírové 10-ti násobně delší životnost, čímž se prodlužuje doba mezi údržbami, ale také 7÷10-ti násobně vyšší pořizovací náklady. Otvor diamantové trysky se může několikrát přečistit a tím se opětovně získá koherentní vysokotlaký proud.^{4,25}

1.7.7 Abrazivní (fokusační) tryska

Fokusační tryska (obr. 1.12) udává konečný tvar vystupujícímu paprsku. Základním požadavkem na tuto trysku je vysoká otěruvzdornost, kvůli čemuž je tryska vyráběna práškovou metalurgií z karbidu wolframu a kubického nitridu

boru.²⁵ Uváděné vysoceotěruvzdorné materiály přispívají k vyšší životnosti a spolehlivosti trysky a ke stabilnějšímu řezacímu procesu.⁶

Abráziva během řezání opotřebovávají svými nárazy vnitřní stěny výstupní (fokusační) trysky, čímž dochází ke tření a tím i k poklesu energie paprsku. V dnešní době je proto snaha vytvářet a používat materiály, které jsou vůči těmto opotřebením imunní. Na kvalitu řezání má totiž vliv i tvar výstupního otvoru v trysce. Jestliže dojde ke změně tvaru otvoru, tak dochází i k řezným nepřesnostem, což je nepřijatelné.⁶ Nárůst teploty trysky má za následek její větší erozivní opotřebení a také zvýšení turbulence směsi v trysce.^{4,20}



Obr. 1.12 Fokusační tryska⁵⁴

1.7.8 Filtry

Dalšími částmi zařízení jsou filtry. Slouží k filtraci kapaliny, většinou se jedná o běžně dostupnou vodu z kohoutku, a zachytávání nečistot o velikosti $0,5 \div 1,2 \mu\text{m}$, čímž ochraňují otvor v trysce před poškozením od cizích příměsí. Rozeznáváme dva druhy filtrů:

- nízkotlaký,
- vysokotlaký filtr.

Nízkotlaký filtr se nachází v přívodním potrubí před multiplikátorem, vysokotlaký je pak umístěn za akumulátorem v potrubí vysokotlakém.⁴ Výhodou technologie vodního paprsku je nezávadnost použité vody po přečištění.²⁰

1.7.9 Pracovní kapalina

Správná volba pracovní kapaliny ovlivňuje efektivnost celého řezného procesu. Jako pracovní kapalina je nejčastěji používána upravená voda splňující následující požadavky:

- nízká cena a snadná dostupnost,
- minimální vliv na jednotlivé části zařízení,
- nízké ztráty při průchodu potrubím a hadicemi, tzn. nízká viskozita,
- co nejnižší ztráty při formování paprsku.

Některé z předchozích požadavků jsou v rozporu s použitím vody, avšak aplikováním různých opatření se dají i tyto požadavky považovat za splnitelné.²⁵

1.7.10 Potrubí pro rozvod vody

Potrubí pro rozvod vody (obr. 1.13) je složeno z různých druhů armatur a spojovacích elementů, jež jsou v dnešní době většinou normalizované a standardizované. Materiál, ze kterého jsou vyrobeny, je většinou vysocepevnostní, korozivzdorná ocel. Průměr potrubí je 6÷14 mm. Potrubí musí být uzpůsobeno flexibilnímu pohybu řezací hlavy.^{4,25}



Obr. 1.13 Potrubí pro rozvod vody⁵⁵

Součástí potrubí jsou i jednocestné ventily a dvojcestný ventil. Jednocestné ventily se nachází v okruhu multiplikátoru. Dva z nich jsou na sací větvi, zabraňují navracení vody zpět do sacího traktu, a další dva jsou na větvi výtlačné, kde blokují tok tlakové vody zpátky do multiplikátoru.

Dvojcestným ventilem umístěným ve vysokotlakém potrubí před řezací hlavou se reguluje řezací proces. Ventil otevírá a uzavírá přívod tlakové vody.⁴

1.7.11 Systém úpravy vody

Systém pro úpravu vody zabraňuje zanášení otvoru v trysce a opotřebování potrubí pro rozvod vody a jeho částí. Voda používaná pro řezání musí být změkčená, deionizovaná a demineralizovaná, tzn. nesmí obsahovat minerály zapříčiňující samotné zanesení trysky. Použití neupravené vody má za důsledek několikanásobně kratší životnost vodní trysky. Systém pro úpravu vody ovlivňuje také kvalitu a rychlost řezu. Kvalita úpravy vody se může u jednotlivých výrobců zařízení lišit.^{4,25}

1.7.12 Aditiva

Aditiva se přidávají do běžné vody z důvodu vytvoření kvalitnějšího a lepšího paprsku. Jsou to přísady různých polymerů s lineárními molekulami

vytvářející dlouhé řetězce. Mezi používané polymery patří polyakrylamid (PAA) a polyetyloxid (PEO). Zmíněné polymery tvoří s vodou roztoky podmiňující vznik souvislého paprsku, u něhož nedochází při styku s obrobkem k roztržení. Výsledkem použití aditiv je tedy účinnější vodní paprsek, v němž nedochází k turbulencím, a tudíž má paprsek velice kompaktní jádro. Díky použití aditiv je pak možno vyrábět součásti s ostrými hranami.^{4,17}

Aditiva na bázi polymerů není vhodné používat u abrazivního řezání, neboť přispívají ke zvýšení soudržnosti paprsku, čímž ovšem zabraňují dobrému vmíchání abrazivních částic. Špatné promíchání má za následek snížení zrychlení abrazivních částic, a tím i menší účinnost řezání.⁶

Kromě aditiv přispívá k vytvoření kompaktnějšího paprsku také fokusační tryska. Čím je delší, tím je paprsek kompaktnější, avšak dochází u něho k většímu tření, což vede ke snížení výstupní rychlosti paprsku.⁶

1.7.13 Lapač vody

Lapač vody je nádoba umístěná pod obrobkem. Jeho hlavní funkcí je zachytávání vodního paprsku (převaděč energie vodního paprsku) a třísek. Slouží též jako tlumič hluku. Lapač musí být robustní a musí mít dlouhou životnost. Jeho rozměry se odvíjí od rozměrů a typu stroje, požadavků na životní prostředí, atd. Rozeznáváme lapače mobilní a stacionární (nádrže).^{4,6}

Přemístitelné lapače jsou velice kompaktní, zabraňují nechtěnému pronikání paprsku do dalších podkladových materiálů. Používají se při řezání vodním paprskem většinou spojeným s robotickou rukou. Převážně jsou konstruovány z trubky naplněnou ocelovými kuličkami. Ocelové kuličky bývají během procesu znehodnoceny a proto se musí často měnit za nové.^{4,6}

Stacionární lapače tvoří součást stacionárních řezacích strojů. Jejich velikost je dána řezací plochou stroje. Hloubka lapače musí být taková, aby došlo ke zlomení paprsku ještě před tím, než dosáhne na dno lapače. Lapače mohou být naplněny vodou nebo vybaveny sloty přispívajícími k roztržení paprsku. Hloubka lapače závisí na pracovním tlaku paprsku a běžně se pohybuje mezi 300÷600 mm. V případech kdy je potřebná ještě nižší hloubka, se do lapače umísťují železné nebo keramické kuličky zajišťující větší roztržení paprsku.^{4,6,25}

1.8 Přednosti technologie vodního paprsku

- Vysoká energetická účinnost (80%) v porovnání s ostatními dělicími technologiemi,
- řezné hrany nejsou zatíženy zbytkovým napětím, jsou bez mechanické i tepelné deformace a bez mikrotrhlin,
- jedním vysokotlakým čerpadlem lze pohánět až 70 zařízení WJM nebo 8 zařízení AWJ,
- malá citlivost na vzdálenost trysky od materiálu umožňuje řezat i vlnité střešní krytiny,

- dvojnásobný řezný nástroj – vrtání i řezání jedním nástrojem,
- obrobky nemusí být pevně upínány,
- dráha řezací hlavy je řízena počítačem, což umožňuje řezat různé tvary,
- v porovnání s plamenovým a laserovým řezáním nevytváří vodní paprsek na řezaném materiálu tvrdou, těžce obrobitelnou kůru,
- některé materiály (titan, kompozity, atd.) s tloušťkou do 10 mm je možno řezat s přesností $\pm 0,05$ mm,
- AWJ metoda umožňuje řezat materiály tloušťky až 300 mm s přesností $\pm 0,13$,
- minimální průměr díry vyrobené technologií AWJ je $0,2 \pm 0,03$ mm (závisí na průměru abrazivního paprsku),
- při řezání se neuvolňují jedovaté páry ani zplodiny, řezací proces je bezprašný a šetrný k životnímu prostředí, nedochází při něm ke znečišťování ovzduší,
- tyto metody lze použít i pro čištění a tryskání těžkoobrobitelných materiálů,
- řez je bez otřepů na dolní straně,
- proces řezání je snadno automatizovatelný a řezací hlavou může být osazena např. robotická ruka,^{4,6,26}
- minimální obrábění řezaných dílců,¹⁷
- zařízení lze implementovat do automatizovaného výrobního procesu,
- úběr materiálů je závislý jen minimálně na mechanických vlastnostech řezaného materiálu.¹⁹

1.9 Nevýhody technologie vodního paprsku

- Materiál v okolí řezu nemůže mít zrcadlový povrch,
- hluk doprovázející řezání,
- cena abraziva udávající z velké části celkovou cenu vyrobeného kusu,
- úkosity a striace na řezných hranách,
- spolehlivost celého zařízení se odvíjí od životnosti trysek,
- zpoždění paprsku a jeho kuželovitý tvar,⁶
- různá řezací rychlost pro různé materiály,¹⁷
- vznik koroze u materiálů jí podléhajících,³
- nelze řezat materiály náchylné na kontakt s vodou (bobtnání) a bezpečnostní automobilová kalená skla,
- rádius u vnitřních rohů se odvíjí od průměru paprsku,
- malé dílce musí být zajištěny proti propadu do lapače – můstky (musí se následně odstranit).^{19,26}

1.10 Použití vodního paprsku v průmyslu

Technologie vodního paprsku je v současné době hojně používána v různých odvětvích průmyslu, což potvrzuje i následující přehled:

- strojírenství – dělení různých kovových a nekovových materiálů,
- potravinářský průmysl – dělení masa, ovoce a zeleniny, sýrů, ať už v syrovém nebo zmraženém stavu,
- elektronický a elektrotechnický průmysl – řezání desek tištěných spojů, keramiky, permanentních magnetů,
- jaderná energetika – dekontaminace a odstraňování železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny,
- stavebnictví – dělení izolačních materiálů, betonu, keramiky,
- chemický průmysl – řezání výbušných látek (dynamit),
- papírenský průmysl – řezání papíru a fólií,
- obuvnický a gumárenský průmysl – řezání kůže, gumy, plastů,
- sklářský průmysl – řezání a matování skla,
- báňský průmysl – těžba a třídění hornin.^{3,26}

1.11 Porovnání vodního paprsku s ostatními technologiemi

Technologie vodního paprsku má v porovnání s jinými nekonvenčními technologiemi řadu výhod, což potvrzuje následující tabulka:

Tab. 1.1 Porovnávací tabulka³

Metoda	Plazma	Laser	Vodní paprsek
Dělitelné materiály	pouze železné a neželezné kovy	všechny, mimo kompozitů a materiálů s vysokou světelnou odrazivostí	všechny materiály
Teplota řezu	horký řez	teplý řez	studený řez
Vliv teploty řezu na materiál	velký	malý	není
Změny struktury materiálu v místě řezu	velké	malé	žádné
Kolmost řezu	silný odklon	mírný odklon	
Drsnost povrchu obrobené plochy	výrazné striace (rýhy)	nízká drsnost	lze dosáhnout nízké drsnosti (závisí na podmínkách)
Výronek v řezné spáře	možno bez výronku	většinou bez výronku	vždy bez výronku
Tvrdost řezaného materiálu	nemá vliv na rychlost řezání		mírně ovlivňuje rychlost řezání
Řezání plastů	není možné	problematické (toxicita)	je možné
Řezání kompozitů	je možné, pokud jsou na bázi kovů	je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	je velmi vhodné
Řezání keramiky, skla, kamene	není možné	velmi omezené	je velmi vhodné s výjimkou kalených skel
Reliéfní obrábění	není možné	je možné	vyjimečně
Velikost dílce	velké dílce	malé i velké dílce	
Tloušťka materiálu	střední a velká	malá a střední	velmi široký rozsah
Složitost tvaru	jednoduché tvary	komplikované tvary	
Prústřel	je možný		
Vznik plyných emisí	velké množství	malé množství	bez vývinu nebo jen při prústřelu
Vznik oxidických povlaků	vznikají	pouze při řezání s kyslíkem	pouze u materiálů korodujících při styku s vodou

2 ROZBOR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘÍZENÍ A ZADÁVÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH DAT

Během posledního desetiletí došlo k vývinu metody řezání vodním paprskem z metody používané pouze jako hrubého dělicího nástroje, po jehož práci muselo následovat ještě obrábění součásti, na metodu velice přesnou a nepostradatelnou. To s sebou přineslo i změny v přesnosti řízení pohybu řezací hlavy. Přesnost polohování řezací hlavy se odvíjí od tuhosti rámu stolu a přesnosti lineárních kuličkových šroubů. Pohyby jsou uskutečňovány pomocí moderních řídicích CNC programů a CNC programovaných pracovních stolů. Rozvoj výpočetní techniky a softwaru se promítá i v této oblasti a zapříčiňuje neustálý vývoj.⁶

Přesnost dosahovaná při řezání se odvíjí mimo jiné od použitého softwaru. Paprsek se během procesu nechová konstantně, dochází k jeho vychylování a rozšiřování. Zmíněné vady je potřeba odstranit pomocí softwaru. Dnešní softwary obsahují matematické modely simulující proces řezání, čímž je možno předpokládat chování paprsku během řezání. Díky tomu pak dochází k optimalizované změně posuvové rychlosti, která se odráží na výsledné výrobní přesnosti. Na obrázku 2.1 je možno vidět optimalizované posuvové rychlosti znázorněné barevným spektrem (tmavě modrá – vysoká rychlost, zelená – nízká posuvová rychlost).²⁸



Obr. 2.1 Změny posuvových rychlostí při řezání⁵⁶

Správně zvolené řezné modely snižují čas řezání a tím i výrobní náklady. Softwary mohou dle přání zákazníka být vybaveny buďto částečným nebo plným softwarem obsahujícím například CAD modul a řezné modely.²⁸

V počátcích programování bylo nutné uživatelem vytvořit konturu součásti ručně a ke každému bodu kontury zadávat rychlost posuvu. Přitom se musel brát ohled na tloušťku a typ materiálu, což vyžadovalo určitou kvalifikaci a zkušenost obsluhy. Řízení pomocí G-kódu se v dnešní době už příliš nepoužívá, protože kvalita povrchu nebyla vyhovující. Jedinou oblastí, v níž je stále užíván, je hrubování součástí větších tloušťek, u nichž je předpoklad, že se budou dále opracovávat.²⁸

Další možností vytvoření řezného plánu, je import geometrie součásti přímo ze souborů *.DXF. Na základě tohoto souboru pak CAD-CAM vytvoří

model procesu řezání a automaticky vygeneruje pro řezaný materiál o určité tloušťce rychlost posuvu v G-kódu. Snížení rychlosti v rohu je řešeno rozdělením dráhy na určité segmenty, v nichž je pak snižována rychlost.²⁸

Poslední možností je software, který je univerzální a dokáže přijímat geometrii z různých CAD-CAM systémů a je jím možno řídit téměř všechny řezací stroje. Tyto systémy automaticky nastavují posuvovou rychlost podle materiálu, tloušťky a geometrie vyráběné součásti. Zároveň v závislosti na rychlosti naklápějí řeznou hlavu, což snižuje kuželovitosti paprsku a vytváří tak kolmý řez.²⁸

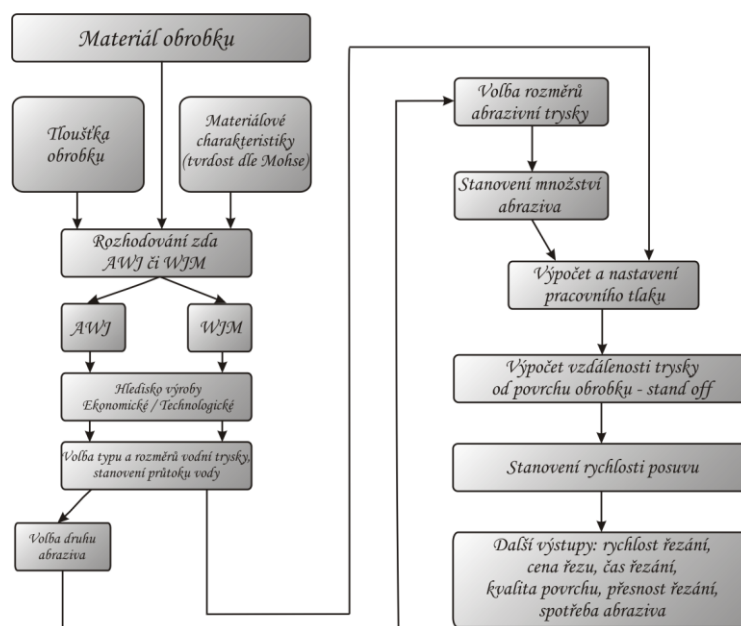
Nově vyvíjené řídicí počítačové systémy jsou spolehlivější, uživatelsky komfortnější a přijatelnější než systémy používané před několika desítkami let. Standardem je počítačové řízení dvou os (X,Y) a ruční řízení třetí osy (Z), což slouží k nastavení vzdálenosti trysky od materiálu (stand-off). V současnosti jsou na trhu stroje, u nichž je řízeno os osm (3 na řezací hlavě a portálu stolu, 2 na obráběném materiálu).⁶

Nynější softwary v sobě zahrnují moduly, jenž následně aplikují při řezném procesu. Mezi významné moduly zahrnujeme:

- možnost snižování řezné rychlosti při řezání křivek a rohů,
- software zná pro konkrétní materiál hodnotu zpoždění paprsku, kterou následně přenáší do programu,
- software uvažuje při řezání opotřebení výstupní trysky.

Opotřebení trysky se projevuje narůstajícím průměrem nástroje, což je v systému kompenzováno odchýlením nástroje od řezné hrany.⁶

Řezný proces je ovlivněn celou řadou vstupních parametrů podílejících se jak na procesu samotném, tak i na konečném výrobku. Vstupní parametry vytváří postup charakterizující postupně řezný proces (obr. 2.2).¹⁸



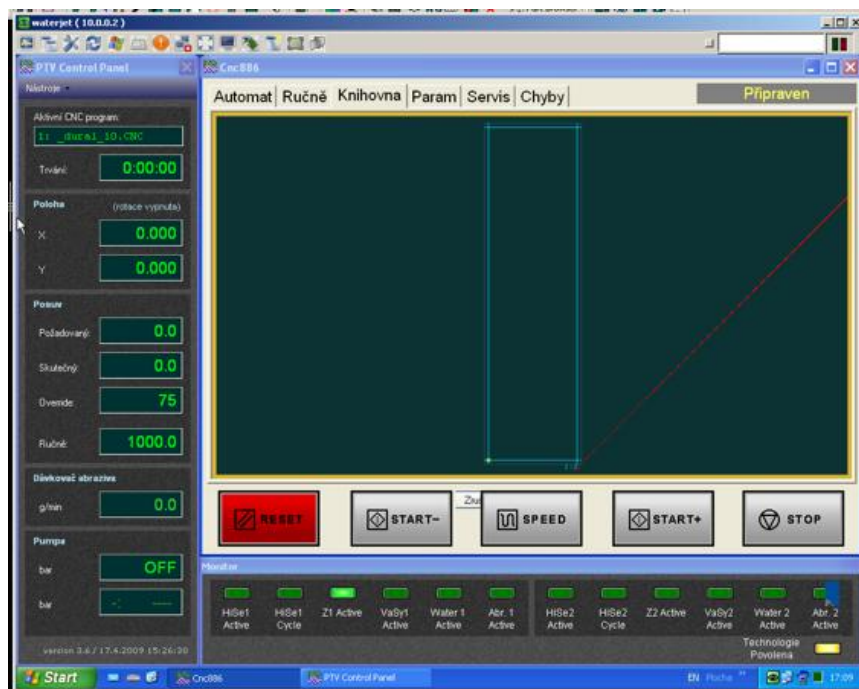
Obr. 2.2 Rozhodovací postup¹⁸

2.1 Řídicí systém CNC886

Řídicí systém slouží přímo k ovládání řezného procesu. Je v něm možno nastavovat různé technologické parametry, počínaje volbou nulového bodu a konče množstvím abraziva.

Uváděný řídicí systém CNC886 je univerzální řídicí systém postavený na bázi Windows. Tím se získává možnost použití několika dalších programů souvisejících s výrobním programem, fakturacemi, kalkulacemi a dalšími činnostmi. Tyto programy mohou být mezi sebou vzájemně propojené, což je také jistou výhodou zlepšující flexibilitu celého výrobního procesu.³²

Výstup řídicího systému je zobrazován na obrazovce, která je součástí ovládacího pultu. Buďto může být obrazovka dotyková nebo bezdotyková ovládaná klasicky myší a klávesnicí.³²



Obr. 2.3 Panel tlačítek

Základní okno tohoto systému je rozděleno do tří částí – karty se záložkami, panelu tlačítek a stavového okna. Stavové okno zobrazuje aktuální stav stroje. Typ záložek je patrný z předchozího obrázku 2.3. V jednotlivých záložkách je možno nastavovat různé parametry. V záložce automat je přehled jednotlivých os dostupných pro daný stroj. V této záložce je též možno nastavovat korekce a odladovat program, ať už řádek pořádku anebo celý. Je též možno spouštět režim tzv. Z pozice, což slouží ke zjišťování přesnosti stroje, při němž program simuluje programované dráhy a porovnává polohu drah skutečných a požadovaných.³²

Záložka knihovna je určena pro načítání a správu programů, zobrazování řezné geometrie s nastaveným nájezdem a přejezdem řezací hlavy, nulovým bodem. Záložka param je pak určena pro nastavení nástrojových korekcí a dalšího nastavení. Předposlední záložka – servis, slouží

k diagnostice stroje. V poslední záložce s názvem chyby se zobrazují hlášení o chybových stavech a dalších problémech stroje.³²

Další částí základního okna je již zmiňovaný panel tlačítek. První tlačítko (RESET) zastavuje právě probíhající operaci. Tlačítko START- umožňuje použití ručních pohybů os vzad. Redukce rychlosti rychloposuvů se provádí tlačítkem SPEED. Jeho použitím se rychloposuvy 10x zpomalí, což je využitelné zejména při odladování programů.³²

START+ spouští ruční pohyby os vpřed, program nebo znovu spouští program po zastavení příkazem M0. Probíhající program se zastavuje i použitím tlačítka STOP.³²

V průběhu řezného procesu je na obrazovce na kontuře obráběné součásti zobrazována aktuální poloha řezací hlavy. Dále jsou pak v levé části obrazovky zobrazovány údaje o řezných parametrech (posuv, poloha řezací hlavy v X a Y souřadnicích, množství abraziva a pracovní tlak).³²

2.2 Software pro řezací stoly

Druh použitého softwaru se odvíjí od výrobce vyrábějícího a dodávajícího vlastní řezací zařízení. Některé softwary je však možno najít u více než jednoho výrobce, viz. např. IGEMS.

2.2.1 IGEMS R9

IGEMS je software sloužící k vytvoření požadovaných tvarů řezané součásti. Uživatelsky je tento software přístupný, protože je na ovládání podobný jako AutoCAD. Samozřejmostí je knihovna s databází všech dostupných materiálů. Volbou materiálu, jeho tloušťky a kvalitou řezu dochází automaticky k nastavení řezných parametrů.³³

Geometrie může být do programu buďto načtena ze stávajícího souboru *.DXF či *.DWG, nebo může být v IGEMSu přímo nakreslena. IGEMS má v sobě implementovanou knihovnu se základními tvary, jež mohou být před vložením do pracovního prostoru editovány.³³

IGEMS obsahuje také modul určený pro import souborů mezi jinými CAD/CAM systémy. Je možno v něm otevřít soubory s následujícími příponami:

- *.CBF (CAMbAL V3),
- *.GEO (TOPS),
- *.TAG (Taglio),
- *.ORD (Flow),
- *.ORD (OMAX),
- *.PRT (ADMICUT V1),
- *.WMF (Windows Metafile),
- *.IGS (IGES),
- *.PS (Postscript Level 1),
- *.EPS (Postscript Level 1).³³

Pomocí jednoho z modulů lze zpětně z CNC programu vytvořit geometrii součásti, pomocí dalšího modulu, tzv. NC-Readeru, je možné importovat soubory do postprocessingu, z nichž je pak vytvořena mapa ukazující dráhy nástroje.³³

Další funkcí programu IGEMS je soubor CAD příkazů usnadňujících přípravu geometrie. Mezi zmíněné příkazy patří funkce automaticky uzavírající otevřené polygony, překrývající se čáry, příkaz vytvářející z polygonu několika malých úseček aproximaci jedinou křivkou v určité toleranci, atd. Zajímavou funkcí je funkce převádění, která z neskenovaných výkresů nebo obrázků (formát *.jpg nebo *.bmp) vytvoří CAD geometrii, z níž je později vytvořen CNC kód.^{33,34}

Jednou z nejpodstatnějších částí tohoto softwaru je CAM modul, jenž slouží k převodu zadané geometrie na dráhy řezací hlavy. Dráha může být vytvořena ručně nebo automaticky. Při automatickém vytváření se počítá optimální dráha nástroje, což v případě ručního režimu vyžaduje jistou zkušenost. Dále je možno v CAM modulu generovat výstupní zprávy, jež mohou v případě individuálního firemního nastavení sloužit i jako faktury. Samozřejmostí je nastavení místa pro vstup a výstup paprsku směrem ke kontuře, stejně tak jako tvar vstupní a výstupní křivky. U řezání malých součástí, které by po vyřezání mohly propadnout přes rošt do nádrže, se na součásti neskončí v místě vstupu ale v určité vzdálenosti od něho. Tím dojde k nedořezání a vytvoření tzv. můstku, jenž drží řezanou součást. Po ukončení řezacího cyklu se musí součást vylomit a můstek odstranit.^{33,34}

Pro uživatele je zcela nezbytné nastavení řezných parametrů, k čemuž slouží IGEMS AWJ Option. Pro určitý materiál s danou tloušťkou jsou v tomto modulu nastaveny parametry pro rohové zpomalování a následně zrychlování a pro děrování (typ, tlak a průměr paprsku, čas děrování, atd.).^{33,34}

Zajímavostí je modul, díky němuž je možné snížit zkosení na plochých součástech, čímž se dosáhne kolmosti dělené hrany a povrchu materiálu. Řezací stůl však musí být osazen pětiosou řezací hlavou, aby tento modul mohl být použit. Použití tohoto modulu se využívá i při řezání úkosů na součástech, které se budou následně svařovat. Díky tomu se ušetří při následné přípravě svarových ploch. Modul je vybaven i podmodulem používaným k eliminaci kuželovitosti paprsku. Za pomoci softwaru se při řezání v závislosti na posuvové rychlosti automaticky naklání řezná hlava, z čehož vyplývá, že se tímto způsobem dají vyrábět velice přesné díly i větších tloušťek.^{33,34}

IGEMS má v sobě vestavěny ještě další moduly jako modul pro automatické umístění součástek do zadaného prostoru s co největším využitím materiálu (modul zvláště pro pravoúhlé a kruhové součásti), sledování odřezků materiálů na skladě (využitelné nejen v kusové výrobě), generátor geometrie ozubených kol a rozvinutého tvaru trubek a profilů, modul usnadňující vyřezávání různých reliéfů do dlažeb, vytváření puzzle, a dále třeba modul pro rozřezávání zbytků tabulí z důvodu lepší skladovatelnosti.^{33,34}

Z předchozích uvedených skutečností je patrné, že software IGEMS R9 je vysoce komplexní produkt.

2.2.2 FlowMaster

FlowMaster je dalším ze softwarů použitelných k řízení zařízení pro řezání vodním paprskem. Funguje na bázi Windows. Stejně jako u IGEMSu je i ve FlowMasteru knihovna s materiály. Geometrie může být opět načtena ze souboru (formáty *.DXF, *.IGS, skenované obrázky a další) nebo nakreslena v samotném programu. Ke stanovení řezných podmínek je potřebné zadat kvalitu řezu, materiál a jeho tloušťku. Zadáním těchto parametrů dojde k automatickému nastavení optimálních řezných parametrů. Použitím Dynamic Waterjet je i u tohoto softwaru možné minimalizovat úkos na řezné hraně.³⁵

FlowMaster v sobě zahrnuje několik dalších modulů. Prvním z nich je FlowPATH. Tento program obsahuje funkci pro redukování velkého množství entit a vyhlazení geometrického průběhu křivek, dále knihovnu základních uživatelem upravovatelných tvarů, funkci pro vyhnutí se přejezdům nad součástmi, které již byly řezány. Tato funkce má své opodstatnění, neboť po odřezání součásti může dojít k jejímu nadzvednutí či vyklopení. V případě nevybavenosti softwaru touto funkcí, a malou vzdáleností hlavy nad materiálem, může nastat kontakt součásti a právě přejíždějící hlavy, což většinou vede k poškození abrazivní trysky.³⁵

Druhým modulem je FlowNEST napomáhající umístování dílů na plochu materiálu. Jeho výhodou je možnost vyhledávání dílů s podobnou geometrií a následné umístování dílů téměř vedle sebe, čímž se snižují řezné a přejezdové časy, zvyšuje koeficient využití materiálu a produktivita. Jestliže se při řezání používá funkce eliminování řezného úkosu, tak nelze použít tohoto umístování.³⁵

Posledním modulem FlowMasteru je FlowCUT. Tento modul slouží k ovládání čerpadla, řezací hlavy a souřadnicového stolu. Zadává se v něm též kvalita řezu. Jeho zajímavým řešením je snižování tlaku při průstřelu křehkých materiálů a následné opětovné navýšení. Tento modul zajišťuje programovatelnost osy Z při řezání, díky čemuž se dají dělit materiály s proměnnou tloušťkou, vlnité střešní krytiny a další.³⁵

2.2.3 Další softwary

Do dalších používaných softwarů jsou zahrnuty softwary, jež jsou v praxi též často používány, ale v rámci této práce nebudou podrobně zmíněny. Mezi některé z nich patří AsperWin, OMAX Intelli-MAX, WARDCAM a další. Zmíněné softwary jsou si často velice podobné a poskytují stejné funkce jako výše popisované softwary.

3 Vliv technologických parametrů na jakost povrchu a přesnost obrábění

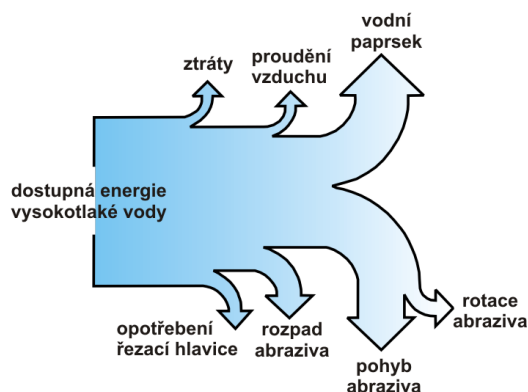
3.1 Mechanismus vytváření nástroje

Vytváření vysokorychlostního abrazivního paprsku může být chápáno jako nelineární dynamický proces. Díky opotřebení komponent, a tudíž změně geometrie, je proces vytváření nástroje závislý na čase. Mezi faktory mající vliv na formování paprsku zahrnujeme:

- geometrii řezací hlavy,
- tlak vody,
- distribuci a hmotnostní tok abraziva,
- hmotnostní tok vzduchu.¹

Výchozí tvar abrazivního paprsku je dán průměrem abrazivní trysky, tvarem a velikostí abrazivních částic a hmotnostním tokem abraziva udávaného v $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$. Pracovní povrch paprsku je složen z vody, abrazivních zrn a také vzduchu. Abrazivní vodní paprsek je tedy směs vytvořená z paprsku vody, abraziva a nezanedbatelného množství vzduchu. Tato směs poté vystupuje nadzvukovou rychlostí z fokusační trubice a vytváří řezný nástroj. Struktura paprsku se dá charakterizovat fázovým rozložením jednotlivých částic a jejich rychlostními profily.¹

Celková energie vysokotlaké vody se během procesu rozděluje na několik subenergií (obr. 3.1), mezi něž patří kinetická energie vodního paprsku, kinetická energie proudu vzduchu a kinetická energie abrazivních částic. Kinetická energie abrazivních částic se nepodílí pouze na pohybu abraziva, ale malou měrou přispívá i k rotaci abraziva. Energie vysokotlaké vody je také částečně spotřebována na opotřebení řezací hlavy a rozštěpení abraziva. Rozdělení celkové energie na subenergie ukazuje obrázek níže:¹



Obr. 3.1 Rozdělení energie při formování abrazivního paprsku¹

Během formování vysokorychlostního vodního paprsku dochází k rozptýlení až 55 % vstupní energie. Hodnota rozptýlení je závislá na použitém tlaku. Při použití středních rychlostí paprsku ($\sim 600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) je

zaručena optimální přeměna energie a tedy i nižší ztráty. V průběhu míchání a udělování zrychlení částicím abraziva dochází ke ztrátám mezi 30÷70 %. Čím vyšší je rychlost paprsku, tím jsou tyto ztráty nižší.³¹

3.2 Mechanismus odebírání materiálu

Do provozních charakteristik vodního i abrazivního paprsku, které ovlivňují odebírání materiálu, tím pádem i účinnost procesu a kvalitu řezaného povrchu, patří:

- vzdálenost mezi tryskou a obráběným materiálem,
- tlak vody, rozměry díry ve trysce, rychlost proudění,
- úhel sklonu paprsku,
- druh, tvrdost a velikost abraziva (u metody AWJ).⁴

Rychlost vodního paprsku je odvozena z Bernoulliho rovnice pro proudění nestlačitelné kapaliny a vypočte se dle vztahu (3.1):⁴

$$v^2 = \frac{2p}{\rho} \quad (3.1)$$

Kde: v – rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
p – tlak kapaliny	[MPa]
ρ – hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]

Ze vzorce 3.1 plyne, že tlak v kapalině je přímoúměrný druhé mocnině rychlosti proudění paprsku. Tato rychlost je pak úměrná kinetické energii částice s hmotností m. Díky tomuto faktu tlak paprsku vody přímo určuje kinetickou energii své částice. Při vyšších tlacích je tedy i kinetická energie paprsku vyšší a dochází díky tomu ke snadnějšímu porušování vazeb mezi molekulami v děleném materiálu.⁴

Z předchozího vyplývá, že čím vyšší bude tvrdost řezaného materiálu, tím vyšší musí být i tlak vodního paprsku. Při zvýšení tlaku vody dochází i ke zvýšení rychlosti proudění vody a tudíž rychlosti paprsku, ke zvýšení celkové energie ve trysce a k navýšení schopnosti pronikání do materiálu, tzn. hloubce řezu. Tlak vodního paprsku ovlivňuje vedle odebírání také mechanismus řezání, zlepšuje se kvalita řezných hran. Rychlost proudění ovlivňuje pouze odebírání materiálu.⁴

3.2.1 Makroskopický pohled na úběr materiálu

Z pohledu tribologie je úběr vodním i abrazivním paprskem možný díky vzájemnému působení dvou médií, a sice vody a řezaného materiálu. Úběr se uskutečňuje pomocí eroze, jejíž podstata je v nárazu pevných částic na povrch materiálu. Důležitým faktorem erozního procesu je druh materiálu,

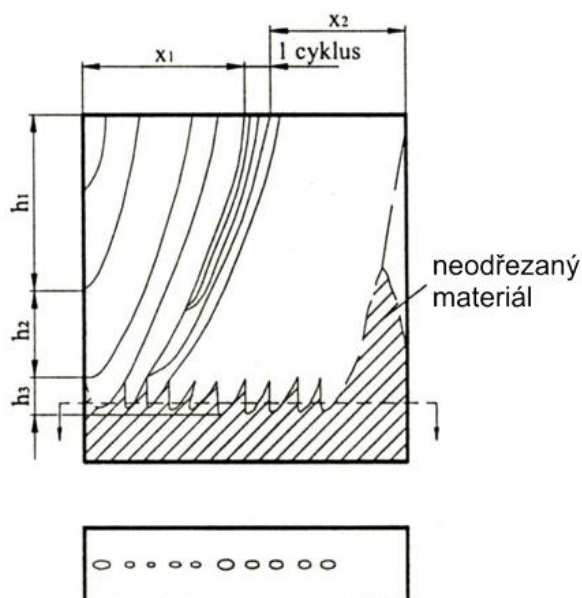
zejména jeho pevnostní charakteristiky a úhel nárazu částic na materiál α (tab. 3.1), který rozhoduje o převažujícím způsobu opotřebení.^{4,20}

Tab. 3.1 Reakce materiálu na různé úhly dopadu částic⁴

materiál	úhel nárazu částic α		
	$<20^\circ$	45°	90°
tvárný	maximální řezné opotřebení	smíšený režim	maximální deformační opotřebení
křehký	velmi malá eroze	střední eroze	maximální eroze

Dvěma hlavními rysy posuzovanými při odebrání materiálu vysokorychlostním abrazivním vodním paprskem jsou topografie a tvar povrchu. Mechanismus odebrání materiálu je založen na odebrání materiálu vysokorychlostním hydroabrazivním paprskem působícím na materiál. Při jeho působení dochází k erozivnímu opotřebení řezaného materiálu. Proces erozivního opotřebení je závislý na pevnostních charakteristikách materiálu a je úzce spjatý s nárazy abraziva na obrobek a s efektem vklínování (voda otevírá trhliny a zrychluje tak jejich šíření) vodního paprsku do povrchu řezaného materiálu. Jelikož abrazivní částice vytváří klíny, je abrazivní vodní paprsek nazýván mnohahklínovým nástrojem.¹

Při řezání působí částice na povrch obrobku a způsobují tak jeho úběr. Princip mechanismu makroskopického úběru popisuje následující obrázek:



Obr. 3.2 Kontura obrobenej plochy¹

Řezaná plocha pomocí vodního paprsku se dá rozdělit na několik podoblastí. První oblastí je oblast vstupu, druhá je oblast ustáleného řezání a poslední oblastí je oblast výstupu paprsku. V oblasti vstupu paprsku do materiálu (uvažováno při novém zářezu vedoucím z místa mimo obrobek, nikoliv při tzv. nástřelu) dochází k rovnoměrnému i nerovnoměrnému dělení,

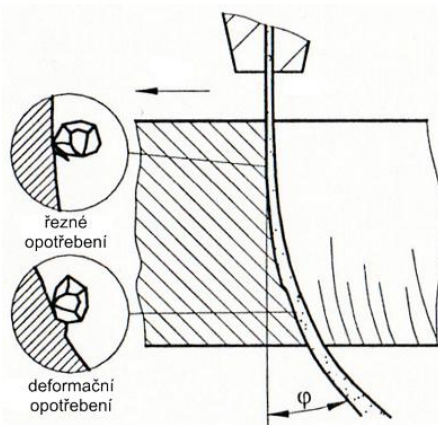
čímž se dosáhne maximální hloubky řezu. Tato oblast tedy končí v okamžiku, kdy paprsek dosáhne své maximální hloubky. Poté přechází do stavu ustáleného řezání, které je uvažováno po dobu, kdy paprsek dosahuje alespoň hloubky řezného opotřebením. Po ustáleném stavu přichází poslední oblast, a to oblast výstupu paprsku z materiálu.⁴

Hloubka řezu se dá rozčlenit na několik částí, které se od sebe liší způsobem odstranění materiálu. Hloubka h_1 je nazývána horní erozní zónou, ve které převládá řezné opotřebením materiálu, a v níž paprsek vykonává ustálený řezný proces. Rychlost posuvu paprsku je v této oblasti rovna rychlosti úběru materiálu.¹

Horní erozní zóna je mírně zaoblená, tudíž netvoří s povrchem materiálu ostrou hranu. Zaoblenost je způsobena dopadajícím paprskem, který způsobí v materiálu plastickou deformaci.³⁷

Pod hranicí hloubky h_1 se paprsek začíná zaoblovat a měnit směr, díky čemuž dochází i ke změně úhlu dopadu částic. Změna úhlu má za následek zánik řezného opotřebením. V oblasti h_2 se tedy uplatňuje deformační způsob odebírání materiálu (obr. 3.3). Jakmile dojde k posunutí paprsku o krok x_1 , tak dojde i k zániku tohoto způsobu odebírání.¹

Jestliže se paprsek dostane až na hloubku h_3 , tak dochází k jeho vychylování směrem nahoru. Tím že částice začínají působit proti původnímu směru paprsku, čímž jdou proti částicím ještě nevychýleným, dostávají díky rozdílné hybnosti další energii, kterou posléze využívají k dalšímu odstraňování materiálu. Kvůli zakřivení a nestabilitě proudu v erozní zóně už ale nedojde k úplnému prořezu materiálu.¹



Obr. 3.3 Druhy opotřebením¹

Z uvedeného vyplývá, že nejlepší účinnosti a tím i kvality povrchu se dosahuje v erozní zóně v hloubce h_1 . Celková hloubka řezu je součtem zón řezného a deformačního opotřebením. Vyjadřuje maximální hloubku, v níž může ještě paprsek řezat bez ztráty účinnosti.^{1,4}

Je zkoumáno použití kavitačního vodního paprsku, u kterého se využívají bublinky obsažené v paprsku vody. Bublinky při kontaktu s povrchem expandují, čímž zajišťují větší úběr materiálu. Pokusy prokázaly u řezání zcela ponořeného materiálu zvětšení odebírané tloušťky až o 100 % než je tomu

u běžného řezání. V tomto případě je kavitace užitečná. Ke kavitaci však dochází i ve vysokotlakém systému za pomoci tlakových napětí, která ve vodě vytváří bublinky. Bublinky při kontaktu s jednotlivými komponentami systému, zejména tryskami, způsobují jejich nadměrné opotřebení. Proto je snaha o úplné odstranění kavitačních bublin ze systému přípravy nástroje.¹⁴

3.2.2 Mikroskopický pohled na úběr materiálu

Hlavní mechanismy úběru materiálu jsou dělení, únava, vznik křehkých lomů a tavení. Tyto mechanismy působí ve vzájemných interakcích a vyskytují se během dělení metodou AWJ. Vliv těchto parametrů na řezný proces závisí na několika faktorech:

- kinetická energie a tvar částic,
- úhel nárazu částic na materiál,
- vlastnosti obráběného materiálu.¹

Během procesu mikrodělení dochází v materiálu k lokálnímu úběru. Práce spotřebovaná k tomuto úběru, se transformuje na tepelnou energii. Velikost této energie je ale obtížně vyčíslitelná. Platí, že část z tepelné energie přechází do paprsku a vychází z řezaného místa ven a část energie přechází kondukcí do obrobku.⁴

Finnieho model popisuje mechanismus eroze obráběného materiálu za působení abrazivních částic z pohledu mikrodělení. Základní myšlenkou Finnieho modelu je odstranění určitého množství materiálu jednou abrazivní částicí. Model je vyjádřen následujícím vztahem:¹

$$V_M = \frac{m_p \cdot v_a^2}{\sigma_f \cdot k \cdot \psi} \cdot f(\varphi) \quad (3.2)$$

Kde: V_M – množství odebraného materiálu	[m ³]
m_p – hmotnost částice	[kg]
v_a – rychlost částice	[m·s ⁻¹]
σ_f – napětí materiálu	[Pa]
k – poměr vertikální a horizontální síly	[-]
$f(\varphi)$ – funkce úhlu, pod níž zasáhne abrazivní částice materiál	[-]
ψ – funkce úhlu, pod níž zasáhne abrazivní částice materiál, $\psi = \frac{L_t}{y_t}$ (obvykle 2)	[-]
L_t – délka pronikání částice do povrchu	[mm]
y_t – hloubka proniknutí	[mm]

Úhel nárazu částice na materiál je dán pozicí paprsku a roviny materiálu. Je definován jako úhel odklonu mezi normálou vektoru posuvové rychlosti a vektorem rychlosti paprsku. V zóně řezného opotřebení je tento úhel malý (ostrý) a dochází v ní k rozrývání materiálu pomocí abraziva.

Nejprve částice abraziva narazí na materiál a vyryje v něm rýhu, poté se odrazí a tím se dostává pryč ze záběru. Částice materiál odstraňuje pouze smykovým a tahovým namáháním povrchu, tlakové namáhání je v případě řezného opotřebení minimální. Úhel nárazu částice musí být menší nebo roven kritickému úhlu α , aby tento proces v materiálu proběhl.^{1,20}

Hloubka zóny řezného opotřebení h_1 se vypočte:

$$h_1 = \frac{C \cdot d_j}{2,5} \cdot \left(\frac{14 \cdot m_a}{\pi \cdot \rho_a \cdot v_p \cdot d_j^2} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \frac{v_a}{v_c} \quad (3.3)$$

Kde: h_1 – hloubka zóny řezného opotřebení	[mm]
C – experimentálně stanovená konstanta	[-]
d_j – průměr abrazivního paprsku	[mm]
m_a – hmotnostní tok abraziva	[kg·s ⁻¹]
π – Ludolfovo číslo	[-]
ρ_a – hustota abraziva	[kg·m ⁻³]
v_p – rychlost posuvu	[m·s ⁻¹]
v_a – rychlost abrazivních částic	[m·s ⁻¹]
v_c – charakteristická rychlost	[m·s ⁻¹]

Při velkém úhlu dopadu, kdy částice dopadají téměř kolmo na povrch, dochází v zóně deformačního opotřebení k nadměrné deformaci částice. Částice zároveň způsobuje zpevnění materiálu, vytváření kráteru v dopadišti, vytlačování materiálu z kráteru a vylamování částí materiálu nárazem následující částice. Částice při kontaktu s materiálem způsobuje zejména tlakové a následně smykové namáhání. Tahové napětí se v deformační zóně uvažuje minimální. Pohyb částice se dělí na složku rotační a translační, přičemž složku rotační lze dále rozčlenit na rotaci ve směru posuvové rychlosti a rotaci proti směru posuvové rychlosti (zpětnou rotaci).^{4,20,25}

Hloubka zóny deformačního opotřebení se stanovuje následovně:

$$h_2 = \frac{1}{\frac{\pi \cdot d_j \cdot \sigma_{kl} \cdot v_p}{2 \cdot C_l \cdot m_a \cdot (v_a - v_e)^2} + \frac{C_f}{d_j} \cdot \frac{v_a}{v_a - v_e}} \quad (3.4)$$

Kde: h_2 – hloubka zóny deformačního opotřebení	[mm]
π – Ludolfovo číslo	[-]
d_j – průměr abrazivního paprsku	[mm]
σ_{kl} – mez kluzu	[MPa]
v_p – posuvová rychlost	[m·s ⁻¹]
C_l – koeficient druhu řezaného materiálu (experimentálně stanovená konstanta udávající část paprsku v řezu)	[-]
m_a – hmotnostní tok abraziva	[kg·s ⁻¹]
v_a – rychlost abrazivních částic	[m·s ⁻¹]

v_e – maximální rychlost pohybu abrazivních částic vyplývající pouze z elastické deformace	[m·s ⁻¹]
C_f – koeficient tření	[-]

Z existence dvou odlišných zón lze vyvodit, že z materiálových vlastností, jež ovlivňují jak hloubku řezu, tak i samotný průnik paprsku do obrobku, je rozhodující především tvrdost materiálu. Hloubka řezu je ale také částečně ovlivněna houževnatostí materiálu. Materiály mající stejnou tvrdost ale rozdílnou houževnatost, mají i odlišnou hloubku řezu. U materiálů s vyšší houževnatostí se dosahuje nižších hloubek řezu.^{1,4}

U křehkých materiálů se v deformační zóně vytváří rychle se šířící trhliny mající za následek vylamování částecek a při odplavení i jejich úběr.⁴ Erozní mechanismy se u těchto materiálů (keramika, sklo, atd.) dají rozčlenit do několika skupin:

- a) kónické, radiální a postranní trhliny,
- b) mikrotrhliny (microchipping),
- c) interkrystalické a transkrystalické trhliny,
- d) kroužkové lomy,
- e) plastická deformace a tavení,
- f) kombinované poškození.¹³

S kónickými, radiálními a postranními trhlinami se u křehkých materiálů lze setkat nejčastěji. Kónické a radiální trhliny vznikají v materiálu v průběhu doby zatěžování. Boční trhliny způsobují odebrání materiálu a vytvářejí se během odlehčovací doby. Podmínkou uplatnění bočních trhin na praskání materiálu je dopad paprsku pod úhlem 90 °.¹³

3.3 Rýhy na řezaném povrchu

Na řezaném povrchu se vyskytují charakteristické rýhy, tzv. striace. Striace jsou zakřivené v opačném směru než je směr řezání a vznikají z důvodu oscilačního pohybu paprsku, který je možné pozorovat v rovině kolmé na směr řezání. Striace se i v dnešní době dají poměrně těžko odstranit. Správně zvolenými parametry, mezi něž patří zvyšování tlaku vody a snižování rychlosti paprsku, se dají striace mírně eliminovat. Zvýšení tlaku vody zabraňuje menšímu rozptylu paprsku, takže paprsek je pak více účinný a stabilní. Snižováním výstupní rychlosti paprsku se dá docílit lepšího povrchu, protože jednotlivé paprskové kanály se začnou překrývat, čímž eliminují striace na povrchu. Povrch, vytvořený na součásti během procesu řezání, je možno rozdělit na dvě oblasti, a sice horní erozní zónu a dolní zdrsněnou zónu.^{1,7,8}

V horní erozní zóně se rýhy nevyskytují a základní povrchovou nerovností je drsnost. V této zóně mají částice kinetickou energii větší, než je deformační energie potřebná k dělení materiálu, a tudíž je možno dosáhnout velice hladkého povrchu. Řezu s nejlepším povrchem lze při řezání docílit tehdy, když řezaná tloušťka je menší než je hloubka erozní zóny.¹

Dolní zóna je charakteristická zvlněnými rýhami. Úhel zvlnění je závislý na poměru rychlosti posuvu a velikostí vertikálního průniku abrazivního paprsku do obrobku.¹

Příčin, proč ke vzniku striací na povrchu dochází, je několik:

- nepravidelnost v dodávce kinetické energie abrazivní částici,
- vibrace během řezacího procesu,
- s hloubkou řezu se snižuje kinetická energie paprsku,
- krok formování řezacího procesu,
- dynamické charakteristiky vodního paprsku.^{7,8}

Mezi faktory ovlivňující nepravidelnosti dodávky kinetické energie patří vibrace obráběného materiálu a hlavy během procesu dělení, nekonstantní rychlost posuvu, hmotnostní tok abraziva a tlak kapaliny a v neposlední řadě i vibrace nosiče abrazivní hlavy.¹

Distribuce kinetické energie částicím abraziva není v závislosti na čase konstantní a v příčném průřezu proudu má charakteristický vlnitý profil, který přispívá k vytvoření rýh.¹

Horní erozní zóna je díky velké kinetické energii částic poměrně hladká. Jakmile se paprsek ocitne v dolní erozní zóně, tak už nemají částice tak velkou kinetickou energii, která by stačila k deformaci obrobku. Částice s dostatečným množstvím kinetické energie se přesouvají na čelo paprsku, naopak částice s malou kinetickou energií pouze následují cestu vytvořenou částicemi před nimi. Jestliže kinetická energie částice je menší, než je energie potřebná k deformaci materiálu, tak dochází k tomu, že částice neprořeže materiál. Tím dojde k vytvoření žlábků a ostrých výběžků na řezaném povrchu.¹

Samotný proces dělení materiálu je důležitým zdrojem vibrací, jež se podílí na tvorbě striací. Je uváděno, že stůl, na němž leží obrobek, by měl být oddělen od lapače, neboť lapač absorbuje vibrace roztrhávajícího se paprsku a mohl by pak vibrace přenášet dále na obrobek.⁸

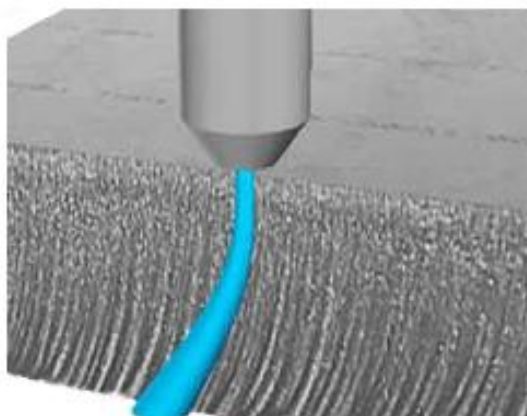
Distribuce abrazivních částic má též vliv na vznik rýhovaného povrchu. V případě, kdy je abrazivo v paprsku rovnoměrně rozloženo, nedochází k vytvoření rýh na povrchu. Jestliže abrazivo rovnoměrně rozloženo není, tak platí, že největší koncentrace je v $1/3 \div 2/3$ průřezu proudu. Bylo zjištěno, že pokud abrazivní paprsek prochází tryskou o stejném průměru jako vodní paprsek, tak má vždy větší průměr. Velikost průměru je závislá na vzdálenosti trysky od řezaného materiálu (stand-off), s rostoucí vzdáleností roste i průměr paprsku.¹

Hodnota optimální vzdálenosti stand-off má vliv na výsledné parametry řezného procesu. Když je vzdálenost mezi obrobkem a materiálem menší, než je udávaná, dochází k situaci, kdy paprsek nevychází z abrazivní trubice s dostatečnou rychlostí. V důsledku toho pak dochází ve směšovací komoře k hromadění vody, která působí jako tlumič a zpomalovač abraziva.³⁶

Na druhé straně při větších vzdálenostech trysky má paprsek větší tření se vzduchem, což ho zpomaluje a snižuje tak hloubku řezu. Rovněž dochází k rozšíření řezné spáry.³⁶

Čistý vodní paprsek má v případě AWJ řezání pouze funkci nosiče abraziva. Úběr materiálu je tedy zcela závislý na kinetické energii abrazivních částic.¹

Vysokotlaká voda uděluje ve směšovací komoře abrazivním částicím vysokou kinetickou energii a hybnost. Během řezání však voda nepůsobí pouze kladně, ale také přispívá ke snižování kinetické rychlosti a hybnosti. Dochází totiž k tomu, že paprsek díky poklesu své kinetické energie zahýbá (obr. 3.4), čímž se vytváří tzv. tlumící vrstva, o kterou se pak abrazivní částice zpomalují a nemají pak potřebnou energii k dělení materiálu. Podle odhadů se rychlost může zmenšovat až o jednu třetinu. Tlumící vrstva se uvažuje především u houževnatých materiálů, u materiálů tvrdých a křehkých není tolik podstatná. Zároveň voda při řezání zajišťuje oplach obrobenej plochy, tudíž po řezání na materiálu nezůstávají zbytky po odebraném materiálu ani abrazivu.¹

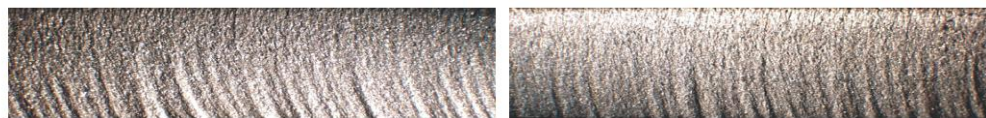


Obr. 3.4 Vážnutí paprsku⁵⁷

Výše jmenované příčiny mohou působit v řezném procesu odděleně, nebo se mohou vyskytovat různé kombinace těchto faktorů. Určení jednotlivých podílů faktorů na celkovém výsledku vzniku striací je však velice složité. Předpokládá se ale, že jednotlivé podíly se mění v závislosti na technologických parametrech řezného procesu.⁸

Proces vytváření striací je obtížně sledovatelný 3D problém. Vzhledem k tomu, že ho nejde dobře popsat pomocí 2D observačních (pozorovacích) metod, musí se používat dvoustranné 2D snímání. Kvůli tomu, že AWJ řezání je vysokorychlostní děj probíhající v agresivním prostředí, tak je snaha simulační experimenty přirovnat k již známým a dobře technicky měřitelným dějům. Procesy, k nimž dochází při řezání, jsou pak často ztotožňovány s řekou tekoucí klikatícím se korytem nebo s opotřebením, k němuž dochází u zahnutých částí pneumatických dopravníků.⁷

U řezacích strojů používaných v dnešní průmyslové praxi je snaha o odstranění striací z materiálu. Stroje jsou vybaveny naklápěním řezné hlavy, což snižuje vznik striací (obr. 3.5).



a) bez progress jet

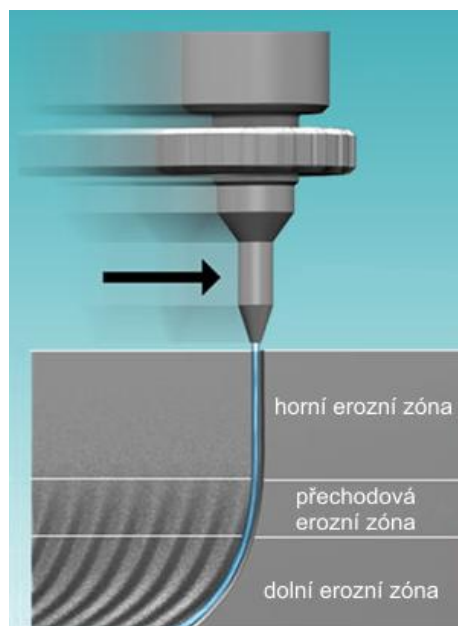
b) s progress jet

Obr. 3.5 Využití funkce progress jet při řezání

3.4 Topografie obrobeného povrchu

Nerovnosti na povrchu vytvořené ať už běžnými konvečními metodami nebo nyníjšími progresivními technologiemi jsou vlastností, která je důležitá pro další život součástky, jelikož ovlivňuje její spolehlivost a životnost.¹⁶

Při vertikálním pohledu na řezanou plochu je možno ji rozdělit na horní, přechodovou a dolní erozní zónu (obr. 3.6).¹

Obr. 3.6 Zóny na řezaném povrchu⁵⁸

V horizontálním směru se na obrobeném povrchu vyskytují tři, někdy i čtyři, zóny a to vždy nezávisle na řezaném materiálu. Tyto oblasti mohou přecházet jedna ve druhou plynule ale také skokově. Velikost jednotlivých oblastí je závislá na fyzikálních a mechanických vlastnostech materiálu, tloušťce materiálu a na technologických vlastnostech řezného procesu (tlak řezné kapaliny, druh a množství abraziva, rychlost dělení). Každá z těchto zón má jinou drsnost.¹

První zóna od vstupu paprsku se nazývá zóna řezného opotřebení. Vyznačuje se dobrou a rovnoměrnou drsností povrchu.¹

Dolní zóna je označována jako zóna deformačního opotřebení materiálu. Deformační úběr se vyskytuje tehdy, když úhel mezi trajektorií částice a povrchem obráběného materiálu odpovídá přibližně 45° .¹ Výrobci se

snaží použitím různých technologií o odstranění striací z řezného procesu. Pak by se na materiálu vyskytovala pouze horní erozní zóna s kvalitním, hladkým povrchem a odpadlo by tak dodatečné zpracování kusů vyrobených technologií AWJ.⁸

U obrábění vodním paprskem je nutné docílit požadovaných parametrů obrobené plochy. Aby tento fakt byl splněn a zároveň bylo dosaženo optimalizace řezného procesu, tak je nutné znát závislosti mezi parametry kvality povrchu a faktory výrobního systému. Na celý proces řezání vodním paprskem má vliv velké množství faktorů, které se dají rozčlenit na dvě hlavní skupiny – přímé a nepřímé.¹

Mezi nepřímé faktory náleží tlak vytvořený čerpadlem, průměr vodní trysky, průměr a délka zaostřovací trysky, směr přivádění abraziva a abrazivní faktory (hmotnostní tok abraziva, průměr a tvar částic, tvrdost abraziva).¹

Do přímých (technologických) faktorů patří směr a rychlost posuvu, vzdálenost trysky od obrobku, úhel působení paprsku a další. Tyto faktory spolu dohromady vytváří jakousi obalovou plochu vodního paprsku a tím se podepisují i na tvaru obrobené plochy.¹

3.5 Drsnost povrchu

Při řezném procesu je na obrobku vytvářen abrazivním vodním paprskem reliéf, který se dá tedy rozdělit na horní erozní zónu a dolní erozní zónu. Horní erozní zóna je charakteristická nižší hodnotou R_a , naproti tomu dolní erozní zóna má vyšší hodnotu průměrné aritmetické úchytky povrchu R_a . Z předchozího je patrné, že horní erozní zóna má lepší kvalitu povrchu než dolní. Horní erozní zóna bývá často popisována jako hladká homogenní oblast, v níž jsou nerovnosti povrchu považovány za mikroskopické.^{1,4,15}

Na výslednou drsnost povrchu má největší vliv tloušťka materiálu a posuvová rychlost řezací hlavy a jejich vzájemná interakce. Drsnost povrchu v horní erozní zóně je méně náchylná na změnu posuvové rychlosti v porovnání s dolní erozní zónou. V horní erozní zóně je s měnící se hloubkou pořád téměř stejná hodnota drsnosti. Tento závěr však pro dolní erozní zónu neplatí, tam se s narůstající hloubkou mění razantně hodnota drsnosti. Při nízké rychlosti posuvu dochází ke zvětšování horní erozní zóny a tím i ke zvětšování hloubky, v níž má obráběný povrch stále přijatelnou drsnost. Jakmile však dojde ke zvětšení rychlosti posuvu, dochází rovněž ke zvýšení drsnosti a tudíž k zúžení horní erozní zóny a rozšíření dolní erozní zóny.^{1,4,6,9,15}

Velikost zrn brusiva má též vliv na drsnost povrchu. S rostoucí velikostí zrn dochází i k rostoucí drsnosti povrchu, vzájemná závislost je téměř lineární. Hrubší zrna abraziva sice řezou materiál s vyššími posuvovými rychlostmi, ale větší velikost zrn se nepříznivě projevuje na drsnosti povrchu.⁴

Pro řezy, u nichž je požadována velmi nízká drsnost povrchu, je doporučeno používat abraziva s malou zrnitostí (150 a více). Malá zrnitost abraziva s sebou však přináší také jisté nevýhody, mezi něž patří vyšší pokles kinetické energie při výstupu z trysky (způsobuje větší vlnitost reliéfu) a nižší rychlost posuvu.⁴

Drsnost povrchu se odvíjí i od tlaku paprsku, mezi nímž a drsností povrchu existuje téměř lineární závislost. Zvýšením tlaku vody se vytvářejí hladší povrchy, snižuje se typická vlnitost povrchu a proces úběru materiálu je rychlejší. Vliv na zlepšení drsnosti povrchu má i použití abrazivní suspenze, díky níž jsou částičky abraziva v paprsku pravidelněji rozmístěny a vytváří tak lepší povrch.^{4,8}

Na drsnost povrchu mají kromě již zmíněných faktorů vliv i vibrace, jež vznikají při řezání v mechanických částech stroje. Vibrace jsou spojené s vytvářením vodního paprsku a šíří se prakticky celým zařízením a podepisují se nejen na drsnosti povrchu ale také na přesnosti vyráběných dílců.⁴

Na velikost vibrací, má vliv i posuvová rychlost a opotřebením fokusační trysky. Neopotřebované fokusační trysky indukují méně vibrací, než je tomu v případě trysek opotřebovaných. K vibracím, způsobených posuvovou rychlostí, dochází zejména tehdy, když je v_p větší jak $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.¹⁰

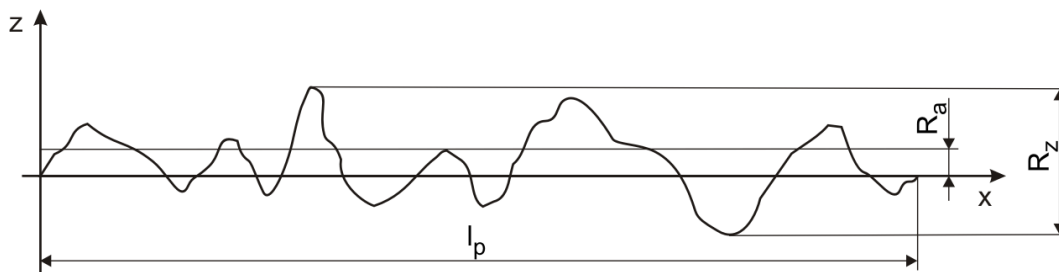
3.5.1 Profily drsnosti

Do profilů drsnosti (obr. 3.7) zahrnujeme průměrnou aritmetickou úchylku profilu a největší výšku profilu. Průměrná aritmetická úchylka profilu je nejpoužívanější parametr pro hodnocení drsnosti povrchu a je definována vztahem 3.5. Průměrná aritmetická úchylka je v podstatě střední aritmetická hodnota absolutních úchylek profilu vztažených na základní délku.

$$R_a = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} |z(x)| dx \quad (3.5)$$

Kde: R_a – průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
l_p – základní délka	[m]
$z(x)$ – funkce popisující profil	[-]

Největší výška profilu vyjadřuje v rozsahu základní délky součet výšky největšího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně.²⁵



Obr. 3.7 Profily drsnosti

3.6 Geometrie řezné hrany

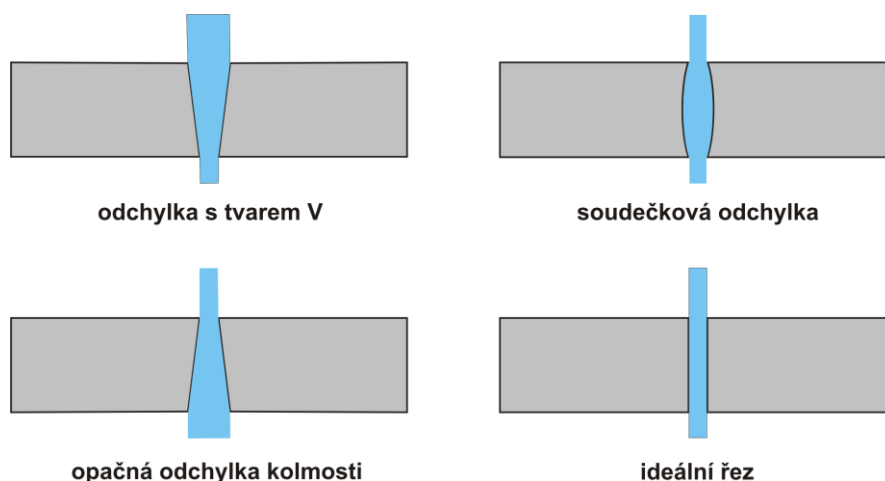
Vlivem náhlého uvolnění velkého množství energie se vodní paprsek po výstupu z trysky mění ze soudržného, koherentního paprsku a dochází k jeho rozšiřování a tím i k poklesu výkonu odebrání materiálu. Rozšiřování paprsku se samozřejmě přenáší i na řezaný materiál, z čehož se poté odvíjí rozměry řezné mezery. Odchylka proudu od kolmého směru ovlivňuje konečný tvar řezaných součástí.¹

3.6.1 Odchylka kolmosti

Odchylka kolmosti patří při obrábění vodním paprskem mezi základní makrogeometrické znaky na obrobeném povrchu a je interpretována zúžením (rozšířením) stěn obráběných ploch. Její velikost určuje, zda bude nutné materiál dále ještě opracovávat či nikoliv. V případě že ano, tak se musí na obrobek přidat přídavek na opracování, čímž se zvýší náklady na kus a sníží využití materiálu, z čehož vyplývá, že se sníží konkurenceschopnost. Aby k tomuto nedocházelo, tak je snaha o odstranění této vady již během procesu řezání. Velikost přídavku na obrábění se odvíjí od řezané hloubky a druhu materiálu součásti.¹

Mezi základní typy odchylek kolmosti (obr. 3.8) patří:

- soudečková odchylka kolmosti,
- odchylka s tvarem V,
- opačná odchylka kolmosti,
- kosodélníková nebo lichoběžníková odchylka.¹



Obr. 3.8 Odchylky kolmosti¹

Se soudečkovou odchylkou kolmosti se lze setkat u obrobků obráběných velmi hrubě, u nichž následuje další opracování. Soudečková odchylka je způsobena paprskem, který je širší ve středu materiálu než na jeho horní a dolní ploše.¹

Nejčastější typ odchyly je odchylyka s tvarem V, jež se na řezaných površích materiálu objevuje tehdy, když paprsek působí na materiál delší dobu, než je doba nutná k prořezání, tzn. v případě nízkých posuvových rychlostí. Tím dochází k vyšší erozi horní části materiálu. Tento typ odchylyky může mít ještě jednu příčinu – větší úběr v horní části materiálu může být způsoben odrazem vody od materiálu.¹

Za podmínky že řezací hlava je špatně ustavena a paprsek nedopadá na materiál kolmo ale pod určitým úhlem, dochází k modifikaci odchylyky s tvarem V na odchylyku kosodélníkovou, popř. lichoběžníkovou.¹

Opačná odchylyka kolmosti se vyskytuje na řezaných površích z důvodu rozšiřování vodního paprsku s rostoucí vzdáleností od výstupní trysky. Tím dochází i k většímu odběru materiálu v dolní části řezu. Tato odchylyka se vyskytuje u měkkých materiálů, u nichž je materiál rychle odebírán nebo v případě použití nízké rychlosti posuvu.¹

Ideální případ řezu je tehdy, když řezné hrany jsou rovnoběžné, tj. když je odchylyka kolmosti nulová.

3.6.2 Odchylyky stopy řezu

Odchylyky stopy řezu rozeznáváme dvě – místní odchylyka zpoždění stopy řezu a nepravidelná hloubka stopy řezu. Tyto odchylyky se většinou na řezané ploše objevují ve vzájemné kombinaci. Odchylyky se dají odstranit zvýšením hmotnostního toku abraziva a snížením posuvové rychlosti.¹

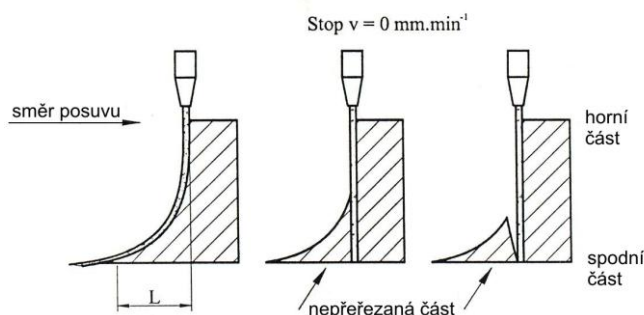
První jmenovaná, odchylyka zpoždění stopy řezu, se projevuje jako odchylyka postupně narůstající s řezanou hloubkou. Je charakterizována výraznými nepravidelnostmi ve zpoždění stopy řezu. Vzniká erozí odraženého paprsku, který působí proti směru posuvové rychlosti a vytváří tak na povrchu rýhy charakterizující tento typ úchylyky.¹

Nepravidelná hloubka stopy řezu je někdy označována jako nadměrná nerovnost hloubky stopy řezu, k níž dochází kvůli poklesu kinetické energie paprsku při průchodu materiálem. Paprsek, jehož energie je tedy ve spodní části materiálu nižší než v horní, při řezání tvrdých a houževnatých materiálů snadno mění svůj směr a vytváří pak v dolní části povrchu dutiny a rýhy značně znehodnocující kvalitu řezané plochy.¹

3.6.3 Neúplný řez

Při řezání může dojít vlivem náhlé změny posuvové rychlosti k neúplnému prořezání celé tloušťky materiálu. Během řezání dochází ke zpoždění paprsku, z čehož vyplývá, že místo vstupu paprsku do materiálu a místo výstupu paprsku z materiálu není totožné. Místa jsou od sebe v určité vzdálenosti L. Tento fakt dává možnost vzniku neprořezání, které je však podmíněno ještě dalšími okolnostmi, a sice musí dojít k náhlému zastavení nebo výraznému snížení pohybu řezací hlavy, tzn. že posuvová rychlost je nulová (nebo se k nule blíží). Tímto dojde k tzv. přeskočení materiálu (obr. 3.9), tzn. že paprsek vlivem setrvačnosti neoddělí materiál, jenž se nachází ve vzdálenosti L. Vznikne tak můstek pevně spojující obě části

řezaného materiálu, což s sebou přináší problémy při vytloukání vyřezaných součástí.¹



Obr. 3.9 Neúplný řez¹

Na neúplný řez má, kromě předchozích, vliv ještě fakt, že během řezání dochází k rozšiřování paprsku, což má za následek působení paprsku na plochu větší, než byla původní. Díky tomuto zjištění a poklesu kinetické energie paprsek není schopen odebrat dostatečné množství materiálu a tak dojde ke zmíněnému neprořezání.¹

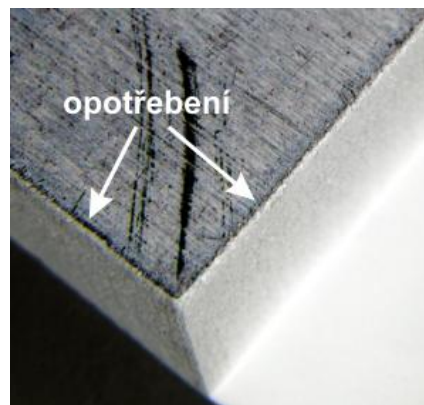
3.7 Vady na povrchu způsobené AWJ

V průběhu abrazivního řezacího procesu jsou na povrchu řezaných součástí vytvářeny vady, které způsobují degradaci součástí a další problémy s nimiž se musí po vyřezání počítat.

3.7.1 Opatření v okolí řezu

Abrazivní vodní paprsek je složen z jádra a pláště. Plášť sestává z částic kapaliny, vzduchu a abraziva a právě částičky abraziva se díky vzájemnému působení částic oddělují z pláště a vytváří svým dopadem erozivní opotřebení (obr. 3.10) v okolí řezu, tzv. kazy. Míra erozivního opotřebení se odvíjí od výše kinetické energie částic a úhlu jejich dopadu na povrch řezaného materiálu.¹

Rozptylování částic z paprsku je závislé na vzdálenosti abrazivní trysky od materiálu, s rostoucí vzdáleností narůstá. Částičky z pláště jsou pak snadno uvolňovány a narušují povrchové vrstvy řezaného materiálu. U materiálů s povrchovou úpravou tak nastává otryskání povrchové vrstvy, zdrsnění povrchu a tím i zhoršení vlastností a použitelnosti řezaného dílce.¹



Obr. 3.10 Opotřebení řezané hrany

3.7.2 Koroze

Mimo kazů se na řezaných površích, většinou nelegovaných kovových materiálů, často vyskytuje i koroze vzniklá oxidací řezacího prostředí a kyslíku, nebo důsledkem velkého energetického ovlivnění povrchu během řezného procesu. Během řezání se totiž tvoří nový povrch, který reaguje na okolní chemické prostředí. Koroze nastává u všech konstrukčních ocelí třídy 10÷19, kromě ocelí třídy 17, jenž jsou korozi odolné. Ke korozi dochází už při prvním kontaktu paprsku s obrobkem.^{1,20}

Koroze může vznikat i samotným působením vody, jež se účastnila řezného procesu. Ve vodě se mohou vyskytovat chemické látky (kyseliny, zásady), které se do ní dostaly z chemické reakce mezi materiálem abraziva a vodou. Pro zamezení vzniku koroze je tedy rozhodující rychlé odstranění zbytků vody ze součásti, k čemuž se většinou využívá stlačeného vzduchu, popřípadě ke zlepšení pasivace povrchu je používán ještě inertní plyn, nejčastěji dusík. Důležité tedy je co nejrychlejší osušení. Povrch součástí, které se nebudou už nijak povrchově zpracovávat, se potírá velmi tenkým olejovým filmem, čímž je materiál chráněn proti působení vzdušné vlhkosti. U součástí, jež budou opatřeny nátěrem, je vhodné provést nátěr co nejdříve. Zároveň by nátěrové hmoty měly obsahovat antikorozi přísady.²⁰

K očištění povrchů lze také použít čistý vodní paprsek vytvářející na povrchu svým kavitačním charakterem podmínky pro dobrou přilnavost ochranných povlaků.

Koroze na površích je nežádoucí, narušuje vzhled a zapříčiňuje nižší životnost součásti. Koroze se nemusí vyskytovat na součásti ihned po uřezání, ale může se vyskytnout na součástech až po uplynutí určité doby a to i přesto, že plocha, na níž se vyskytne, je chráněna nátěrem. V tomto případě se začne nátěr odlupovat od korodované plochy. Mimo tyto poruchy může koroze zapříčinit i jiné problémy.²⁰

3.8 Hluk při řezání

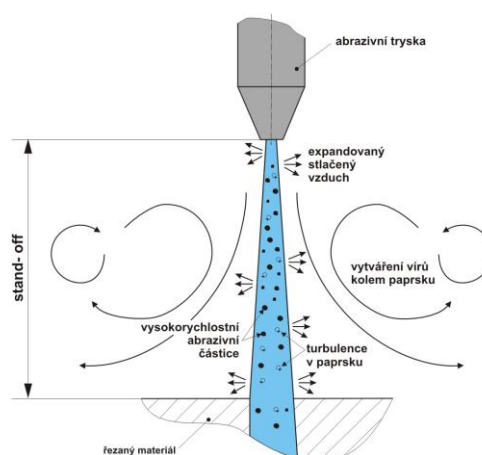
Řezací proces je neodmyslitelně spjatý s hlukem. Rychlost výstupního paprsku je zhruba třikrát vyšší než rychlost zvuku. Na výstupu ze zaostřovací trubice se paprsek střetává s molekulami okolního prostředí, což přiměje částice ke kmitání (obr. 3.11). Kmitáním dochází v paprsku k energetickým změnám, které vytvoří akustické pole projevující se hlukem o vysoké frekvenci. Hluk má přímý dopad na nervovou soustavu obsluhy a je tedy nutné se před ním chránit.^{6,12}

Zdroje hluku během procesu jsou následující:

- základní šum WJM systému,
- výstup ze zaostřovací trubice,
- řezný proces,
- výstup paprsku z obrobku a jeho náraz na hladinu vody v lapači.¹²

Na celkovou velikost hladiny hluku má největší vliv rychlost posuvu a vzdálenost mezi obrobkem a řezaným materiálem, tlak vody má vliv menší. Odhlučněním při řezání je možné snížit hladinu hluku.^{12,36}

Hladina hluku je mimo jiné závislá, jak už bylo zmíněno, také na vzdálenosti stand-off. Na tomto poznatku je založen výzkum, jenž se snaží najít vyjádření této závislosti. Pomocí ní by se dala měřit a následně upravovat aktuální vzdálenost mezi tryskou a materiálem, čímž by bylo dosaženo konstantní požadované vzdálenosti mezi materiálem a tryskou. Výsledkem by bylo účinnější, optimálnější řezání, potažmo i snížení nákladů.³⁶



Obr. 3.11 Vytváření hluku v řezacím procesu³⁶

3.9 Experimenty

Částí této diplomové práce je i několik experimentů sloužících k ověření teoretických poznatků v praxi.

3.9.1 Experiment představující 5 různých kvalit řezu

První experiment se zabývá kvalitou řezaného povrchu v závislosti na použitém řezném módu. Řezací stroj WJ2015B-1Z-D, na němž byly všechny experimenty prováděny, je osazen naklápěcí řeznou hlavou, která umožňuje eliminaci vad paprsku a přispívá tak k vytvoření lepších povrchů. Na tomto stroji je možno nastavit pět módů řezu, jež se označují Q1-Q5 a jejichž slovní ohodnocení poskytuje následující tabulka:

Tab. 3.2 Kvalita řezu

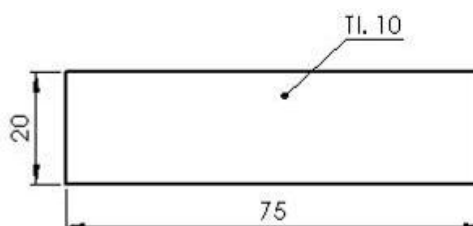
označení	popis
Q1	dělicí řez (X – rough)
Q2	hrubý řez (rough)
Q3	střední kvalita řezu (medium)
Q4	jemný řez (fine)
Q5	nejjemnější řez (X – fine)

Řezaný materiál byla hliníková slitina AlMg3, jejíž vlastností je dobrá obrobitelnost, vynikající svařitelnost a korozní odolnost, dále je dobře odolná mořské vodě a má vynikající leštící schopnosti. Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou popsány v tabulce 3.3.^{38,39}

Tab. 3.3 Mechanické a fyzikální vlastnosti AlMg3^{38,39}

mechanické	Youngův modul E	70 000 MPa
	pevnost v tahu R_m	205 MPa
	smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	105 MPa
	tažnost A	4÷17 %
	tvrdost	60 HB
fyzikální	hustota ρ	2 670 kg·m ³
	tepelná vodivost λ	130÷140 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹

Rozměry řezaných vzorků ukazuje obrázek níže:



Obr. 3.12 Rozměry vzorku

V průběhu experimentu se provedlo 5 řezů, u nichž se udržovala konstantní posuvová rychlost, jež činila $562 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jelikož tato rychlost je standardní posuvová rychlost při hrubém řezu, tak se ostatní posuvové rychlosti musely k této hodnotě přepočítávat a posléze se do řezného procesu začleňovaly nastavením korekcí na ovládacím panelu. Hmotnostní tok abraziva během experimentu se neměnil, do řezací hlavy se dodávalo $350 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ abraziva (indický granát) s označením MESH 80. Řezací tlak byl 4 000 bar a vzdálenost abrazivní trysky od povrchu materiálu byla 4 mm. Průměr diamantové trysky byl 0,254 mm a abrazivní trysky 0,889 mm. Výkon řezacího zařízení byl 19 kW a spotřeba vody činila $8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Výsledky experimentu

Během experimentu software měří čas řezání, který je následně uváděn v tabulce 3.4 u jednotlivých typů řezů. Kvalitu povrchu dosaženou v provedených řezech je možno posoudit na obrázku 3.13.

Tab. 3.4 Řezací parametry

číslo vzorku	typ řezu	řezný čas t_{as} [s]
11	dělicí řez	28
12	hrubý řez	32
13	střední kvalita řezu	41
14	jemný řez	51
15	nejjemnější řez	62

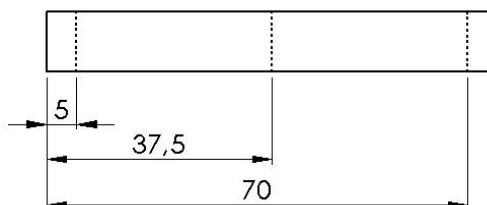


Obr. 3.13 Kvalita řezu jednotlivých vzorků

U vzorku 15, který byl řezán v módu nejjemnějšího řezu (Q1), byla poté změřena kvalita povrchu. Měření bylo prováděno na přístroji Perthometer M2 (obr 3.14). Jedná se o dotykový profiloměr, jehož dotyk je tvořen diamantovým hrotem. Měřicí dráha byla 5,6 mm, měření trvalo 7 s. Na této dráze byla posléze vyhodnocována průměrná aritmetická úchylka profilu R_a a největší výška profilu R_z .



Obr. 3.14 Detail řezání a měření vzorku



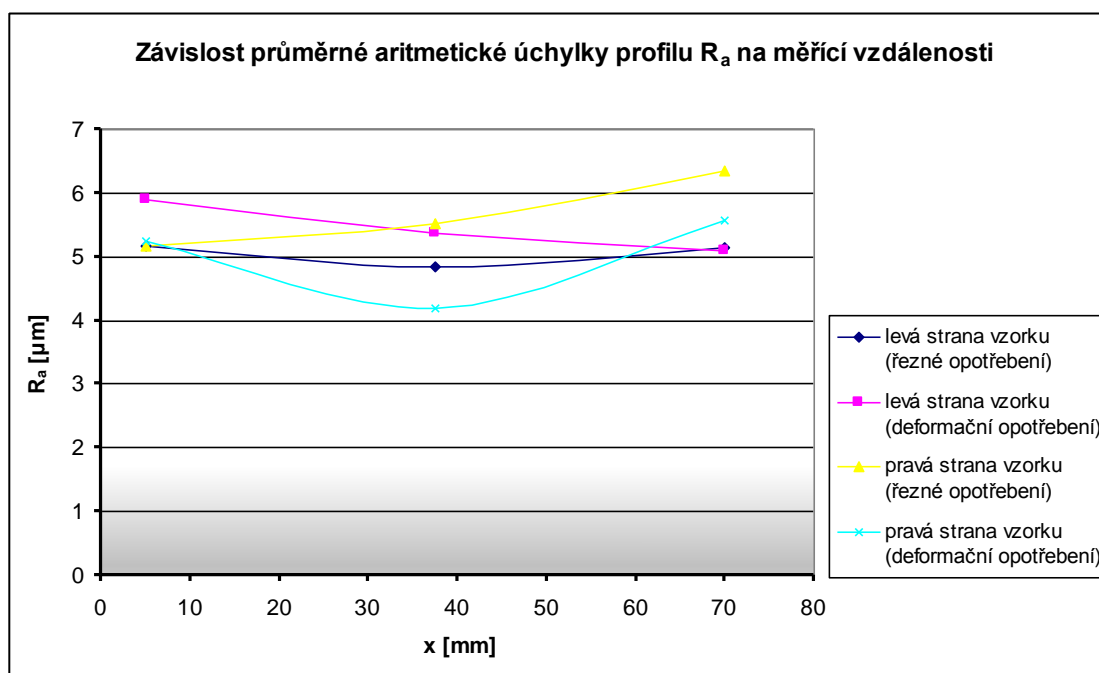
Obr. 3.15 Horizontální polohy měřících míst

Měření bylo prováděno na levé i pravé straně vzorku ve třech horizontálních polohách, jak ukazuje obrázek 3.15, a ve vertikální poloze v oblasti řezného opotřebení (výška 2 mm od horní hrany vzorku), i v oblasti deformačního opotřebení (výška 2 mm od spodní hrany vzorku). Naměřené hodnoty uvádí tabulka 3.5.

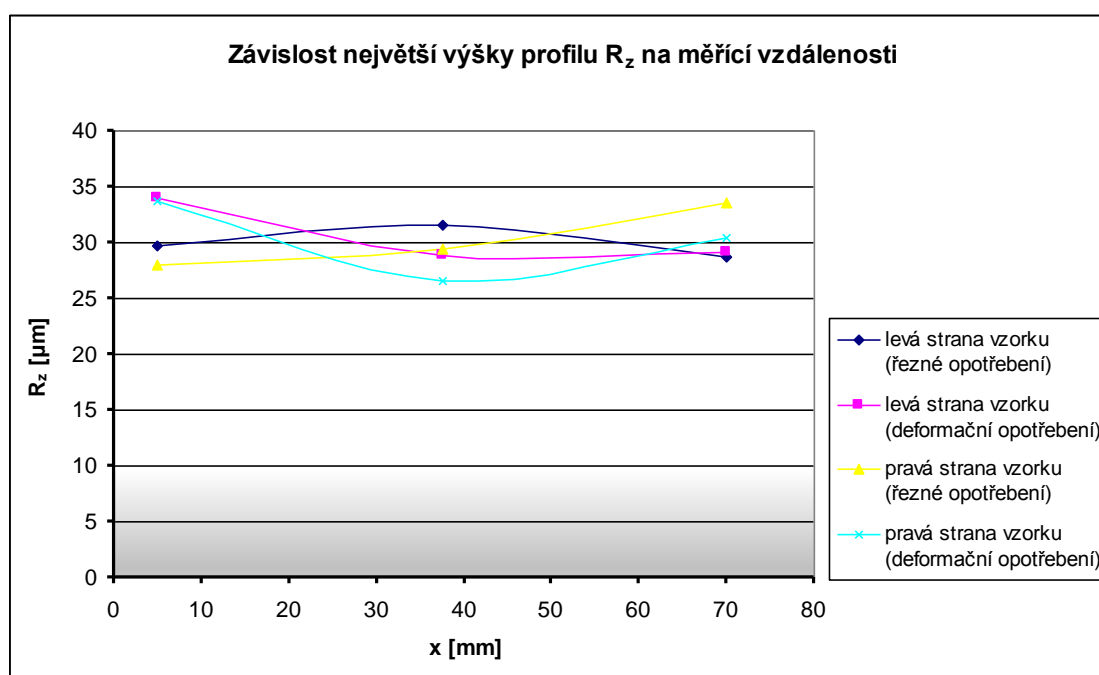
Tab. 3.5 Naměřené hodnoty vzorku č. 15

měřicí vzdálenost [mm]	profily drsnosti	levá strana vzorku		pravá strana vzorku	
		oblast řezného opotřebení	oblast deformačního opotřebení	oblast řezného opotřebení	oblast deformačního opotřebení
5	R_z [μm]	29,7	34,0	28,0	33,7
	R_a [μm]	5,168	5,898	5,162	5,238
37,5	R_z [μm]	31,6	28,8	29,5	26,6
	R_a [μm]	4,834	5,368	5,510	4,200
70	R_z [μm]	28,7	29,1	33,6	30,4
	R_a [μm]	5,133	5,083	6,340	5,580

Z naměřených hodnot uvedených v předešlé tabulce byly zhotoveny grafy závislosti průměrné aritmetické úchytky (obr. 3.16) a největší výšky profilu na měřicí vzdálenosti (obr. 3.17).



Obr. 3.16 Závislost průměrné aritmetické úchyly na měřicí vzdálenosti



Obr. 3.17 Závislost největší výšky profilu na měřicí vzdálenosti

Zhodnocení experimentu

Vzhledem k tomu, že byla zachována konstantní posuvová rychlost, docházelo k úměrnému nárůstu času řezání a kvality obrobeného povrchu. Z grafického vyjádření je patrné, že průměrná aritmetická úchylka profilu u vzorku č. 15 je na levé i pravé straně v obou oblastech odlišná. Nejnižší hodnota byla naměřena na pravé straně vzorku v oblasti deformačního opotřebení ve vzdálenosti 37,5 mm od hrany, což bylo zajímavým zjištěním, neboť z teoretických poznatků by právě v tomto místě mělo být dosaženo nejvyšší aritmetické úchylky, jelikož se zde řezací hlava pohybuje největší posuvovou rychlostí. Zároveň by se oblast deformačního opotřebení měla vyznačovat horší kvalitou povrchu.

Průběhy hodnot největších výšek profilu byly podobné průběhům hodnot průměrných aritmetických úchylek. Nejnižší hodnoty bylo opět dosaženo v místě nacházejícím se uprostřed vzorku v oblasti deformačního opotřebení. Hodnotě $R_a = 4,2 \mu\text{m}$ tedy náležela hodnota $R_z = 26,6 \mu\text{m}$.

Z uvedených poznatků je patrné, že dosažené hodnoty na levé a pravé straně vzorku se příliš neshodovaly s předpokládanými závěry.

3.9.2 Experiment na ověření závislosti mezi množstvím abraziva a výslednou strukturou povrchu – hrubý řez

Při tomto experimentu se zkoumal vliv abraziva na výslednou drsnost řezané plochy. Experiment byl prováděn ve dvou variantách – v první se vycházelo z podmínky, kdy zákazník vyžaduje co nejlevnější výrobu dílce, z čehož vyplývá, že bývá většinou řezán v některém z nejhorších módů. Tím se zajistí nízký řezný čas a požadovaná nízká cena. Kvalita povrchu však není nikterak dobrá. Použitím řezací hlavy s možností naklopení lze i za těchto podmínek dosahovat poměrně kvalitních řezaných povrchů.

Experiment byl prováděn na stejném stroji jako předešlý, tzn. že rozměry trysek zůstávají zachovány. Pracovní tlak byl opět 4 000 bar. Hmotnostní tok abraziva se postupně měnil z hodnoty $150 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ až na hodnotu $600 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Všechny vzorky byly řezány v módu hrubého řezu.

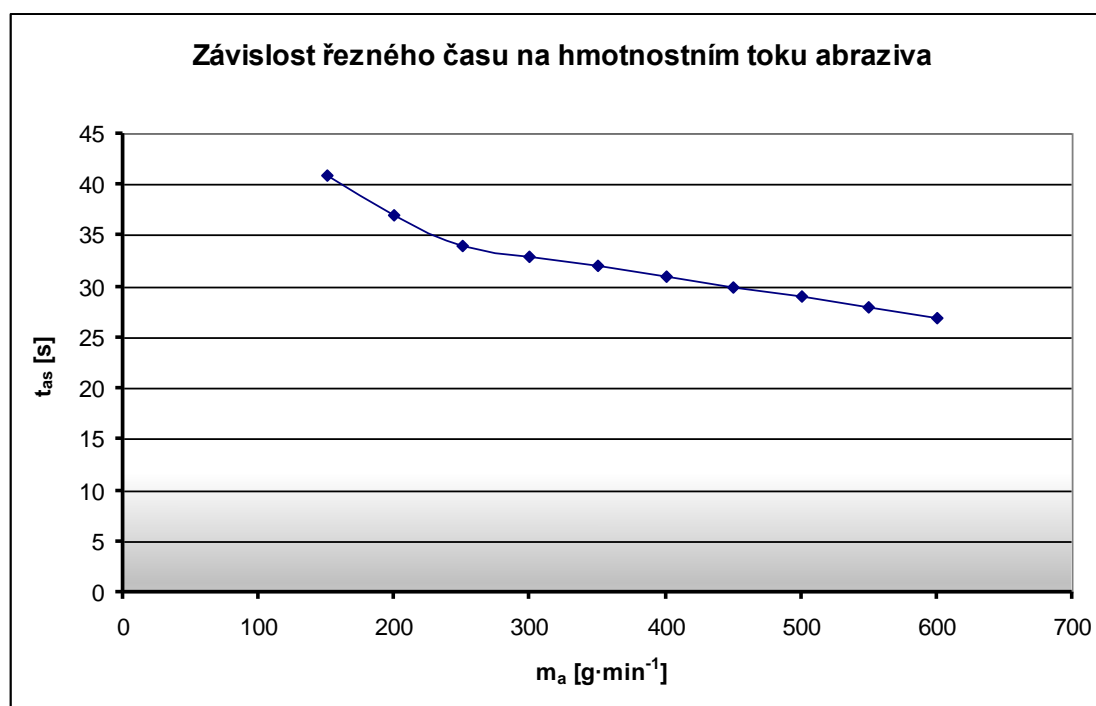
Výsledky experimentu

Hodnoty posuvových rychlostí a řezných časů u jednotlivých vzorků dokumentuje následující tabulka 3.6:

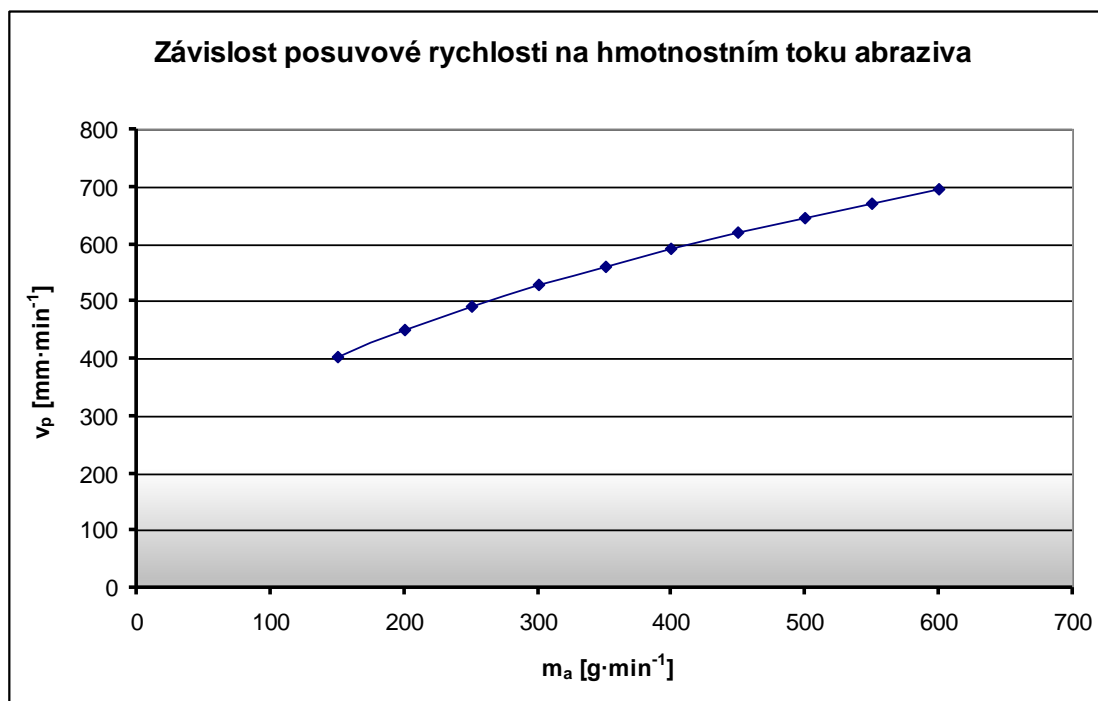
Tab. 3.6 Experimentálně zjištěné hodnoty

číslo vzorku	množství abraziva m_a [$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$]	posuvová rychlost v_p [$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$]	řezný čas t_{as} [s]
1	150	402,0	41
2	200	450,3	37
3	250	491,8	34
4	300	528,5	33
5	350	561,6	32
6	400	592,0	31
7	450	620,1	30
8	500	646,4	29
9	550	671,2	28
10	600	694,6	27

Z uvedených experimentálně naměřených hodnot byly stanoveny grafické závislosti (obr. 3.18 a obr. 3.19).



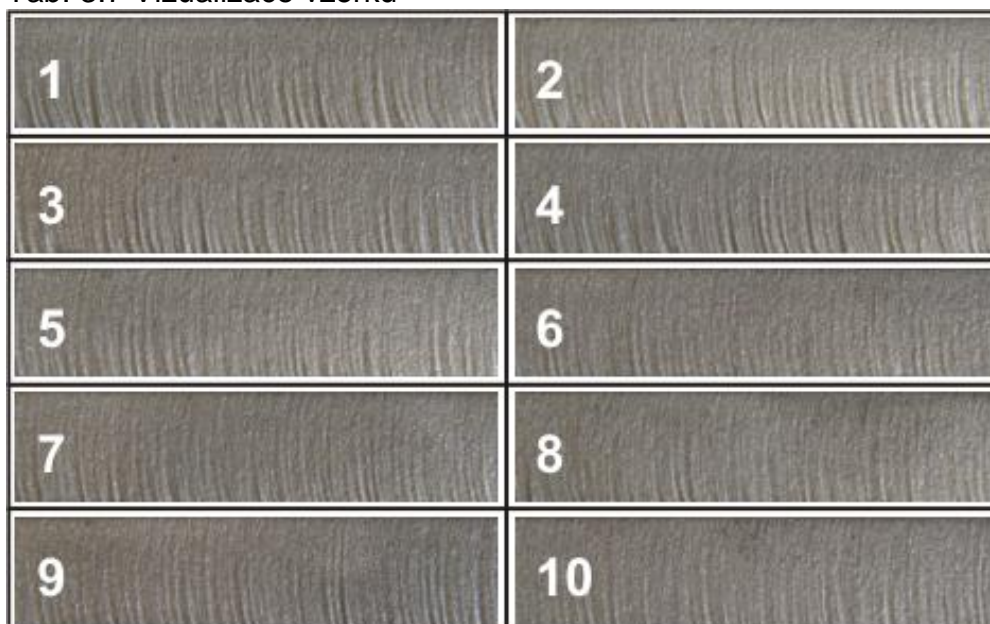
Obr. 3.18 Závislost řezného času na hmotnostním toku abraziva



Obr. 3.19 Závislost posuvové rychlosti na hmotnostním toku abraziva

Naměřené vzorky byly nafoceny a pro lepší porovnatelnost seřazeny v níže uvedené tabulce:

Tab. 3.7 Vizualizace vzorků



Zhodnocení experimentu

Vzorky zhotovené při tomto experimentu se vyznačovaly poměrně velkou drsností v oblasti deformační zóny, a proto nebyly měřeny pomocí profiloměru, ale byly pouze vizuálně porovnány. Při porovnání vychází nejlépe vzorek číslo 10, tj. vzorek s nejvyšším hmotnostním tokem abraziva. Povrchy ostatních vzorků se podle jejich snižujících pořadových čísel zhoršují, a tudíž má nejhorší povrch vzorek řezaný jako první. Závěrem je možno říci, že hmotnostní tok abraziva má u tohoto druhu řezu vliv na výsledný povrch. S narůstajícím hmotnostním tokem abraziva narůstá též posuvová rychlost řezací hlavy a zároveň klesá čas řezání, což je vidno z předešlých grafů.

3.9.3 Experiment na ověření závislosti mezi množstvím abraziva a výslednou strukturou povrchu – nejjemnější řez

Opačnou alternativou k předešlému experimentu je experiment prováděný v tomto bodě. Byla opět zkoumána závislost abrazivního toku abraziva na vytvořený povrch. Hmotnostní tok abraziva se zase pohyboval v rozmezí hodnot $150\div 600 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. Rozdíl oproti experimentu popisovanému v bodě 3.9.2 je ten, že vzorky byly řezány v nejjemnějším módu, tedy v Q5.

Vstupní parametry, jež zůstávají v průběhu pokusu konstantní:

- posuvová rychlost – $v_p = 195,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,
- tlak vody – $p = 4\,000 \text{ bar}$,
- vzdálenost stand-off – $z = 4 \text{ mm}$,
- průměr vodní (diamantové) trysky – $d_d = 0,254 \text{ mm}$,
- průměr abrazivní trysky – $d_a = 0,889 \text{ mm}$,
- abrazivo – MESH 80.

Řezaným materiálem byla opět hliníková slitina AlMg3 tloušťky 10 mm, rozměry vzorků byly 20 x 75 mm a řezání se provádělo na totožném stroji jako v předešlých experimentech.

Výsledky experimentu

Během experimentu byla udržována konstantní posuvová rychlost $v_p = 195,8 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ a tudíž se k této rychlosti ostatní rychlosti musely vztahovat. Tato rychlost je rychlostí výrobcem uváděnou jako optimální pro řezání v kvalitě Q5 při zachování výše uváděných vstupních parametrů. Při experimentu bylo vyhotoveno 10 vzorků, jejichž řezné parametry uvádí tabulka 3.8.

Tab. 3.8 Hodnoty naměřené během řezného procesu

číslo vzorku	hmotnostní tok abraziva m_a [g·min ⁻¹]	řezný čas t_{as} [s]
1	150	77
2	200	76
3	250	76
4	300	77
5	350	76
6	400	76
7	450	76
8	500	77
9	550	77
10	600	77

Výsledný řezný čas osciluje mezi 76 a 77 vteřinami. Teoreticky by měl řezný čas pro všechny vzorky být 77 s. Oscilace je způsobena přepočtem posuvových rychlostí a softwarovými možnostmi řezacího stroje.

Vzorky vyřezané v rámci tohoto experimentu byly následně podrobeny měření drsnosti na řezaných plochách. Měření bylo provedeno na profiloměru Perthometer M2. Byly vyhodnocovány hodnoty průměrné aritmetické úchyly povrchu R_a a největší výšky profilu R_z . Měření se v horizontální poloze uskutečňovalo ve třech místech (obr. 3.15). Ve vertikálním směru vzorku se měřící hrot pohyboval v přechodu mezi řezným a deformačním opotřebením. Z každého vzorku se získalo 6 hodnot R_a a R_z .

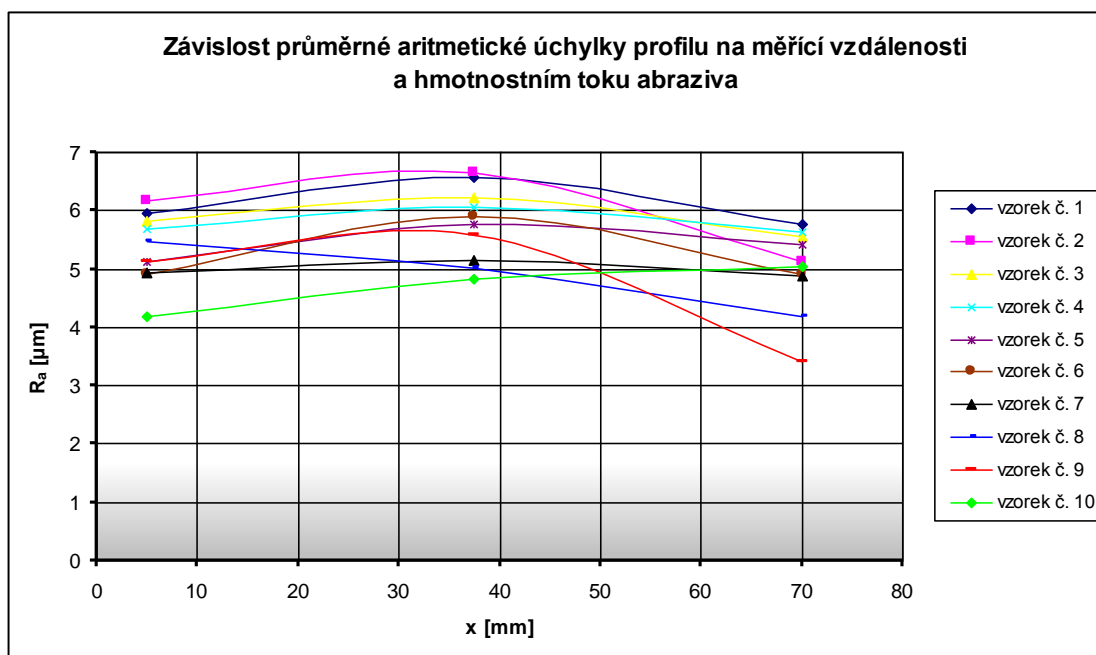
Kompletní tabulka naměřených hodnot je součástí přílohy 1, zde jsou uvedeny pouze hodnoty potřebné pro tvorbu předkládaných grafů.

a) Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a

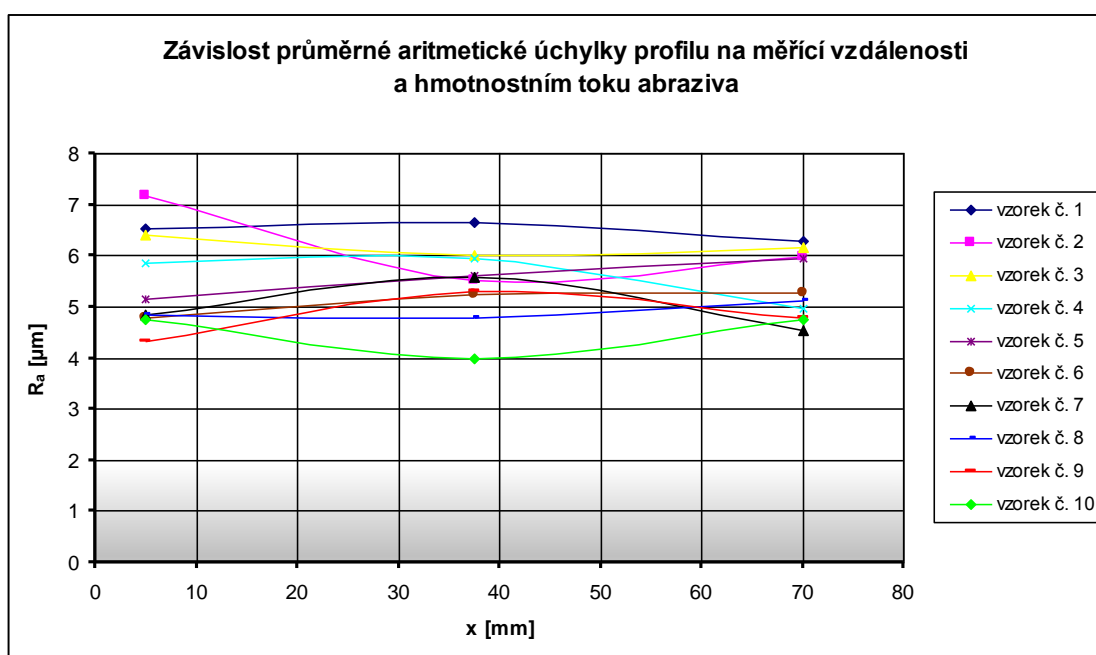
Tab. 3.9 Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a

č. vzorku	hmotnostní tok abraziva m_a [g·min ⁻¹]	levá strana vzorku			pravá strana vzorku		
		měřící vzdálenost [mm]			měřící vzdálenost [mm]		
		5	37,5	70	5	37,5	70
		průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [μm]					
1	150	5,950	6,583	5,753	6,532	6,643	6,291
2	200	6,166	6,643	5,121	7,179	5,513	5,967
3	250	5,821	6,229	5,554	6,402	6,014	6,171
4	300	5,691	6,073	5,639	5,864	5,941	4,968
5	350	5,120	5,760	5,418	5,144	5,603	5,944
6	400	4,919	5,894	4,918	4,796	5,245	5,286
7	450	4,922	5,152	4,870	4,837	5,568	4,547
8	500	5,458	5,008	4,180	4,855	4,787	5,105
9	550	5,130	5,590	3,396	4,336	5,298	4,771
10	600	4,194	4,823	5,053	4,737	3,991	4,759

Z naměřených hodnot (tab. 3.9) byly sestrojeny grafy vyjadřující vliv množství abraziva na průměrnou aritmetickou úchylku profilu. Grafy znázorňují zvlášť závislost pro levé (obr. 3.20) a pravé strany vzorků (obr. 3.21). V příloze 2 je možno nalézt další grafické závislosti průměrných aritmetických úchylek vztahovaných na jednotlivé vzorky.



Obr. 3.20 Průměrné aritmetické úchylky profilu levých stran vzorků

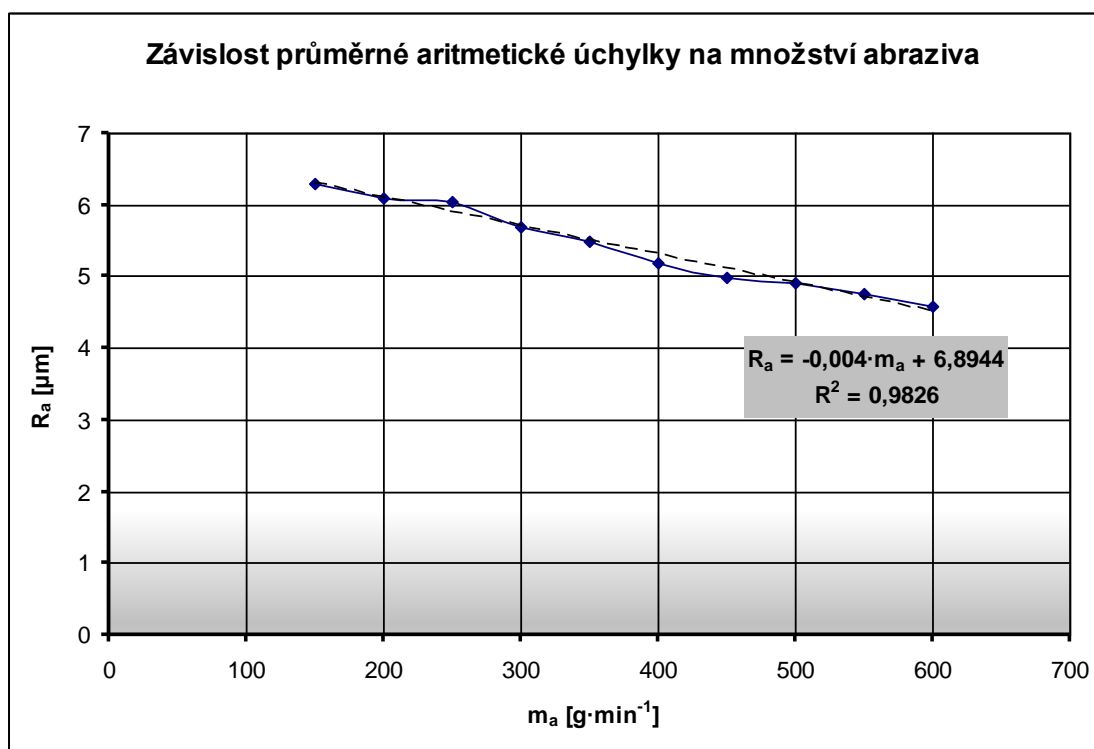


Obr. 3.21 Průměrné aritmetické úchylky profilu pravých stran vzorků

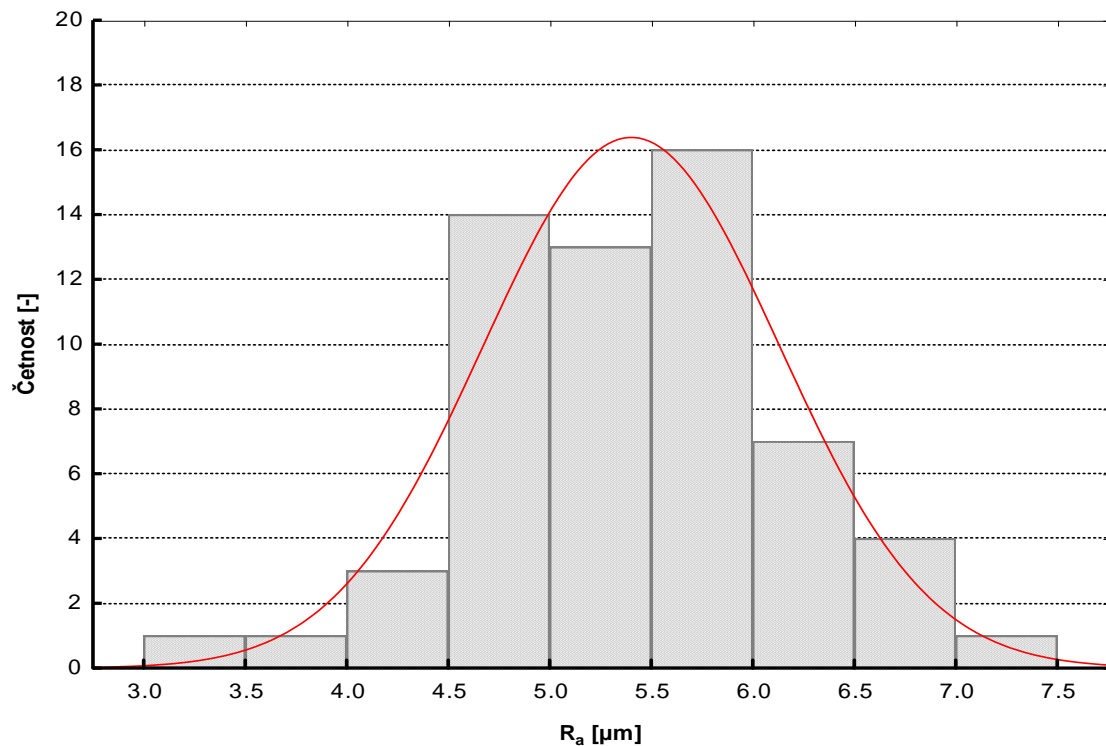
Graf popisující vliv hmotnostního toku abraziva na kvalitu výsledného povrchu je znázorněn na obrázku (obr. 3.22). Data, z nichž byl graf sestaven, jsou uvedena v tabulce 3.10.

Tab. 3.10 Průměrné hodnoty kvality povrchu dosažené na vzorku

č. vzorku	hmotnostní tok abraziva m_a [$\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$]	průměrná aritmetická úchylnka R_a [μm] (průměrná)	největší výška profilu R_z [μm] (průměrná)
1	150	6,292	36,250
2	200	6,098	35,150
3	250	6,032	35,117
4	300	5,696	32,433
5	350	5,498	30,583
6	400	5,176	29,650
7	450	4,983	29,100
8	500	4,899	29,050
9	550	4,754	27,783
10	600	4,593	27,000



Obr. 3.22 Vliv množství abraziva na výslednou průměrnou aritmetickou úchylnku



Obr. 3.23 Histogram naměřených hodnot průměrné aritmetické úchyly profilu

Hodnoty z tohoto experimentu byly rovněž statisticky testovány. Při uvažování všech naměřených hodnot průměrné aritmetické úchyly byl zhotoven histogram, viz. předešlý obrázek (obr. 3.23), vyjadřující četnosti v jednotlivých intervalech úchylek.

Zhodnocení experimentu

Z experimentu bylo zjištěno, že s narůstajícím abrazivním tokem dochází k dosažení lepší kvality řezaného povrchu. Během tohoto experimentu bylo docíleno nejlepší průměrné aritmetické úchyly profilu $R_a = 3,396 \mu\text{m}$. Těto hodnoty bylo dosaženo u vzorku č. 9 v místě vzdáleném 70 mm od hrany. Vzhledem k tomu, že na tomto vzorku byly ostatní hodnoty průměrné aritmetické úchyly profilu o jednotky μm větší, tak nelze uváděnou hodnotu považovat za relevantní.

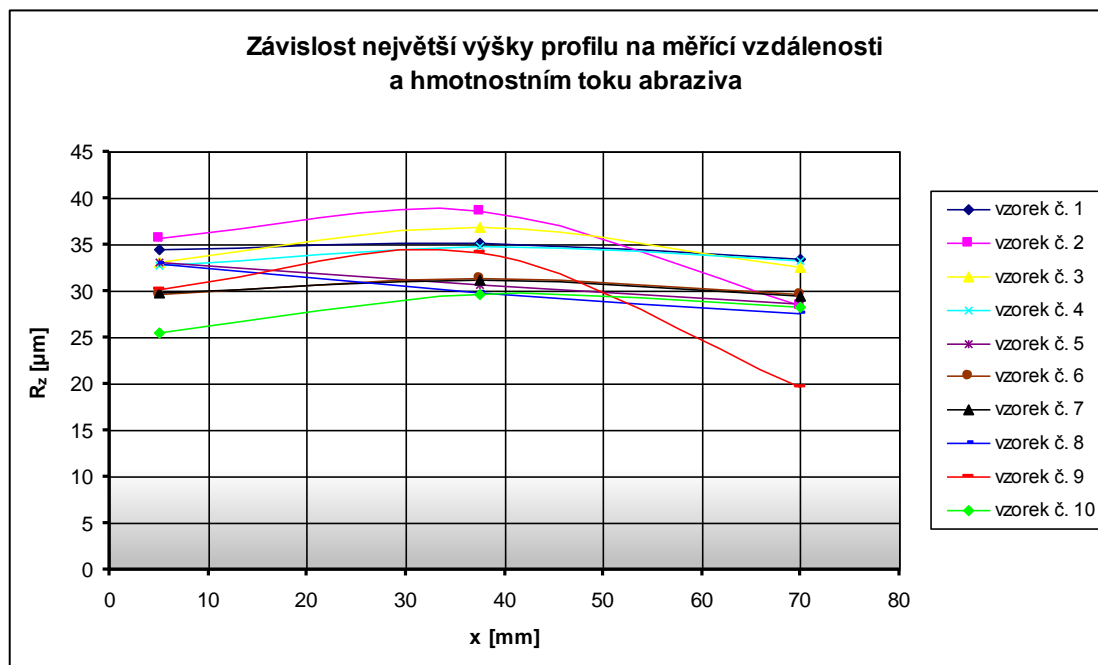
Mezi množstvím abraziva a výslednou kvalitou povrchu byla sestavena rovnice vyjadřující jejich vzájemnou závislost. Průběh této závislosti se blížil lineární závislosti s pravděpodobností 98 %. Hodnoty byly při experimentu testovány na normální rozdělení Shapiro-Wilksovým testem a byl u nich zjištěn korelační koeficient 0,9889. Závěrem lze tedy konstatovat, že závislost množství abraziva na kvalitu řezaného povrchu je téměř lineární.

b) Největší výška profilu R_z

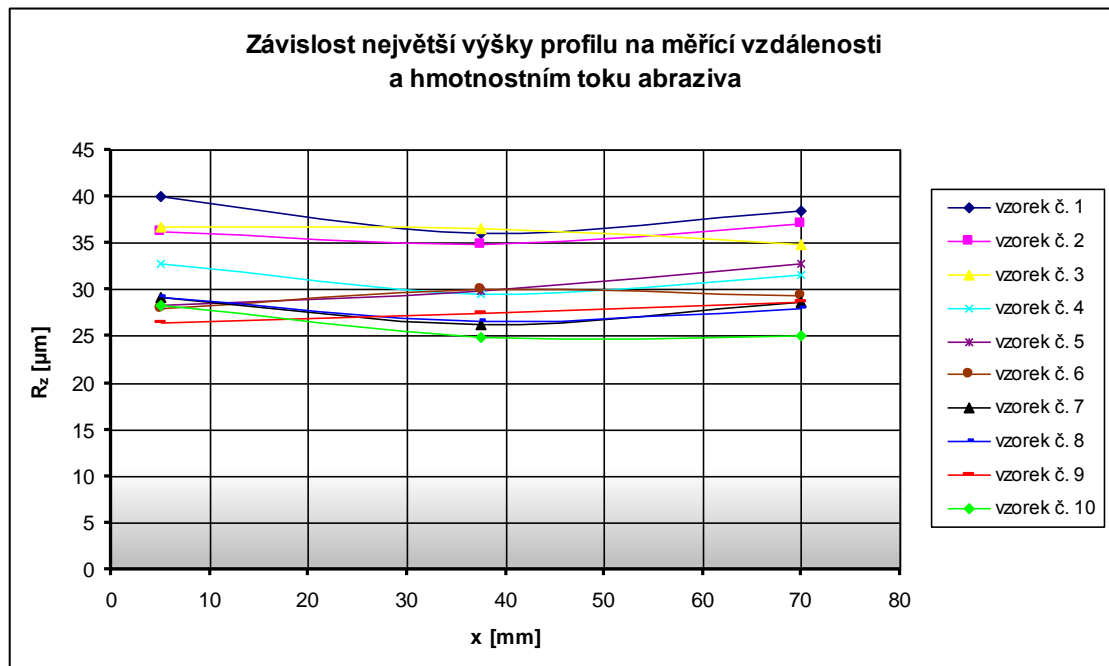
Tab. 3.11 Největší výška profilu R_z

č. vzorku	hmotnostní tok abraziva m_a [$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$]	levá strana vzorku			pravá strana vzorku		
		měřicí vzdálenost [mm]			měřicí vzdálenost [mm]		
		5	37,5	70	5	37,5	70
		největší výška profilu R_z [μm]					
1	150	34,4	35,2	33,4	40,1	36,0	38,4
2	200	35,7	38,6	28,4	36,2	34,9	37,1
3	250	33,1	36,9	32,6	36,7	36,5	34,9
4	300	32,7	34,8	33,2	32,8	29,5	31,6
5	350	33,1	30,7	28,7	28,3	29,9	32,8
6	400	29,6	31,4	29,6	28,0	30,0	29,3
7	450	29,8	31,2	29,4	29,2	26,3	28,7
8	500	33,0	29,9	27,6	29,2	26,6	28,0
9	550	30,2	34,2	19,7	26,4	27,5	28,7
10	600	25,6	29,7	28,3	28,4	24,9	25,1

Z naměřených hodnot R_z (tab. 3.11) byly opět sestrojeny grafy vyjadřující vliv hmotnostního toku abraziva na největší výšku profilu (obr. 3.24 a obr. 3.25).

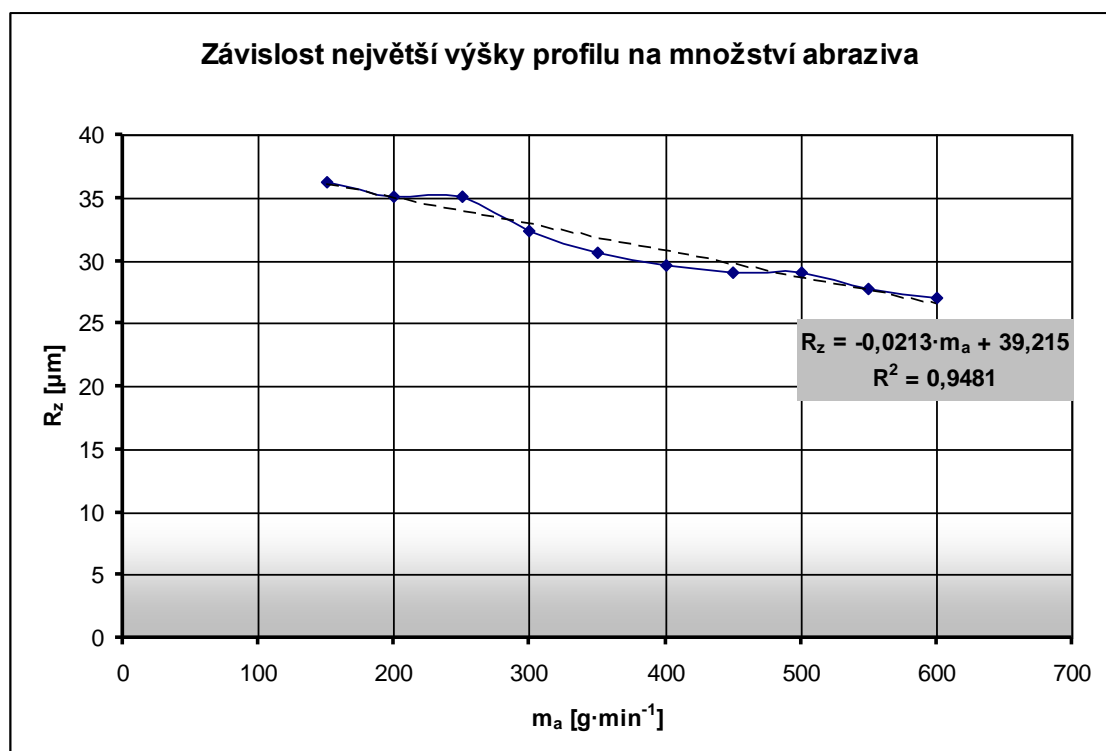


Obr. 3.24 Největší výšky profilu levých stran vzorků



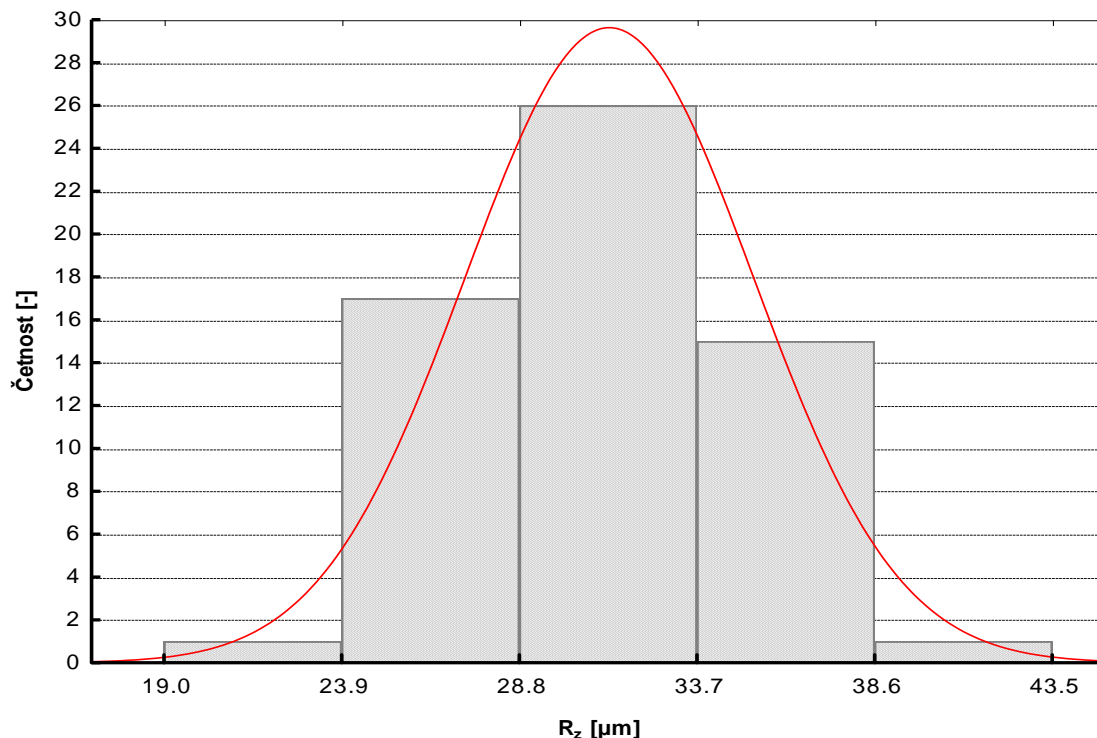
Obr. 3.25 Největší výšky profilu pravých stran vzorků

Z průměrných hodnot největších výšek profilů uvedených v tabulce 3.10 byla sestavena grafická závislost, která je zobrazena na obrázku níže.



Obr. 3.26 Vliv množství abraziva na největší výšku profilu

Všechny hodnoty největších výšek profilu byly též vyneseny do histogramu (obr. 3.27) a statisticky testovány na normální rozdělení.



Obr. 3.27 Histogram naměřených hodnot největších výšek profilu

Zhodnocení experimentu

Množství abraziva, dodávané do směšovací trysky abrazivní řezací hlavy, má vliv i na největší výšky profilu získané na povrchu. Mezi těmito veličinami je téměř lineární závislost, o čemž je možno se přesvědčit z uváděného grafu, v němž se změřené hodnoty blíží k lineární závislosti s pravděpodobností odpovídající téměř 95 %. Po statistické stránce se hodnoty R_z řídí normálním rozdělením, kdy při Shapiro-Wilkově testu dosáhl koeficientu korelace 0,9780.

Nejnižší výšky profilu bylo dosaženo v místě odpovídajícímu i nejnižší průměrné aritmetické úchylce. Naměřená hodnota byla 19,7 μm . V tomto místě zřejmě došlo k nějaké anomálii v řezném procesu, a proto zde bylo dosaženo těchto hodnot.

V příloze 3 jsou uvedeny grafické závislosti největších výšek profilu jednotlivých vzorků.

3.9.4 Experiment na zjištění hlukové hladiny

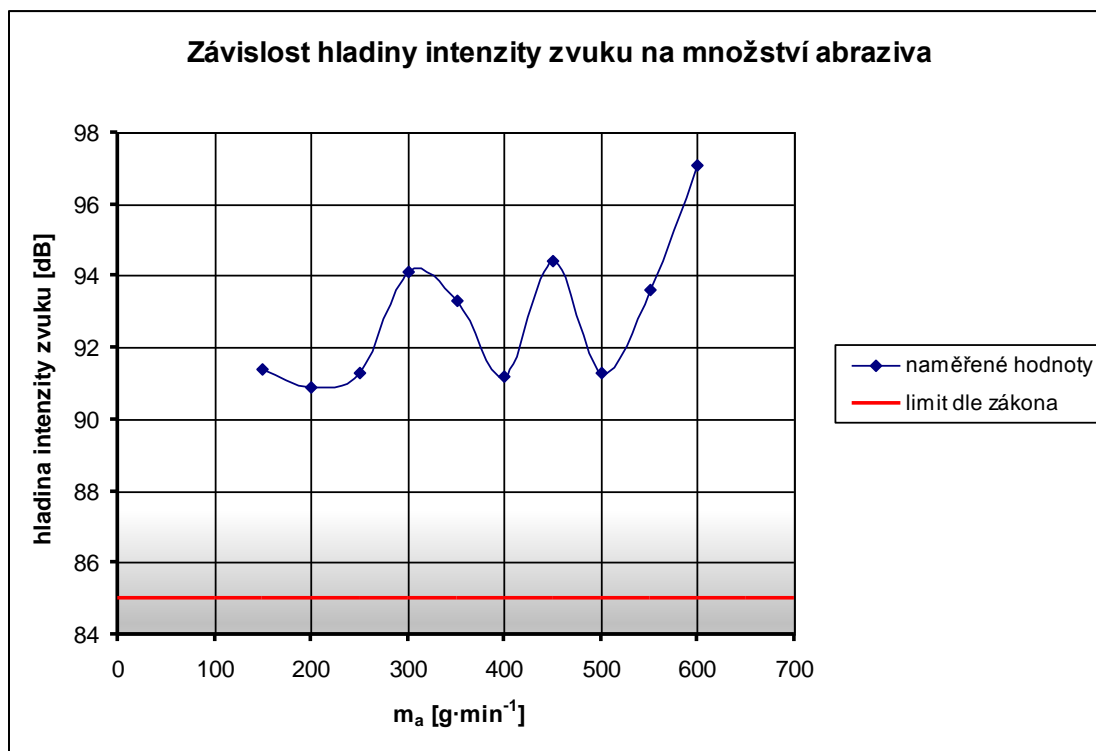
Posledním z experimentů je experiment zkoumající závislost mezi množstvím dodávaného abraziva a hladinou vytvářeného hluku při řezání. Tento experiment byl prováděn souběžně s experimentem předešlým, a tudíž veškeré vstupní hodnoty a parametry zůstaly zachovány. Konečná hladina intenzity zvuku byla zapříčiněna pouze řezným procesem, nebyla ovlivněna hlukem způsobeným při přípravě tlakové vody – hydraulická jednotka a kompresor byly umístěny v oddělené místnosti. Hlukoměr byl umístěn v konstantní vzdálenosti 1 500 mm od řezacího stolu.

Výsledky experimentu

V průběhu řezného procesu byly měřeny za pomoci hlukoměru maximální hodnoty hladin intenzity zvuku (tab. 3.12), jenž byly poté vyneseny do grafu (obr. 3.28).

Tab. 3.12 Naměřené hladiny intenzity zvuku

číslo vzorku	hmotnostní tok abraziva m_a [g·min ⁻¹]	hladina intenzity zvuku [dB]
1	150	91,4
2	200	90,9
3	250	91,3
4	300	94,1
5	350	93,3
6	400	91,2
7	450	94,4
8	500	91,3
9	550	93,6
10	600	97,1



Obr. 3.28 Zjištěné hodnoty hladiny hluku

Zhodnocení experimentu

Z grafické interpretace není patrna žádná závislost mezi hmotnostním tokem abraziva a hladinou intenzity zvuku. Rozptyl získaných hodnot může být dán nahodilými vlivy během řezání. I přesto se stal tento experiment základem, jenž by se mohl dále rozvíjet a zkoumat. Nejvyšší naměřená hodnota je 97,1 dB a bylo jí dosaženo při použití $600 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ abraziva.

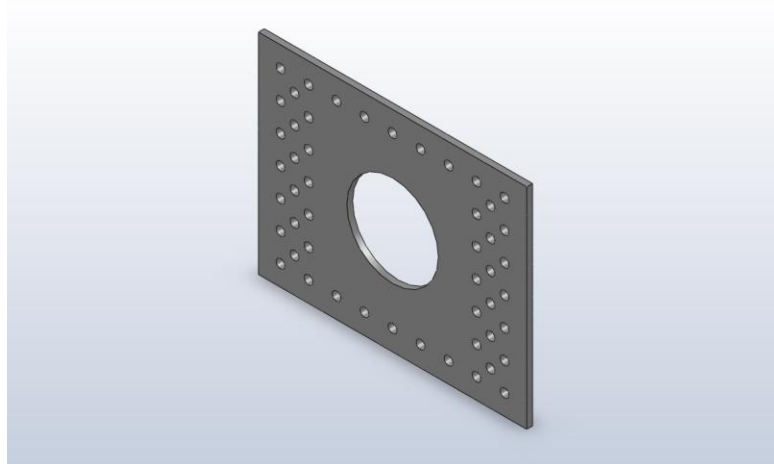
Zarážející na vyhodnocení ovšem je fakt, že všechny hodnoty přesahují zákonem povolený limit, jenž je 85 dB. Z tohoto důvodu je nutné při pracovním procesu neustále používat sluchovou ochranu.

4 KOMPLETNÍ ŘEŠENÍ TECHNOLOGIE PRO KONKRÉTNÍ SOUČÁST

Jedním z cílů předkládané práce je zhotovení konkrétní součásti za použití technologie vodního paprsku. Postup výroby součásti je shrnut v jednotlivých podbodech kapitoly.

4.1 Součást a její rozměry

Řezaná součást (obr. 4.1) je vyráběna z chrom-niklové austenitické oceli 1.4301 (X5CrNi18-10, ČSN 17 240). Její výkres s rozměry je v příloze 4, hmotnost součásti je 10,99 kg.

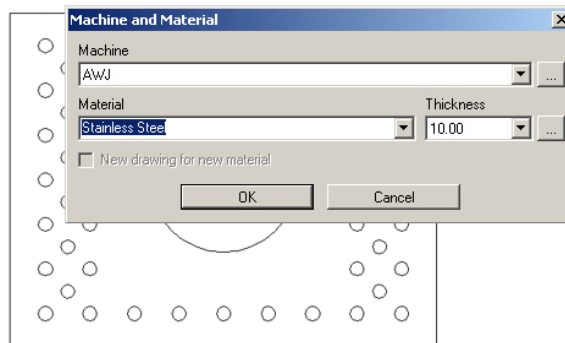


Obr. 4.1 Řezaná součást

4.2 Vytvoření řezné geometrie

Na začátku řezacího procesu byl výkres součásti od zákazníka, který byl v elektronické podobě – DWG formátu, a který byl otevřen v programu IGEMS. Nejprve bylo zapotřebí odmazat všechny kóty, osy a nadbytečné čáry z tohoto výkresu. Ve jmenovaném programu je k tomuto účelu několik usnadňujících funkcí. Po jejich použití na výkrese zůstanou pouze čáry sloužící následně jako vodící čáry pro řezání.

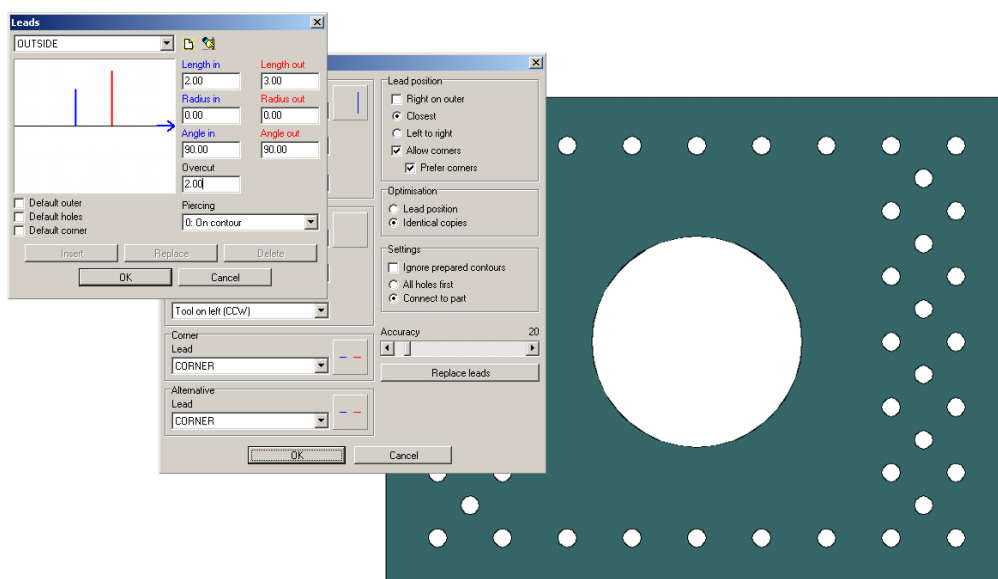
Poté se tomuto upravenému souboru čar přiřadí z nabídky materiál a tloušťka (obr. 4.2). Pokud námi požadovaný materiál v nabídce není, tak je možnost materiál vytvořit. Od zvoleného materiálu a jeho tloušťky se pak odvíjí řezací parametry.



Obr. 4.2 Přiřazení materiálu a tloušťky

Z množiny čar se vytvoří součástka a na monitoru se vyplní kontura zelenou barvou. Dále se určí kvalita řezaného povrchu – Q2 (hrubý řez).

Dalším postupným krokem je vytvoření nájezdových a výjezdových míst, což může být uděláno automaticky nebo manuálně. Nejprve se vytváří nájezdová místa pro vnější kontury (obr. 4.3).



Obr. 4.3 Zadávání nájezdových a výjezdových drah u vnějších tvarů

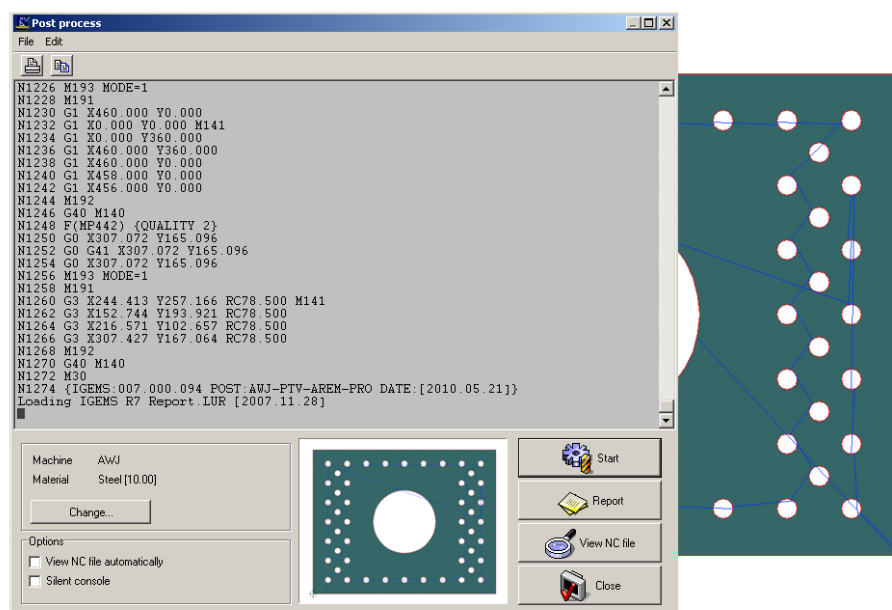
Paprsek může ke kontuře najíždět různě – pod úhlem, zaobleně, atd. Délka nájezdu, jenž musí být dostatečná k tomu, aby se paprsek prořezal skrz materiál, byla zvolena 2 mm, a byla kolmo na konturu. Délka výjezdu byla 3 mm a byla kolmo od kontury. Délka přejezdu byla 2 mm (u malých součástí se volí minusová hodnota, čímž se vytvoří můstek zamezující propadu součásti do lapače). Následně se nastaví totéž u vnitřních otvorů – byl zvolen pouze přejezd 2 mm. Ostatní hodnoty byly nulové z důvodu, že otvory jsou pouze pro šrouby a je u nich zajištěna dostatečná vůle, tudíž nebylo nutné zadávat nájezdové a výjezdové dráhy zajišťující vyšší kvalitu řezané plochy. Po potvrzení tlačítkem OK se na součásti vytvoří přejezdové

a požadované řezné dráhy. Toto nastavení se dá posléze ještě ručně upravovat tak, aby byla zajištěna co největší optimalizace řezání.

4.3 Program

V dalším kroku preprocessingu se na kontuře určí počáteční bod, od něhož začíná program. U součásti se nejprve budou řezat díry o průměru 15 mm, následně se vyřízne obrys a nakonec středová díra.

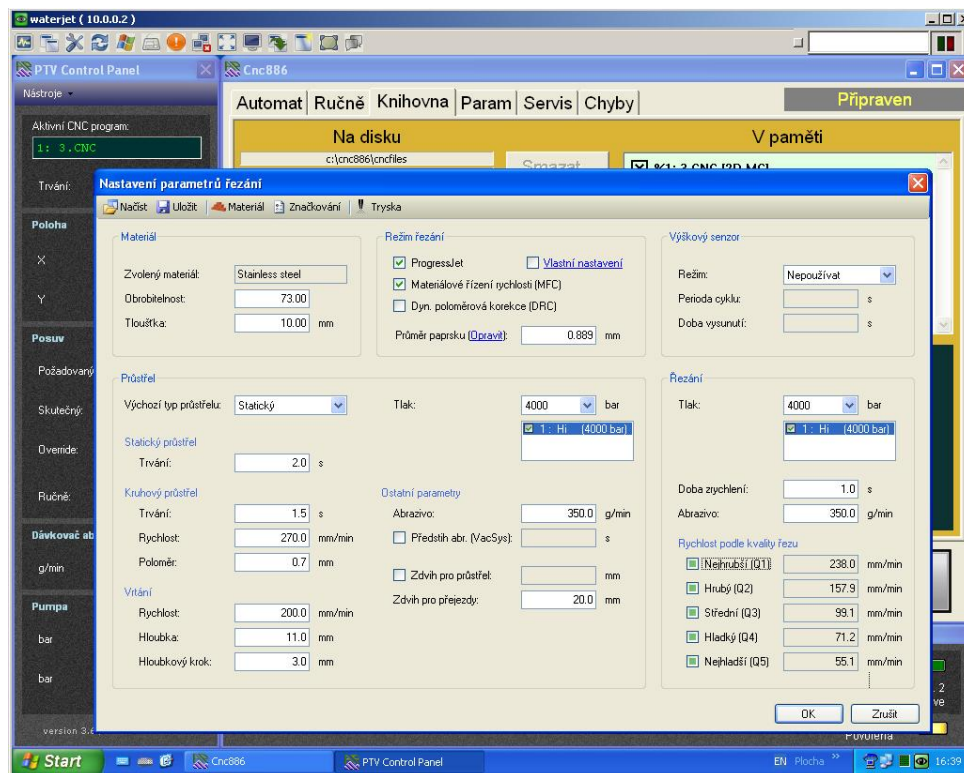
Poté se spustí postprocessing, což je vidět na obrázku 4.4. Dochází tak k vytvoření programu, který se po potvrzení uloží na síť, čímž se zajistí možnost jeho následného načtení do pracovního počítače. Z postprocessingu je možno vygenerovat zprávu obsahující všechny řezací parametry. Po jejím vytisknutí může být přiložena k součásti, což se zejména ve velkosériové výrobě projeví ve zjednodušené manipulovatelnosti a skladovatelnosti hotových výrobků.



Obr. 4.4 Tvorba programu

4.4 Příprava stroje na řezání

V pracovním počítači se z adresáře načte vytvořený program, jehož fragment je vidět v předešlém obrázku. Poklepnutím načteného programu v okně kontrolního panelu se objeví okno (obr. 4.5), v němž je možné ještě editovat určité parametry jako množství abraziva pro řezání a průstřel, tlak vody, dobu trvání průstřelu, vypínat (zapínat) naklápění řezné hlavy, atd.



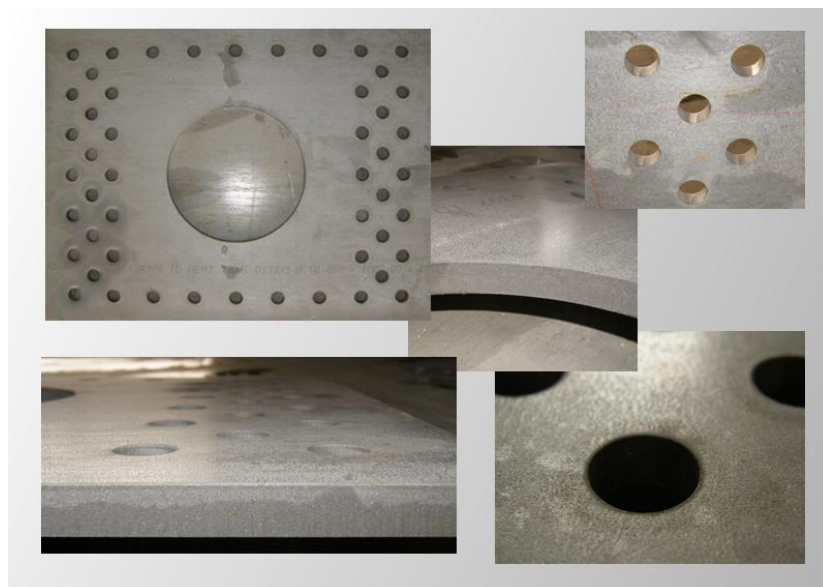
Obr. 4.5 Pracovní prostředí řezacího stroje

Nyní je programová část připravena a je tedy nutné na řezací stůl umístit tabuli materiálu, z něhož bude součást řezána. Po položení a ustavení tabule se řezací hlavou najede do levého rohu tabule a aktuální bod, v němž se hlava nachází, se v programu nastaví jako nulový. Ještě se zkontroluje správná vzdálenost stand-off, jež v našem případě činila 4 mm.

4.5 Řezání

Spustí se čerpadlo a následně program, čímž se zahájí samotné řezání. Na obrazovce je možno pozorovat, ve kterém bodě kontury se řezací hlava právě nachází (jsou uváděny i přesné 2D souřadnice), jaké jsou aktuální posuvové rychlosti a řezací čas. Řezné parametry pro řezání byly následující: tlak 4 000 bar, množství abraziva $350 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, použité abrazivo byl granát (MESH 80), průměry trysek jsou totožné s předešlými experimenty.

Po dořezání se hlavou odjede pryč od řezaného materiálu, aby se součást dala vyjmout, a vypne se čerpadlo. Součást je tedy vyřezána (obr. 4.6) a může následovat její další zpracování. I přesto, že součást byla řezána v hrubém řezu ($v_p = 157,9 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), tak na ní bylo dosaženo dobré kvality řezu. Řezná délka činila 4 597,4 mm (údaj ze zprávy). Celý proces řezání trval 31,5 minuty.



Obr. 4.6 Vyřezaná součást v různých pohledech

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ

Technicko ekonomické vyhodnocení bude vztaženo k součásti vyráběné v předešlém bodu práce. Na výslednou cenu řezané součásti mají vliv následující faktory:

- cena materiálu,
- náklady na hodinu provozu stroje.

Cena materiálu se odvíjí od výrobce, potažmo dodavatele. Náklady na hodinu provozu stroje se mohou vypočítat dle následujícího vztahu:

$$N_{hS} = S_f + \frac{C_S + N_i + N_d - L_h}{Z \cdot F_{ef}} \quad (5.1)$$

Kde: N_{hS} – náklady na hodinu provozu stroje	[Kč·h ⁻¹]
S_f – fixní hodinová sazba	[Kč·h ⁻¹]
C_S – cena stroje	[Kč]
N_i – náklady na instalaci stroje	[Kč]
N_d – náklady na demontáž	[Kč]
L_h – likvidační hodnota	[Kč]
Z – doba životnosti	[rok]
F_{ef} – efektivní časový roční fond stroje	[h]

Fixní hodinová sazba v sobě zahrnuje zejména náklady na:

- mzdy obsluhy,
- energie,
- abrazivo,
- náhradní díly a další položky.

Fixní hodinová sazba se samozřejmě může měnit, ať klesat při bezporuchovosti zařízení, či naopak růst při neočekávaných nákladech spojených s údržbou stroje. Životnosti jednotlivých komponent jsou odlišné a nelze je přesně určit. Pohybují se v rozmezí od 500÷5000 motohodin. Životnosti jsou dané celou řadou faktorů, mezi nimiž má největší váhu používaný tlak a množství abraziva.

Část fixní hodinové sazby, sestávající se z nákladů na energie (voda, vzduch, elektřina), abrazivo a náhradní díly, je dle firmy PTV s.r.o.³² vyčíslena na 400 Kč·h⁻¹. Za povšimnutí určitě stojí fakt, že tato suma je téměř z 50 % daná pouze cenou abraziva. Tento údaj může kolísat v závislosti na druhu řezu a dalších řezných parametrech, ale také se v něm odráží aktuální stav na světových trzích a burzách. V částce 400 Kč·h⁻¹ však nejsou zahrnuty mzdy obsluhy, odpisy a další položky.

Celkové náklady na hodinu provozu stroje se pak ve firmách pohybují v rozsahu od 1 500÷2 500 Kč·h⁻¹.

5.1 Výpočet ceny součásti

Cena součásti je důležitým faktorem při udržení vzájemné konkurenceschopnosti firem zabývajících se dělením materiálů. Odvíjí se od nákladů na řezání a materiál.

5.1.1 Náklady na řezání

Pro uváděný případ budou brány náklady na hodinu provozu stroje $N_{hS} = 2\,000 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$. Řezný proces trval 31,5 minuty (1 890 s). Z těchto údajů se vypočítají náklady na vyřezání součásti:

$$N_{\dot{R}} = N_{hS} \cdot t_{as} = 2\,000 \cdot \frac{1\,890}{3\,600} = 1\,050 \text{ Kč} \quad (5.2)$$

Kde: $N_{\dot{R}}$ – náklady na řezání [Kč]
 N_{hS} – náklady na hodinu provozu stroje [Kč·h⁻¹]
 t_{as} – čas řezání [s]

Během řezání zadané součásti ($t_{as} = 31,5 \text{ min}$, $m_a = 350 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$), bylo teoreticky spotřebováno 11,025 kg abraziva. Při uvažování ceny abraziva ($8,70 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$)³² jsou náklady na abrazivo:

$$N_A = C_A \cdot S_A = 8,70 \cdot 11,025 \cong 96 \text{ Kč} \quad (5.3)$$

Kde: N_A – náklady na abrazivo [Kč]
 C_A – cena abraziva [Kč·kg⁻¹]
 S_A – teoretická spotřeba abraziva [kg]

Celkové náklady na řezání součásti jsou přibližně z 1/10 tvořeny pouze náklady na abrazivo, což potvrzuje výše zmíněný fakt.

5.1.2 Náklady na materiál

K nákladům na řezání, v případě kdy zákazník nedodává svůj vlastní materiál, je nutno ještě připočíst cenu materiálu, pro jejíž výpočet je potřeba znát hmotnost výpalku. Rozměry samotné součásti jsou 360 x 460 x 10 mm. Jelikož na rohu tabule zůstane mezi vyřezávanou součástí a hranami tabule nevyužitý materiál, tak je zapotřebí zvýšit rozměry součásti o cca 10 mm, takže kalkulační plocha výpalku bude 370 x 470 mm. Z navržené plochy se posléze vypočte hmotnost výpalku:

$$m_v = S_v \cdot t \cdot \rho = 0,37 \cdot 0,47 \cdot 0,01 \cdot 8\,000 = 13,912 \text{ kg} \quad (5.4)$$

Kde: m_v – hmotnost výpalku [kg]
 S_v – plocha výpalku [m²]
 t – tloušťka materiálu [m]
 ρ – hustota nerezové oceli [kg·m⁻³]

Cena materiálu součásti se pak vypočte dle následujícího vztahu:

$$N_M = m_V \cdot C_M = 13,912 \cdot 83,3 \cong 1159 \text{ Kč} \quad (5.5)$$

Kde: N_M – náklady na materiál [Kč]
 m_V – hmotnost výpalku [kg]
 C_M – cena materiálu⁴⁰ [Kč·kg⁻¹]

5.1.3 Celkové náklady na vyráběnou součást

Konečná cena součásti zahrnující v sobě jak náklady na řezání tak i náklady na materiál je vyčíslena následovně:

$$C_{SO} = N_R + N_M = 1159 + 1050 = 2209 \text{ Kč} \quad (5.6)$$

Kde: C_{SO} – konečná cena součásti [Kč]
 N_R – náklady na řezání [Kč]
 N_M – náklady na materiál [Kč]

Dílčí zhodnocení:

Konečná cena vyřezané součásti, kterou při převzetí zakázky zaplatí zákazník provozovateli řezacího zařízení, je výsledkem vztahu 5.6. Tato cena však nemusí být konečná, jelikož v řadě firem je poskytována sleva za sériovost zakázky. Tento fakt je vysvětlen tím, že při větším počtu kusů, je možnost naskládat součásti na tabuli s minimálním odstupem mezi sebou, čímž se nepatrně sníží kalkulační plocha, což přinese i snížení nákladů na materiál.

Větší úsporu přinese optimalizace řezání, jež se však vyplatí až při větším počtu kusů. Jak už bylo v této práci uváděno, tak nastavením materiálu a jeho tloušťky, při programování součásti, dojde k nastavení optimálních parametrů pro řezání. Tyto parametry však mohou někdy být naddimenzované, někdy logicky poddimenzované, a proto v případě sériových výrob je lepší odladit optimální parametry přímo na stroji, čímž dojde ke snížení nákladů, na což je v současnosti ze strany zákazníků vyvíjen obrovský tlak.

Navrhované náklady na hodinu provozu stroje jsou brány pouze orientačně. Je jasné, že některé firmy dokážou řezat na samotné spodní hranici uváděného intervalu, naopak existují firmy účtující si za hodinu provozu oněch zmíněných 2 500 Kč. V tomto případě je vhodné zvážit, zda by součást nemohla být zhotovena některou jinou dělicí technologií, pokud je to ale z technologického hlediska možné.

ZÁVĚR

Předkládaná práce je zaměřena na problematiku řezání vodním paprskem. Je možno ji rozdělit do dvou celků, a to teoretického a praktického. V obou celcích byly splněny zadané cíle. Některé z teoreticky popisovaných problémů dané technologie byly i prakticky experimentálně ověřeny.

V první části této práce byly uvedeny možné metody používané v oblasti řezání vodním paprskem. Zároveň byly popsány jednotlivé části zařízení. Druhá část pojednává o softwarovém vybavení zařízení pro řezání vodním paprskem, stejně tak jako o způsobu zadávání technologických dat.

Třetí část se zabývá charakteristickými rysy a problémy objevujícími se během rezného procesu. Některé podkapitoly jsou doplněny experimenty. Při prvním experimentu se udržovala konstantní posuvová rychlost a byly vytvořeny řezy v kvalitách Q1-Q5. Tyto řezy byly pouze vizuálně představeny. Druhý experiment se zabývá posouzením vlivu množství abraziva na výslednou strukturu povrchu. Bylo zjištěno, že mezi množstvím abraziva a kvalitou výsledného povrchu existuje téměř lineární závislost. S narůstajícím množstvím abraziva klesají hodnoty průměrných aritmetických úchylek i největších výšek profilů. Tento závěr je však potvrzen pouze u nejjemnějšího řezu, poněvadž u hrubého řezu povrch vykazoval špatně měřitelné kvality. Z tohoto důvodu byly povrchy jednotlivých vzorků pouze nafoceny.

V současné praxi, kdy se každá firma snaží o snížení nákladů na co nejnižší částku, se ale nejčastěji používá právě hrubý řez, protože je pro zákazníka dostačující a nabízí mu lepší ekonomičnost než v případě kvalitnějších řezů. Zajímavostí jednoho z experimentů bylo vizuální porovnání řezu, u něhož byl použit systém eliminující vznik striací náklonem rezné hlavy, s řezem nevyužívající tuto technologii. Na pořízených obrázcích byl patrný rozdíl ve tvaru striací.

Předmětem posledního experimentu bylo hledání závislosti mezi použitým množstvím abraziva a vytvářenou hladinou hluku. Mezi těmito dvěma proměnnými nebyla zjištěna žádná jednoznačná závislost. Za povšimnutí však stojí, že všechny naměřené hodnoty hluku překračovaly zákonem povolenou hodnotu. Tímto experimentem by se dalo dále zabývat, což by mohlo vést k nalezení určité závislosti.

Posledními dvěma částmi předkládané diplomové práce byl popis technologie pro výrobu reálné součásti a její technicko-ekonomické zhodnocení.

Řezání vodním paprskem patří mezi nekonvenční technologie budující si v dnešní době čím dál pevnější postavení ve všech možných průmyslových odvětvích. Často je tato technologie používána v důsledku své flexibility a univerzálnosti. Těžko by se hledal jiný nástroj, jímž je možné obrábět na počátku směny dlaždice a na konci nerezovou ocel s tloušťkou v desítkách milimetrů. Metoda vodního paprsku je především dobře použitelná pro materiály, z nichž některé mají svá specifika, díky čemuž je nelze jinak opracovat než právě vodním paprskem. Samozřejmě i technologie vodního paprsku má své limity. Právě proto sílí tlak na firmy, jež se zabývají výrobou těchto zařízení, aby i tyto limity byly odstraněny a z paprsku se tak stala metoda uživateli běžně dostupná v jakémkoliv prostředí. Investice do vodního paprsku se jeví jako dobře zvolená firemní strategie.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. 1. vyd. Ostrava: Jiří Pustina, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
2. *Flow* [online]. 2011 [cit. 2011-01-15]. History. Dostupné z WWW: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>>.
3. HUMÁR, Anton. *Technologie I-Technologie obrábění-3.část* [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>.
4. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technologie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
5. *PTV s.r.o.* [online]. 2006 [cit. 2011-01-18]. Abrazivo. Dostupné z WWW: <<http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/abrazivo/index.html>>.
6. KULEKCI, Mustafa Kemal. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, Issue 12, [cit. 2011-01-20]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6V4B-46NY9VV-4-1B&_cdi=5754&_user=640830&_pii=S089069550200069X&_origin=gateway&_coverDate=09%2F30%2F2002&_sk=999579987&view=c&wchp=dGLzVzb-zSkzS&md5=670f10033b08970d3e4900b30d721124&ie=/sdarticle.pdf>.
7. ORBANIC, Henri and Mihael JUNKAR. Analysis of striation formation mechanism in abrasive water jet cutting. *Wear* [online]. 25 August 2008, Issues 5-6, [cit. 2011-02-01]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6V5B-4S02T6N-1-17&_cdi=5782&_user=640830&_pii=S0043164808000148&_origin=gateway&_coverDate=08%2F25%2F2008&_sk=997349994&view=c&wchp=dGLzVtz-zSkWb&md5=78fb7dc5e85d00b4ba8f3be90c8e94bf&ie=/sdarticle.pdf>.
8. CHEN, Frank Link, et al. Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, Issue 2, [cit. 2011-02-02]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TGJ-49D2HT8-5-D&_cdi=5256&_user=640830&_pii=S0924013602011202&_origin=gateway&_coverDate=10%2F20%2F2003&_sk=998589997&view=c&wchp=dGLzVlz-zSkzk&md5=a8271cb08b1f305b1af39c724975e6a7&ie=/sdarticle.pdf>.
9. AVALLONE, Eugene A, Theodore BAUMEISTER and Ali M. SADEGH. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers (11th Edition)* [online]. New York: McGraw-Hill, 2007 [cit. 2011-02-02]. Materials of Engineering. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2204&VerticalID=0>. ISBN 978-0-07142-867-5.

10. HLOCH, Sergej, Jan VALÍČEK and Jana MULLEROVA. Vibrations measurements in the evaluation of the impact of focusing tube wear at abrasive waterjet machining. *Machines, technologies, materials: International virtual journal for science, technics and innovations for the industry* [online]. 2008, no. 10-11, [cit. 2011-02-02]. Dostupný z WWW: <http://mech-ing.com/journal/Archive/2008/10-11-2008/4_18_Hloch,Valicek,Mullerova_vibro.pdf>. ISSN 1313-0226.
11. AVALLONE, Eugene A, Theodore BAUMEISTER and Ali M. SADEGH. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers (11th Edition)* [online]. New York: McGraw-Hill, 2007 [cit. 2011-02-02]. Manufacturing Processes. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2204&VerticalID=0>. ISBN 978-0-07142-867-5.
12. HLOCH, Sergej, Michal HATALA and Robert ČEP. Influence and evaluation of selected factors to acoustic sound pressure at abrasive waterjet cutting technology. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, Řada strojní* [online]. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006 [cit. 2011-02-02]. Dostupné z WWW: <http://www.fs.vsb.cz/transactions/2006-1/1504_HLOCH_Sergej_HALATA_Michal_CEP_Robert.pdf>. ISSN 1210-0471.
13. ZENG, Jiyue and Thomas J. KIM. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear* [online]. 1996, Issue 2, [cit. 2011-02-11]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6V5B-3VTFHS7-33-2&_cdi=5782&_user=640830&_pii=0043164895067213&_origin=gateway&_coverDate=05%2F31%2F1996&_sk=998069997&view=c&wchp=dGLbVzW-zSkWA&md5=00fed4d7f559080ea6972bfcba5a0024&ie=/sdarticle.pdf>.
14. MADADNIA, Jafar, et al. A Study of Cavitation Induced Surface Erosion in Abrasive Waterjet Cutting Systems. *Advanced Materials Research* [online]. 2008, Volumes 53 – 54, [cit. 2011-02-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.scientific.net/AMR.53-54.357.pdf>>.
15. HLOCH, Sergej, Jana MULLEROVA a Jan VALÍČEK. Abrasive type influence on surface roughness at abrasive waterjet cutting. *Machines, technologies, materials: International virtual journal for science, technics and innovations for the industry* [online]. 2008, no. 10-11, [cit. 2011-02-20]. Dostupný z WWW: <http://mech-ing.com/journal/Archive/2008/10-11-2008/1_17.Hloch,Mullerova,Valicek_abrasives.pdf>. ISSN 1313-0226.
16. VALÍČEK, Jan, et al. Study of Surfaces Generated by Abrasive Waterjet Technology. *Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications* [online]. 2007, [cit. 2011-02-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/k2641x7p82133551/fulltext.pdf>>.
17. BRALLA, James G. *Design for Manufacturability Handbook (2nd Edition)* [online]. New York: McGraw-Hill, 1999 [cit. 2011-03-12]. Machined Components. Dostupné z WWW: <http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=3311&VerticalID=0>. ISBN 978-0-07-007139-1.

18. DVOŘÁK, Jaromír, Jana DVOŘÁKOVÁ a Martin SLANÝ. Aplikace umělé inteligence na analýzu vstupních parametrů a materiálových charakteristik pro technologii AWJ. *Výrobné inženýrstvo* [online]. 2009, Issue 1, [cit. 2011-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf09/1-str-24-28.pdf>>.
19. DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Technika, technologie* [online]. 2008, č. 15, [cit. 2011-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>>.
20. HLAVÁČ, Libor, et al. Prevence koroze kovů po obrábění kapalinovým paprskem. In *Sborník referátů konference AKI 2003* [online]. Praha: Asociace korozních inženýrů, 2003 [cit. 2011-03-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/met/aki/konferen/2003/sbornik/hlavac.pdf>>.
21. MARTINEC, Petr, et al. *Abrasives for AWJ cutting*. Ústav geoniky, Ostrava: INCO-COPERNICUS, 2002. 93 s. ISBN 80-86407-02-0.
22. MARTINEC, Petr, et al. Olivine as industrial abrasive for high-speed water jet technology. *Proceedings of the 16th International Conference on Water Jetting, Lake (ed.)*. 2002, s. 287 - 297. ISBN 1855980428.
23. FOLDYNA, Josef, et al. Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků. *Vodní paprsek 2009 – výzkum, vývoj, aplikace*. 2009, 16 s.
24. FOLDYNA, Josef, et al. Pulsating water jets. *Documenta Geonica 2005*. 2005, s. 18-29.
25. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. vyd. 1. Ostrava: Ámos Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
26. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
27. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
28. OLSEN, John H. *The Fabricator.com* [online]. 2003 [cit. 2011-03-22]. Software for abrasive water jet machines. Dostupné z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/software-for-abrasive-water-jet-machines>>.
29. BISHOP, Michael. *The Fabricator.com* [online]. 2009 [cit. 2011-03-22]. Reusing waterjet cutting abrasive. Dostupné z WWW: <<http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/reusing-waterjet-cutting-abrasive>>.
30. PTV s.r.o. [online]. 2006 [cit. 2011-03-23]. Recyklační jednotka. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/jnp/cz/produkty/recyklacni_jednotka/index.html>.
31. MOMBBER, Andreas W. Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: an impact-force study. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2001, Issues 1-2, [cit. 2011-03-23]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6V34-43J6MXG-5-4H&_cdi=5720&_user=640830&_pii=S0894177701000577&_origin=gateway&_coverDate=08%2F31%2F2001&_sk=999749998&view=c&wchp=dGLzVlb-zSkWb&md5=40c2f7fb6c6531c708ec4fc033a6237c&ie=/sdarticle.pdf>.

32. *PTV s.r.o.* Firemní materiály. Hostivice.
33. *IGEMS Software AB* [online]. 2010 [cit. 2011-03-26]. Products. Dostupné z WWW: <http://www.igems.se/index.php?option=com_content&task=view&id=15&Itemid=31>.
34. *PTV s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2011-03-26]. Software. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/public/c/f5/cc/8/5067_27446_Co_je_noveho_v_Igems_R9.pdf>.
35. *Flow* [online]. 2009 [cit. 2011-03-26]. Software. Dostupné z WWW: <<http://www.flowcorp.cz/flowmaster-software-suite-83/>>.
36. JURISEVIC, Bostjan, Viktor SAJN and Mihael JUNKAR. Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, Numbers 9-10, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/medtp5xly5nfn05/fulltext.pdf>>.
37. HLOCH, Sergej a Jan VALÍČEK. Drsnost povrchu a hydroabrazivne delenie. *Strojárstvo Extra* [online]. 2009, č. 11, [cit. 2011-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.strojarsstvo.sk/docwww/SK/319/319.pdf>>.
38. *Primapol* [online]. 2008 [cit. 2011-04-01]. Hliníkové desky. Dostupné z WWW: <<http://www.primapol.cz/almg3-en-aw-5754.html>>.
39. *Matbase* [online]. 2009 [cit. 2011-04-02]. AlMg3. Dostupné z WWW: <<http://www.matbase.com/material/non-ferrous-metals/wrought-aluminium/almg3-5754a/properties>>.
40. *A20* [online]. 2011 [cit. 2011-04-03]. Nerezové plechy PN. Dostupné z WWW: <<http://www.a20.cz/10080/>>.
41. *LuPaul-FC Mason* [online]. 2010 [cit. 2011-04-11]. Water Jet Cutting. Dostupné z WWW: <<http://www.lupaul.com/images/waterjet.jpg>>.
42. *Flow* [online]. 2009 [cit. 2011-04-11]. DYNAMIC WATERJET (DWJ). Dostupné z WWW: <http://static.flowcorp.cz/watermarked/555c1_Image_Products_DWJ_DWJ_Cutting_Head_Composites_shrink800x520_quality_90.jpg>.
43. *Phoenix Water Jet Cutting Pros* [online]. 2010 [cit. 2011-04-11]. Water Jet Cutting. Dostupné z WWW: <http://phoenixwaterjetcutting.com/images/content_image4c570f45a25ca.jpg>.
44. *Awac s.r.o.* [online]. 2011 [cit. 2011-04-11]. Obrázky-ukázky. Dostupné z WWW: <http://www.awac.cz/fotov/_f_240strom_plexi_vodni_paprsek.jpg>.
45. *Bohler water jet cutting* [online]. 2011 [cit. 2011-04-11]. How to Use Water Jet Cutter. Dostupné z WWW: <<http://4.bp.blogspot.com/-aHS7Apzn10Q/TamZvCcC1ul/AAAAAAAAAAB0/JIG3WtBZjng/s1600/water+jet+cutter.jpg>>.
46. *PTV s.r.o.* [online]. 2008 [cit. 2011-04-15]. New line. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/public/46/d3/c7/7c/4008_25792_NewLine_velky.jpg>.
47. *StereoVision Engineering* [online]. 2000 [cit. 2011-04-15]. Ultrahigh-Pressure Fluidjet Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.stereovisionengineering.net/FJ%20Schematic.jpg>>.
48. *Prime TECH* [online]. 2008 [cit. 2011-04-16]. Garnet. Dostupné z WWW: <<http://www.prime-tech.ca/garnetpage.jpg>>.
49. *Reno – Tech.cz, s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-19]. Syntetická abraziva. Dostupné z WWW: <<http://www.piskovacky.cz/products/ab-6.jpg>>.

50. *PTV s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-19]. Recyklační jednotka. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/public/9e/f5/1d/eb/702_18096_recyklace_stin.jpg>.
51. *Jet System* [online]. 2011 [cit. 2011-04-19]. A Comprehensive Overview of Abrasivejet Technology. Dostupné z WWW: <http://www.jetsystem.pl/_filez/Image/lwf4_small.gif>.
52. *PTV s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-19]. PTV JETS - 2.2/60 bez krytáže. Dostupné z WWW: <http://www.ptv.cz/ptv/public/9a/98/6a/f0/5105_28045_22kW_bez_kapotaze_velky.jpg>.
53. *SWA* [online]. 2010 [cit. 2011-04-20]. Industrial Waterjet. Dostupné z WWW: <<http://www.swa.se/img/scaled/cuttinghead.jpg>>.
54. *Alcom Alval s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2011-04-23]. Abrazivní trysky. Dostupné z WWW: <http://files.vodnipaprsek.com/200000560-ba350bb2ed/Tryska_550.jpg>.
55. *WARD Jet* [online]. 2009 [cit. 2011-05-16]. Overview. Dostupné z WWW: <http://cdn.wardjet.com/images/waterjet-university/03-How-It-Works_files/image016.jpg>.
56. *The Fabricator* [online]. 2003 [cit. 2011-04-23]. Software for abrasive water jet machines. Dostupné z WWW: <<http://image.thefabricator.com/a/articles/photos/358/fig2a.jpg>>.
57. *The Fabricator* [online]. 2003 [cit. 2011-04-23]. Software for abrasive water jet machines. Dostupné z WWW: <<http://image.thefabricator.com/a/articles/photos/358/fig1b.jpg>>.
58. *Flow* [online]. 2009 [cit. 2011-04-23]. Vodní paprsek a jeho možnosti. Dostupné z WWW: <http://www.flowcorp.cz/upload/Image/News/rezani-vodnim-paprskem_big.jpg>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
(Mg, Fe) ₂ (SiO ₄)	-	olivín
[Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃]	-	železo hliníkový granát (almandin)
2D	-	2-Dimension
3D	-	3-Dimension
5Al ₂ O ₃ ·3Y ₂ O ₃	-	yttrium hliníkový granát
A	%	tažnost
Al ₂ O ₃	-	oxid hlinitý
ASJ	-	Abrasive Slurry Jet
AWJ	-	Abrasive Water Jet
bmp	-	formát souboru
c ₁	m·s ⁻¹	rychlost šíření rázové vlny v kapalině
c ₂	m·s ⁻¹	rychlost šíření rázové vlny v řezaném materiálu
C	-	experimentálně stanovená konstanta
C _A	Kč·kg ⁻¹	cena abraziva
CAD	-	Computer Aided Design
CAM	-	Computer Aided Manufacturing
C _f	-	koeficient tření
C _l	-	koeficient druhu řezaného materiálu, experimentálně stanovená konstanta
C _M	Kč·kg ⁻¹	udávající část paprsku v řezu cena materiálu
CNC	-	Computer Numerical Control
C _S	Kč	cena stroje
C _{SO}	Kč	konečná cena součásti
d _a	mm	průměr abrazivní trysky - vnitřní
d _d	mm	průměr diamantové trysky
d _j	mm	průměr abrazivního paprsku
D _a	mm	průměr abrazivní trysky - vnější
DWG	-	DraWinG
DXF	-	Data eXchange Format
E	MPa	Youngův modul
f(φ)	-	funkce úhlu, pod níž zasáhne abrazivní částice materiál
F _{ef}	h	efektivní časový roční fond stroje
h ₁	mm	hloubka zóny řezného opotřebení
h ₂	mm	hloubka zóny deformačního opotřebení
h ₃	mm	hloubka, v níž paprsek působí proti svému původnímu směru
jpg	-	formát souboru
k	-	poměr vertikální a horizontální síly
K	-	kontinuální vodní paprsek
l _p	m	základní délka
L	mm	vzdálenost mezi vstupním a výstupním místem paprsku

L_a	mm	délka abrazivní trysky
L_t	mm	délka pronikání částice do povrchu
L_h	Kč	likvidační hodnota
m_a	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	hmotnostní tok abraziva
m_p	kg	hmotnost částice
m_v	kg	hmotnost výpalku
N_A	Kč	náklady na abrazivo
N_d	Kč	náklady na demontáž
N_{hS}	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	náklady na hodinu provozu stroje
N_i	Kč	náklady na instalaci stroje
N_M	Kč	náklady na materiál
$N_{\text{Ř}}$	Kč	náklady na řezání
p	bar (MPa)	tlak kapaliny
P	-	pulzující vodní paprsek
PAA	-	polyakrylamid
PEO	-	polyetyloxid
p_i	MPa	impaktní tlak
p_s	MPa	stagnační tlak
R^2	-	spolehlivost proložené přímky
R_a	μm	průměrná aritmetická úchylka
R_m	MPa	pevnost v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
S_A	kg	teoretická spotřeba abraziva
S_f	$\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$	fixní hodinová sazba
SiO_2	-	křemičitý písek
S_V	m^2	plocha výpalku
t	m	tloušťka materiálu
t_{as}	s	řezný čas
$TI.$	mm	tloušťka materiálu
v	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost proudění paprsku
v_a	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost abrazivních částic
v_c	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	charakteristická rychlost
v_e	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	maximální rychlost pohybu abrazivních částic vyplývající pouze z elastické deformace
V_M	m^3	množství odebraného materiálu
v_p	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	posuvová rychlost
v_r	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost radiálního toku kapaliny
WJM	-	Water Jet Machining
x_1	mm	délka kroku
x_2	mm	délka ustáleného úseku dělení
y_t	mm	hloubka proniknutí
z	mm	stand-off (vzdálenost abrazivní trysky od materiálu)
$z(x)$	-	funkce popisující profil
Z	rok	doba životnosti

α	$^{\circ}$	úhel nárazu částic
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
π	-	Ludolfovo číslo
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$	hustota
ρ_1	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$	hustota paprsku
ρ_2	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$	hustota řezaného materiálu
ρ_a	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$	hustota abraziva
σ_f	Pa	napětí materiálu
σ_{kl}	Mpa	mez kluzu
φ	$^{\circ}$	úhel výstupu paprsku z materiálu
ψ	-	funkce úhlu pod níž zasáhne abrazivní částice materiál

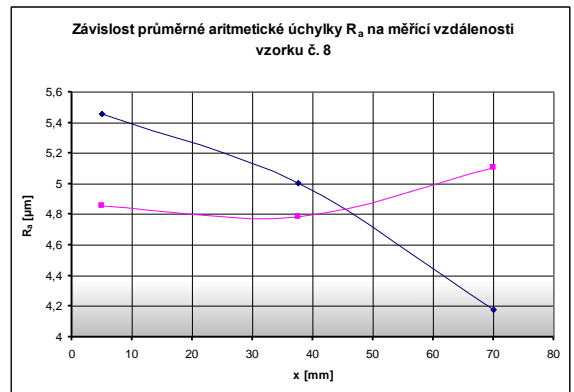
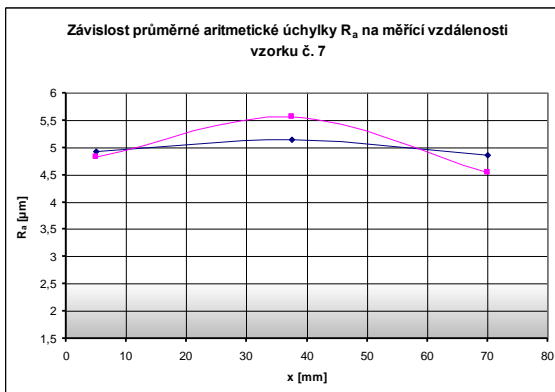
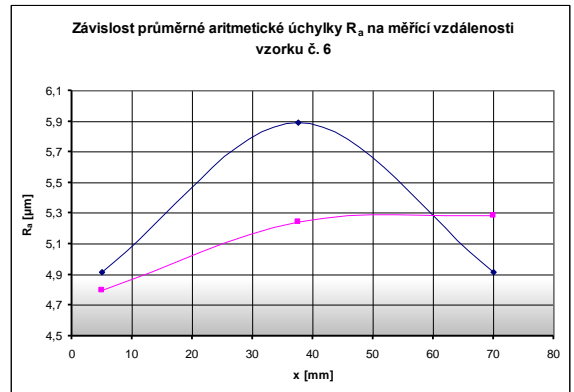
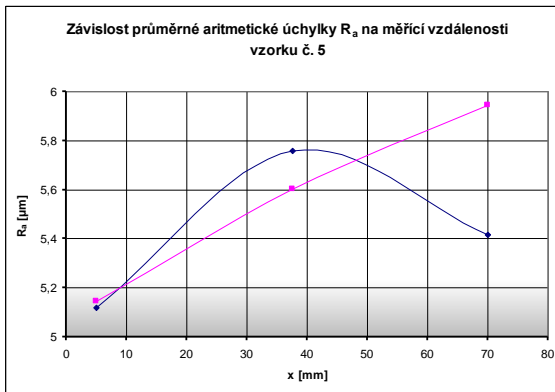
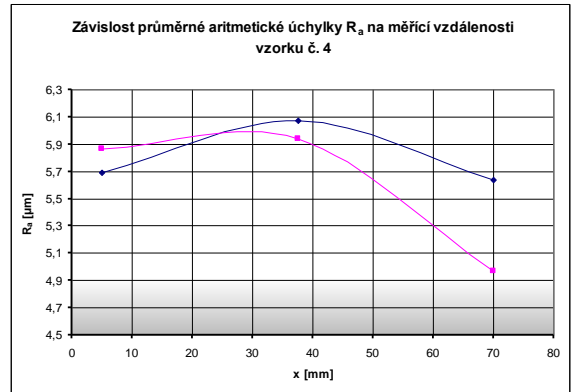
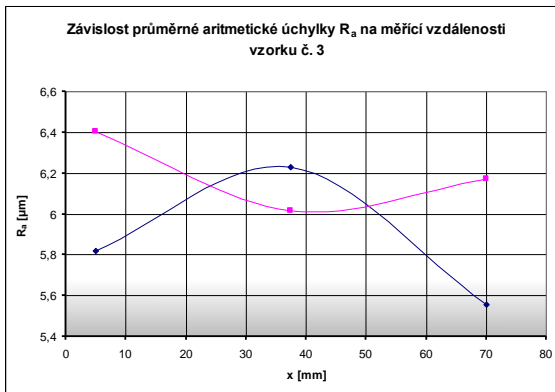
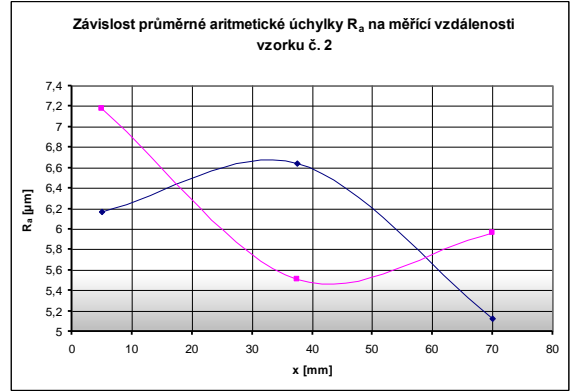
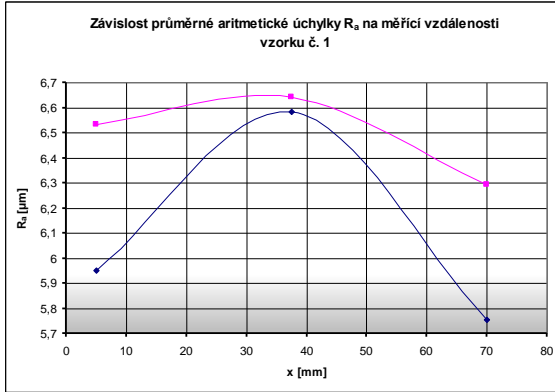
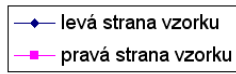
SEZNAM PŘÍLOH

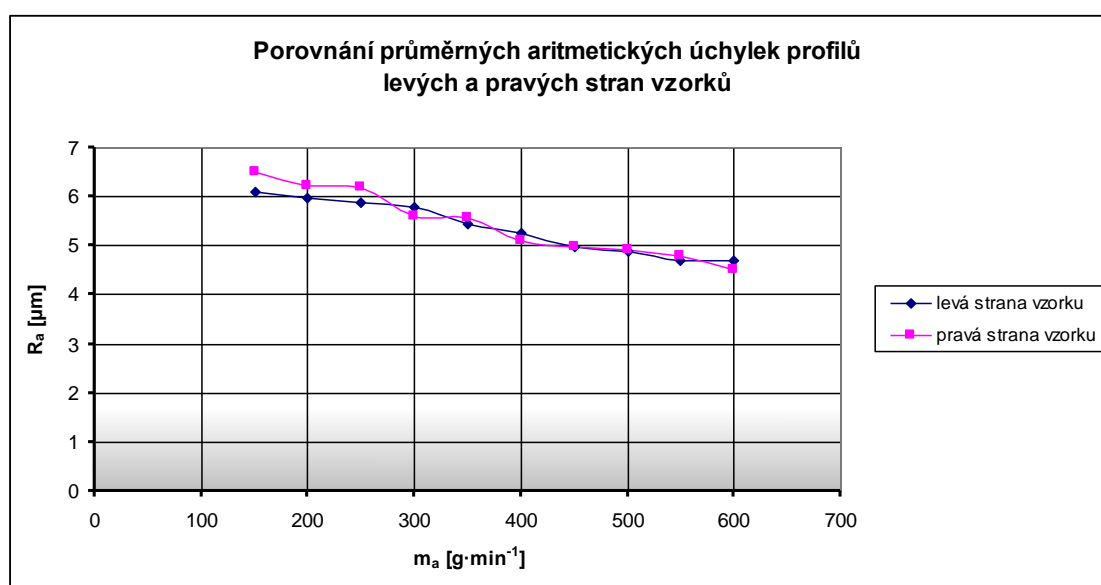
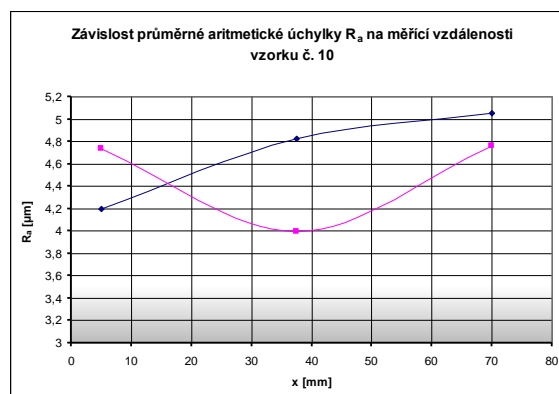
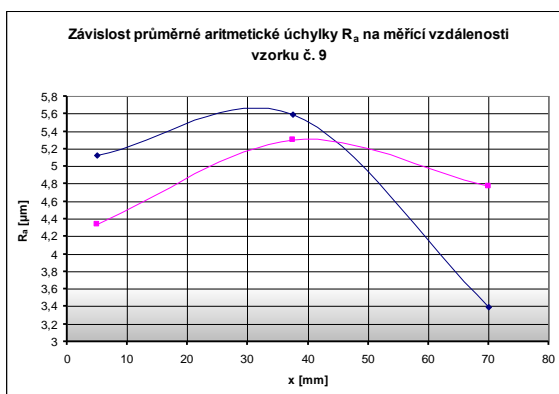
- Příloha 1 Naměřené hodnoty z experimentů
Příloha 2 Grafy průměrných aritmetických úchylek
Příloha 3 Grafy největších výšek profilů
Příloha 4 Výkres řezané součásti

Příloha 1

č. vzorku	strana vzorku	profily drsnosti [μm]	měřicí vzdálenost [mm]		
			5	37,5	70
1	levá	R _a	5,950	6,583	5,753
		R _z	34,4	35,2	33,4
	pravá	R _a	6,532	6,643	6,291
		R _z	40,1	36,0	38,4
2	levá	R _a	6,166	6,643	5,121
		R _z	35,7	38,6	28,4
	pravá	R _a	7,179	5,513	5,967
		R _z	36,2	34,9	37,1
3	levá	R _a	5,821	6,229	5,554
		R _z	33,1	36,9	32,6
	pravá	R _a	6,402	6,014	6,171
		R _z	36,7	36,5	34,9
4	levá	R _a	5,691	6,073	5,639
		R _z	32,7	34,8	33,2
	pravá	R _a	5,864	5,941	4,968
		R _z	32,8	29,5	31,6
5	levá	R _a	5,120	5,760	5,418
		R _z	33,1	30,7	28,7
	pravá	R _a	5,144	5,603	5,944
		R _z	28,3	29,9	32,8
6	levá	R _a	4,919	5,894	4,918
		R _z	29,6	31,4	29,6
	pravá	R _a	4,796	5,245	5,286
		R _z	28,0	30,0	29,3
7	levá	R _a	4,922	5,152	4,870
		R _z	29,8	31,2	29,4
	pravá	R _a	4,837	5,568	4,547
		R _z	29,2	26,3	28,7
8	levá	R _a	5,458	5,008	4,180
		R _z	33,0	29,9	27,6
	pravá	R _a	4,855	4,787	5,105
		R _z	29,2	26,6	28,0
9	levá	R _a	5,130	5,590	3,396
		R _z	30,2	34,2	19,7
	pravá	R _a	4,336	5,298	4,771
		R _z	26,4	27,5	28,7
10	levá	R _a	4,194	4,823	5,053
		R _z	25,6	29,7	28,3
	pravá	R _a	4,737	3,991	4,759
		R _z	28,4	24,9	25,1

Příloha 2





Příloha 3

