ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie – technologie obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem

Autor: **Bc. Libor SUCHÁNEK**

Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Libor SUCHÁNEK**
Osobní číslo:	**S16N0063K**
Studijní program:	**N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenská technologie - technologie obrábění**
Název tématu:	**Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem**
Zadávající katedra:	**Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rozbor problematiky
3. Návrh experimentu
4. Návrh metody hodnocení
5. Závěr

Rozsah grafických prací:	**dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce:	**50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce:	**tištěná**

Seznam odborné literatury:

- **Astakhof Viktor P., Tribology and interface engineering series, Elsevier, 2006, ISBN 0-444-52881-4**
- **Shaw, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3**
- **Junera, B.L., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, New Age International, ISBN 978-81-224-1467-7**
- **Marcel, Kolb,Waterjet Cutting, Material processing with a high-pressure waterjet, Bystronic Laser AG, 2006, ISBN 978-3-937889-54-2**
- **Staněk, Jiří, Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací, Západočeská univerzita, 2005, ISBN 80-7043-363-9**

Vedoucí diplomové práce:	**Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.** Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce:	**Ing. Ivana Zetková** Katedra technologie obrábění
Ostatní konzultanti:	**Ing. Štěpán Jeníček** Výzkumné centrum tvářecích technologií
Datum zadání diplomové práce:	**17. října 2016**
Termín odevzdání diplomové práce:	**2. června 2017**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. října 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.
Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: ……. . . . . . .

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Miroslavu Zetkovi, Ph.D., Ing. Ivaně Zetkové a Ing. Štěpánu Jeníčkovi za odbornou pomoc při řešení experimentální části diplomové práce, a také za cenné připomínky a podněty poskytnuté během vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem těm, kteří mě podporovali nejenom během zpracování diplomové práce, ale i v průběhu celého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** SUCHÁNEK	**Jméno** Libor	
STUDIJNÍ OBOR	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. ZETEK, Ph.D.	**Jméno** Miroslav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	**DIPLOMOVÁ**	~~**BAKALÁŘSKÁ**~~	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem		

FAKULTA	strojní		**KATEDRA**	KTO		**ROK ODEVZD.**	2017

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	83		**TEXTOVÁ ČÁST**	75		**GRAFICKÁ ČÁST**	0

STRUČNÝ POPIS	První část práce popisuje teoretické znalosti o vodním paprsku a řezání vodním paprskem. Druhá část práce je praktická. Jsou v ní uvedeny dva experimenty, při nichž se měnily různé parametry řezání. Následně jsou oba tyto experimenty vyhodnoceny z různých hledisek.
KLÍČOVÁ SLOVA	vodní paprsek, řezání, změna parametrů, kvalita řezu

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	**Surname** SUCHÁNEK	**Name** Libor	
FIELD OF STUDY	Department of Machining Technology		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. ZETEK Ph.D.	**Name** Miroslav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	**DIPLOMA**	**~~BACHELOR~~**	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	The effect of a change of parameters cutting process on the quality of the cut at the unconventional machining with the abrasive water jet		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	Machining Technology		**SUBMITTED IN**	2017

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	83		**TEXT PART**	75		**GRAPHICAL PART**	0

BRIEF DESCRIPTION	The first part of the thesis describes theory knowledge about a water jet and a water jet cutting. The second part of the thesis is practical. There are described two experiments. Cutting parameters were changed during these experiments. Subsequently, both of the experiments were evaluated according to various aspects.
KEY WORDS	water jet, cutting, cutting parameters, quality of cut

Obsah

Seznam zkratek 10
Úvod 11
1 Rozbor současného stavu 12
1.1 Historie[6] 12
1.2 Princip vodního paprsku [2,5] 12
1.3 Typy vodního paprsku[1,3,5,9] 13
1.3.1 Kontinuální vodní paprsek[1,2,3,4,10,11,12,15] 14
1.3.2 Diskontinuální vodní paprsek [12,15] 19
1.4 Faktory ovlivňující výkon vodního paprsku – řezivost[1] 22
1.4.1 Tlak vodního paprsku 22
1.4.2 Velikost abrazivních částic 22
1.4.3 Průtoková rychlost s abrazivem: 22
1.5 Struktura vodního paprsku[1,2,22] 24
1.6 Kvalita řezu [1,7,21] 26
1.6.1 Kriteria kvality řezu 27
1.6.2 Úloha ovlivňujících faktorů 29
1.7 Strojní vybavení a příslušenství Stroj a strojní vybavení [16] 30
1.7.1 Technické parametry CNC stroje COBRA: 30
1.7.2 Příslušenství, které má stroj Cobra v RTI: 31
1.7.3 Detailní popsání vybraných speciálních aplikací a příslušenství 32
2 Experiment 1 39
2.1 Kontura 39
2.2 Podmínky experimentu 39
2.3 Upnutí obrobku 40
2.4 Naměřené rozměry vzorků 41
2.5 Závislost tloušťky na časové náročnosti řezání 45
2.6 Vizuální kontrola kvality 47
2.7 Vizuální kontrola kvality u šikmých ploch 49
2.8 Vizuální kontrola kvality – vnitřní kontura 50

2.9 Vizuální kontrola kvality – detail změny směrů 53
2.10 Měření na přístroji Infinite Focus G4 (IFM) 55
2.10.1 Povrch řezaných vzorků – barevné spektrum 55
2.10.2 Naměřené hodnoty drsností 57
3 Experiment 2 60
3.1.1 Drsnost povrchu 61
3.1.2 Barevná spektra 63
3.1.3 Snímky otřepů 69
3.1.4 Rozměry vzorků 72
3.1.5 Výměna abraziva během experimentu. 75
4 Závěr 76
Seznam použité literatury 78
Seznam obrázků 80
Seznam tabulek 82
Seznam grafů 83

Seznam zkratek

Ra	-	střední aritmetická hodnota profilové drsnosti [μm]
Sa	-	střední aritmetická hodnota plošné drsnosti [μm]
∅	-	průměr [mm]
p	-	tlak[MPa]
horní část	-	paprsek vchází do materiálu
dolní část vzorku	-	paprsek vychází z materiálu
q	-	množství přidaného abraziva do vodního paprsku [g/min]

Úvod

Tato diplomová práce se bude zabývat nekonvenčním obráběním – řezáním vodním paprskem. Princip dělení vodním parskem je obrušování řezaného materiálu pomocí tlaku vodního paprsku. Takto se dělí však jen velmi měkké materiály jako je papír nebo polystyrén. K řezání tvrdších materiálů jako jsou kovy nebo žula je třeba do vodního paprsku přidat materiál tzv. abrazivo, což je velmi často granát. Vodní paprsek dopraví abrazivo do místa řezu a následné dělení tvrdého materiálu obstarává právě jen abrazivo obrušováním materiálu. Význam řezání vodním paprskem vzrostl hlavně díky vysoké kvalitě řezu a ekologičnosti celého procesu. Například při porovnání s další velmi rozšířenou nekonvenční metodou – jakou je řezání laserem, nevznikají v řezu nataveniny, tepelně ovlivněná oblast nebo také nebezpečné plyny během řezání. Řezání vodním parskem samozřejmě nemá pouze samá pozitiva, nelze opomenout negativa, jakými jsou zkosená řezná hrana, koroze při špatném otření obrobku, otřepy v dolní části řezané plochy nebo zášlehy v dolní části řezu, díky již zesláblému paprsku.

Tato diplomová práce má dva hlavní cíle. První z nich je výpis teoretických znalostí, které jsou v současnosti o vodním paprsku ve všeobecném povědomí. Druhým cílem této diplomové práce je měnit parametry řezání a hodnotit jejich vliv na kvalitu řezu. Mezi možné proměnné parametry řezání můžeme počítat: průměr trysky, typ, velikost a množství abraziva přidaného do paprsku, zapnuté nebo vypnuté korekce (což jsou softwarově vylepšené možnosti stroje), nebo typ a tloušťku materiálu. Některé z těchto parametrů jsou ve dvou experimentech záměrně měněny. Následné vyhodnocení předkládá zcela konkrétní výsledky o tom, jak velký vliv mohou mít a mají jednotlivé parametry na samotnou kvalitu řezu.

První experiment je zaměřen nejenom na kvalitu rovného řezu, ale také hodně na schopnost řezat různé tvary (pravý uhel, rádiusy nebo zkosení) v závislosti na typu a tloušťce materiálu. Druhý experiment je zaměřený na kvalitu řezu tenkých plechů při změně velikosti a dávkování abraziva do dvou různých materiálů, které jsou často využívány k řezání na stroji Cobra v RTI, kde byly také tyto experimenty provedeny.

1 Rozbor současného stavu

1.1 Historie[6]

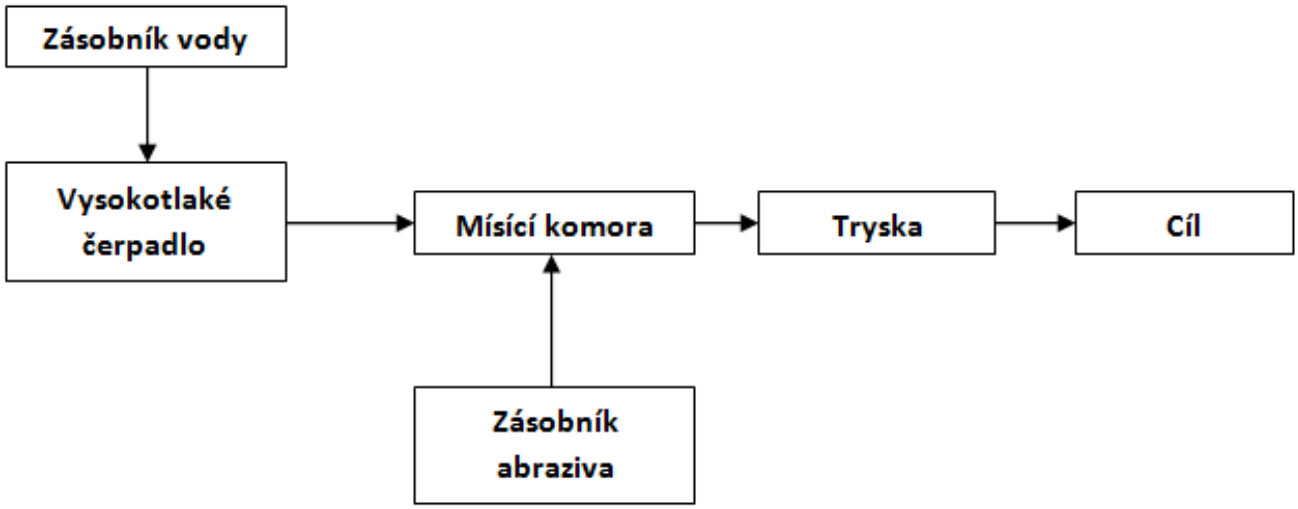
Využití tlaku vody pro vymílání se datuje k roku 1800 v důlním průmyslu pro vytváření dolů. Od roku 1930 se začal vodní paprsek objevovat v strojním průmyslu jako řezací zařízení. Společnost na výrobu papíru ve Wisconsinu vyvinula stroj na měření, odvíjení a řezání papírů vodním paprskem. To se datoval rok 1933 a byl to počátek řezání vodním paprskem s malým tlakem, tudíž byl využitelný pro měkké materiály, jako je právě papír. Základní idea přidávání abraziva do paprsku začalo roku 1935.

K rozvoji technologie vodního paprsku došlo v poválečném období, kdy výzkumní pracovníci hledali nové metody efektivního dělení materiálů. Závisel na vývoji vysokotlakých čerpadel. Roku 1956 Carl Johnson vyvinul metodu pro dělení plastů pomocí tenkého vysokotlakého proudu paprsku. Další milník byl v roce 1958, kdy Billie Schwacha vyvinul paprsek využívající ultra vysokého tlaku paprsku o hodnotě 6900[b] a dokázal řezat slitiny železa.

Nová technologie přišla v roce 1962, kdy byl vyvinut pulzující vodní paprsek (3450[b]), který mohl řezat kovy, kámen a další materiály. Zaměření vývoje bylo hlavně na ideální tvar trysky pro vysokotlaký paprsek. V sedmdesátých letech minulého století se výzkum upínal ke zvýšení životnosti. Vedli jej Ray Chadwick, Michael Kurko a Joseap Corriveau, kteří použili korund jako abrazivo a docílili zvýšení životnosti trysky a celkovému vylepšení metody.. K životnosti trysky úpravou vody přispěli John Olsen, Georg Hurlburt a Louis Kapcsandy Dalším posunem v sedmdesátých letech bylo vyvinutí trysky s Ø 0,05[mm] s p=4830[b] Normanem Franzem. Vytvoření řízeného pohybu paprsku, jeho polohy, rychlosti řezání parsku a změny polohy paprsku bylo na počátku roku 1990.

1.2 Princip vodního paprsku [2,5]

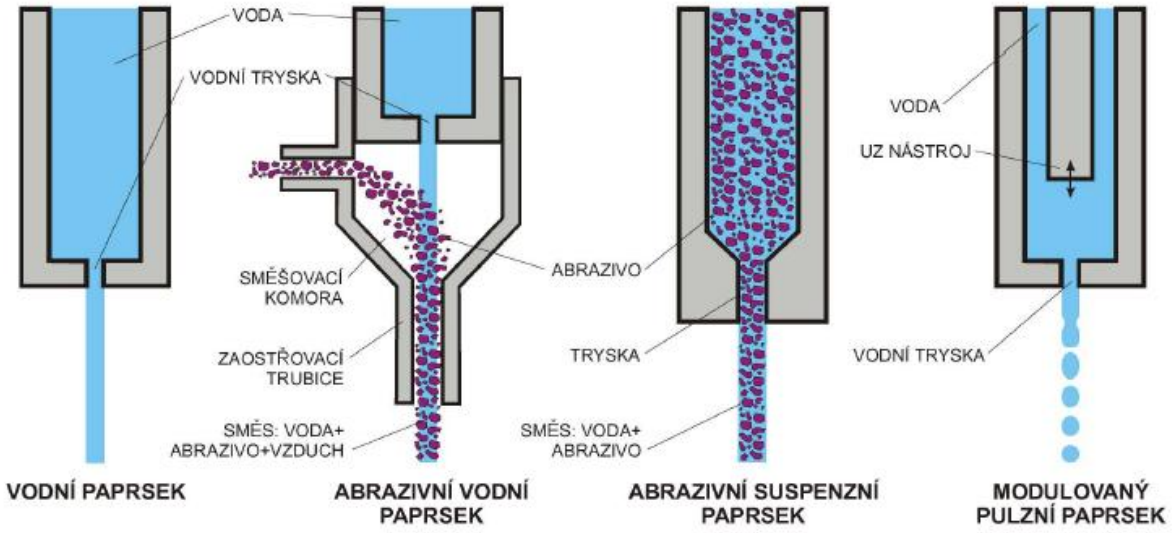
Princip vytvoření vodního paprsku je vcelku jednoduchý. Voda se z nádrže dostane pomocí vysokotlakých čerpadel do dopravního systému. Vysokotlaká čerpadla jsou schopná dát vodě tlak až 6000[bar]. Což je samozřejmě závislé na typu a výrobci daného čerpadla. Dopravní systém dopraví natlakovanou vodu do komory, kde se smísí vodní paprsek s abrazivem (brusné tvrdé částice). Následně tryska směřuje již plnohodnotný vodní paprsek na obrobek. Viz obrázek 1.



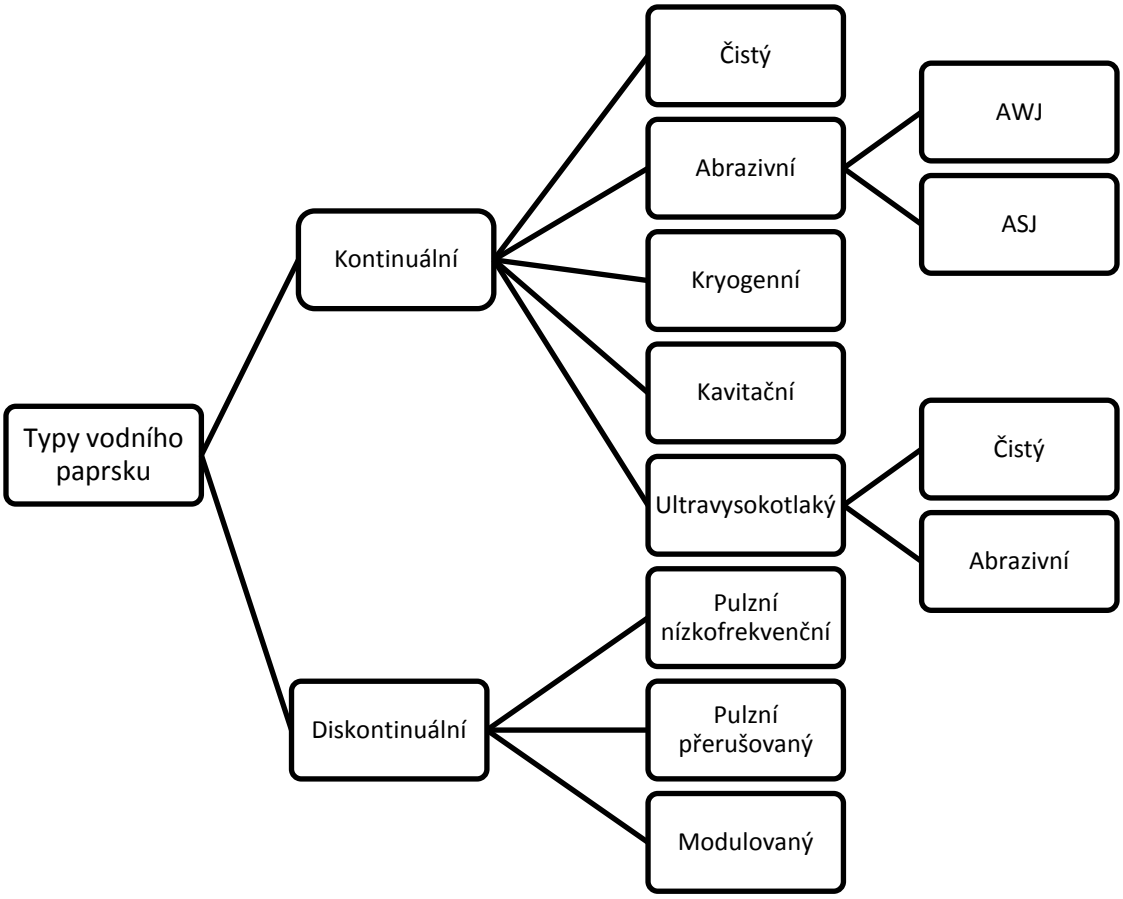
Obrázek 1: Schéma principu vytvoření vodního paprsku[2]

1.3 Typy vodního paprsku[1,3,5,9]

Na obrázku níže můžeme vidět schéma rozdělení vodního paprsku. Hlavní dva typy vodního paprsku jsou kontinuální – nepřerušovaný a diskontinuální – přerušovaný. Ten byl vyvinut z důvodu větší efektivity úběru materiálu. Další základní rozdělení je na čistý vodní paprsek nebo abrazivní vodní paprsek. To je paprsek, do kterého jsou navíc míšeny částice tvrdého materiálu, který zvyšuje (až 1000x) řezný výkon. Ten se ještě podle způsobu míšení rozděluje na abrazivní vodní paprsek (abrazive injector waterjet) a abrazivní suspenzivní vodní paprsek (abrazive suspension waterjet). Jsou to dvě různé technologie, které mohou vypadat na první pohled podobně, ale úplně se liší použitím a výkonností. Zatímco u čistého vodního paprsku dochází k narušování jen samotnou vysokotlakou vodou. U abrazivního paprsku dochází k narušování materiálu abrazivem, přičemž voda je jen urychlovač, nikoliv nástroj k erozi.



Obrázek 2: Typy vodních paprsků [9]



Obrázek 3: Typy vodních paprsků

1.3.1 Kontinuální vodní paprsek[1,2,3,4,10,11,12,15]

1.3.1.1 Čistý vodní paprsek

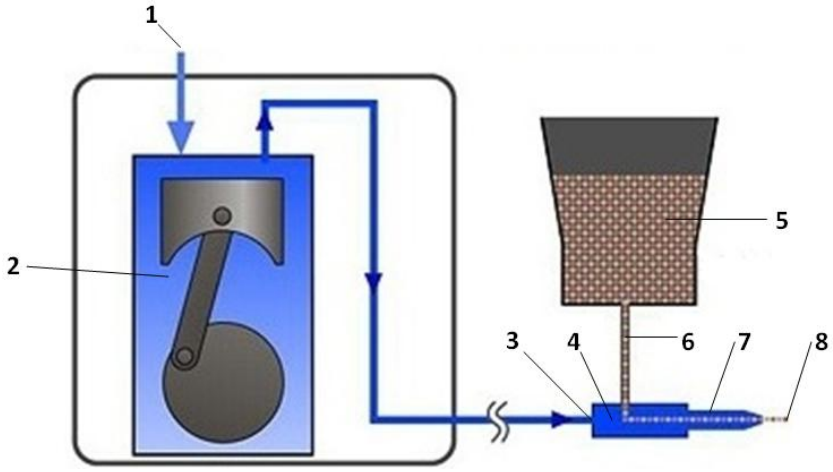
Vodní paprsek, který je generovaný v safírové, rubínové nebo diamantové trysce, tvoří nástroj pro dělení materiálu. K odstranění materiálu vede erozivní účinek. Protože řezný výkon pro tvrdé materiály je velmi omezený, tento typ parsku se zejména používá pro měkké materiály. Mezi ně patří například umělé hmoty, textilie, papírenských výrobky, těsnících materiály, kovové fólie, pěny, potraviny nebo tenké překližky. Společnost Flow International Corporation uvádí, že k nejčastějším řezaným materiálům patří jednorázové pleny, hedvábný papír či vybavení interiéru automobilů. Přičemž při řezání papíru nebo plen vodním parskem vzniká na jejich povrchu méně vlhkosti, než při dotyku nebo dýchnutí na ně.

Čistý vodní paprsek má několik důležitých výhod, které jsou velmi důležité pro případné zájemce. Dokáže produkovat velmi tenký paprsek (∅ 0,1016 - 0,254 mm je běžné rozmezí). Z toho vyplívá, že odpad materiálu bude velmi malý. Ale také tento tenký paprsek umožňuje výrobu složitých tvarů s jemnými konturami, ostrými úhly a malými poloměry a velkou přesností. Během řezání nevzniká žádné teplo, proto místo řezu není vystaveno škodlivému tepelnému namáhání. To je velká výhoda oproti řezání laserem nebo plazmu. Mezi další výhody patří řezání velmi silných materiálů nebo naopak tenkých materiálů. Řezání je většinou rychlé (posuv trysky), řezné síly jsou velmi nízké, obrobek se nemusí

složitě upínat nebo používat přípravky. Při dělení měkkých a lehkých materiálů je možné řezat do velké hloubky (např. izolace ze skelných vláken až do tloušťky 610mm).

1.3.1.2 Abrazivní vstřikovací paprsek

Tento typ abrazivního parsku pracuje s proudem vody, který je urychlen přes první trysku tzv. vodní trysku. Následně se vodní paprsek dostane do směšovací komory. Ve směšovací komoře se vytváří podtlak, který umožňuje strhávání abraziva. Množství nasátého abraziva je úměrné poklesu tlaku. Paprsek s abrazivem dále proudí do zaostřovací trysky. Tento systém přívodu abraziva je znázorněn na obrázku. Pomocí vysokotlakého čerpadla se vytvoří tlakový proud vody. Ten se smísí s abrazivními částicemi ve směšovací komoře. Abrazivo je dopraveno do mísící komory pomocí hadice ze zásobníku abraziva. Abrazivo je urychleno vysokorychlostním proudem vody, tak aby vytvořilo erozivní účinek na cílovém povrchu.



1	Voda ze zásobníku
2	Vysokotlaké čerpadlo
3	První ¨vodní tryska¨
4	Směšovací komora
5	Zásobník abraziva
6	Trubka pro dopravení abraziva
7	Zaměřovací tryska
8	Abrazivní paprsek

Obrázek 4: Abrasive vstřikovací waterjet[1]

Problémy vyskytující se u této metody:

1. Tryska je vystavena rychlé erozi abrazivního paprsku. Pro snížení účinků eroze se používají vložky karbidu wolframu.
2. Je mylná představa, že tato technologie mísení nevyžaduje externí zdroj energiie pro mísení vody a abraziva. Nicméně pokles tlaku vyskytující se v trysce poskytuje požadovanou energii. To omezuje užitečný tlakový spád, který by byl k dispozici v zaostřovací trysce a v tom důsledku snižuje sílu nárazu paprsku, který je přímo úměrný k poklesu tlaku přes zaměřovací trysku.
3. Dalším závažným problémem je suchý podávací systém abraziva. Při užívání ejektoru je ztráta kontroly nad rychlostí podávání abraziva. Dávkování abraziva je řízeno sacím tlakem ve směšovací komoře a závisí na velikosti otvoru. Dávkování abraziva je téměř nemožné kontrolovat při dávkování jedním otvorem, aby bylo optimální. Možné, ale nepraktické je používat střídavě různé velikosti otvorů do té doby než je dosaženo ideálního abrazivního dávkování. Dále se mění abrazivní dávkování když se mění vstupní otvor díky erozi.
4. Strhávání vzduchu je další problém této metody a to zejména při používán suchého abraziva. Jakmile se dostane vzduch do systému, způsobuje dva problémy: (a)

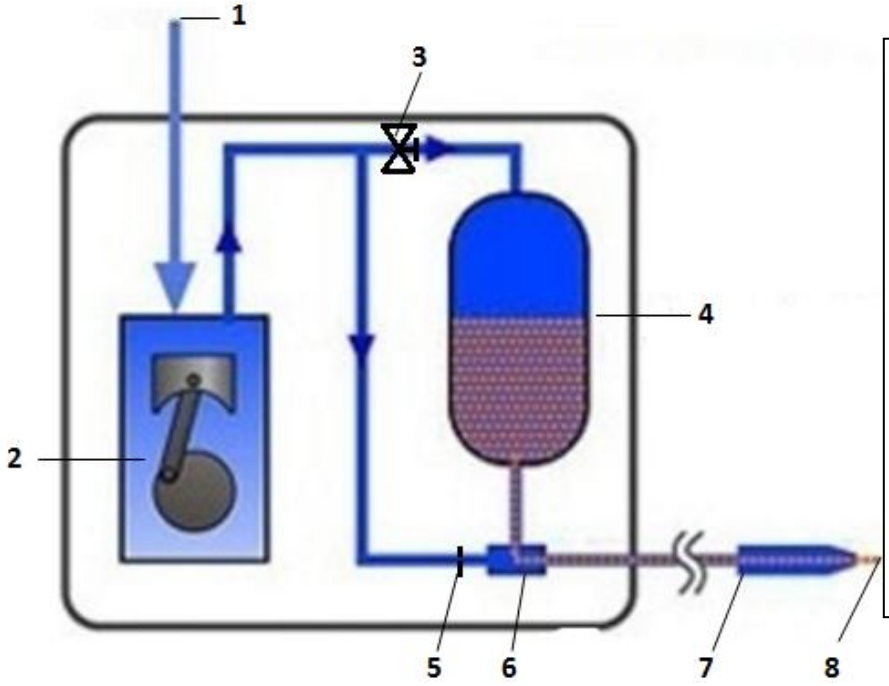
třífázový průtok v kolimátoru a (b) když vzduch opouští trysku, tak se roztahuje a přeruší paprsek do kapiček, což výrazně snižuje řezný výkon.

5. Kapalina hromadící se v abrazivním přívodním potrubí je dalším problémem. Voda se ze směšovací komory dostane dovnitř potrubí, které přivádí abrazivo. Směs vody a abraziva ucpává toto potrubí.

1.3.1.3 Abrazivní suspenzivní paprsek

Tato metoda byla vyvinuta, aby se zabránilo vnikání vzduchu do systému vytváření paprsku. Z hlavního hnacího vodního parsku je odvedeno přibližně 10% objemu vody a ta je dopravena do směšovací vysokotlaké komory. Tato vysokotlaká komora slouží jak zásobník abraziva tak i zároveň směšovací komora. Směs vody a abraziva je dodávána k řezací hlavě, aniž vzduch vstupoval do systému. Aby bylo zajištěno, že tlak v hlavním proudu, v místě spojení dvou proudů, je menší než tlak směsi v nádobě, je v hlavním parsku malé omezení. Tato konstrukce vylučuje provzdušnění. Komplikace této konstrukce je však v dávkování abraziva. Neexistuje žádný způsob jak zajistit, že přívod z vysokotlaké komory bude dodávat pořád stejnou koncentraci abraziva.

Jelikož abrazivo s vodou jsou urychlovány společně pod tlakem, při této metodě směšování, pak je míra odstraňování materiálu mnohem vyšší, než u metody unášení suchého abraziva. Je tedy možné pracovat s menším tlakem a menší dávkou abraziva. To má pozitivní vliv na výši finančních prostředků, časový faktor a životní prostředí.



1	Zásobník vody
2	Vysokotlaké čerpadlo
3	Ventil regulující vtok vody (10% z hlavního proudu)
4	Vysokotlaká komora – zásobník abraziva + mísící komora
5	Omezení z důvodu tlaku
6	Spojení hlavního vodního proudu a proudu s abrazivem
7	Řezací hlava
8	Abrazivní řezný paprsek

Obrázek 5: Abrazivní suspenzivní paprsek[1]

Porovnání výkonů obou technologií:

	Suspenzivní	Vstřikovací	Jednotky
Tlak	2000	4000	[bar]
Hloubka řezu (ocel)	120	120	[mm]
Řezná rychlost	25	10	[mm/min]
Objemový průtok vody	9,7	4	[l/min]
Spotřeba vody	388	400	[l/m]
Objemový průtok abraziva	0,97	0,48	[kg/min]
Spotřeba abraziva	39	48	[kg/m]
Hydraulický výstup na trysce	32	27	[kW]

Tabulka 1: Porovnání výkonů dvou různých technologií míšení abrazivního paprsku[1]

Jak je vidět z tabulky tak, pro dosažení stejné hloubky řezu potřebuji u metody suspenzivní přesně poloviční tlak vody. Řezná rychlost dosahuje 2,5x vyšších hodnot než u metody vstřikovací. Objemový průtok je sice výrazně vyšší, ale důležité je, že spotřeba abraziva na jeden metr řezu je menší.

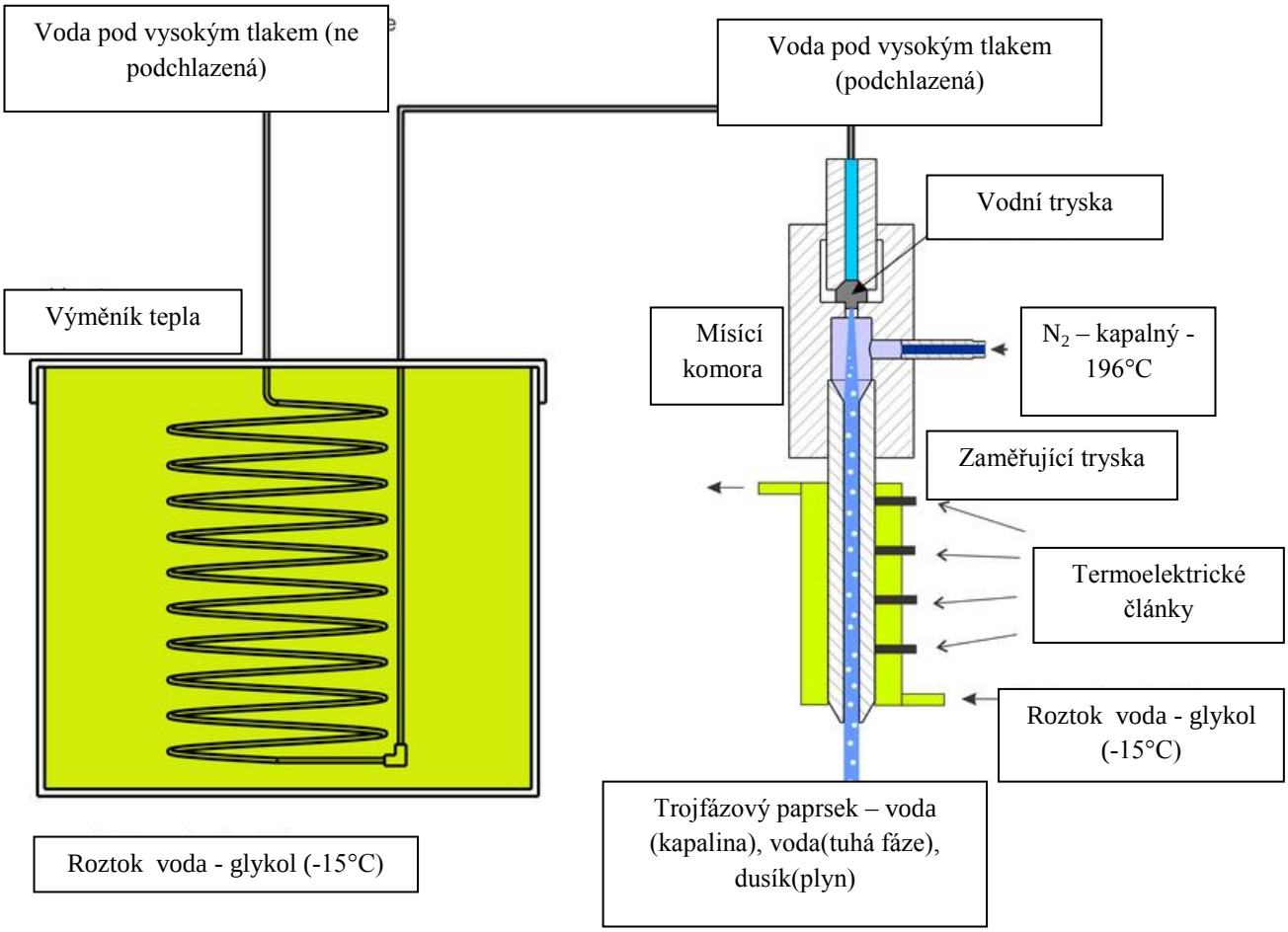
1.3.1.4 Kryogenní vodní paprsek

Jednou z nevýhod čistého paprsku je, že má limitující erozivní schopnosti a není schopen řezat do tvrdých materiálů jako je ocel, kamen nebo keramika. Pro zvýšení účinnosti se tedy přidává abrazivo. Nevýhoda této metody zase spočívá ve velké prašnosti.

Za účelem vyřešit tyto problémy byl navržen systém, kde jako brusný materiál jsou použity ledové částice. Poté co ledové abrazivní částice skončí řezný proces, tak jdou do zásobníku na vodu, kde tají. Tato voda, která již byla použitá jako stlačená ve vodním paprsku, se může znovu použít při zařazení dostatečné filtrace a může vytvořit uzavřený kruh. Nicméně většina uživatelů vodu znovu nepoužívá.

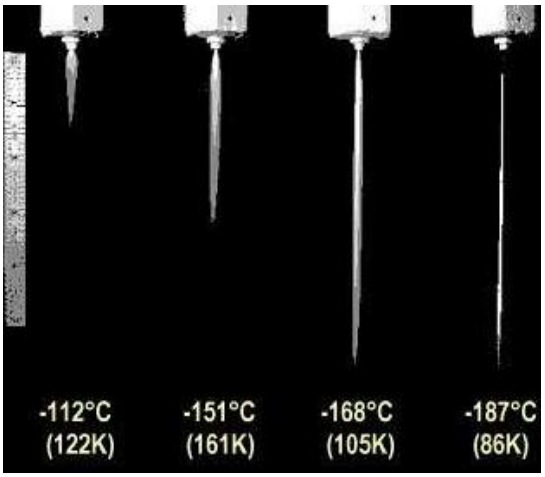
Jsou dvě možnosti jak vytvořit paprsek s ledovými částicemi:

1. Ledové částice mohou být připraveny předem pomocí generátoru ledových částic. Ty jsou uloženy v zásobníku a přidávány do vodního parsku stejně jako u abrazivního vodního paprsku.
2. Lze eliminovat použití generátoru ledových částic, zásobníku pro částice a dopravního zařízení částic tím, že ledové částice se vytvoří přímo ve vodním paprsku. Ledové části v tomto případě vznikají, buď že fázová přeměna podchlazené natlakované vody je řízena při tlakovém uvolnění v trysce nebo podchlazená voda strhává studený zkapalněný plyn jako například tekutý dusík. Princip této metody je na obrázku 11 níže.



Obrázek 6: Princip kryogenního paprsku [11]

Jak je vidět na dalším obrázku, tak ideální řezné parametry a nejvyšší účinnost má paprsek, do kterého je přiveden tekutý dusík o teplotě -190°C. Pro nižší teploty dusíku není výkon paprsku tak účinný. Nižší řezný výkon je způsoben příliš rychlím odpařováním dusíku. Při -190°C dosahuje kryogenní paprsek podobné účinnosti jako běžný vodní paprsek. Využívá se tam, kde se klasický vodní paprsek nedá použít jako u materiálů chemicky reagujících na vodu nebo při používání v znečištěných prostředích.



Obrázek 7: Několik paprsků při různých teplotách a konstantním tlaku 55MPa [12]

1.3.1.5 Kavitační vodní paprsek

Kavitací se obecně rozumí dutiny par a plynů v kapalině. To je vyvolané silami působící na tekutinu. Obvykle se kavitace vyskytne, když je tekutina podrobena rychlé změně tlaku. Mluvíme tady o snížení tlaku. 13 Ve vodním paprsku se tedy vyskytují dutiny a ty se využívají k erozi na řezaném materiálu. Konkrétně jde o jev zvaný imploze, což je zborcení kavitační dutiny. Při zborcení dochází ke vzniku vysokorychlostního paprsku, který řeže materiál. Tlak vyvolaný implozí se může zvýšit až desetinásobně. Tento typ vodního paprsku se vyskytuje velmi zřídka. Je to dané velmi nízkou přesností a konstrukční složitostí dýzy.

Zda se kavitace vyskytuje v paprsku, můžeme zjistit pomocí kavitačního koeficientu σ_0:

$$\sigma_o = \frac{2 * (P_a - P_v)}{v^2}$$

Kde:

v – rychlost proudu paprsku

P_a – tlak okolí (atmosférický tlak)

P_v – tlak par

$\sigma_0 > \sigma_1$ Kavitace se v paprsku nevyskytuje

$\sigma_0 = \sigma_1$ Kavitace se v paprsku začíná objevovat

$\sigma_0 < \sigma_1$ Poměr kavitace v paprsku roste [13,14,15]

1.3.1.6 Ultravysokotlaký paprsek

V dnešní době již existují čerpadla, která jsou schopná dodat vodě tlak přes 6000 bar. Konkrétně společnost PVT nabízí na svých internetových stránkách čerpadlo s pracovním tlakem 6200 bar. Vysoký tlak vody zvyšuje řeznou účinnost paprsku. Z toho důvodu se spotřebuje méně abraziva a tedy proces je šetrnější k životnímu prostředí a ušetří se peníze za abrazivo. K dosáhnutí vysokého tlaku vodního paprsku se také využívá dvojstupňového natlakování. Jedno čerpadlo zvýší tlak na 3500 bar a druhé přidá kapalině znovu 3500 bar a dosáhne se 7000 bar.

1.3.2 Diskontinuální vodní paprsek [12,15]

Na obráběný materiál, který je řezaný kontinuálním vodním paprskem působí tzv. stagnační tlak Ps. Velikost stagnačního tlaku je:

$$P_s = 500 * v_0^2 \quad [Pa]$$

Kdežto na materiál, který je řezaný diskontinuálním paprskem působí tzv. impaktní tlak Pi. Velikost impaktního tlaku je:

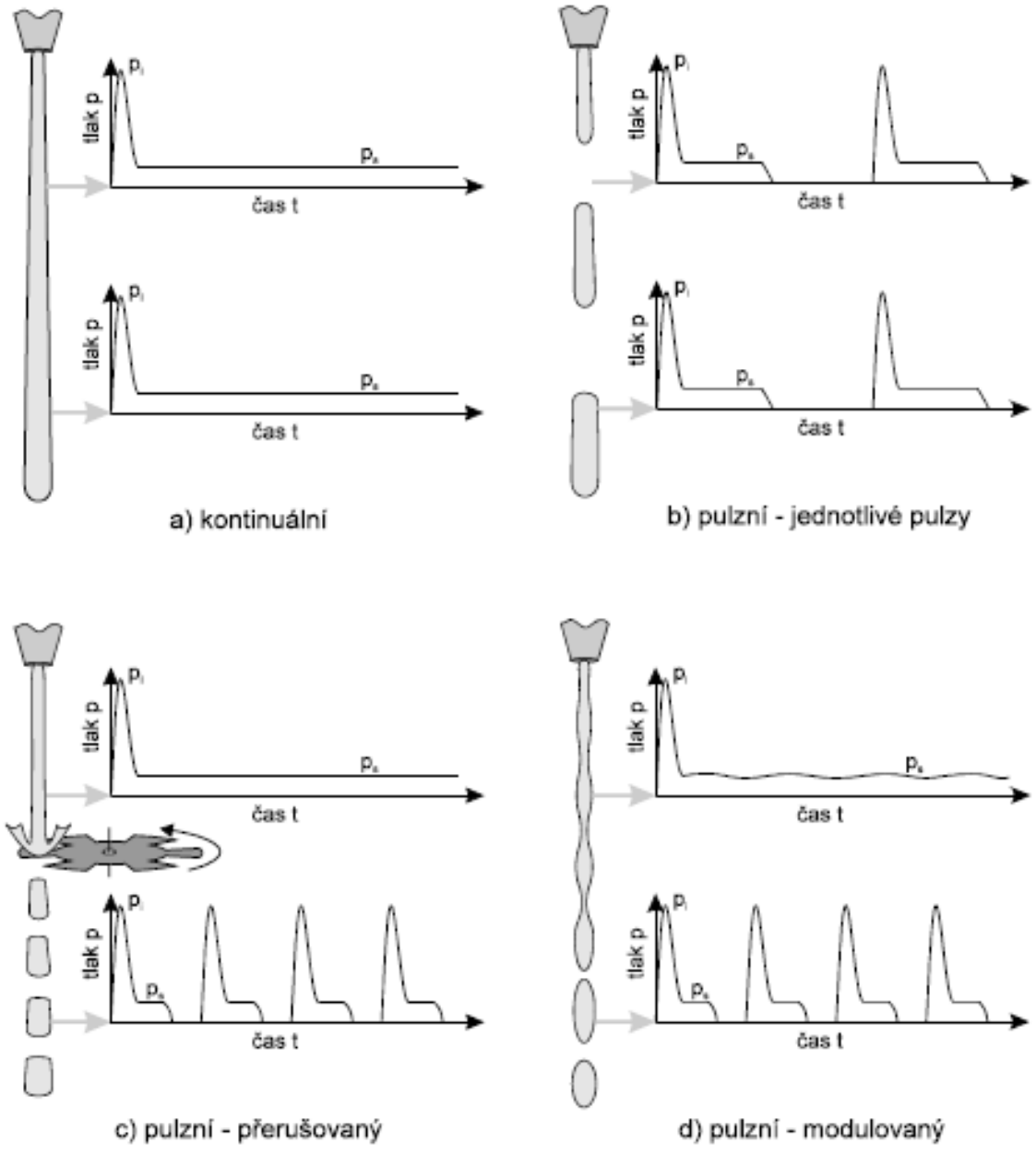
$$P_i = 1477000 * v_0$$

Porovnání obou tlaků, získáme velikost o kolik je diskontinuální paprsek účinnější než paprsek kontinuální.

$$Z = \frac{P_i}{P_s} = \frac{2954}{v_0}$$

v_0 - rychlost kapaliny, která opouští trysku

Jak můžeme vidět na obrázku níže, kde u jednotlivých typů paprsků jsou i průběhy tlaků při dopadu na materiál. U kontinuálního paprsku je pouze při prvním dopadu impaktní tlak a pak už na materiál působí jen tlak stagnační. Kdežto u diskontinuálních paprsků je impaktním tlakem zatížen materiál při každém dopadu jednotlivých paprsků. Materiál je tedy zatížen několikanásobně vyšším tlakem, než je tlak stagnační. Podle rozpadu paprsku dělíme diskontinuální parsky do tří skupin.



Obrázek 8: Typy paprsků a průběhy tlakových zatížení při dopadu na obrobek [15]

1.3.2.1 Jednotlivé pulzy nebo pulzy s nízkou frekvencí

Tento paprsek má vcelku dlouhé sloupce vody. Při dopadu na obrobek jej zatíží impaktním tlakem. Ten pak se sníží na tlak stagnační. Poté co celý sloupec dopadne na obrobek, nepůsobí na něj žádný tlak až do doby, kdy nový sloupec vody působí impaktním tlakem. Frekvence tvoření vodních sloupců záleží na zařízení, které sloupce produkuje. Tyto zařízení se nazývají vodní děla, ale z důvodu velkého namáhání je jejich použití omezené. Mezi tyto vodní děla patří např.:

- Nárazová zařízení s volným pístem
- Zařízení vytlačující pulzy tlakem
- Hydraulické generátory pulzů
- Elektrohydraulické generátory pulzních paprsků

1.3.2.2 Pulzní paprsek přerušovaný

Při této metodě vystupuje z trysky klasický kontinuální paprsek a okamžitě za tryskou by na materiál působil impaktním tlakem a následně by klesnul na stagnační. Poté co však paprsek projde zařízením, které přerušuje paprsek, stává se z něj paprsek diskontinuální. Frekvence s jakou se tvoří jednotlivé sloupce vody, záleží na přerušovacím zařízení. To je umístěné ihned za tryskou. Buď je zařízení mechanické a použije se speciální rotující kotouč, který má různé konstrukční řešení (zuby, díry, zářezy). Velikost a frekvence sloupců vody záleží právě na konstrukčním uspořádání kotouče a rychlosti jeho otáčení. Nevýhoda této metody je v tom, že paprsek ztrácí poměrně velkou část své energie nárazem do kotouče, který odráží paprsek zpět. Další zařízení, které by se mohlo použít je pulzní laser. Ovšem nemá žádné uplatnění v praxi, jelikož výkon laseru, který by odpařoval vodu, by musel mít obrovský výkon.

1.3.2.3 Modulovaný vodní paprsek

Při opouštění trysky je paprsek spojitý a rozpadne se až po určité vzdálenosti. Tato vzdálenost se nazývá vzdálenost rozpadu. Pokud by paprsek přišel do kontaktu s obrobkem dříve, než se rozdělí na jednotlivé části, zatížil by jej impaktním tlakem, který by pak poklesl na tlak stagnační. Ten by byl kolísavý, jelikož paprsek má různé rychlosti. Když paprsek naráží do obrobku za rozpadovou vzdáleností, pak zatěžuje obrobek impaktními tlaky.

Důvod rozdělení paprsku je ten, že v paprsku jsou různé rychlosti. Rychlejší a pomalejší úseky mají tendenci se shlukovat a vytvářet shluky. Rozpad paprsku je dokonán, když v každém shluku je stejná axiální rychlost. Tyto rychlosti jsou vytvářeny pomocí modulátorů. Existují tři typy těchto modulátorů:

- Vnitřní mechanické modulátory průtoku
- Rezonátory
- Ultrazvukové modulátory

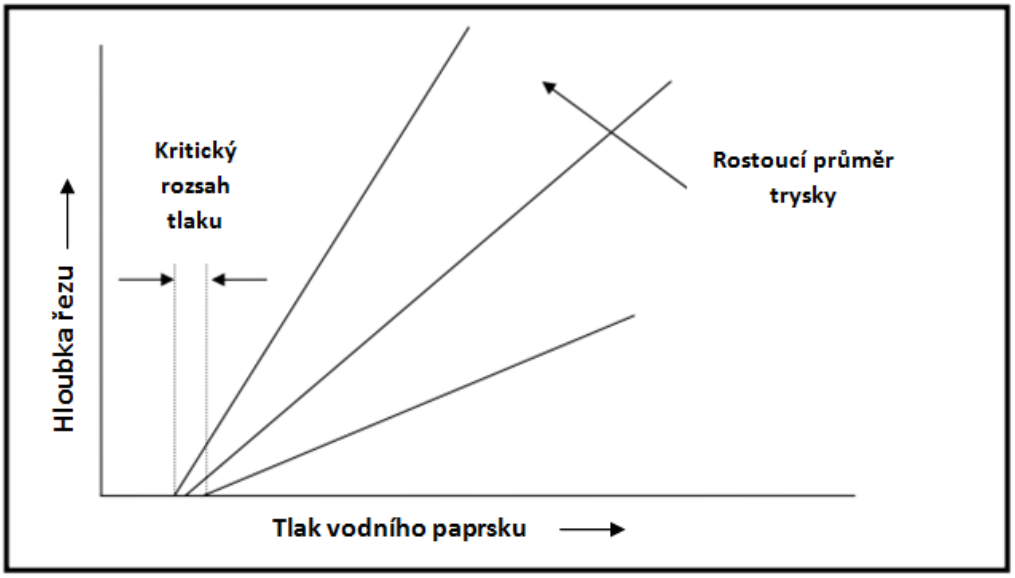
Tato metoda dělení paprsku je nejvýhodnější a nejefektivnější a to hned ze dvou důvodů. Za prvé paprsek neztrácí energii jako u metody přerušování paprsku. Za druhé nevznikají rázy velké změny reaktivních sil jako u metody nízkofrekvenčního vodního paprsku.

1.4 Faktory ovlivňující výkon vodního paprsku – řezivost[1]

Řezný výkon proudu vody, závisí na mnoha parametrech. Tyto faktory již byly zkoumány různými výzkumníky více než poslední čtyři desetiletí. Tento oddíl shrnuje vliv parametrů týkajících se této studie.

1.4.1 Tlak vodního paprsku

Tlak vodního paprsku a hloubka řezu mají mezi sebou lineární závislost až do dosažení kritického tlaku, jak je znázorněno na obrázku 2. Kritický tlak závisí na erozivních vlastnostech materiálu. Pokud by materiál mohl být řezán čistým parskem, tak kritický tlak není závislí na abrazivu a jeho směšovacích parametrech.



Obrázek 9: Vliv tlaku vodního paprsku na hloubku řezu[2]

1.4.2 Velikost abrazivních částic

Zde není žádná jasná definice velikosti abrazivních částic, která by vytvářela nejhlubší řezy pro daný materiál. Obecně platí, že řezivost částic se zvyšuje se zvýšením velikosti částic, ale největší velikost částic je omezena velikostí průměru tryskového otvoru. Obvykle se doporučuje použít brusné velikosti částic menší než jedna třetina průměru trysky.

1.4.3 Průtoková rychlost s abrazivem:

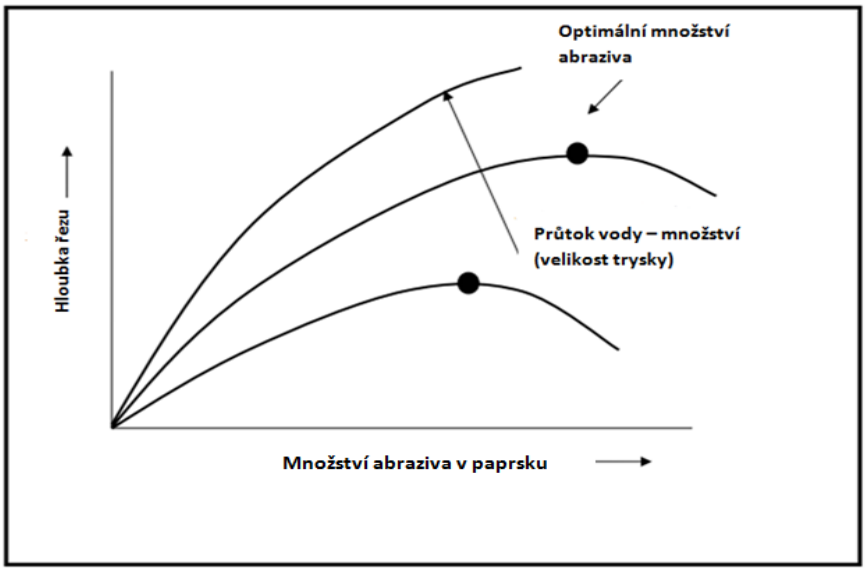
Abrazivní průtok hraje rozhodující roli ve výkonu vodního paprsku s abrazivem. Bylo provedeno mnoho studií k pochopení účinku množství abraziva, unášeného v proudu vody o vysoké rychlosti, na snížení výkonu abrazivního vodního paprsku. Bylo zjištěno, že zpočátku abrazivní průtok a hloubka řezu je v lineární závislosti.

Nicméně mimo optimální bod jakékoli další zvýšení množství abraziva vede k poklesu řezné hloubky. Hloubka řezu (založená na teorii eroze) je úměrná kinetické energii abrazivních částic – závisí tedy na hmotnosti a rychlosti částic opouštějících trysku.

$$h \propto M * v^2 \quad (1)$$

h – hloubka řezu, M – hmotnost částice, v – rychlost částice při opuštění trysky

Rychlost v z hlediska rychlosti vodního paprsku vj :



Obrázek 10: Vliv množství abraziva na hloubku řezu[2]

Bylo provedeno mnoho studií k pochopení účinku množství abraziva, unášeného v proudu vody o vysoké rychlosti, na snížení výkonu abrazivního vodního paprsku. Bylo zjištěno, že zpočátku abrazivní průtok a hloubka řezu je v lineární závislosti.

Nicméně mimo optimální bod jakékoli další zvýšení množství abraziva vede k poklesu řezné hloubky. Hloubka řezu (založená na teorii eroze) je úměrná kinetické energii abrazivních částic – závisí tedy na hmotnosti a rychlosti částic opouštějících trysku.

$$h \propto M * v^2 \quad (1)$$

h – hloubka řezu, M – hmotnost částice, v – rychlost částice při opuštění trysky

Rychlost v z hlediska rychlosti vodního paprsku vj :

$$v \approx v_j * \frac{1}{1+R} \quad (2)$$

Kde R je míra zatížení a je popsán jako poměr abrazivního průtoku (m) a průtoku vody (mw)

$$R = \frac{m}{m_w} \quad (3)$$

Za pomocí těchto rovnic může být hloubka řezu odhadnuta na základě teorie o erozi jako:

$$h = M * \left(\frac{v_j}{1+R}\right)^2 \quad (4)$$

Kritický abrazivní průtok lze získat pomocí parciální derivace:

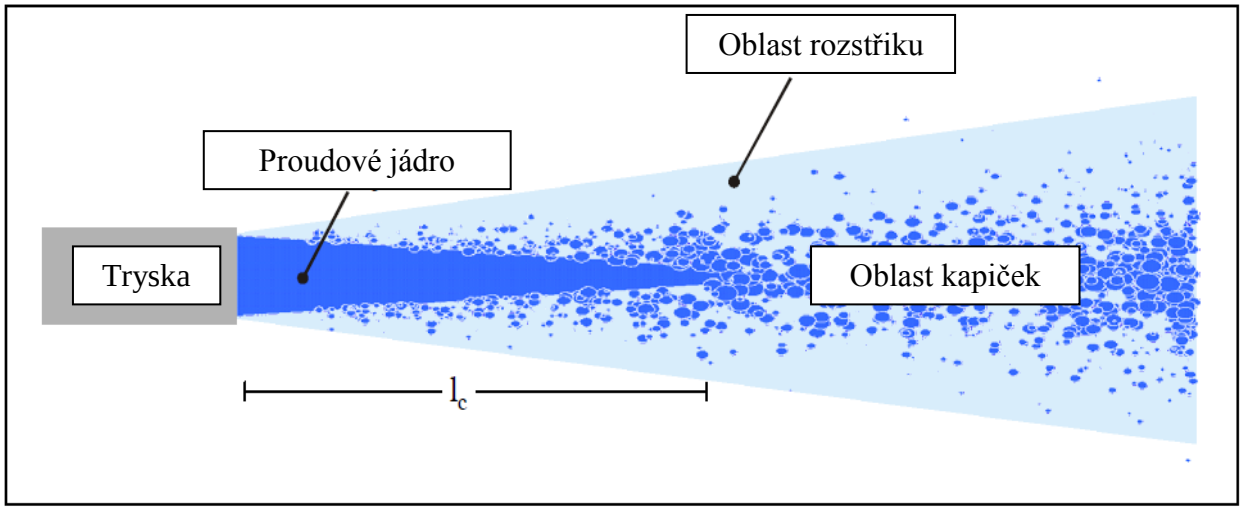
$$\frac{\partial h}{\partial R} = 0 \quad (5)$$

Graf mezi hloubkou řezu a abrazivního průtoku by obecně přinést výsledky, jak je znázorněno na obrázku 3. Nicméně však existuje nesoulad mezi výpočty a experimenty.

Výše uvedené skutečnosti však znamenají, že je důležitá kontrola dávkování abraziva. V případě, že abrazivní průtok je nižší než optimální množství, nemusí být dosaženo dostatečné hloubky řezu. Naopak v případě, že je dávkování příliš vysoké, bude to plýtvání abrazivem.

1.5 Struktura vodního paprsku[1,2,22]

Ve vodním parsku je bývalá hydraulická energie stlačené vody přeměněna v kinetickou energii vody přes trysku. Struktura vodního paprsku je zobrazena na následujícím obrázku.



Obrázek 11: Rozpad vodního paprsku[22]

Vodní paprsek se skládá z proudového jádra, který se postupně rozpadá na kapičky vody. Třetí oblast vodního paprsku obklopuje proud vody (proudové jádro a oblast kapiček) a obsahuje velmi malé kapičky – oblast rozstřiku. Tato oblast má velmi nízkou energetickou hladinu a za normálních okolností nepoškozuje materiál obrobku. Délka proudového jádra je závislá hlavně na vnitřní turbulenci trysky. Tudíž tento nejvýznamněji ovlivňující faktor je kontrolován během vytváření proudu - obsah turbulence v proudící tekutině. Rozpad způsobený turbulencí proudění se nazývá primární rozpad. Ve větší vzdálenosti kapičky pokračují v rozpadu v důsledku aerodynamických účinků. Tento rozpad se nazývá sekundární. Několik hodnot odhadnutých z měření délky proudového jádra lc jsou zveřejněny v tomto pořadí:

$$73 < \frac{l_c}{d_n} < 135$$

$$50 < \frac{l_c}{d_n} < 125$$

$$20 < \frac{l_c}{d_n} < 150$$

Hodnoty délky proudového jádra jsou v závislosti na průměru trysky d_n.

Další výzkumy byly prováděny pro výpočet délky proudového jádra, kde bylo zjištěno, že poměr hustoty kapaliny a prostředí mohou být považovány za další ovlivňující veličiny. Délka jádra paprsku tedy může být také vypočtena jako:

$$l_c = k_1 * d_n * \sqrt{\frac{\rho_F}{\rho_E}}$$

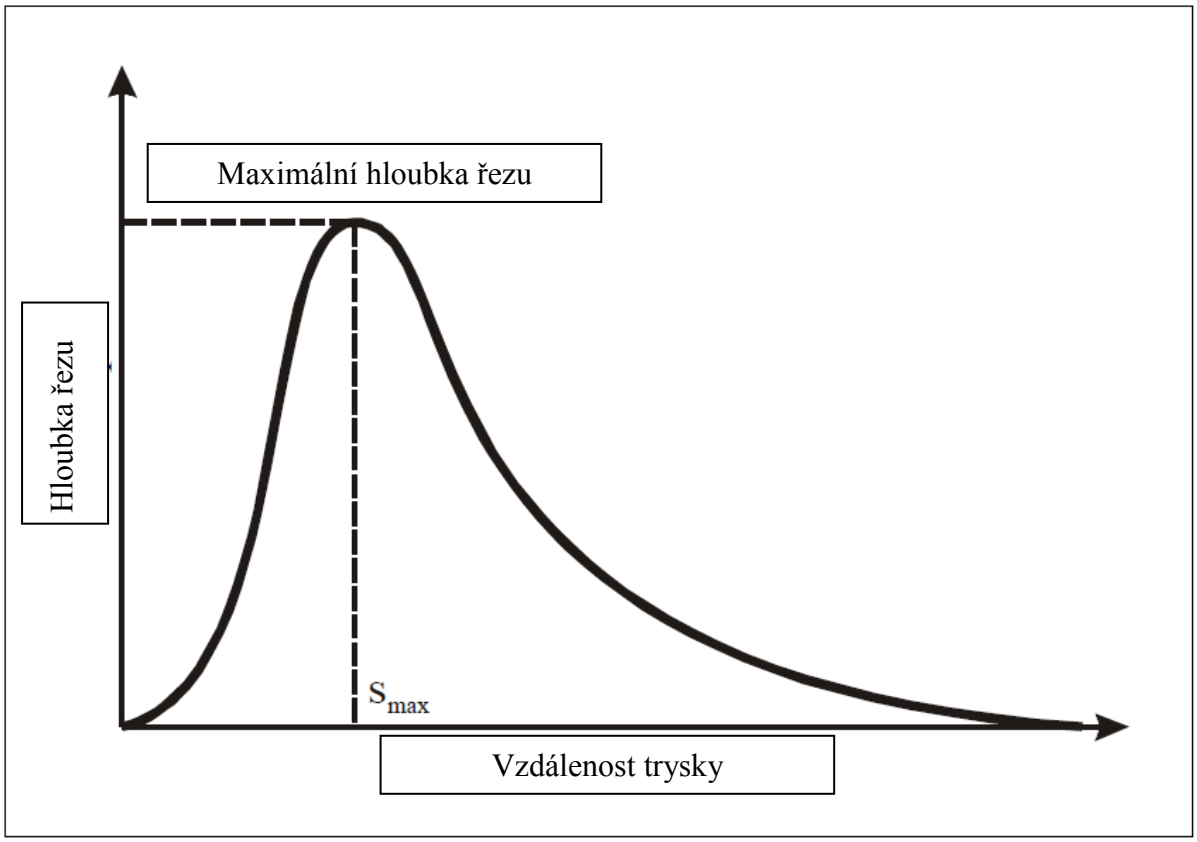
Kde k_1 je konstanta a rovná se 7,15 až 15,8, ρ_F je hustota tekutiny, ρ_E je hustota prostředí. Pro vodní paprsek ve vzduchu je délka jádra okolo 200 až 500 násobku průměru trysky.

Experimentální výzkum vyvinul výrobu řezného paprsku s dlouhým soudržným paprskem s tryskáním paprsku do atmosféry s různým tlakem (v rozmezí mezi 120 [hPa] a 1300[hPa]) a různých prostředí (normální vzduch, metan, helium a argon) za pracovních podmínek vodního parsku o tlaku 96[MPa] a průměru trysky 36[μm]. Bylo zjištěno, že souvislá délka parsku je přibližně 100 násobek průměru trysky. Uvádí se, že tryská-li paprsek do média o velmi nízké hustotě (velmi lehký plyn jako helium), tak délka soudržnosti parsku je několikrát vyšší a tyto parsky tryskající do nižšího tlaku mají delší soudržný paprsek než při tryskání do prostředí o vyšším tlaku. To je díky faktu, že při vysokém okolním tlaku, atmosférický plyn by působil s větší silou na povrch paprsku. To způsobuje intenzivnější vzájemnou interakci mezi paprskem a obklopujícím prostředím.

Široký rozptyl výsledků jednotlivých autorů je v důsledku dvou efektů. Na jedné straně se jedná o geometrii trysek na sebe navazujících, což má podstatný vliv na rychlost rozpadu paprsku a na druhé straně provozní tlak, který ovlivňuje Reynoldsovo číslo.

Příčinou rozpadu paprsku může být přičítáno vzájemnému působení prostředí a turbulencí uvnitř paprsku. Bylo zjištěno, že poměr hustoty paprsku a prostředí má zásadní vliv na mechanismus proudového rozkladu. Když je poměr hustot menší než 500, pak vzájemné působení prostředí má zásadní význam na rozpad paprsku. Zatímco při větších poměrech hustoty je hnací silou rozpadu turbulence v paprsku. Pro vodní paprsek ve vzduchu je poměr hustot okolo 800, takže to se paprsek rozpadá díky turbulencím. Turbulentní poruchy expandující v paprsku a opouštějí jej, jakmile jejich kinetická energie převyšuje povrchovou energii média paprsku. V důsledku toho se očekává, že maximální velikost kapek se objevuje na konci jádra paprsku.

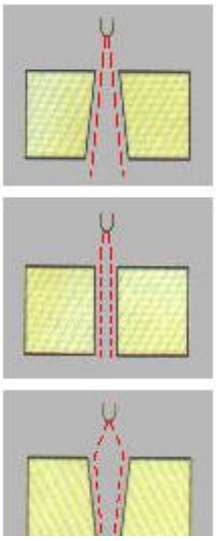
Na základech diskuse o struktuře vodního paprsku můžeme dospět k závěru, že různé oblasti průtoku mohou mít za následek různé zatížení materiálů a s tím související mechanismy odstranění materiálů. Za prvé, odstraňování materiálu je způsobeno stagnačním (statickým) tlakem zatímco v druhé řadě je odstraňován dopadajícím tlakem vyplívající z dopadu jednotlivých kapalných objemů (kapek). Tyto dva vlivy vysokorychlostních kapalinových paprsků jsou simulovány pouze jedním paprskem. S rostoucí vzdáleností trysky od obrobku, se zatížení vzorku mění odpovídajícím způsobem ze stagnačního tlaku kompaktního paprsku na pulzní nespojitý dopadající tlakový paprsek složený z jednotlivých kapek, proto vzdálenost trysky hraje velkou roli v rozhodování mechanizmu odstraňování materiálu. Na druhou stranu se zdá být shoda o existenci optimální vzdálenosti trysky, při níž je hmota odstraňování maximální, jak je ukázáno na grafu dole.



Obrázek 12: Hloubka řezu je funkcí vzdálenosti trysky [22]

1.6 Kvalita řezu [1,7,21]

Vodní paprsek může v řezaném materiálu vytvořit různé tvary. Tyto tvary jsou ovlivněné jednak materiálem a tloušťkou obrobku a pak také rychlostí řezu paprsku. To můžeme vidět na následujícím obrázku.



- Zde je vidět tvar, který vznikne při velmi pomalém řezu a navíc v měkkém materiálu. Paprsek tedy vytvoří kužel.
- Tvar řezu v druhém obrázku je ideální. Nastává rovnováha mezi rychlostí řezu, odolností a tloušťkou materiálu. Celou dobu řezu je paprsek udržen jako válec.
- Poslední tvar řezu vzniká, když je vysoká řezná rychlost a zároveň je materiál odolný. Pak znovu vzniká kuželovitost, ale obrácená tak že se kužel uzavírá. Materiál se nestihne probrousit.

Obrázek 13: Typy řezů - vodní paprsek[21]

Kuželovitost není závislá jen na materiálu a rychlosti řezu. Další ovlivňující faktory jsou především: množství abraziva, tvar řezu (rovný, kruhový) a šířka obrobku.

Existuje stupňování kvality řezu v pěti stupních, což je zobrazeno na dalším obrázku.

Obrázek 14: Stupně kvality řezu[21]

V tabulce jsou dosažené přibližné hodnoty jednotlivých řezů. Zase záleží na materiálu, tlaku, abrazivu, šířce, rychlosti řezu.

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra* v horní kontuře	Drsnost Ra* ve spodní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* v horní kontuře	Tvarová přesnost (mm)* ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/- 0,1	+/- 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	+/- 0,1	+/- 0,2	Většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	+/- 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	+/- 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělící řez	4,0-6,3	do 40	+/- 0,2	Výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +

Tabulka 2: Velikosti drsností řezu podle kvality[21]

1.6.1 Kriteria kvality řezu

Využití vodní parsku pro dělení materiálu je poměrně jednouchá procedura, nicméně kvalita výsledného produktu závisí na několika parametrech. Nejdůležitější kritéria při hodnocení kvality jsou: drsnost povrchu odříznuté roviny – přiřazení příslušné úrovni (Q1-Q5), chyba řezného úhlu, chyba poloměru a chyba *v* rohu – v kolmých rovinách, chyba v počátku a konci řezu.

1.6.1.1 Povrchová drsnost

Povrchová drsnost a příslušná úroveň kvality řezu závisí na zvyšující se průnikové hloubce paprskem do materiálu. Povrchová drsnost může být ovlivněna řeznými parametry; první a nejpřednější parametr je řezná rychlost a typ plus jemnost abraziva. Při zvolení nižší řezné rychlosti jsou užší tolerance a proto jsou nižší hodnoty drsnosti. Běžné hodnoty drsnosti jsou od Ra=3,2μm do Ra=50μm.

Vodní paprsek hledá vždy cestu, kde je nejmenší odpor. Jakmile paprsek se pohybuje přes obrobek, odchyluje se víc a víc s přibývající hloubkou materiálu. To způsobuje zaostávání řezného paprsku na výstupu parsku z obrobku oproti vstupu parsku do obrobku. Rozsah tohoto zpoždění především závisí na rychlosti paprsku. Při abrazivním řezání na kvalitě a velikosti abraziva, stejně tak na typu směšování abraziva v trysce.

1.6.1.2 Chyba úhlu řezu

Typická charakteristika hodnocení kvality obrobku pro vodní paprsek je odchylka od pravého úhlu na odřezávaném povrchu. Největší vliv na toto kriterium má řezná rychlost. V závilosti na tvrdosti a tloušťce materiálu, se odchylka pohybuje mezi 0° až 2°. Nicméně další faktory jako jsou velikost částic abraziva, vzdálenost trysky od obrobku nebo způsob míchání abraziva v trysce musí být brány v úvahu jako faktory ovlivňující odchylku od ideální roviny.

V průmyslové praxi je chyba úhlu řezu měřena jako odchylka šířky dolní (vstup parsku) a horní hrany (výstup paprsku). V zásadě platí, že je možné dosáhnout velmi dobrých hodnot. Tak například, při zpracování nástrojových ocelí nebo hliníku o tloušťce 50 mm je možné dosáhnout vychýlení paprsku menší než 0,1mm.

Vstupní řezný paprsek je přibližně o 10% větší než průměr trysky. Se zvyšujícím se opotřebením zaměřovací trysky se i průměr paprsku zvyšuje (přibližně 0,03mm po osmi hodinách provozu).

1.6.1.3 Rádius a chyba v rohu

Nejmenší možný rádius v pravoúhlém rohu pro řezání vodním parskem závisí na průměru vodního parsku, na pohybech obráběcího stroje a na řezné rychlosti. Rádius je mezi 0,25 a 0,8mm. Speciálně v rozích a záhybech způsobí zpoždění parsku odklony na výstupním okraji a z toho vyplívající chyby geometrie.

Rohová chyba je zvláště ovlivněna řeznou rychlostí. Čím větší rychlost tím větší rohová chyba. V průmyslových procesech je tato chyba obecně mezi 0,05 a 3mm.

1.6.1.4 Chyba na vstupu a výstupu paprsku z řezu

Kvůli zpoždění parsku nastávají jisté nepřesnosti na začátku řezu (start kontury) a na konci řezu (konec kontury). Tyto chyby jsou ovlivněny především druhem materiálu, tloušťkou materiálu, řeznou rychlostí, pohybem nástroje a nastavenými parametry. Můžou být mezi 0,05 a 5[mm]. Proto by měl být začátek a konec kontury vždy stanoven v místě, kde poškození není takový problém.

1.6.2 Úloha ovlivňujících faktorů

Zatímco výsledek řezání u čistého vodního paprsku závisí na typu materiálu a tloušťce, tlaku paprsku, vzdálenosti trysky od obrobku a průměru paprsku. U abrazivního paprsku navíc výsledek obrábění závisí na typu abraziva, velikosti jeho částic a na množství, které se dávkuje do paprsku. V následujícím textu jsou vysvětleny a zobrazeny v grafech účinky každého faktoru na řezný výsledek.

1.6.2.1 Tuhost a tvrdost materiálu

Tuhost a tvrdost materiálu má významný účinek na řeznou rychlost. Tužší a tvrdší materiál znamená nižší řeznou rychlost.

1.6.2.2 Tloušťka materiálu

Větší tloušťka materiálů ke zpracování znamená snížení řezné rychlosti. Protože při stejném množství abraziva je zároveň potřeba odebrat více materiálu.

1.6.2.3 Tlak

Nejen maximální možná dosažená hloubka závisí na tlaku. Se zvyšujícím se tlakem je také možno zvyšovat řeznou rychlost a dosáhnout stejných výsledků řezu. Závislost je skoro lineární. Nicméně se zvyšujícím se tlakem je také větší opotřebení trysky a stabilita řezného procesu klesá.

1.6.2.4 Průměr trysky – čistý paprsek

Se zvětšujícím se průměrem trysky se zvyšuje i řezná rychlost nicméně toto zvyšování řezné rychlosti není omezené. Hydraulická síla se zvyšuje kvadraticky. Pak tedy požadovaná elektrická síla pro vysokotlaká čerpadla také roste.

1.6.2.5 Vzdálenost trysky – čistý paprsek

Při řezání čistým paprskem je kompaktní vodní paprsek řezný nástroj. Vzdálenost trysky by proto měla být nastavena dostatečně malá, tak aby rozbíhavost paprsku byla omezena. Obvykle je tato vzdálenost mezi 4 a 8 mm. S cílem udržet paprsek kompaktní i přes větší vzdálenosti a také aby se zvýšila řezná síla, můžou být přidány polymery s dlouhým řetězcem.

1.6.2.6 Průměr trysky – abrazivní paprsek

Průměr paprsku se zvyšuje se zvyšujícím se průměrem abrazivní trysky. S rostoucím průměrem paprsku se šířka řezu rozšiřuje. To znamená, že je odebíráno více materiálu. U abrazivního řezání je pevný vztah mezi průměrem vodní trysky a průměrem abrazivní trysky (zaměřující tryska) a množstvím abraziva. Když je větší průměr vodní trysky, tak také musí být větší průměr i abrazivní trysky. Obecně platí, že každému průměru vodní trysky je přiřazen optimální průměr abrazivní trysky. Kolísání vodního tlaku a množství abraziva může způsobit ucpávání abrazivní trysky. To omezuje výběr kombinací průměrů v praxi. Se stoupajícím průměrem abrazivní trysky musí stoupat i množství přidávaného abraziva

1.6.2.7 Vzdálenost trysky – abrazivní paprsek

U abrazivního vodního paprsku zvyšování vzdálenosti mezi tryskou a obrobkem způsobuje snižování řezné rychlosti kvůli souvislosti s rozbíháním paprsku. Ve stejném čase se zvyšuje šířka řezu a také vedlejší poškození díky písku dopadající na povrch obrobku blízko řezu. Navíc je tam zaoblení na horní hraně, kde se pohybuje paprsek. Rozbíhavost paprsku je vyšší když se porovná s rozbíhavostí čistého vodního paprsku, proto je výběr vzdálenosti velmi důležitý. Nejmenší vzdálenost zajistí nejvyšší řeznou rychlost a proto také nejmenší poškození řezané strany. V praxi by měla být dodržena konstantní vzdálenost trysky přibližně 1[mm].

1.6.2.8 Typ, velikost částic a množství abraziva

Tvrdší a tužší materiál abraziva znamená rychlejší řeznou rychlost. Větší abrazivní částice abraziva také způsobují rychlejší řeznou rychlost. Nicméně to lze uplatnit jen do maximální velikosti částic, které se prodávají. Na druhou stranu: čím menší částice, tím kvalitnější řez.

Pro každou kombinaci trysek je optimální množství abraziva. Jestliže množství roste konstantně, do té doby kdy se dosáhne optimálního množství. Od určitého bodu je zatížení zrychlení objemu vodního paprsku je vyčerpané a řezná síla nemůže dále stoupat. Místo toho se následkem zvyšování třecí síly zvyšuje možnost ucpání abrazivní trysky.

Čím menší kolísání tlaku pak také menší rychlostní rozdíly v paprsku mají za následek rychlejší konečnou rychlost abrazivních zrn. To samé platí i pro kolísání přidaného množství brusiva. V obou případech výkyvy, které jsou příliš velké, způsobují ucpávání a ztráty třením a to má za následek nižší stabilitu procesu.

1.7 Strojní vybavení a příslušenství Stroj a strojní vybavení [16]

V této kapitole se čtenář seznámí se strojem, na kterém byl experiment proveden a také se strojním vybavením, kterým tento stroj disponuje. Řezalo se za pomoci stroje firmy PVT s.r.o., konkrétně s modelem COBRA.

1.7.1 Technické parametry CNC stroje COBRA:

Pracovní rozsah v ose Z	500[mm] (materiál o síle až 500[mm](2D) a 320[mm](3D))
Přesnost polohování	+/- 0,04[mm] na 300[mm]
Opakovatelná přesnost	+/-0,05[mm]
Rozsah pracovních rychlostí	1-12 000[mm/min]
Rozsah přejezdových rychlostí	1 až 36 000[mm/min]
Rozsah pracovních zrychlení	0,01 až 0,1[m/s^2]
Nosnost ložné plochy řezacího roštu	max. hmotnost 150[$kg/1m^2$] plochy (v neporušeném stavu roštů)
Nosnost ložné plochy řezacích lišt	max. hmotnost 500[$kg/1m^2$] plochy
Počet řezacích hlav	1-4 (na stroji v RTI 2 řezací hlavy – vodní paprsek a plazma)

Maximální tlak paprsku	4130[bar] (tento tlak je produkován čerpadlem o příkonu 37kW)
Množství vody	3,8 [l/min] (při maximálním tlaku)

Obrázek 15: Stroj Cobra pro řezání vodním abrazivním paprskem[16]

Pro přesnost řezání a celkovou kvalitu řezaných výrobků jsou důležité určité konstrukční parametry stroje. V následujících řádkách budou vypsány některé konstrukční prvky a jejich dopad na řezání. Stroj tedy disponuje následujícími konstrukčními prvky:

- Nízké podélné osy, které mají dopad na lepší stabilitu stroje, přesnější řezání a pro obsluhu stroje je lepší přístup k pracovní ploše
- Extrémně robustní vysokou ocelovou konstrukcí
- Přesná lineární vedení
- Kalené a broušené ozubené hřebeny a pastorky
- Silné servopohony v kombinaci s velmi přesnými převodovkami
- Lineární odměřovací systém

1.7.2 Příslušenství, které má stroj Cobra v RTI:

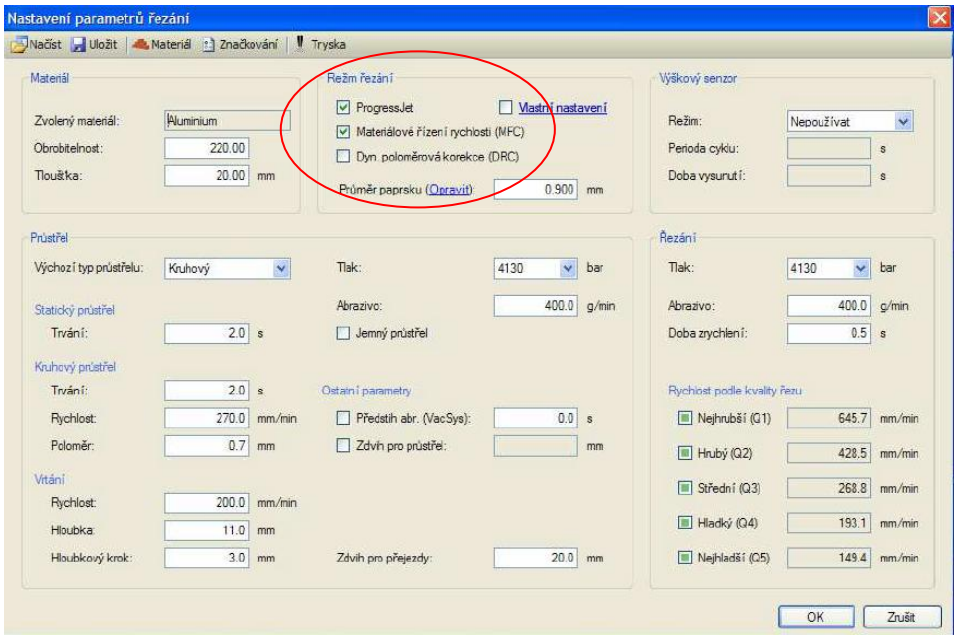
- Výškový senzor v ose Z
- ProgressJet 5AX 60°
- Tlaková doprava abraziva
- Dálkové ovládání
- Systém regulace výšky hladiny
- Laserový zaměřovací kříž
- Světelná závora
- Gentle Piercing

- Simulace řídícího systému
- Rotační osa – 6.osa
- Mikrořezání

1.7.3 Detailní popsání vybraných speciálních aplikací a příslušenství

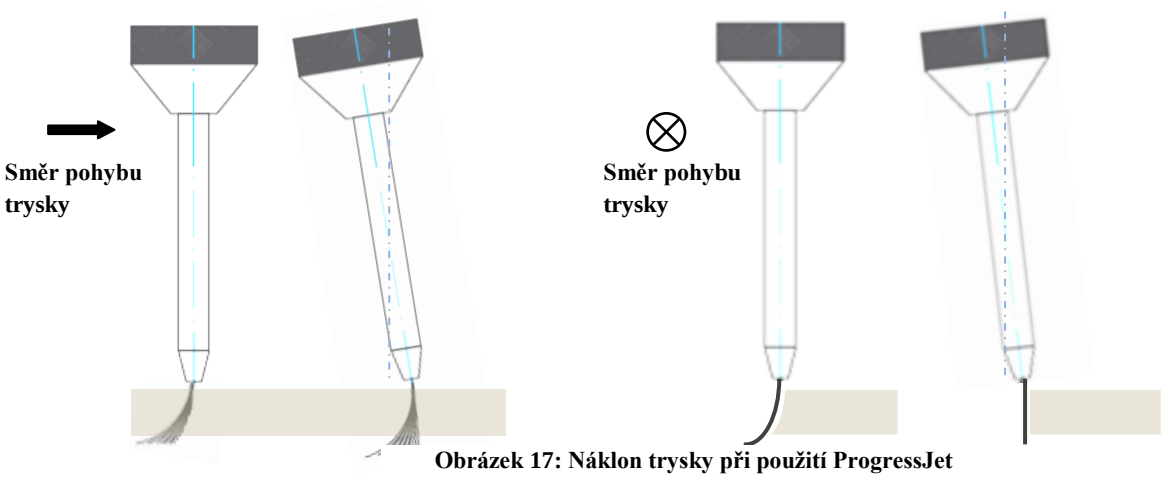
1.7.3.1 Režim řezání

V okně pro nastavování parametrů řezání se kromě parametrů jako je typ materiálu, průměr trysky, typ průstřelu, dávkování abraziva, kvalita řezu, tloušťka materiálu, tlak paprsku se dají také zvolit režimy řezání tzv. korekce. Software nabízí tři druhy režimů řezání: ProgressJet, Materiálové řízení rychlosti (MFC) a Dynamická poloměrové korekce (DRC). Všechny tyto korekce by měli pomoci k lepší kvalitě řezu a lepší rozměrové přesnosti.



Obrázek 16: Okno nastavení parametrů řezání[16]

ProgressJet je korekce při řezání, která pomocí naklápění trysky odstraňuje úkos, který vzniká při řezání vodním paprskem. Pomocí ProgressJet se tedy dosáhne kolmých řezů a přispívá i k lepší tvarové přesnosti výrobku. Úkosy vznikají díky ztrátě síly paprsku v řezu. Tyto úkosy nevznikají díky trysce, naklánějící se v rozsahu až +/-10° v rotačních osách. Naklání se ve směru řezu a druhý je náklon do řezané plochy. To z důvodu získání co nejsilnějšího a konstantního paprsku v celé šířce řezu. Tato korekce se dá využít jen při řezání plochých polotovarů, ne pro šikmé řezy. Tato funkce je plně řízena softwarovým systémem CNC stolu.



Obrázek 17: Náklon trysky při použití ProgressJet

Materiálové řízení jakosti (MFC) se snaží zabránit zášlehům, podřezům a vymýtinám. Funguje to tak, že rychlost paprsku je taková, aby šířka parsku v celé délce řezu zůstala stejná. Například, když se paprsek blíží k nějakému rádiusu nebo záhybu na kontuře, pak paprsek zpomalí a drží na snížené rychlosti, tak aby se šířka paprsku vyrovnala v celé šířce.

Dynamická poloměrová korekce (DRC – dynamic radius correction) kompenzuje změnu šířky spáry vyříznutou parskem. Šířka spáry závisí na paprsku, který se zužuje a zpožďuje v závislosti na rychlosti, a to nejen na výstupu z materiálu, ale i na vstupu do materiálu. Postup v praxi je takový, že obsluha stroje provede testovací řez, který určí ‘‘maximální průměr‘‘ paprsku. Od tohoto maxima systém odečítá odhadnutou hodnotu změny průměru paprsku. Systém odečítá tuto odhadnutou hodnotu na základě výsledků testů.

1.7.3.2 Rotační osa – 6.osa

Stroj je možno vybavit také šestou – rotační osou. Šestá osa je možno vyrobit buď rovnoběžně s osou Y nebo osou X. Konkrétně v RTI je osa paralelní s osou Y. Firma PVT dodává šestou osu ve dvou výkonových typech. První varianta je: krouticí moment 7[Nm], maximální otáčky 1000 min^{-1}, maximální nosnost 200 kg a upínání vnějšího průměru až 200mm a vnitřního průměru až 254mm. Druhá varianta je: krouticí moment 40[Nm], maximální otáčky 150 min^{-1}, maximální nosnost 1000 kg a upínání vnějšího průměru až 315mm a vnitřního průměru až 392mm. U obou typů se upíná pomocí tří čelistí.

Obrázek 18: Rotační šestá osa[16]

1.7.3.3 Světelná bariéra, lankový systém

Na obrázku pod textem můžeme vidět světelnou bariéru a také světelné bariéry s lankovým systémem vybudovaným okolo stroje. Tento systém je bezpečnostním prvkem a chrání tak obsluhu stroje před zraněním. Pokud je zapnutý program řezání a pracovník protne světelnou bariéru, dojde k okamžitému zastavení procesu řezání. Pokud není u stroje světelná bariéra, nesmí nikdy pracovník šahat pod řezací trysku. Paprsek může být tak tenký, že si jej pracovník nevšimne, přestože si myslí, že program je vypnutý a dojde ke zranění. Může se také poranit o pohybující části stroje. To jsou důvody, proč je dobré mít tento ochranný systém.

Obrázek 19: Světelná bariéra a lankový systém[16]

1.7.3.4 Doprava abraziva do řezací hlavy

Celý systém dopravy abraziva se skládá z těchto prvků: pulzní dopravník abraziva (PDA) – PDA250 (zásobník), propojovací hadice na abrazivo, dávkovač abraziva, abrazivní hadičky a řezací hlavy.

Při poklesu abraziva v dávkovači dostává řídicí systém tuto informaci díky čidlu na detekci minimálního množství abraziva. Řídicí systém reaguje doplněním abraziva ze zásobníku (PDA250) přes propojovací hadici. Dávkovač přestane tuto informaci vysílat po doplnění abrazivem.

Princip odvodu abraziva na obrázku 20. PDA se skládá z násypky v horní části a ve spodní části má tlakovací komoru. Když je tlakovací komora nenatlakovaná sype se do ní abrazivo z násypky. V případě povelu z řídicího systému pro doplnění dávkovače abrazivem je přiveden do tlakové komory tlakový vzduch. Tlakový vzduch zvedne ventil, ten následně zablokuje sypání z násypky a tlačí na abrazivo, které je vytlačováno do propojovací hadice. Dobu tlakování komory řídí řídicí systém stroje. Vzduch proudí z dávkovače směrem do volného prostoru.

Do násypky je možno nasypat až 250kg abraziva. Tento typ zásobování je pro jeden druh abraziva. V případě použití jiného typu je třeba abrazivo vysypat nebo vyčerpat při řezání. Pro bezproblémový chod systému je nutné mít v násypce dostatečné množství abraziva. Může jinak dojít k úplnému vytryskání abrazivního materiálu a přerušení jeho dopravy. Abrazivo se doplňuje z 15kg pytlů. Odklopí se víko násypky a pytel se položí na rošt se sítem. Pak se pytel roztrhne a síto zachytí hrubé části, které by mohli ucpat trysku. Po doplnění abraziva se víko zase zavře.

Stav množství v násypce musí být buď kontrolován průběžně obsluhou, nebo jej lze kontrolovat modulem, který signalizuje nízkou úroveň abraziva v násypce. Stav abraziva signalizuje maják. Pokud svítí zeleně je v násypce dostatek abraziva, pokud červeně tak je množství abraziva nedostatečné a obsluha musí do pěti minut abrazivo dosypat. Zároveň s červeným světlem se spustí zvuková siréna.

Díky proporcionálnímu dávkovači abraziva se může regulovat odvod abraziva do trysky. Tento úkon lze dělat během řezání bez nutnosti zastavit program. Regulací množství abraziva lze snížit spotřebu abraziva a tím peněžité náklady. Řízené dávkování dávkovačem přináší však i další výhody:

- Snížení rizika průniku vody do násypky
- Zvýšení rychlosti řezání a kvality řezu
- Prodloužení životnosti trysky
- Snížení spotřeby tlakového vzduchu
- Snížení rizika ucpání trysky při průstřelu materiálu
- Minimalizace spotřeby abraziva při průstřelu materiálu
- Rychlé odstranění závady při nežádoucím průniku vody do dávkovače

Obrázek 20: a) schéma pulzní dopravy abraziva, b) pulzní dopravník abraziva, c) dávkovač abraziva[16]

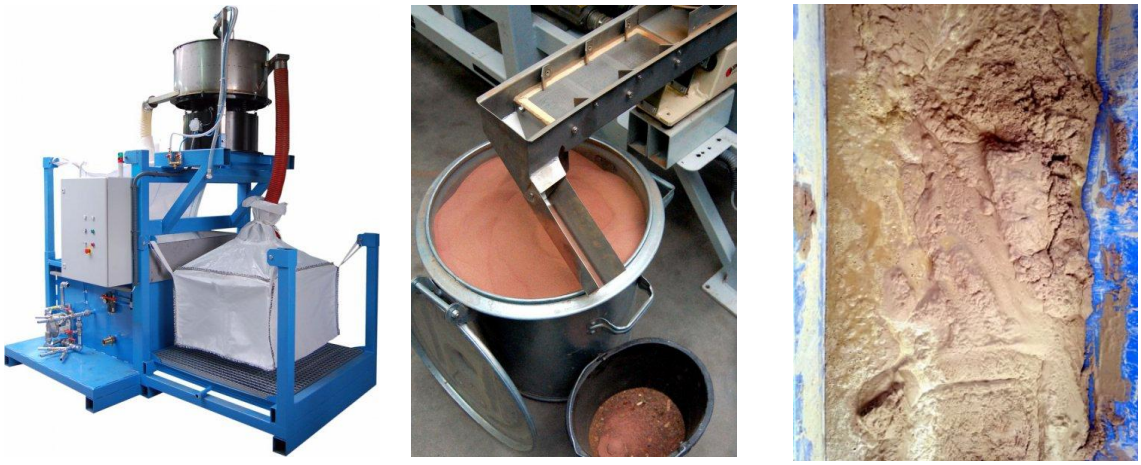
1.7.3.5 Použité abrazivo

Obrázek 21: Odkalovací zařízení[16]

K odstranění již použitého abraziva slouží *odkalovací systém*. Tento odkalovací systém odstraňuje kromě použitého abraziva i odpadní materiál z polotovarů, ale do velikosti 3[mm]. Do ocelové konstrukce odkalovacího systému jsou dány čtyři nejdůležitější prvky systému: membránové čerpadlo, kalové čerpadlo, řídící elektronika a mechanický hydrocyklon. Odkalovací systém funguje tak, že z lapače jsou pomocí sacích hlav odsávána voda s použitým abrazivem. Vzduchové čerpadlo je dále transportuje do hydrocyklonu. Tam se oddělí voda od abraziva. Voda se dopraví do pomocné vany a abrazivo do pytlů tzv. big-bagů. Zbylá voda z abraziva vyteče skrz pytel do pomocné vany. Z této vany je voda dopravována zpět do lapače, díky kalovému čerpadlu. I přes používání tohoto zařízení se musí lapač občas vypustit a ručně pomocí

lopaty lapač vyčistit od usazených nečistot. V RTI se tento úkon provádí přibližně jednou za rok.

Dalším zařízením na odstranění použitého abraziva je *sedimentační zařízení*. Toto zařízení odstraňuje částice velké maximálně 1,6[mm]. Princip tohoto zařízení je v samovolném usazování částic na dně nádrže sedimentačního zařízení. Použité abrazivo je možno znovu využít pro řezání. Je k tomu potřeba *recyklační jednotka*. Šnekový dopravník dopraví již použité abrazivo do sušící komory na vibrační síto. Pod vibrační síto je vháněn vzduch, který suší abrazivo. Síto vibruje a rozmělňuje hrudky abraziva na jednotlivá zrna. Proud vzduchu unáší zrna na výstup sušící komory, kde je umístěn cyklonový odlučovač. Ten odlučuje jemný prach. Z odlučovače padá usušené abrazivo do pytlů. Vstupní abrazivo musí být bez větších částic. Výkon recyklační jednotky je velmi ovlivněn vlkostí vstupního abraziva. Je dobré tedy před recyklací nechat 3-5 dnů abrazivo v pytlích odstát v suchém prostředí, tak aby se zbavilo přebytečné vody. V RTI není recyklační jednotka dostupná. Použité abrazivo si odváží firma, která dodává abrazivo do RTI a následně jej recykluje. Pro RTI je tato jednotka zbytečná, protože by nebyla plně využita. V RTI se spotřebuje ročně průměrně čtyři tuny abraziva. Pořízení této jednotky dává smysl pro firmy, které mají strojů pět a spotřebují čtyři tuny abraziva měsíčně.



Obrázek 22: z leva: recyklační jednotka RAMS 2, výstup abraziva z recyklační jednoty, abrazivo před recyklací v šnekovém dopravníku[16]

1.7.3.6 Abrazivo[17,18,19,20,21]

Abrazivo je nedílnou součástí řezání vodním paprskem. Je to dáno tím, že přidáním abraziva se několikanásobně zvýší řezná účinnost vodního paprsku a je umožněno řezání i velmi tvrdých materiálů. Řezání samotným paprskem je používáno jen pro velmi měkké materiály(papír,polystyren). Abrazivo je zjednodušeně velmi jemný sypký prášek, z materiálů různého chemického složení, různých velikostí zrn, různých tvrdostí a ostrostí. Není používáno jen pro řezání materiálu, ale různé druhy lze využít k dalším účelům, které jsou popsány v textu níže.

Typy a použití abraziva

Abraziva organická jsou velmi lehká, obvykle oválné nebo ostrohranné. Původ těchto organických abraziv je živočišný, rostlinný nebo biologický. Obvykle je to recyklovaný materiál vyrobený přírodně – skořápky ořechů, kukuřičný granulát nebo synteticky – abrazivo

z plastu. Tyto abraziva se nepoužívají pro řezání vodním paprskem. Abrazivo z plastu se využívá například v leteckém průmyslu a na komponenty z elektroniky, jelikož při tryskání se nepoškozuje povrch materiálu. Dále k odstraňování starých barev, nátěrů laků a také k leštění povrchů. Lze jej použít až třicetkrát. S drcenými skořápkami lze leštit lehké slitiny nebo čistit starožitnosti nebo keramiku.

Obrázek 23:Abraziva organická: skořápky ořechů, kukuřičný granulát, plastové abrazivo[17]

Abraziva kovová jsou sypké a těžké materiály a vyznačují se velkou životností. Mezi základní kovová abraziva patří ocelová a litinová drť nebo ocelový a nerezový granulát. Drtě jsou ostrohranné a mají různou tvrdost a hrubost. Tyto drtě se používají pro čištění od okují nebo pro přípravu – zdrsnění - povrchů před konečnou úpravou jako je lakování, galvanizace nebo smaltování. Granuláty nebo také kuličky či broky mají oblý tvar. Dlouhá životnost je dána odrazovou pružností a odolností vůči únavě. Tyto granuláty se používají pro čištění odlitků, vyhlazování povrchů armatur a svarů, ale také pro zvýšení tvrdosti povrchu. Nerezový granulát se používá pro opracování nerezových materiálů nebo barevných kovů, jelikož při styku těchto materiálů nevznikají vedlejší účinky. Používané hlavně pro větší díly.

Obrázek 24: Abraziva kovová: ocelová drť, litinová drť, ocelový granulát, nerezový granulát[17]

Abraziva minerální jsou sypké středně těžká abraziva. Buď se získávají synteticky – např. korund, karbid nebo přírodně – např. granát. Korund neboli oxid hlinitý je využíván k broušení materiálu před konečným zpracováním nebo i k výrobě brusných nástrojů. Karbid je stejně jako korund ostrohranný. Oproti korundu tvrdší a křehčí, ale používán pro podobné účely.

Obrázek 25: Abraziva minerální: granát, korund, karbid[17,19]

Dalším abrazivním materiálem je **granát**. Tento typ abraziva je nejčastěji používaný při řezání vodním paprskem, ale kromě toho se používá pro aplikace jako čištění různých materiálů (železa, kamene, dlažby, betonu, odstranění rzi nebo usazenin např. z trupů lodí) nebo tryskání skla. Pro řezání je vhodný pro tyto materiály: ocel, měď, žula, hliník, guma, sklo, mramor, dřevo ad. Je to přírodní materiál se zbarvením do červena. Tento materiál je

nekovový a netoxický, proto je také přívětivý k životnímu prostředí. Mezi vlastnosti tohoto materiálu patří vysoká tvrdost (7,5-8 na Mohsově stupnici tvrdosti) a pevnost. To je důvod proč ostrohranost jednotlivých zrn má dobrou trvanlivost a je možno již použitá zrna recyklovat. To šetří náklady za koupi nového abraziva. Mezi další vlastnosti garnátu patří nereaktivnost s obráběnými materiály a to, že nenasákne ve vlhkém prostředí a je ho tedy možné bezproblémově skladovat.

Důležitý je výběr granátu podle velikosti zrna. Nejčastěji jsou k řezání využívány granáty MESH50, MESH80 a MESH120. Vůbec nejpoužívanější pro řezání je MESH80. MESH je jednotka pro sypké hmoty a vyjadřuje velikost jednotlivých zrn. Například pro MESH80 má filtrační složka osmdesát čtvercových ok na jednom palci (2,54cm). Průměr drátu síta je standardizován. Čím vyšší je tedy jednotka MESH, tím více ok filtrační zařízení má a pak jsou zrna menší a jemnější. Pro příklad jsou uvedeny velikosti zrn jednotlivých MESH: MESH50 je 0,3[mm], MESH80 je 0,18[mm] a MESH120 je 0,125[mm]. Pro představu je uvedeno několik příkladů MESH dalších materiálů: cukr krystal – MESH10, písek hrubozrnný – MESH35, portlandský cement – MESH120. Důležité je kupovat granát, kde jsou velmi dobře vytříděna jednotlivá zrna. To je z důvodu, aby pak v balení MESH80 se nenacházely jemnější zrna – to má za následek zmenšení řezné účinnosti nebo zase zrna větší, která by ucpávala trysku. To by mělo za následek ztrátový čas jednak stroje, tak i obsluhy stroje. Granát je i rozdělován podle toho, kde byl vytěžen. Máme tedy např. granát australský nebo indický.

SiO_2	36%
Al_2O_3	20%
FeO	30%
Fe_2O_3	2%
TiO_2	1%
MnO	1%
CaO	2%
MgO	6%

Tabulka 3: Chemické složení granátu[19]

Abrazivo se prodává v pytlích o hmotnosti 25kg. V tabulce níže jsou uvedeny ceny, za kolik se prodává granát MESH80. Ceny jsou uvedené v Kč za jeden kilogram. Zde prodejce i rozlišuje v jakém množství odběratel abrazivo kupuje.

Hmotnost	do 25kg	do 50kg	do 150kg	do 300kg	do 500kg	do 750kg	do 1000kg	nad 4000kg
MESH80	25,-	23,-	21,-	19,-	15,-	13,-	10,-	7,5,-

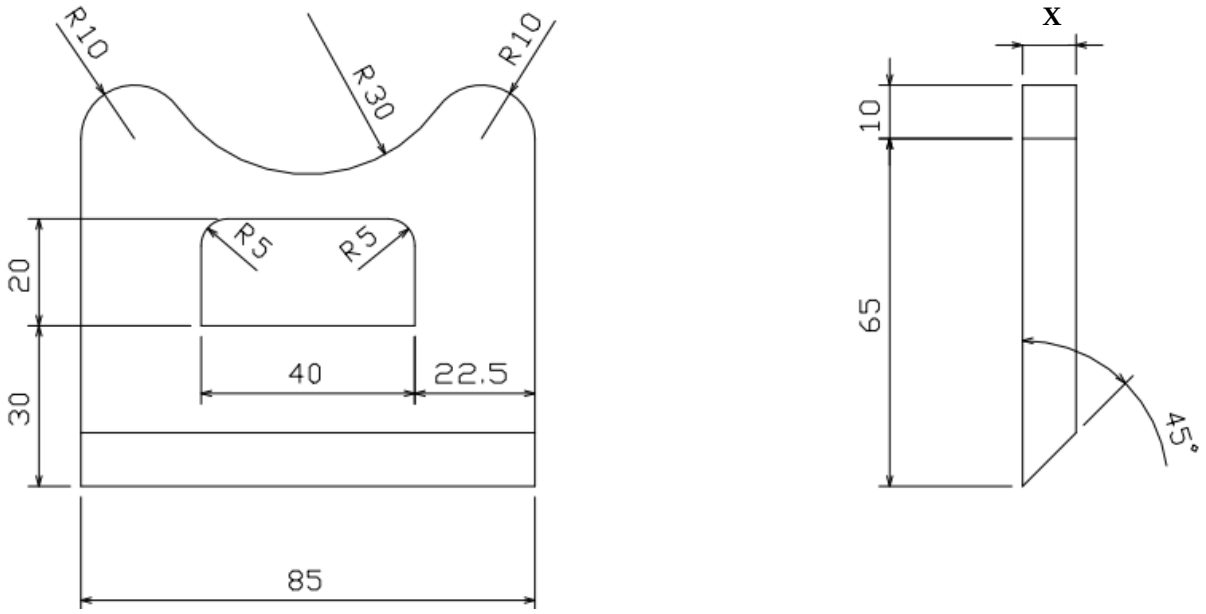
Tabulka 4: Cena abraziva - granát MESH80 - Kč/1kg[17]

2 Experiment 1

Cílem tohoto experimentu bylo vyřezat pomocí vodního abrazivního paprsku navrženou konturu (obrázek 26). Řezalo se do dvou typů ocelí – 12 050 a 19 573. Do 12 050 z důvodu, že tento materiál je etalon pro obrobitelnost ocelí a do 19 573, protože patří do skupiny těžko obrobitelných materiálů. Je tedy možno porovnat kvalitu řezu u dvou velmi rozdílně obrobitelných ocelí. Dále se řezalo do vzorků o různé tloušťce, konkrétně 5, 10, 15 a 20 [mm]. Tloušťky jsem volil tak, aby bylo zřetelné, jak si abrazivní paprsek poradí i se silnou tloušťkou stěny obrobku. Do každého vzorku se řezalo bez korekcí a se zapnutými korekcemi (tedy 2 vzorky u každé tloušťky stejného materiálu, avšak každý řezaný jinou technologií). Korekce jsou softwarovou nabídkou stroje, tak aby eliminoval chyby řezu – eliminace zkosení řezu, eliminace tloušťky paprsku a zpomalování v ohybech kontury (více v kapitole 1.7.3.1 Režim řezání). Celkem bylo tedy zhotoveno šestnáct vzorků.

2.1 Kontura

Tento tvar kontury jsem zvolil z důvodu, že paprsek bude řezat nejenom vnější, ale i vnitřní konturu, rádiusy se změnou interpolace a šikminu o úhlu 45°.



Obrázek 26: Kontura, experiment 1

2.2 Podmínky experimentu

Zde v této části jsou vypsány podmínky a parametry při experimentu:

- Tlak vodního abrazivního paprsku: 413[MPa] – maximální možný tlak
- Průměr abrazivní trysky: 0,889 [mm]
- Průměr vodní trysky: 0,33[mm]
- Typ abraziva, velikost: australský granát, MESH80
- Průtok abraziva tryskou: 300 [g/min]
- Vzdálenost trysky od materiálu: 4[mm]
- Požadovaná kvalita řezu: Q5

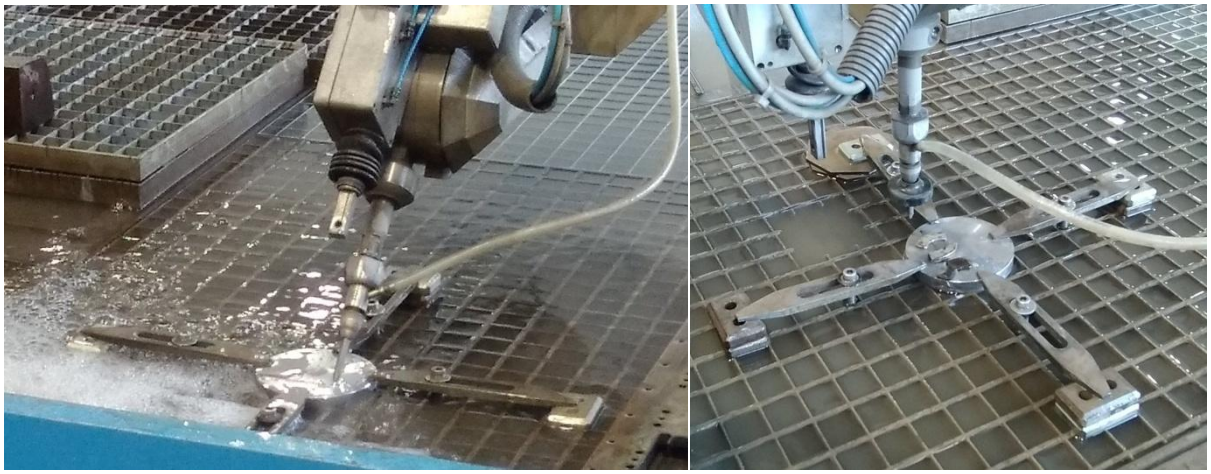
Tyto hodnoty byly **pevně dané a neměnné.** Řezná rychlost (posuv paprsku) je automaticky vygenerována podle typu materiálu, požadované kvality řezu a tloušťky materiálu. V možnostech softwaru pro řezání není možno zvolit konkrétní typ oceli, ale pouze obecně ¨Ocel¨. Nastavení trysky nad materiálem 4[mm] se používá proto, aby tryska nepřišla do kontaktu s materiálem, což by mohlo mít za následek poškození stroje (trysky). Pro toto nastavení je několik logických důvodů: nerovnost materiálu, který leží velkou plochou na roštu, nečistoty na řezaném polotovaru nebo také zvednutým obrobkem ke konci řezu, kde se zkroutí, jelikož jej drží k polotovaru jen tenká část materiálu. Při nárazu do materiálu tryskou se program okamžitě zastavuje.

Proměnlivé parametry při řezání:

- Tloušťka: 5,10,15 a 20 [mm]
- Materiál: 12 050 a 19 573
- Možnosti stroje: Zapnuté a vypnuté korekce – ProgressJet, MFC, DRC

Celkem **16 vzorků.**

2.3 Upnutí obrobku



Obrázek 27: Upnutí obrobku

Na těchto obrázcích je vidět upnutí obrobku pomocí čtyř upínek k pracovnímu roštu na vodní hladině. Pevné uchycení je důležité vzhledem ke kvalitě řezu, jelikož na obrobek působí velké síly a je nežádoucí, aby se vzorek pohnul, ať už během průstřelu nebo v průběhu řezání kontury. Vlevo na obrázku 27 je vidět řezání s vyklopenou řezací hlavicí – řez zkosení. Tímto řezem program vždy začínal a pak se vrátil do výchozí polohy. Po tomto řezu byly k obrobku připnuty magnety. Ty zabraňovaly propadnutí vzorku do nádrže, při eventuálním prořízntutí pracovního roštu (možno vidět na pravém obrázku 27, vedle obrobku). Stabilizovaly také vyřezávanou část z polotovaru, tak aby nedošlo k nežádoucímu pohybu v okamžiku, kdy se paprsek blížil k dokončení kontury a vyřezávaná část tak byla k polotovaru připevněna jen velmi malou částí. K prořízntutí pracovního roštu došlo při řezání vzorků o tloušťce 15[mm], kdy byly dva tyto vzorky dělené na stejném místě. Díky dlouhému působení vodního paprsku v jednom místě tedy došlo k prořízntutí roštu. Při dalším řezání se silnějšími vzorky, se následující uchycovaly na jiné místo tak, aby k prořízntutí nedošlo.

Na dvou snímcích je zachycena vodní hladina během řezání, ale i když je paprsek vypnutý a obsluha stroje může provádět zásahy v pracovním prostoru. Za povšimnutí stojí

výška hladiny vody – nižší při vypnutém programu řezání. Se zapnutím programu vodní hladina stoupne nad úroveň pracovního roštu.

2.4 Naměřené rozměry vzorků

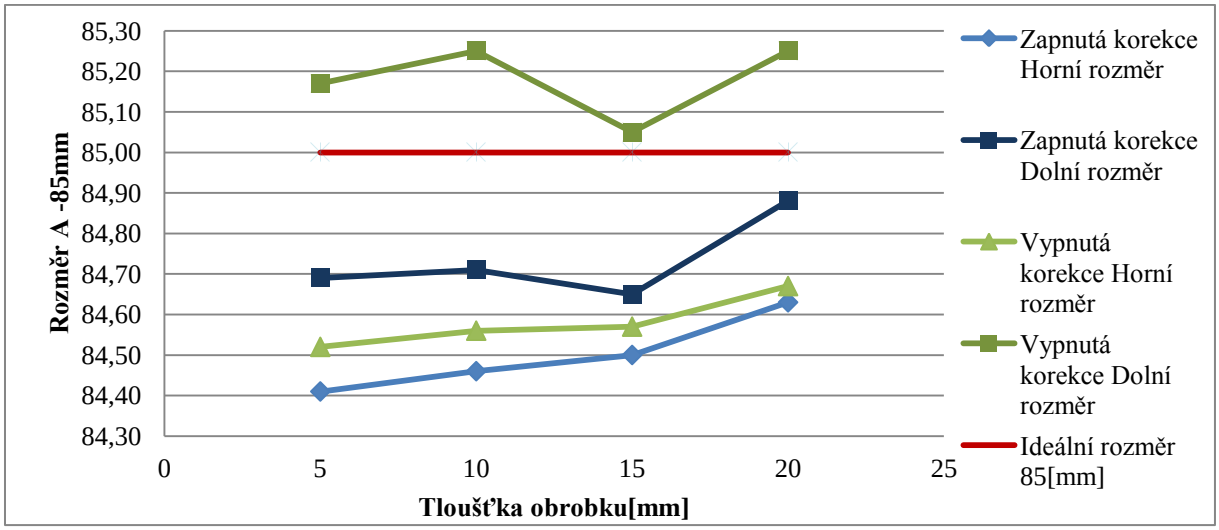
Měření bylo provedeno na mikroskopu MULTICHECK PC500. Výsledný rozměr se získal rozdílem souřadnic a byl zaokrouhlen na setiny. Měřeny byly tři rozměry, a to vnější 85[mm] a dva vnitřní 20 a 40[mm]. Měřila se jak horní hrana vzorku, tak i dolní hrana vzorku aby bylo zjištěno zkosení. Měření bylo provedeno z důvodu, že přesnost rozměrů je jeden z parametrů kvality.

Materiál 12 050 – naměřené rozměry									
Tloušťka [mm]		**5**		**10**		**15**		**20**	
Korekce		**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**
A–85mm	**Horní okraj**	84,41	84,52	84,46	84,56	84,50	84,57	84,63	84,67
	Dolní okraj	84,69	85,17	84,71	85,25	84,65	85,05	84,88	85,25
	Rozdíl	0,28	0,65	0,25	0,69	0,15	0,48	0,25	0,58
B–40mm	**Horní okraj**	40,73	40,63	40,70	40,54	40,84	40,49	40,62	40,44
	Dolní okraj	40,41	40,02	40,44	39,97	40,62	39,91	40,37	39,90
	Rozdíl	0,32	0,61	0,26	0,57	0,22	0,58	0,25	0,54
C-20mm	**Horní okraj**	20,83	20,63	20,80	20,62	20,78	20,49	20,73	20,41
	Dolní okraj	20,53	19,98	20,48	19,95	20,51	19,78	20,36	19,78
	Rozdíl	0,30	0,65	0,32	0,67	0,27	0,71	0,37	0,63

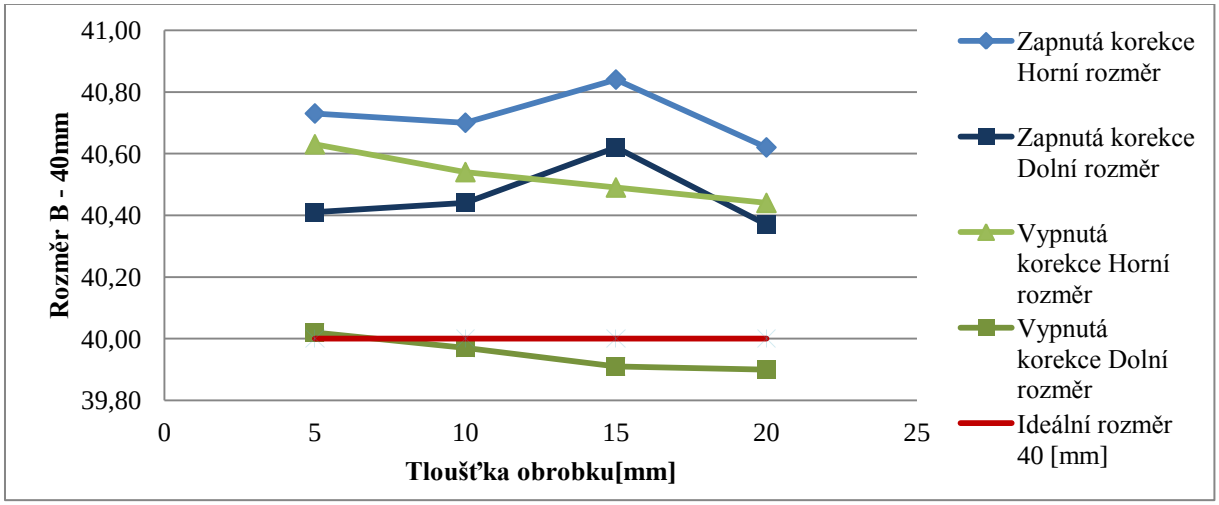
Tabulka 5: Rozměry jednotlivých rozměrů pro materiál 12 050

Materiál 19 573– naměřené rozměry									
Tloušťka [mm]		**5**		**10**		**15**		**20**	
Korekce		**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**	**Korekce -zaplé**	**Korekce - vyplé**
A–85mm	**Horní okraj**	84,34	84,36	84,31	84,42	84,41	84,47	84,83	84,55
	Dolní okraj	84,67	85,06	84,56	84,95	84,83	85,31	84,84	85,29
	Rozdíl	0,33	0,7	0,25	0,53	0,42	0,84	0,01	0,74
B–40mm	**Horní okraj**	40,77	40,64	40,81	40,56	40,84	40,61	40,63	40,53
	Dolní okraj	40,44	40,05	40,55	40,02	40,57	40,06	40,32	39,93
	Rozdíl	0,33	0,59	0,26	0,54	0,27	0,55	0,31	0,6
C-20mm	**Horní okraj**	20,6	20,86	20,86	20,57	20,85	20,55	20,65	20,42
	Dolní okraj	20,51	19,92	20,61	19,96	20,5	19,92	20,32	19,76
	Rozdíl	0,09	0,94	0,25	0,61	0,33	0,63	0,33	0,66

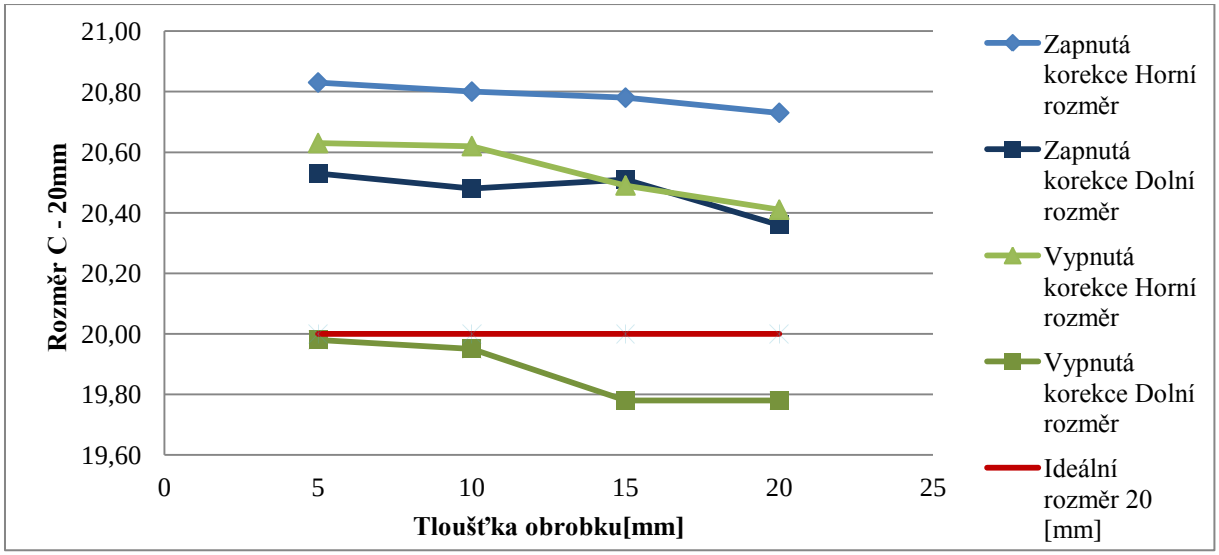
Tabulka 6: Rozměry jednotlivých rozměrů pro materiál 19 573



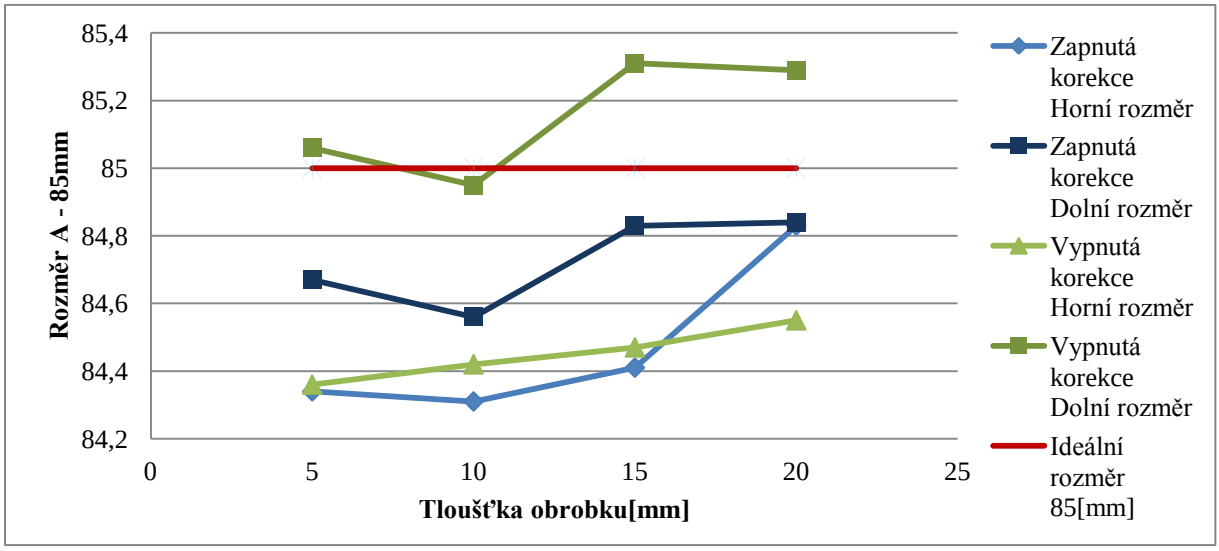
Graf 1: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 85[mm] - materiál 12 050



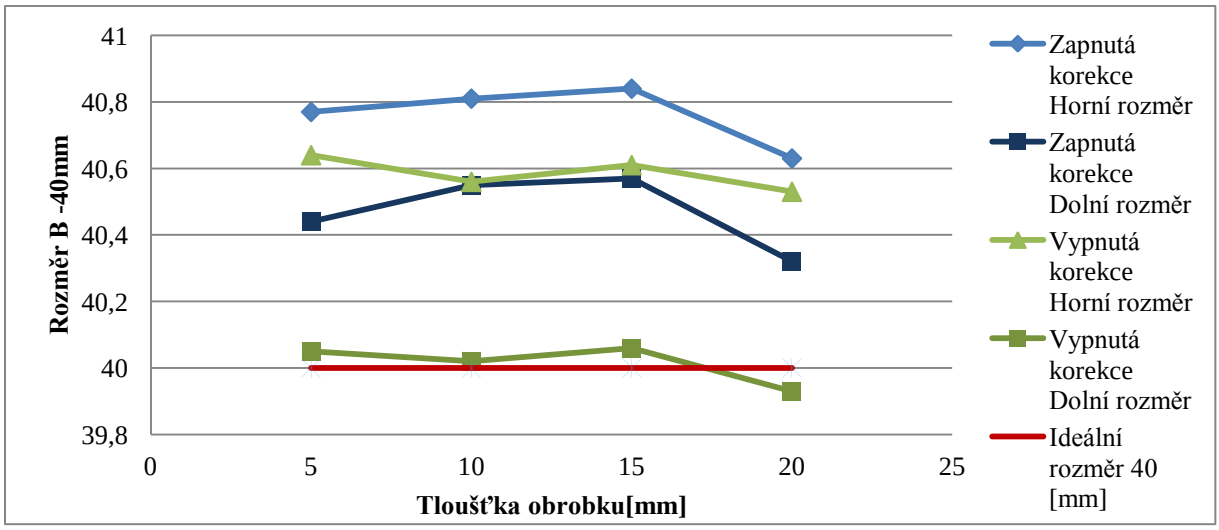
Graf 2: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 40[mm] - materiál 12 050



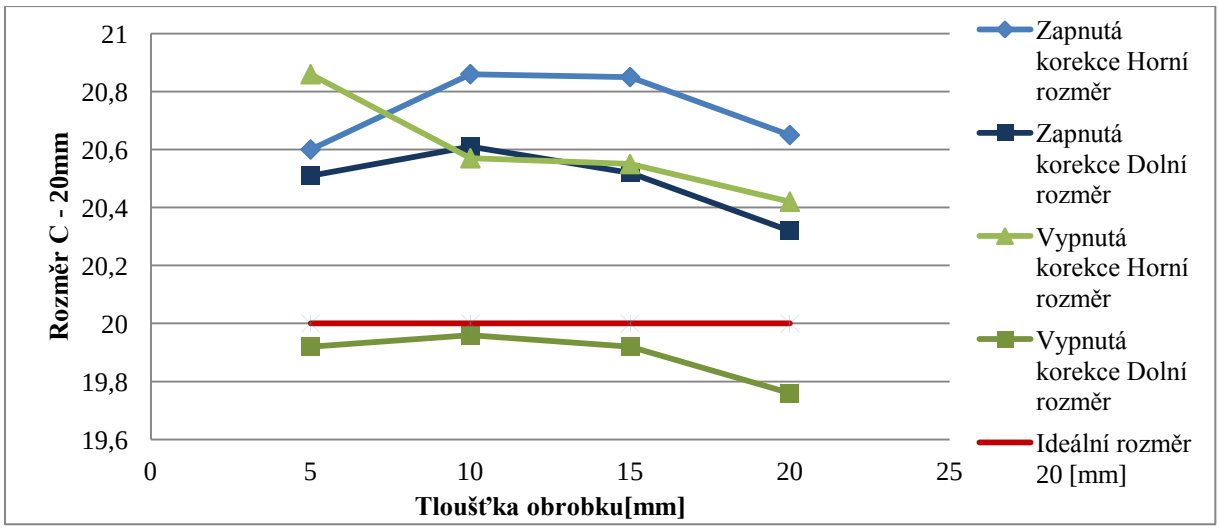
Graf 3: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 20[mm] - materiál 12 050



Graf 4: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 85[mm] - materiál 19 573



Graf 5: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 40[mm] - materiál 19 573



Graf 6: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 20[mm] - materiál 19 573

Při pohledu na grafy můžeme obecně říct, že při řezání se zapnutými korekcemi je zkosení řezu menší než při řezání bez korekcí. To je zřejmé na všech grafech i z tabulky naměřených hodnot. Velikost zkosení je však přibližně stejně velká ať už se jedná o vzorek

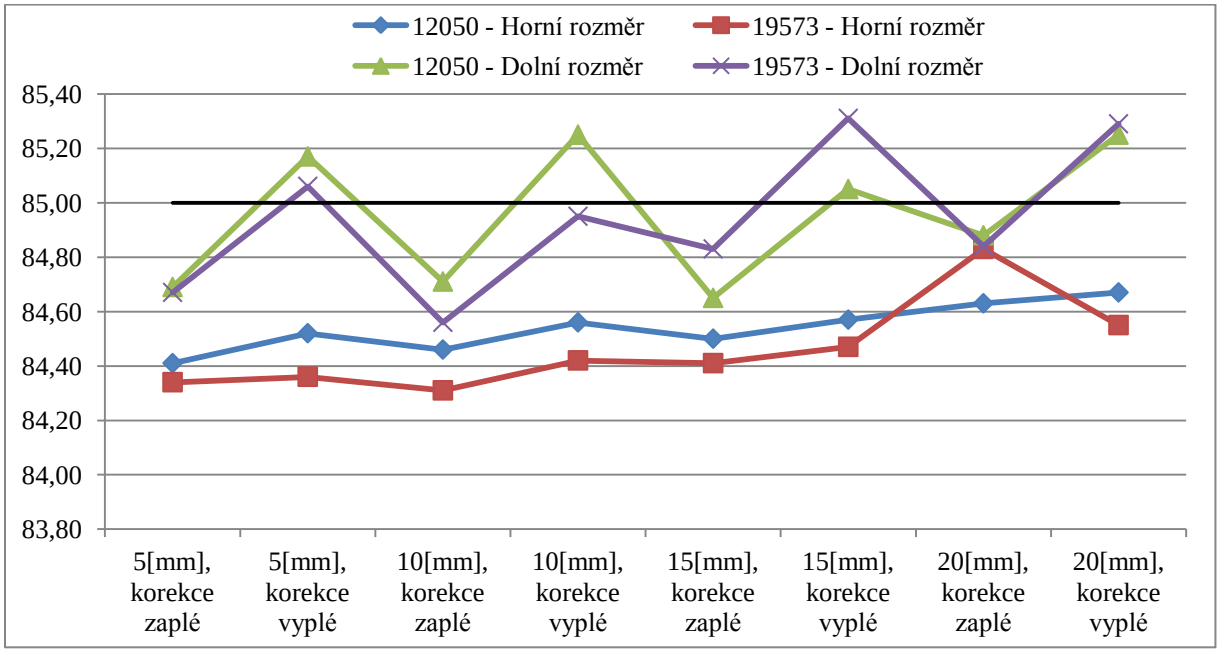
s tloušťkou 5[mm] nebo 20[mm]. Dále je z grafů a tabulek zřejmé, že ideálních rozměrů se vodním paprskem nedosáhlo. Odchylky jsou v řádech desetin [mm] a od ideálního rozměru jsou podobné jak u 5[mm], tak i u 20[mm]. Rozdíl je jen v tom, že čím silnější vzorek, tím se horní hranice přibližuje více ideálnímu rozměru, ale na druhou stranu dolní rozměr se od ideálního oddaluje (přibližuje) stejně, tj. zůstává podobné zkosení (rozdíl mezi horním a dolním okrajem).

Na grafech pod tímto textem je porovnání obou ocelí – 12 050 a 19 573. Grafy zobrazují horní a dolní rozměry obrobku všech tloušťek jak s korekcí, tak i bez korekce. Jde tedy o porovnání závislosti druhu ocele na přesnosti.

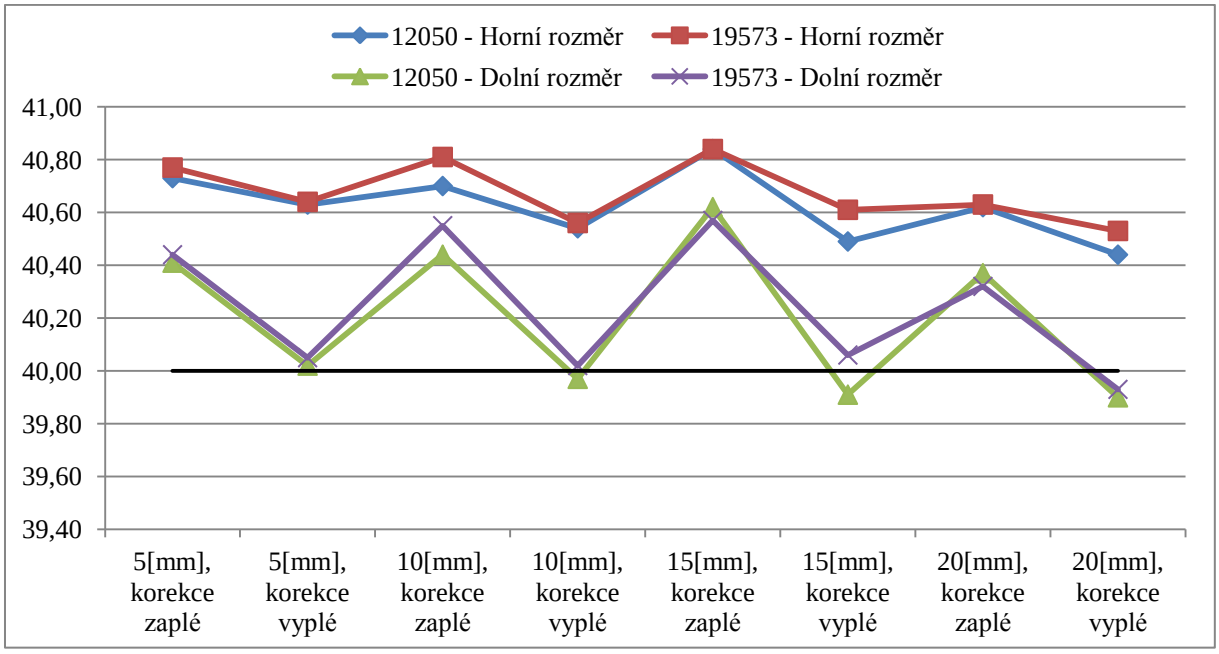
V grafu 7 je vidět, že horní rozměr 12 050 je blíž ideálnímu rozměru 80[mm] až na jednu výjimku. Dolní rozměry vzorků 5 a 10[mm] mají podobný rozdíl mezi horním a dolním. Vzorky 15[mm] oceli 12 050 mají rozdíly menší než oceli 19 573. U vzorků tloušťky 20[mm] má ocel 19 573 stejný rozměr jak v horní tak dolní části.

V grafu 8 je znovu vidět, že horní rozměr oceli 12 050 je častěji blíže k ideálnímu rozměru, ale už ne tak výrazně, jak je tomu u 85[mm]. Dolní rozměry jsou podobně daleko u obou ocelí u jednotlivých vzorků. Dobře je vidět jaký rozměr byl řezán se zapnutou korekcí ProgressJet (zubatá křivka).

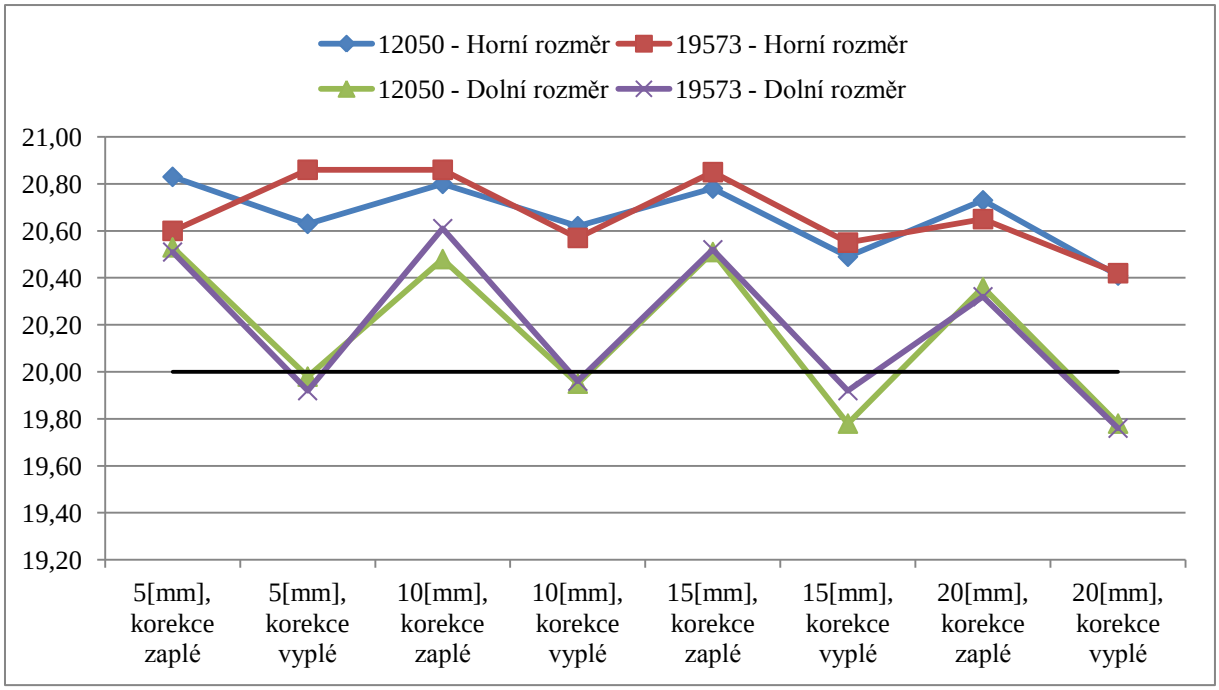
V grafu 9 není horní rozměr oceli blíže u oceli 12 050, ale je to střídavě. Dá se tedy říci, že čím menší rozměr tím se rozdíly mezi ocelemi smazávají. Jinak je znovu vidět křivka, kdy je jasně menší skosení na řezané hraně při zapnuté korekci.



Graf 7: Závislost přesnosti na typu ocele - 85[mm]



Graf 8: Závislost přesnosti na typu ocele – 40[mm]

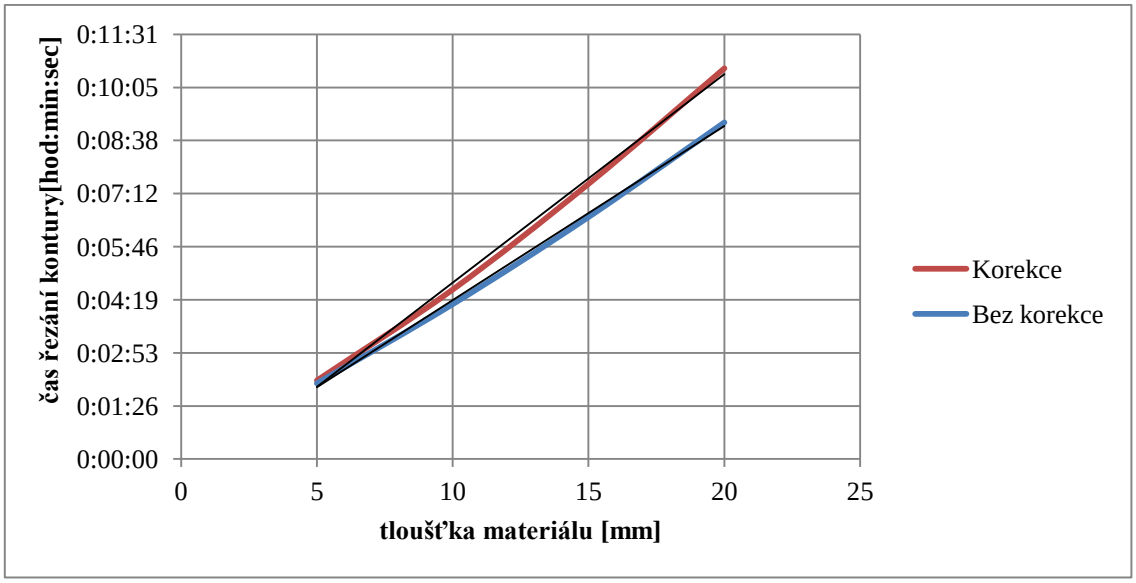


Graf 9: Závislost přesnosti na typu ocele – 20[mm]

2.5 Závislost tloušťky na časové náročnosti řezání

	Korekce vyplé t[h,min,s]	Korekce zaplé t[h,min,s]
5[mm]	0:02:03	0:02:08
10[mm]	0:04:12	0:04:36
15[mm]	0:06:34	0:07:28
20[mm]	0:09:08	0:10:36

Tabulka 7: Časy vyříznutí vzorků



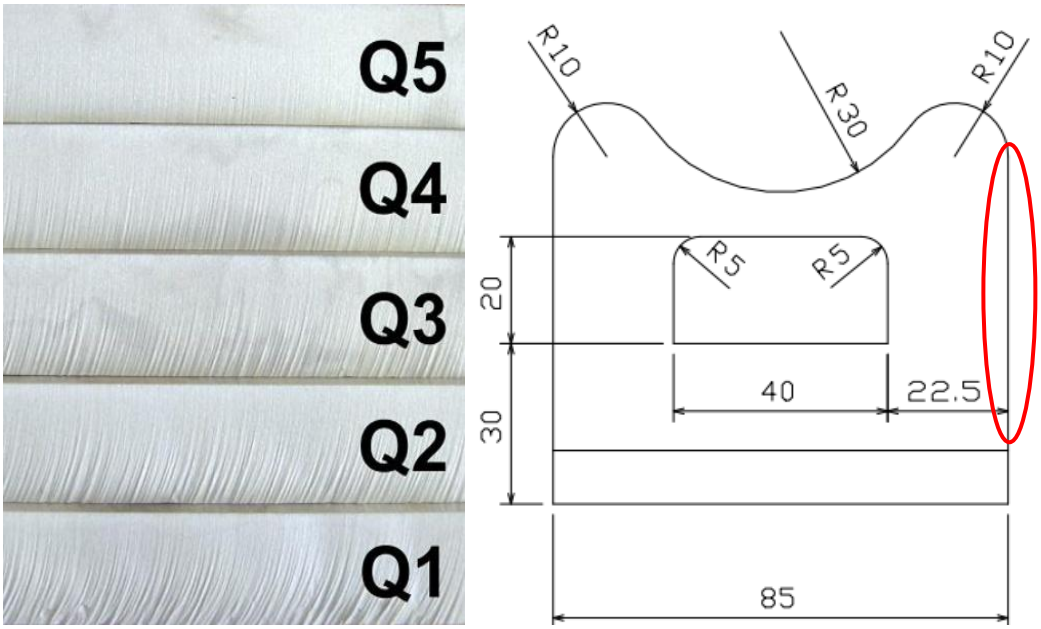
Graf 10: Závislost časové náročnosti řezu na tloušťce oceli

Nad tímto textem je tabulka 10 zachycují trvání vyříznutí kontury do ocelových vzorků. Jak je vidět, časy rostou téměř lineárně s tloušťkou vzorku. Při řezání se zapnutými korekcemi je časová náročnost vyšší. Čím silnější vzorek tím se časová náročnost zvyšuje u jednotlivých tloušťek oproti řezání s vypnutými korekcemi – křivky se oddalují. Řezání do různých materiálů bylo stejně časově náročné, jelikož v ¨nastavení parametrů řezání¨ lze nastavit jen obecně ¨Ocel¨ tudíž program vypočítá stejnou řeznou rychlost jak pro 12 050, tak i pro 19 573.

2.6 Vizuální kontrola kvality

Vizuální kontrola kvality je základní kontrola kvality řezu vodního paprsku. Podle této kontroly se snadno a rychle zjistí, jaká kvalita povrchu řezáním vznikla. Je pět stupňů kvality Q1 (nejhorší) - Q5 (nejlepší). Stupeň kvality se určuje porovnáním vyříznutého vzorku s etalonem kvality. Záleží na tom, jak hluboké stopy zanechá zpomalující paprsek.

Všechny vzorky jsou foceny na pravé straně při pohledu na vzorek shora. Snímky jsou od začátku zkosení do končícího rádiusu. Na této straně obrobku vždy končil proces řezání.

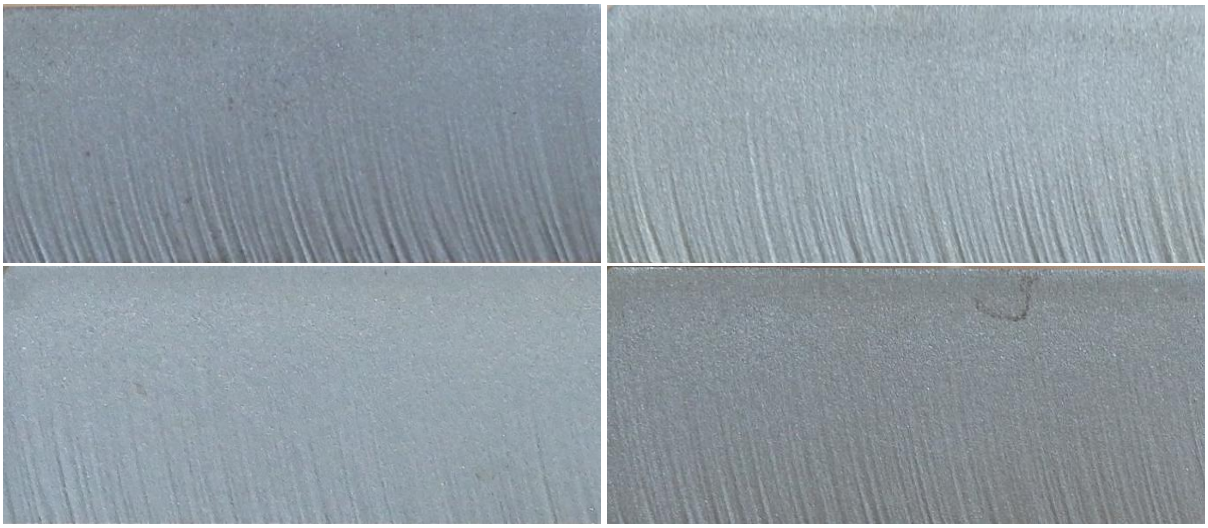


Obrázek 28: Etalon kvality řezu, strana hodnocení jakosti

Následující snímky budou vždy v tomto řazení s tím, že se jedná vždy o stejnou tloušťku materiálu.

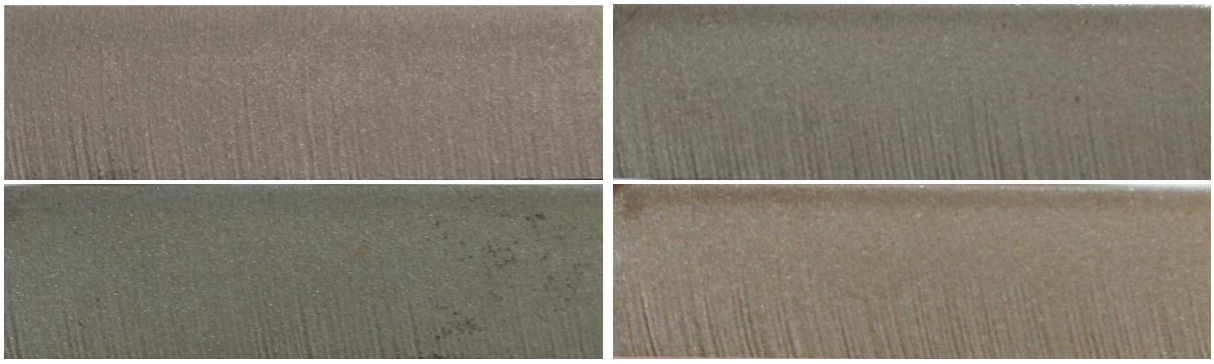
19 573 – Korekce zapnuté	**12 050 – Korekce zapnuté**
19 573 – Korekce vypnuté	**12 050 – Korekce vypnuté**

Tabulka 8: Umístění snímků



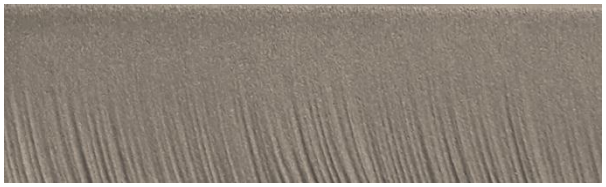
Obrázek 29: Vzorky 20[mm]

Nejlepší kvalita Q5 povrchu vznikla u materiálu 19 573, který byl řezaný s vypnutými korekcemi. Kvalita Q4 byla dosažena u materiálu 12 050, také řezaného s vypnutými korekcemi. Kvality Q3 bylo dosaženo u obou zbývajících vzorků řezaných se zapnutými korekcemi.

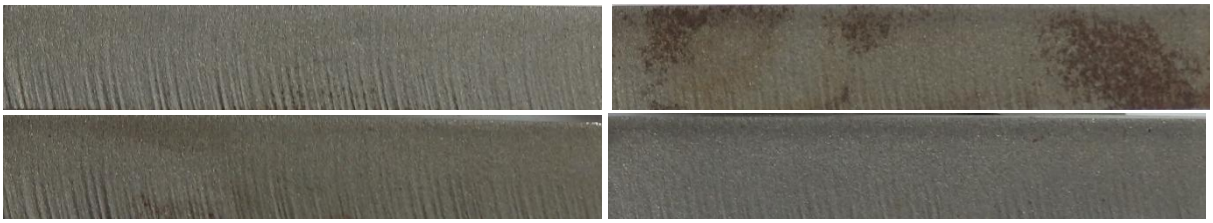


Obrázek 30: Vzorky - 15[mm]

Nelze říct, že kvalita u vzorků je zřejmá Q5. Spíš se jedná o kvalitu velmi blízko k Q5, tedy mezi Q4 a Q5. Na obrázku 31 je materiál 12 050, tloušťky 15[mm], řezaného s vypnutými korekcemi. Je jen focen na straně levé při pohledu na vzorek shora. Na této straně se dosáhlo Q3. Ojediněle se tedy stane, že kvalita je v různých částech řezu odlišná. Například v ohybech to může být dáno zpomalujícím a zrychlujícím paprskem.

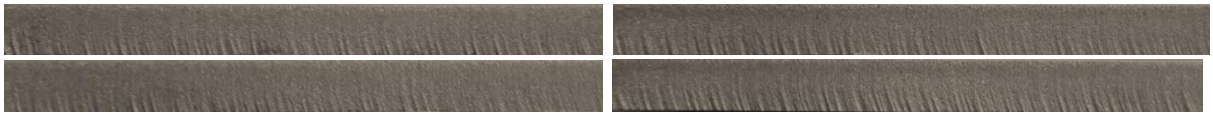


Obrázek 31: 15[mm], 12 050, korekce vypnuté, druhá strana



Obrázek 32: Vzorky - 10[mm]

U vzorků tloušťky 10[mm] je vidět, že materiál 19 573 má hrubší rýhy po parsku a kvalitu Q3 oproti vzorkům oceli 12 050, které jeví vyšší jakost povrchu mezi Q4-Q5. Na ploše řezu u materiálu 12 050 řezaného se zapnutými korekcemi, je vidět zkorodovaný povrch. Výrobky řezaných vodním paprskem je třeba po odebrání z roštu stolu pečlivě otřít hadrem nebo ofouknut stlačeným vzduchem.



Obrázek 33: Vzorky - 5mm

U vzorků tloušťky 5[mm] je u všech čtyřech vidět kvalita Q3. Není zde zřejmý rozdíl v kvalitě mezi různými materiály nebo zapnutými a vypnutými korekcemi.

Vzhledem k tomu, že byla nastavena Q5, tak požadované kvality dosáhli jen ojedinělé vzorky. Naopak drtivá většina vzorků měla kvalitu Q3-Q4. Návrh, jak by se dosáhlo lepších kvalit povrchu, je zvolení vlastní rychlosti řezání, která bude menší, než vypočítaná

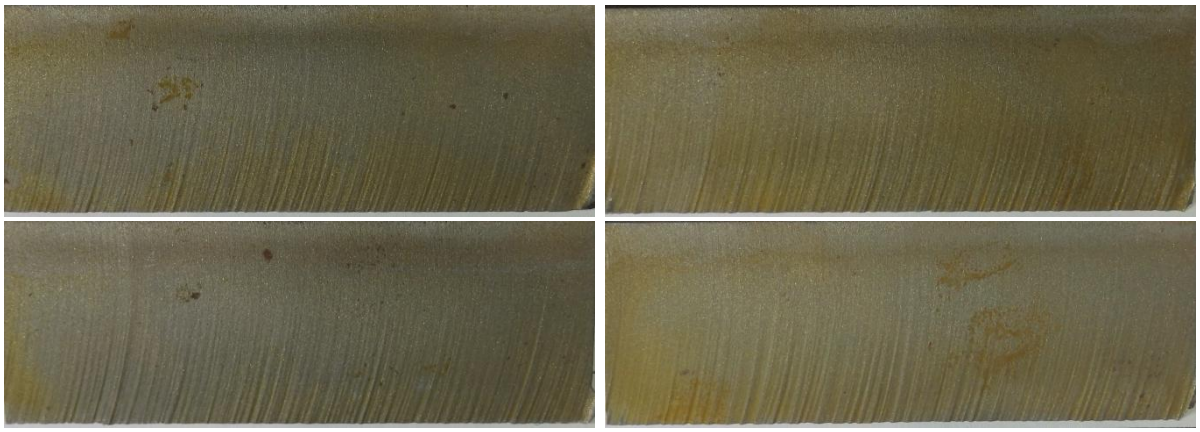
softwarem. Jde ale pouze jen o odhad a uchopitelnější a konkrétnější informace o povrchu by měla říct drsnost povrchu.

2.7 Vizuální kontrola kvality u šikmých ploch

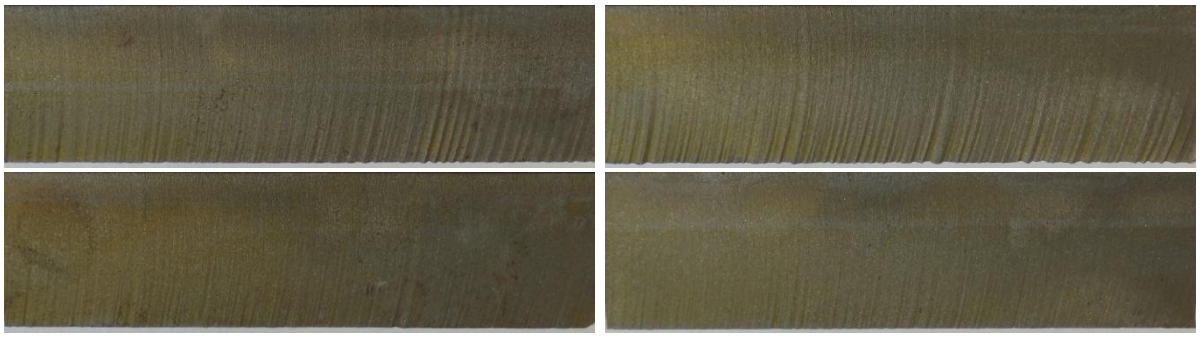
Na následujících snímcích jsou šikmé plochy jednotlivých tloušťek a materiálů. Při řezání šikmých ploch nelze využít korekce, proto jsou pod sebou umístěny vždy dva vzorky stejného materiálu a tloušťky, řezaných při stejných parametrech. Na obrázcích jsou zachyceny celé délky šikmých ploch.

19 573 – vzorek 1	12 050 – vzorek 1
19 573 – vzorek 2	12 050 – vzorek 2

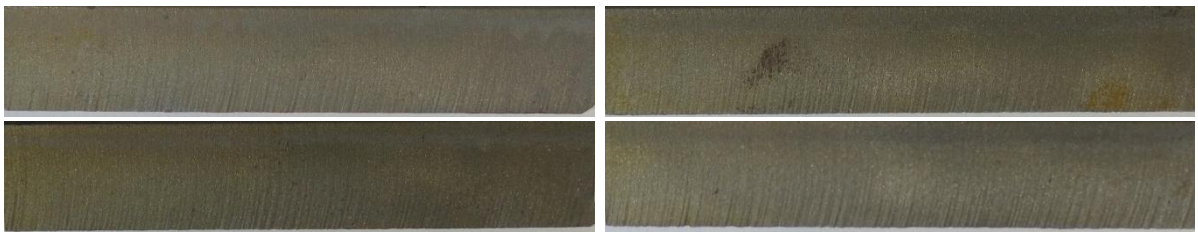
Tabulka 9: Umístění snímků



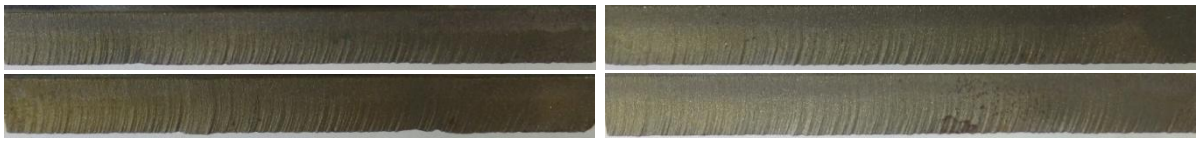
Obrázek 34: tloušťka vzorku: 20[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050



Obrázek 35: tloušťka vzorku: 15[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050



Obrázek 36: tloušťka vzorku: 10[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050



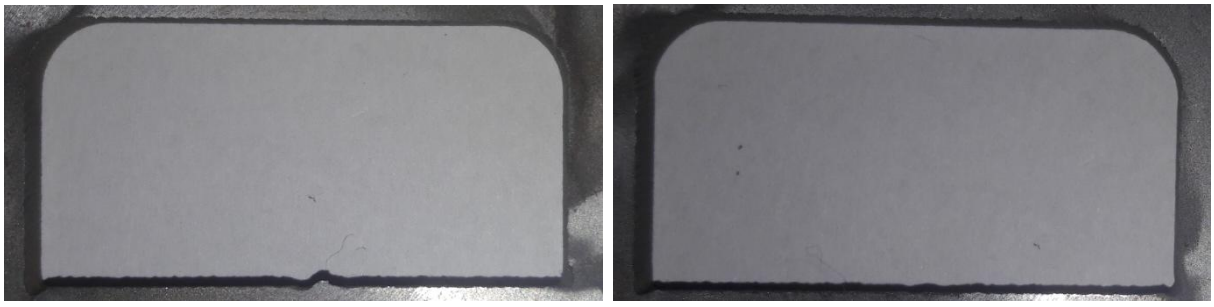
Obrázek 37: tloušťka vzorku: 5[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050

U všech šikmých řezů do vzorků tloušťky 20[mm] vznikl řez Q3. U prvních řezaných vzorků od každého typu materiálu tloušťky 15[mm] vznikly řezy Q2. U dalších dvou vzorků stejné tloušťky vznikly řezy Q4. U všech šikmých řezů do vzorků tloušťky 10[mm] vznikl řez Q4. Nekvalitní povrchy šikmých ploch vznikly u vzorků tloušťky 5[mm] – Q1-Q2. Nejvíc je to zřejmé v druhého vzorku 19 573, kde jsou na podkladu vidět ''vlnky'' místo rovné hrany.

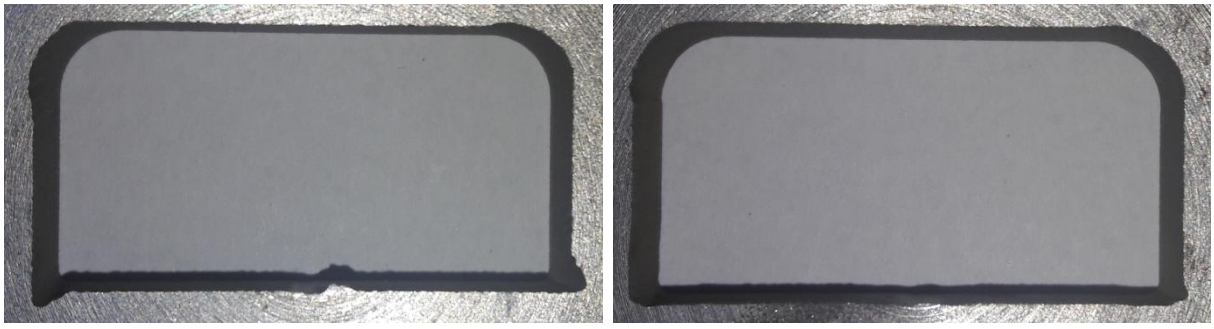
2.8 Vizuální kontrola kvality – vnitřní kontura

V této kapitole jsou obrázky vnitřní kontury a porovnání vlivu korekcí na kvalitu ve spodní části vzorku. Vrchní část vzorků není třeba porovnávat, jelikož tam je kvalita vysoké úrovni. Nalevo jsou vzorky, které byly nařezány s vypnutými korekcemi a napravo s korekcemi zapnutými. Tato vnitřní kontura má dva rádiusy, tak dva pravé úhly. V pravém úhlu je v ideálním případě nejmenší rádius – půlka průměru tloušťky vodního paprsku.

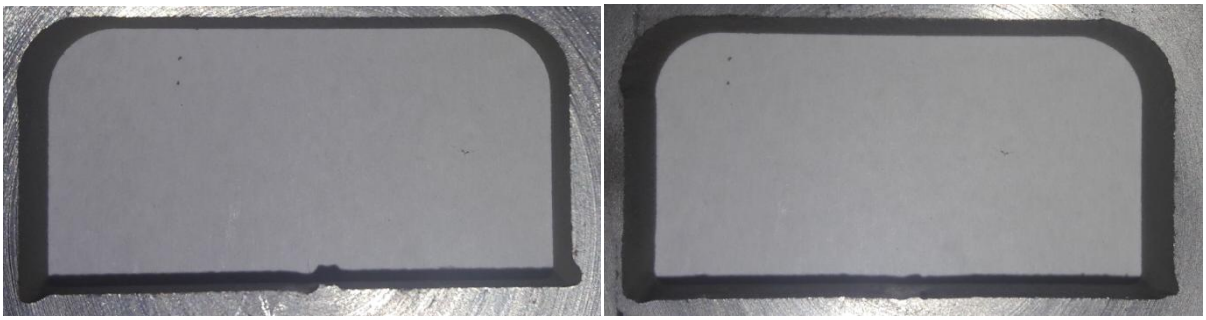
Obrázek 38: Materiál 12 050, tloušťka 5[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



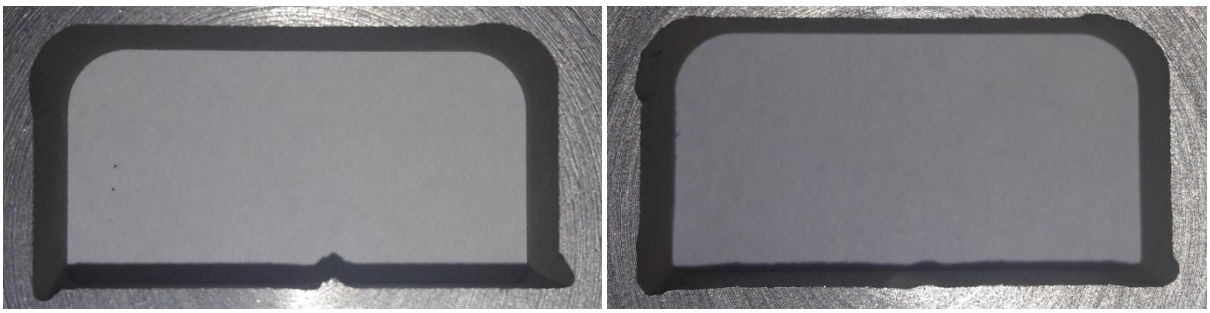
Obrázek 39: Materiál 19 573, tloušťka 5[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



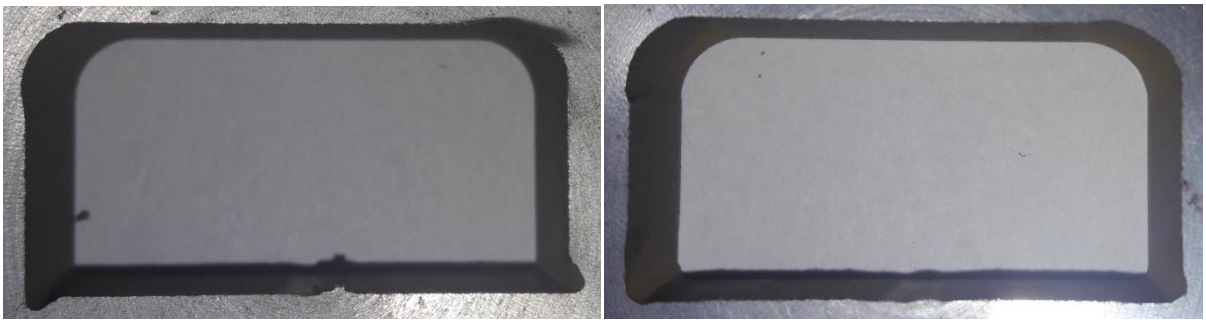
Obrázek 40: Materiál 12 050, tloušťka 10[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



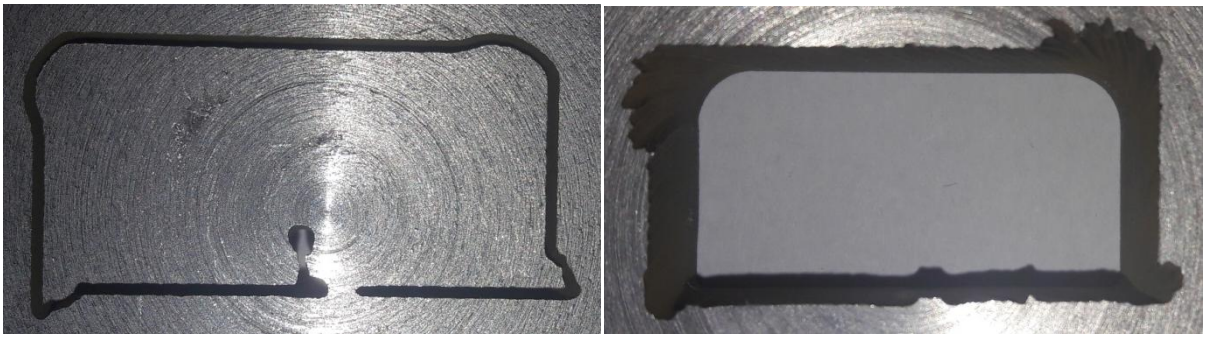
Obrázek 41: Materiál 19 573, tloušťka 10[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



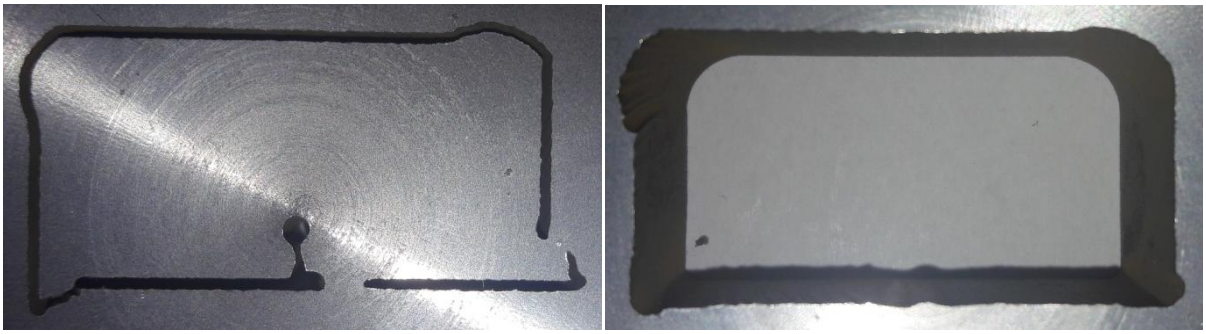
Obrázek 42: Materiál 12 050, tloušťka 15[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



Obrázek 43: Materiál 19 573, tloušťka 15[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



Obrázek 44: Materiál 12 050, tloušťka 20[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté



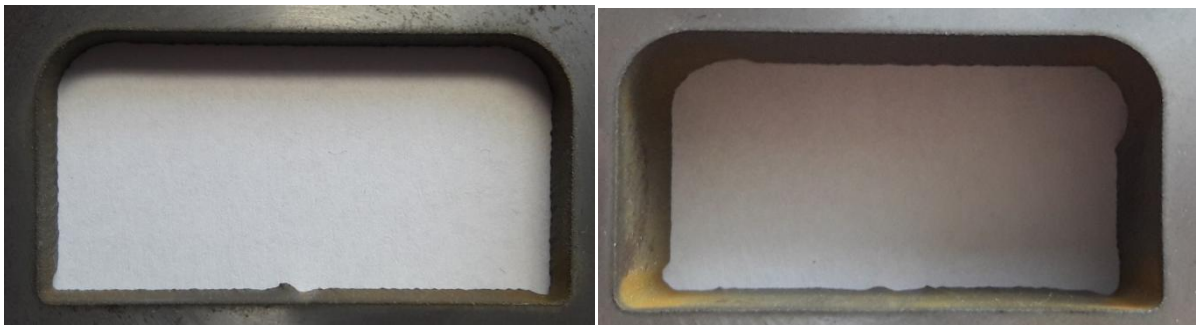
Obrázek 45: Materiál 19 573, tloušťka 20[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté

Ze snímků jasně vyplývá, že čím silnější materiál, tím méně kvalitní řez ve spodní části vnitřní kontury. Fakt, který se může konstatovat je, že se zapnutými korekcemi dosáhneme lepšího výsledku při doříznutí vnitřní kontury (spodní část kontury na obrázcích). Jak je patrné z obrázků vlevo, zůstává ve spodním řezu vždy nedořízntutý materiál a vytváří hrbol. Tento hrbol se na vzorcích se zapnutými korekcemi nevyskytuje. Je to dané zpožděním paprsku v dolní části při řezání. Paprsek dojede na konec kontury a vypne se program a tím i řezný paprsek. V horní části vzorku je řez dobrý, ale v dolní části, jak bylo napsáno, je paprsek zpožděný a tím se vytvoří tato nedokonalost. Extrémní situace nastala u vzorku tloušťky 20[mm] řezaného s vypnutými korekcemi. Tam zpoždění paprsku bylo tak velké, že se přebytečný materiál neoddělil od vzorku.

Pravé úhly, které byly vyřezány se zapnutými korekcemi, vypadají lépe, něž s korekcemi vypnutými, i když výsledný tvar není rádius průměru paprsku, ale křivka. Je to jakási prohlubeň pod ideální hranou kontury. Paprsek přijede na konec daného tvaru a zastaví se. Pak se dle programu rozjíždí řezat stěnu kolmou na již vyřezanou stěnu. Paprsek se rozjíždí a na horní části vzorku dělí materiál. V dolní části se paprsek zpomaluje, tím zasahuje do materiálu, který by měl ideálně zůstat v konečném výrobku. To je důvod vzniklých prohlubní. Čím silnější materiál, tím hlubší prohlubeň. To je zapříčiněno pomalejším pohybem paprsku a tím pádem jeho delším působením v jednom místě.

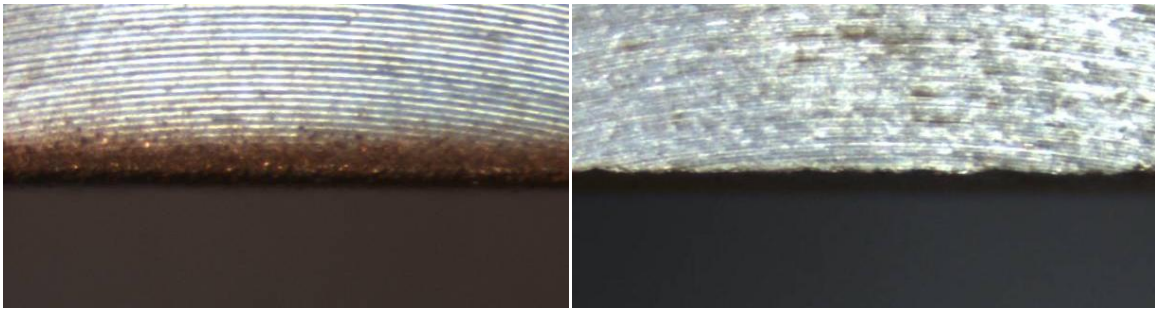
Kvalita rádiusů R5 je lepší při řezání s vypnutými korekcemi. Od vzorku s tloušťkou 10[mm] je vidět v rádiusech z nájezdové strany paprsku mírná prohlubeň- rádius není tečný s přímkou řezu. Je to způsobeno tím samým důvodem popsaným výše. Prohlubně nejsou tak velké, jelikož paprsek se pohybuje po křivce a již zpomalený nepůsobí tak dlouho do jednoho místa. U vzorků s vypnutými korekcemi je dosaženo kvalitnějších rádiusů. Dobře je to vidět u vzorků tloušťky 10[mm] a 15[mm]. Se zapnutými korekcemi jsou před rádiusem skokové prohlubně. Kdežto u vypnutých korekcí je přechod mezi rádiusem a rovnou plochou kontinuální, i když také s prohlubní.

U vzorků tloušťky 20[mm] je vidět, že v rádiusu R5 vznikly daleko vetší rýhy u oceli 12 050. To se u předchozích tloušťek vzorků (5,10 a15[mm]) neprojevilo.



Obrázek 46: Vnitřní kontura, řez na horní části, 19 573

Pro ukázku jsou přiloženy snímky vnitřních kontur. Vlevo vzorek tloušťky 5[mm], vpravo 20[mm]. Jak je vidět z horní strany řezu je oddělení materiálu velmi kvalitní.

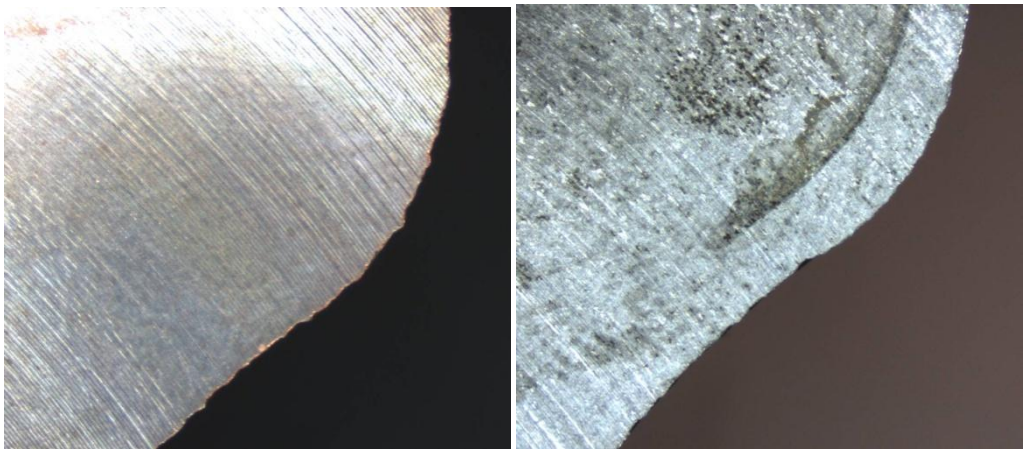


Obrázek 47: detail řezu, vlevo horní část, vpravo dolní část

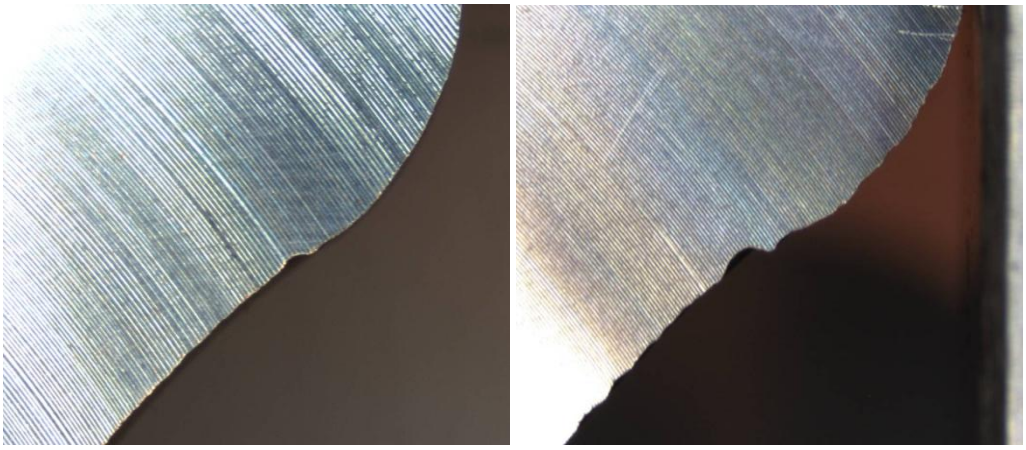
Na obrázku 47 je detail řezu. Vlevo je horní část řezu a vpravo dolní část řez. V horní části je hrana řezu s malým rádiusem a okolí řezu je zkorodované. To způsobují kapičky, které se oddělují od proudového jádra. Dole je řez bez koroze a s velmi ostrou hranou. Ta je však lehce vlnitá, díky zpomalenému paprsku. V horní části je hrana bez tohoto zvlnění. NA obrázku je vzorek tloušťky 15[mm], materiálu 19 573 a korekce vypnuté.

2.9 Vizuální kontrola kvality – detail změny směrů

Na obrázcích 48 a 49 pod tímto textem jsou detaily přechodu velkého rádiusu R30 do malého rádiusu R10. Jsou tam srovnány všechny čtyři tloušťky materiálu 19 573, řezaného se zapnutými korekcemi. Jak je vidět na vzorcích tloušťky 5[mm] a 10[mm] přechod mezi rádiusy je plynulý. U vzorku tloušťky 15[mm] je již vidět zřetelná prohlubeň způsobená zpomaleným parskem. U vzorku tloušťky 20[mm] je prohlubeň ještě více zřetelná.

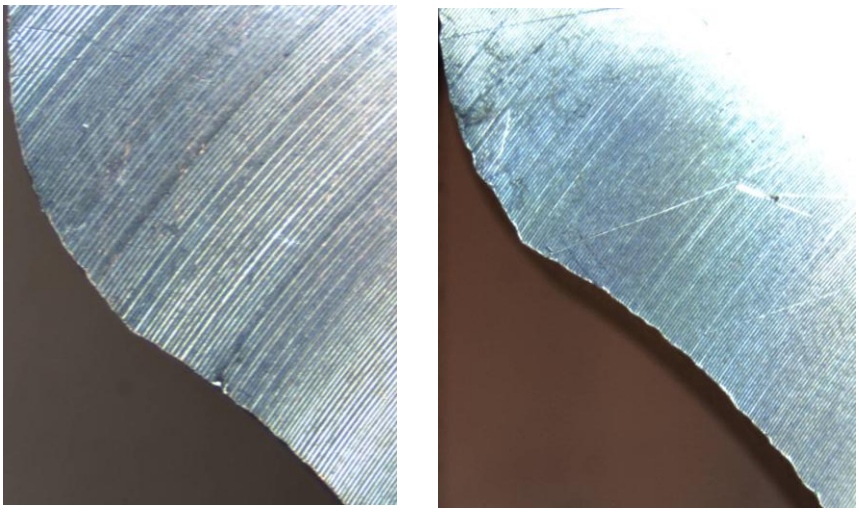


Obrázek 48: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 5[mm], vpravo vzorek 10[mm]

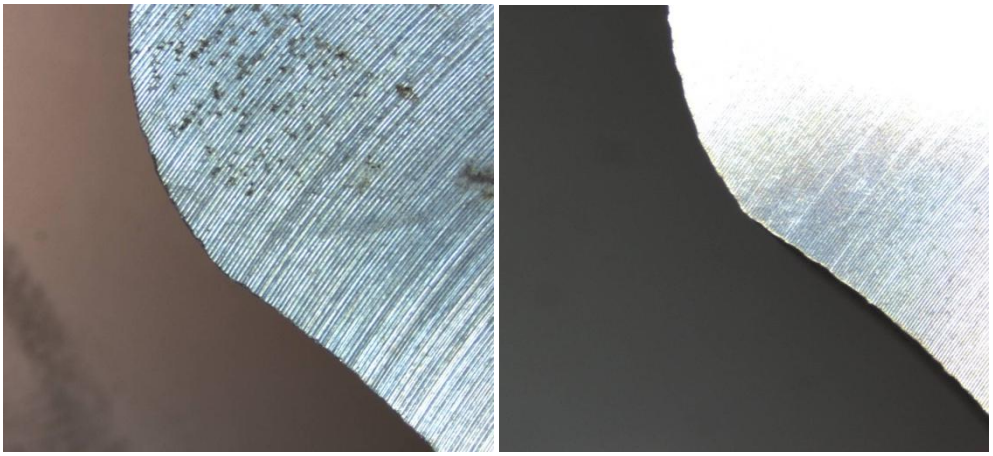


Obrázek 49: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm]

Na obrázku 50 a 51 jsou detaily přechodu z malého R10 na velký rádius R30 u materiálu 19 573 a tloušťkách 20[mm] a 15[mm]. Vzorky jsou řezané se zapnutými a vypnutými korekcemi. U vzorku 20[mm] je hrbol větší. Tento hrbol vzniká tím, že paprsek zpomaluje u přechodu dvou rádiusů. Když už najede na pohyb po navazujícím rádiusu, tak zase zrychluje. Zrychlí ale tak, že ve spodní části zpomalený paprsek nedokáže odříznout materiál v této spodní části. Tenčí vzorky už mají přechod plynulý.



Obrázek 50: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm]



Obrázek 51: detail přechodu, 19 573, korekce vypnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm]

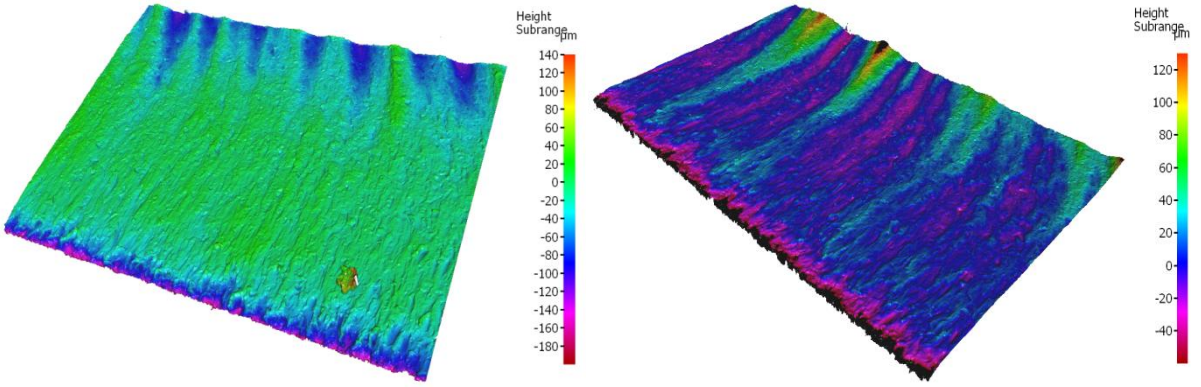
Při porovnání vzorků tloušťky 15[mm] a 20[mm], 19 573, řezaných s vypnutými a zapnutými korekcemi. Je třeba říct, že s vypnutými korekcemi nejsou přechody tak výrazné, jako u vzorků řezaných se zapnutými korekcemi. To je dobře vidět při porovnání obrázků 50 a 51.

2.10 Měření na přístroji Infinite Focus G4 (IFM)

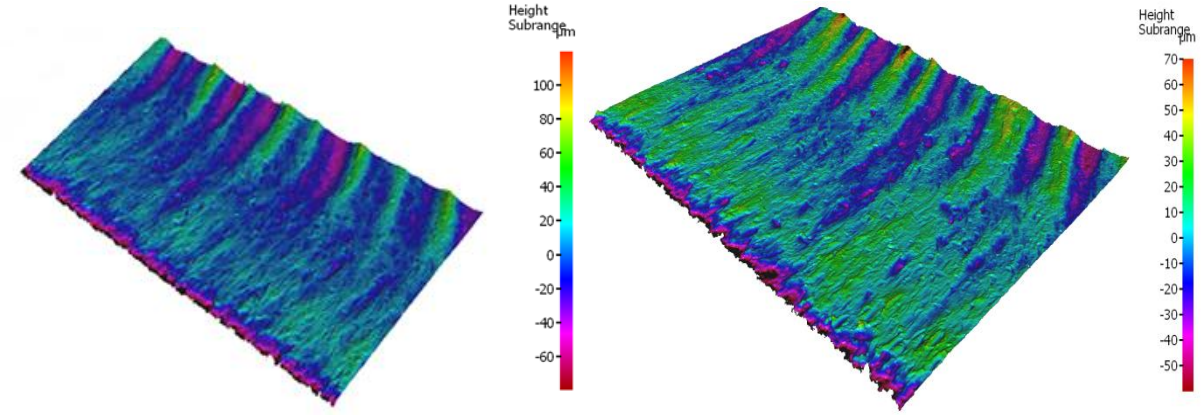
Přístroj IFM naskenoval povrchy jednotlivých vzorků. Skenovali se vždy na předem určené straně. V našem případě se jedná o stranu podélnou na pravé straně, když je vzhlíženo na vzorek shora, tedy stejnou stranu jako u hodnocení vizuálního. Na naskenované ploše se měřily lineární a plošné drsnosti. Dále se získala barevná spektra povrchů, na nichž jsou vidět odchylky od ideální roviny jednotlivých vzorků. Skenovaná délka povrchu byla 5[mm]. Je to z důvodu, že skenování povrchu je časově velmi náročné a 5[mm] je dostatečná délka na to, aby hodnoty vypovídaly o reálné drsnosti. Vzorky 5 a 10[mm] se skenovali po délce 5[mm] celé. Vzorky 15 a 20[mm] se skenovali v horní a dolní části plochy 2x5[mm]. To abychom získali plošnou drsnost v obou částech řezu. Jen pro představu plocha 5x5[mm] se skenovala 40 minut.

2.10.1 Povrch řezaných vzorků – barevné spektrum

V této kapitole jsou vidět na obrázcích velikosti odchylek od ideální roviny. Jsou zde jen vzorky 5 a 10[mm], jelikož 15 a 20[mm] byly skenovány jen části.

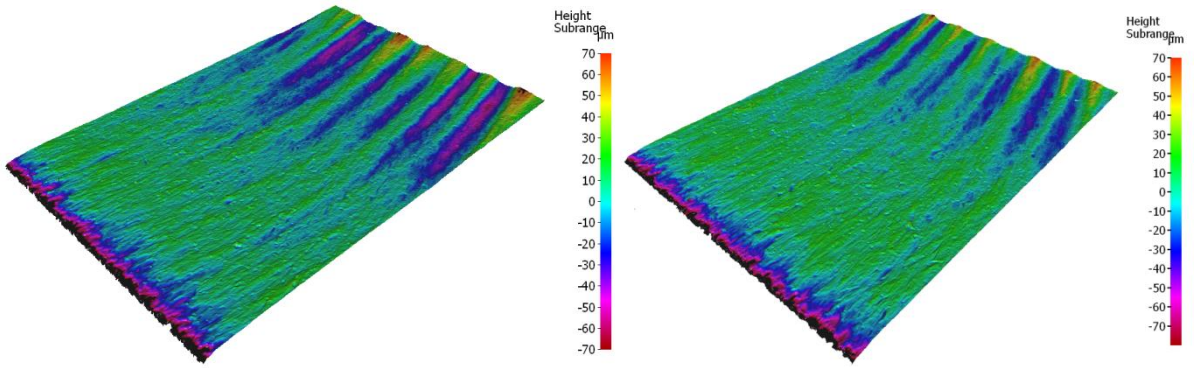


Obrázek 52: Barevné spektrum povrchu - 19 573 – 5[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo)

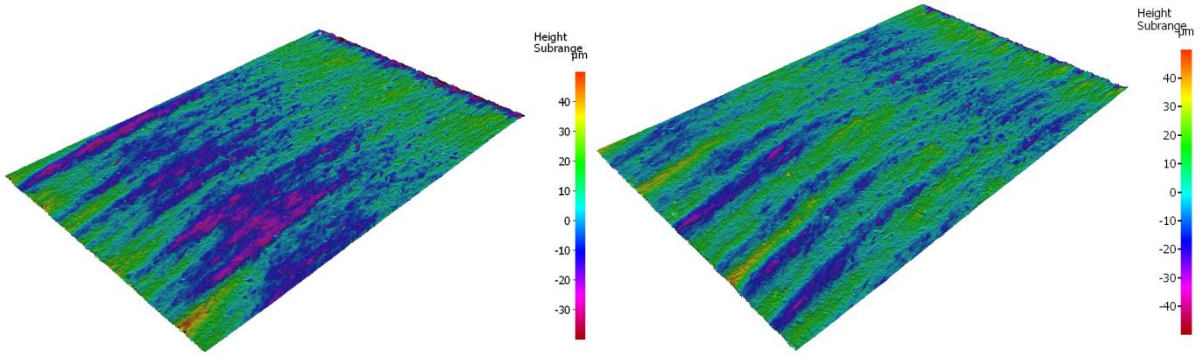


Obrázek 53: Barevné spektrum povrchu – 12 050 – 5[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo)

Na obrázku 53 jsou vidět v horní části větší odchylky od ideální roviny (až -140[μm]). Tato odchylka však nemá co dočinění s drsností povrchu, ale je to rádius, který byl vytvořen při vstupu paprsku do materiálu kapičkami, oddělených z hlavního proudového jádra. Tento rádius je přibližně až 0,25[mm] velký a je u každého vzorku, tam kde paprsek vstupuje do materiálu. Když se porovnají vzorky oceli 19 573, tak ve střední části se u obou vzorků vyskytují odchylky převážně v kladných hodnotách (okolo +20[μm]) a jen v malých bodových částech se dostávají do záporných hodnot (okolo -20[μm]). Když se ale podíváme na střední část vzorků materiálu 12 050, je vidět, že povrch není v jedné rovině, ale je daleko víc členitý než u materiálu 19 573. Při zaměření se na dolní část řezu můžeme vidět vlnky. Ty jsou způsobené vodním paprskem, který již nemá takovou sílu, aby byl řez kvalitnější. Tři vzorky vykazují podobné hodnoty odchylek -40[μm] až +130[μm]. Jenom u vzorku 19 573 se zapnutými korekcemi jsou vlnky spíše v záporných hodnotách -100[μm] a v kladných okolo +30[μm].



Obrázek 54: Barevné spektrum povrchu - 19 573 – 10[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo)



Obrázek 55: Barevné spektrum povrchu – 12 050 – 10[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo)

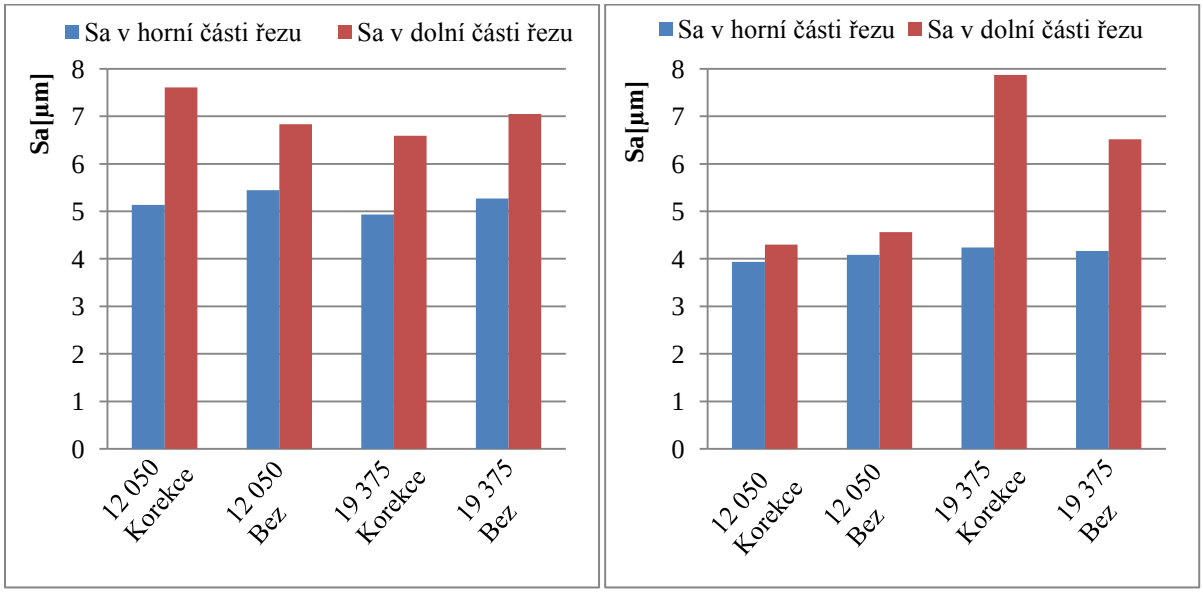
Stejně jako u 5[mm] vzorků je vidět, že ve střední části řezu jsou vzorky z materiálu 19 573 (rozptyl +20[μm]až -5[μm]) rovnější. Vzorky z materiálu 12 050 mají daleko vetší členitost, ale rozptyl mají podobný (-30[μm] až +10[μm] vzorek se zapnutými korekcemi a -20[μm] až +20[μm] s vypnutými korekcemi). Při pohledu na dolní část řezu je zřejmé, že největší odchylky od ideální roviny má vzorek 19 573 se zapnutými korekcemi (-50[μm] až +100[μm]). Vzorek 19 573 s korekcemi vypnutými má odchylky od ideální roviny -30[μm] až +70[μm]. Překvapením jsou vzorky oceli 12 050, jelikož mají velmi malé odchylky. To že se jedná o dolní oblast je velmi málo rozpoznatelné a odchylky od ideální roviny jsou, u těchto vzorků tloušťky 10[mm] - 12050, velmi malé.

2.10.2 Naměřené hodnoty drsností

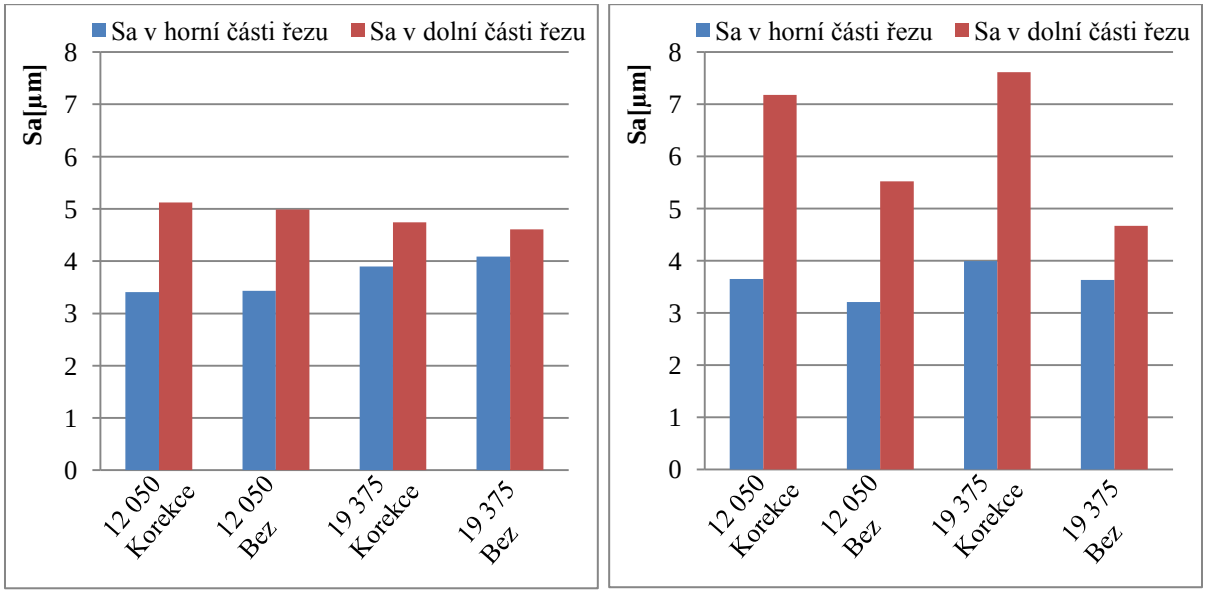
2.10.2.1 Plošná drsnost Sa

Materiál	5mm		10mm		15mm		20mm	
	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu
12 050 Korekce	5,13	7,61	3,94	4,30	3,41	5,12	3,65	7,18
12 050 Bez	5,44	6,84	4,09	4,56	3,43	4,99	3,21	5,52
19 573 Korekce	4,93	6,59	4,24	7,87	3,9	4,74	3,99	7,61
19 573 Bez	5,27	7,05	4,16	6,52	4,09	4,61	3,63	4,67

Tabulka 10: Hodnoty plošné drsnosti Sa[µm]



Graf 11: Plošné drsnosti Sa - vzorky 5[mm] (vlevo) a 10[mm] (vpravo)



Graf 12: Plošné drsnosti Sa - vzorky 15[mm] (vlevo) a 20[mm] (vpravo)

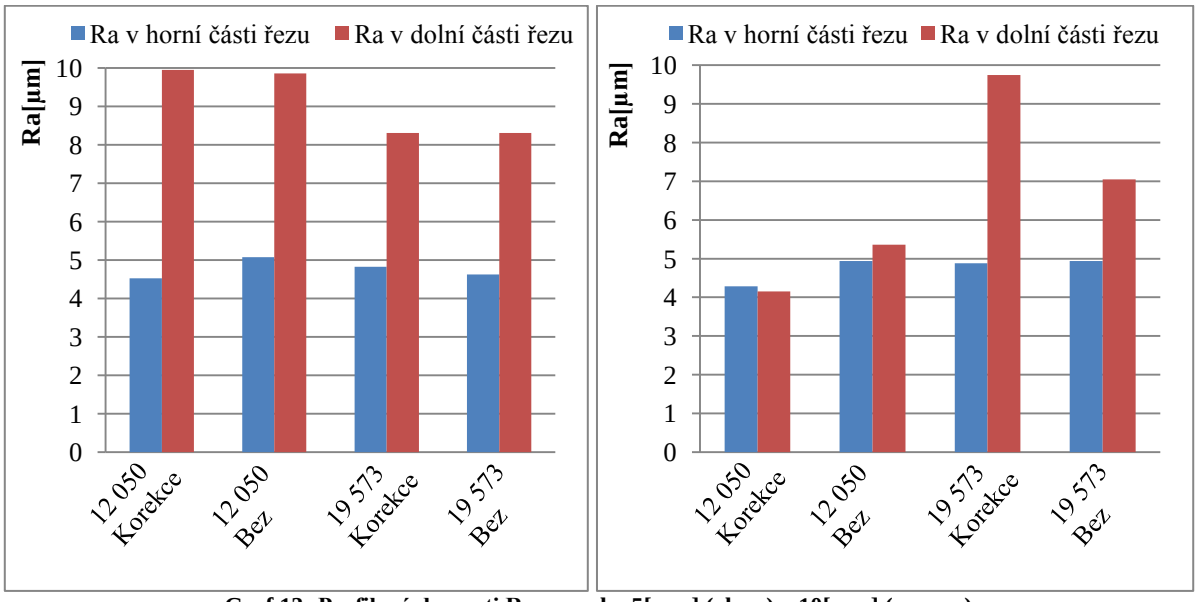
Hodnoty plošné drsnosti byly získány ze skenů povrchů na přístroji IMF. U každého vzorku jsou dvě hodnoty drsnosti. To je dáno tím, že se drsnost měřila na dvou místech a ne na celém naskenovaném povrchu. Tento postup byl zvolen, protože jsou drsnosti v horní části a dolní části řezu značně odlišné. Každá hodnota je tedy naměřena na ploše 2x5[mm](šířka x délka).

Při pohledu na graf a hodnoty u vzorků tloušťky 5[mm], lze obecně říci, že druh oceli ani korekce neměli na velikosti drsností téměř žádný vliv. U vzorků tloušťky 5[mm] jsou nejvyšší hodnoty v horní části řezu. V dolní části řezu jsou taky vysoké, a to u všech vzorků. Při pohledu na graf a hodnoty u vzorků tloušťky 10[mm], je vidět, že u etalonu obrobitelnosti – 12 050 - se dosáhlo daleko lepších hodnot Sa v dolní části řezané plochy. Kdežto rozdíly drsností u ocele 19 573 jsou 3,63 a 2,36[μm]. U vzorků tloušťky 15[mm] byly změřeny nejnižší hodnoty v obou dvou částech. U vzorků 20[mm] byly změřeny vysoké hodnoty Sa v dolní části u vzorků řezaných bez korekce. V horní části řezu jsou hodnoty drsností u těchto silnějších vzorků nepatrně menší než u vzorků 5[mm] a 10[mm].

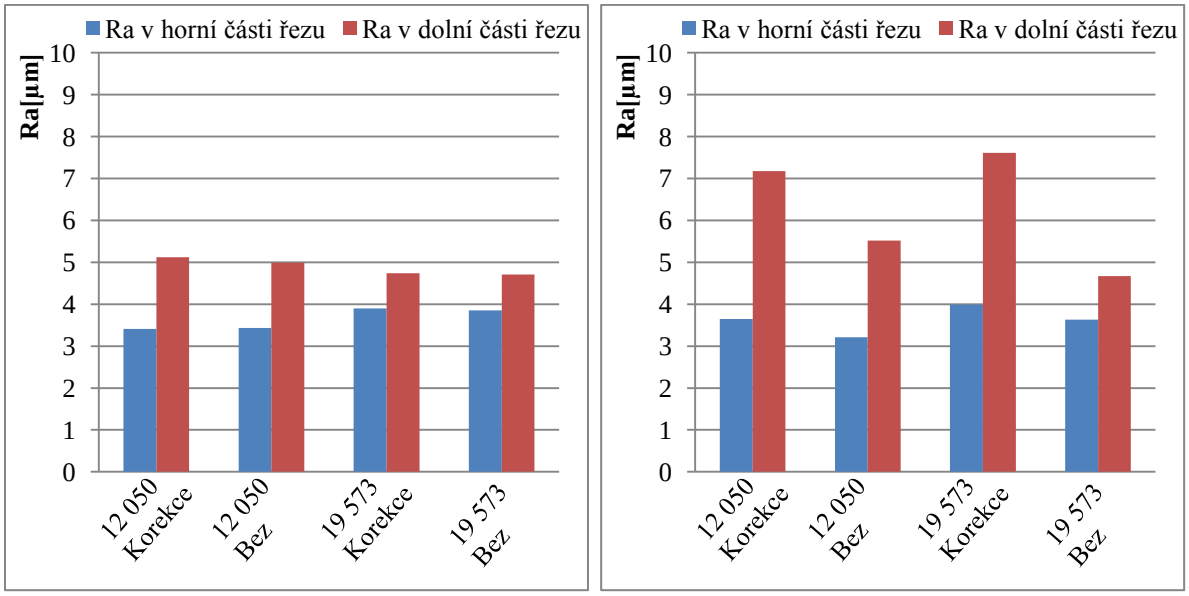
2.10.2.2 Profilová drsnost Ra

	5[mm]		10[mm]		15[mm]		20[mm]	
	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu	Horní část řezu	Dolní část řezu
12 050 Korekce	4,52	9,95	4,29	4,15	3,58	6,07	3,86	8,51
12 050 Bez	5,08	9,86	4,94	5,36	3,61	5,42	3,68	6,35
19 573 Korekce	4,82	8,31	4,88	9,74	4,40	5,63	4,26	9,16
19 573 Bez	4,62	8,31	4,94	7,93	4,47	6,19	3,65	5,62

Tabulka 11: Hodnoty profilové drsnosti Ra[μm]



Graf 13: Profilové drsnosti Ra - vzorky 5[mm] (vlevo) a 10[mm] (vpravo)



Graf 14: Profilové drsnosti Ra - vzorky 15[mm] (vlevo) a 20[mm] (vpravo)

Hodnoty profilové drsnosti Ra vykazují podobné závěry jako hodnoty plošné drsnosti Sa. Rozdíl je v tom, že některé hodnoty profilové drsnosti, zvláště v horních částech řezu má větší hodnoty než Sa.

3 Experiment 2

Tento experiment byl proveden, stejně tak jako první, na řezacím stroji PVT Cobra v hale RTI a byl proveden za účelem zjištění vlivu velikosti abraziva na kvalitu řezu. Pro různé velikosti abraziva se používá také jiná velikost průměru trysky, takže kvalita řezu se projeví i díky změně trysky. Konkrétně pro MESH80 a MESH120 byla použita tryska o Ø 0,5[mm] a pro MESH200 tryska o Ø 0,889[mm]. Abrazivo o velikosti MESH80 a MESH120 nejde použít v trysce o Ø 0,5[mm], jelikož by jí ucpávalo. Dávkování abraziva q se při experimentu také měnilo. To bylo provedeno za účelem zjištění, zda dávkování q, které je používáno jako ideální, dosáhne nejlepšího výsledku kvality řezu. Dávkování bylo voleno ze zkušeností, ale ty nebyly podpořeny konkrétními hodnotami. Konkrétně se každá používaná hodnota dávky q zvětšila a zmenšila o 20%. Řezalo se do dvou materiálů – nerez a hliník o tloušťce 1,5[mm]. Tyto materiály a tloušťka byly zvoleny z důvodu jejich častého řezání na stroji. Řezali se obdélníky o velikosti 50x10[mm]. Každý vzorek byl vyříznut dvakrát, kvůli opakovatelnosti experimentu. Zde jsou v bodech vypsané parametry experimentu:

- Tlak paprsku: 413[MPa]
- Průměr abrazivní trysky: Ø0,889[mm]- pro MESH80 a MESH120
  Ø0,5[mm]- pro MESH200
- Průměr vodní trysky: Ø0,33[mm]- před abrazivní tryskou Ø0,889[mm]
  Ø0,1[mm]- před abrazivní tryskou Ø0,5[mm]
- Materiál: nerez, hliník
- Tloušťka: 1,5[mm]
- Abrazivo: MESH80, MESH120, MESH200 (australského původu)
- Dávkování abraziva q: 24, **30**, 36 [g/min] (hliník, tryska Ø 0,5[mm])
  160, 200, 240 [g/min] (hliník, tryska Ø 0,889[mm])
  32, **40**, 48 [g/min] (nerez, tryska Ø 0,5[mm])
  160, 200, 240 [g/min] (nerez, tryska Ø 0,889[mm])

  Tučně je označena dávka, která se obvykle používá pro řezání daného materiálu. Tryska o Ø 0,889[mm] a abrazivo MESH80 a MESH120 se obvykle pro řezání těchto plechů nevyužívá.
- Korekce: Vypnuty
- Požadovaná kvalita: Q5

Experiment je vyhodnocen na základě těchto výsledků:

- drsnost povrchu
- otřepy na řezané ploše
- rozměrová přesnost
- vizuální kontrola není předmětem hodnocení, jelikož ve spodní části vzorků nejsou patrné žádné rýhy zpožděného paprsku
- součástí hodnocení není vizuální kontrola povrchu, jelikož na povrchu nejsou rozeznatelné vlnky po zpomaleném paprsku

3.1.1 Drsnost povrchu

V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé hodnoty plošné drsnosti Sa u vzorků, řezaných s různými parametry řezného procesu. Drsnost se měřila na stroji Alicona Infinite Focus. U každého vzorku se skenoval 5[mm] dlouhý úsek uprostřed v celé šířce. To proto, že uprostřed vzorku byl paprsek již v plné rychlosti po rozjezdu a před zastavením ke konci řezné dráhy. Vždy se měřila drsnost těsně pod horní hranou a těsně nad spodní hranou. To aby byl vidět rozdíl drsností v horní a dolní části řezané plochy. Oproti prvnímu experimentu jsou uvedeny jen plošné drsnosti Sa, protože mají vyšší vypovídající hodnotu.

NEREZ							
MESH80	**Dávka q**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	5,42	5,63	4,44	4,39	6,13	6,15
	Dolní h. Sa[μm]	6,34	6,41	4,64	4,72	6,99	6,76
MESH120	**Dávka q**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	5,31	5,3	5,69	5,53	4,69	5,14
	Dolní h. Sa[μm]	5,34	5,44	6,66	6,59	4,8	5,93
MESH200	**Dávka q**	**32[g/min] 1. vzorek**	**32[g/min] 2. vzorek**	**40[g/min] 1. vzorek**	**40[g/min] 2. vzorek**	**48[g/min] 1. vzorek**	**48[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	2,83	2,42	2,54	2,63	2,66	2,54
	Dolní h. Sa[μm]	2,87	2,65	2,62	2,68	2,67	2,65

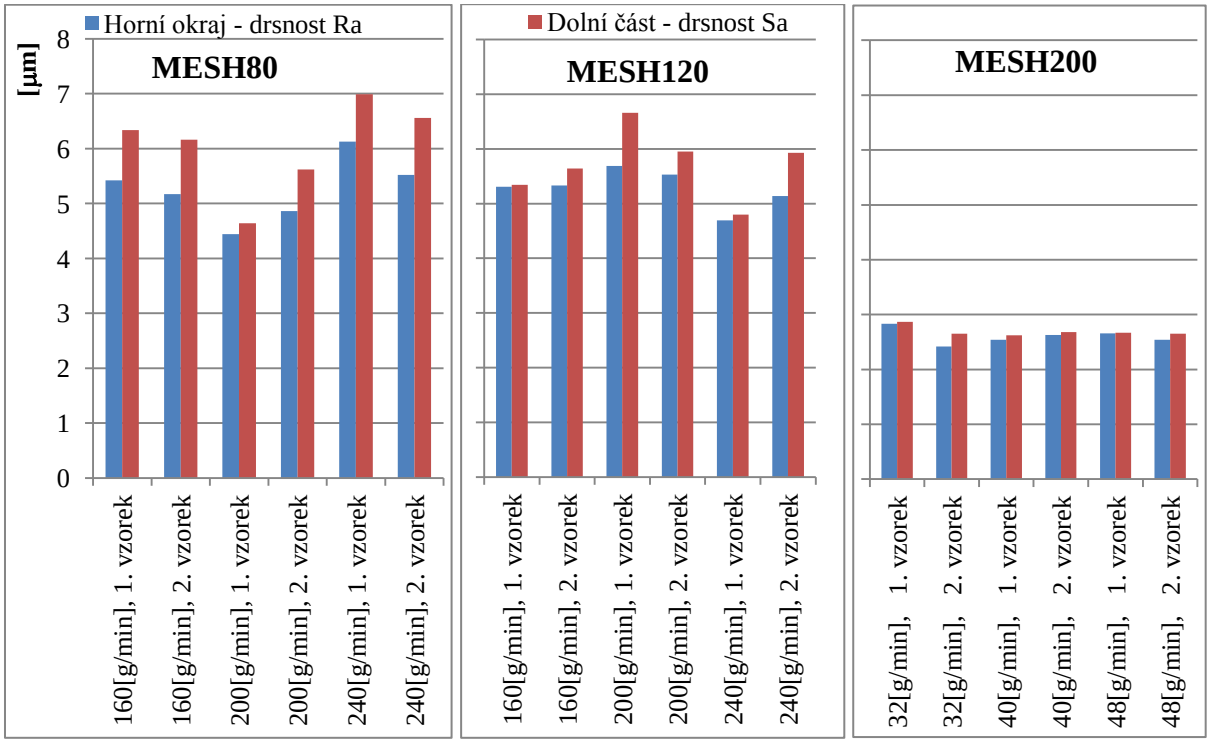
Tabulka 12: Hodnoty drsností Sa[μm], nerez

HLINÍK							
MESH80	**Dávka q**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	11,31	10,93	11,33	11,01	10,8	10,59
	Dolní h. Sa[μm]	14,09	14,55	12,67	13,03	12,99	13,37
MESH120	**Dávka q**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	9,03	8,68	8,07	8,2	7,76	7,43
	Dolní h. Sa[μm]	10,58	10,71	12,24	12,33	11,62	11,25
MESH200	**Dávka q**	**24[g/min] 1. vzorek**	**24[g/min] 2. vzorek**	**30[g/min] 1. vzorek**	**30[g/min] 2. vzorek**	**36[g/min] 1. vzorek**	**36[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. Sa[μm]	5,26	5,37	4,85	5,26	5,39	5,16
	Dolní h. Sa[μm]	5,12	4,82	4,95	5,98	5,03	5,26

Tabulka 13: Hodnoty drsností Sa[μm], hliník

Z grafů je na první pohled zřejmé, že na řezané ploše u nerezu jsou menší hodnoty drsností (jiná měřítka na osách y). Při pohledu na první graf, jsou hodnoty drsnosti u nerezu

při řezání abrazivem MESH80 a MESH120 velmi totožné a pohybují se často mezi 5 a 6 [μm] u několika vzorků i nad 6[μm]. Abrazivo MESH120 s menšími zrny než MESH80, tedy nemělo vliv na snížení drsnosti. Výrazného snížení drsnosti se dosáhlo řezáním s abrazivem MESH200 a menším průměrem trysky. Velikosti drsností Sa se pohybují okolo 2,6[μm]. To je dáno nejen abrazivem MESH200, ale vliv na této drsnosti má také průměr trysky. Dále podle naměřených hodnot drsností Sa nelze říct, že změna množství abraziva (dávka q) by se projevila na drsnosti povrchu a to u všech typů abraziva.



Graf 15: Drsnosti Sa[μm], nerez

Graf 16: Drsnosti Sa[µm], hliník

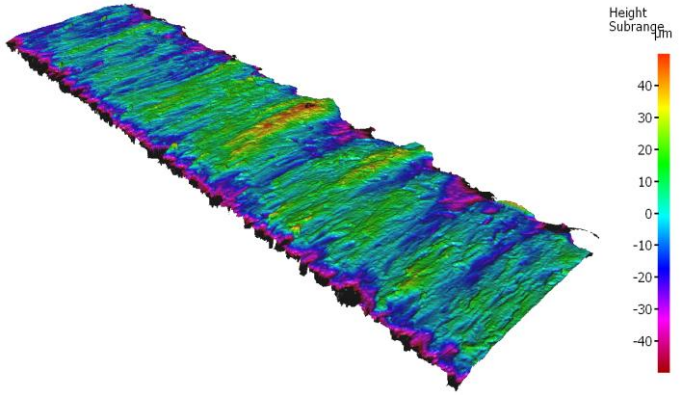
Drsnosti u hliníku jsou větší v porovnání s nerezí. Jsou vidět i zřetelnější rozdíly v drsnostech v horní a spodní části řezaných vzorků. Při řezání hliníku se projevil rozdíl při řezání abrazivy MESH80 a MESH120. U vzorků řezaných s MESH120 se dosáhlo menších hodnot drsností Sa, díky jemnější struktuře abraziva. Znovu nejnižší hodnoty drsnosti Sa bylo dosaženo s menší tryskou a abrazivem MESH200. Zvýšení a snížení dávkování abraziva q[g/min] nemělo žádný vliv na velikost drsností. Vliv zvýšení dávky abraziva je vidět u vzorků řezaných s MESH120, kde se u vyšších dávek q[g/min] zvětšil rozdíl mezi drsností v horní a dolní části. U dalších vzorků neměl vliv změny q[g/min] vliv.

3.1.2 Barevná spektra

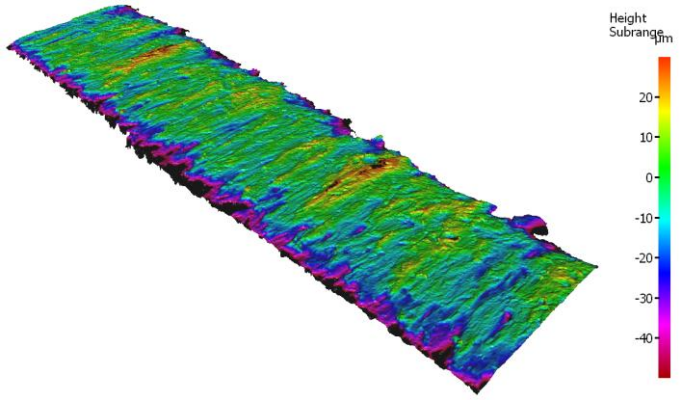
V této kapitole jsou umístěny snímky řezaných povrchů a díky barevnému vyhodnocení jsou vidět odchylky povrchu od ideální roviny. Prvních devět obrázků jsou vzorky nerezu a dalších devět snímků jsou vzorky hliníku. Jako příklady jsou umístěny vzorky s popiskem 1, které byly vyříznuté první. Na obrázku je první hrana ta, kde vstupoval paprsek do materiálu. Na této hraně je rádius, vzniklý díky nestálosti proudu paprsku. Naskenovaná délka je 5[mm].

Při kompletním pohledu na vzorky nerezy, je vidět, že nejmíň odchýlený povrch od ideální roviny mají vzorky řezané abrazivem MESH200. Povrchy jsou rovné, bez zjevných hrbolů. Odchylka se pohybuje v rozmezí +/-10[µm]. U vzorků vyřezaných s abrazivem MESH120 jsou vidět odchylky v rozmezí -20 až +15[µm], až na výjimky, kdy se objeví odchylka nad 30[µm](červeno-černá barva). Struktura povrchu však není již tak rovná jako u vzorků MESH200, ale více strukturovaná. Tím je myšleno, že se střídají větší plochy s různými odchylkami od ideální roviny. Odchylky u vzorků vyřezaných s MESH80 se pohybují v rozsahu podobném jako u MESH120 -20 až +15[µm], až na výjimky, kdy se

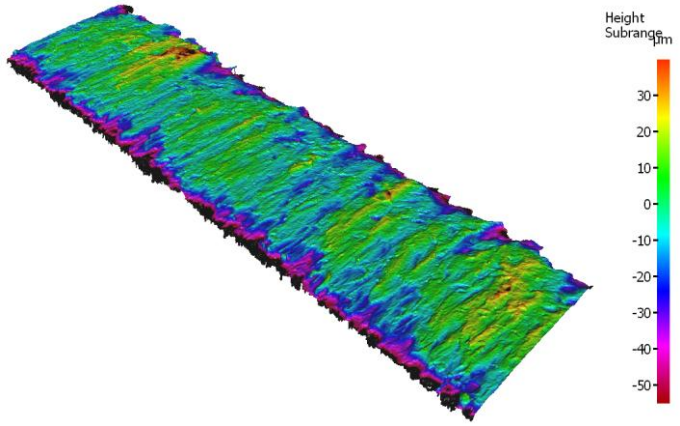
objeví odchylka nad 30[μm](červeno-černá barva). Struktura povrchu je však více členitá, než u vzorků řezaných MESH120. U členitosti se tedy projevuje rozdílná velikost zrn abraziva. Povrch je lepší při použití MESH120 než MESH80. Naopak změna dávkování se neodrazila ve změně struktury ani u jednoho se vzorků.



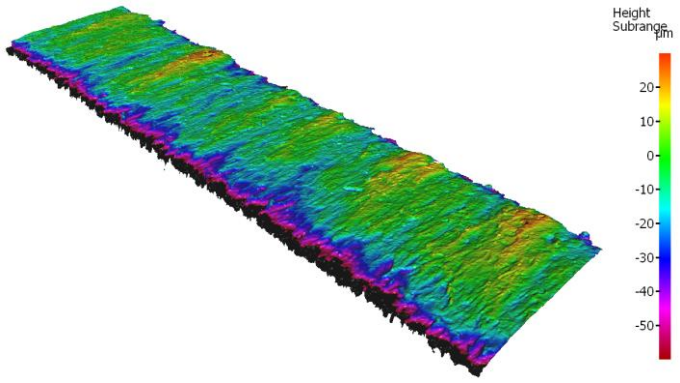
Obrázek 56: nerez, vzorek 1, MESH80, 240[g/min]



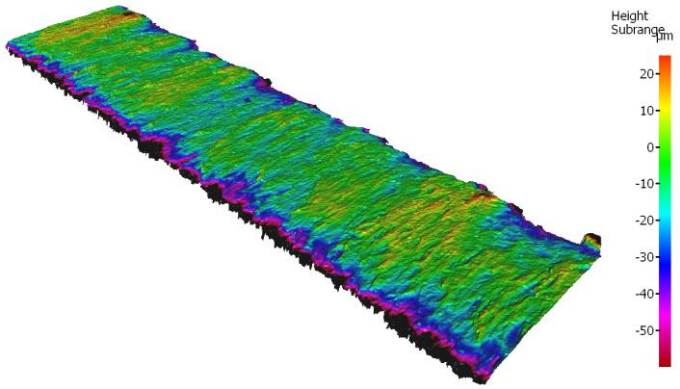
Obrázek 57: nerez, vzorek 1, MESH80, 200[g/min]



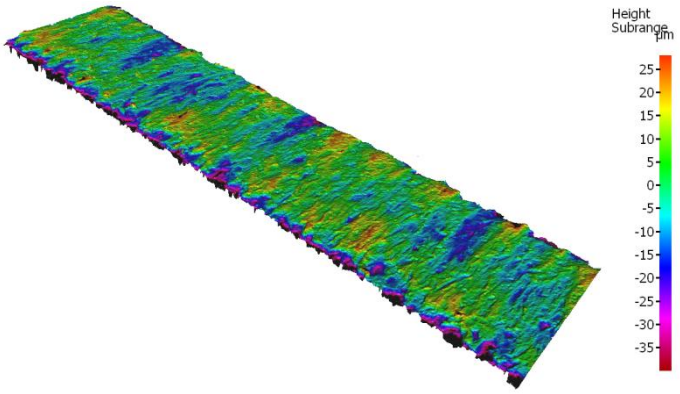
Obrázek 58: nerez, vzorek 1, MESH80, 160[g/min]



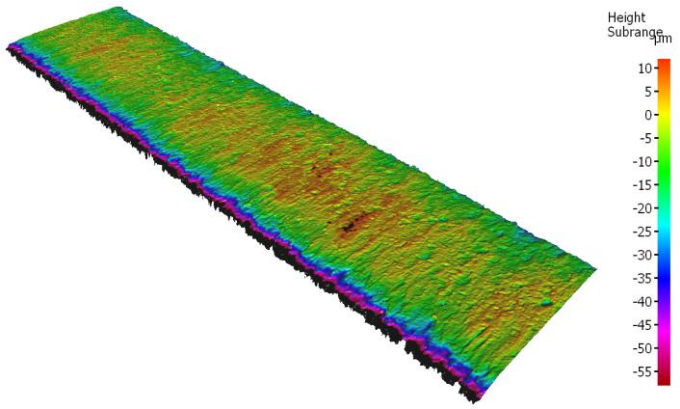
Obrázek 59: nerez, vzorek 1, MESH120, 240[g/min]



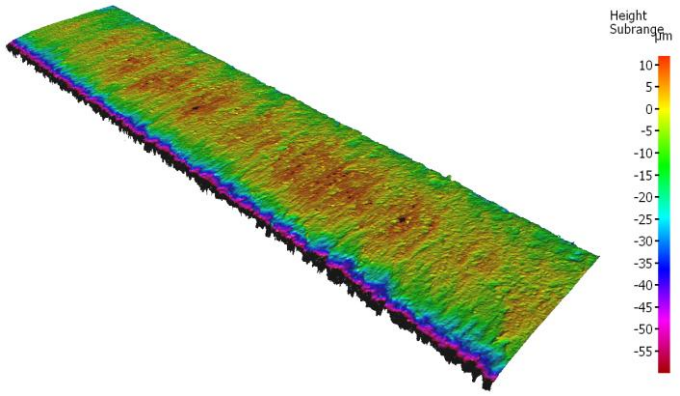
Obrázek 60: nerez, vzorek 1, MESH120, 200[g/min]



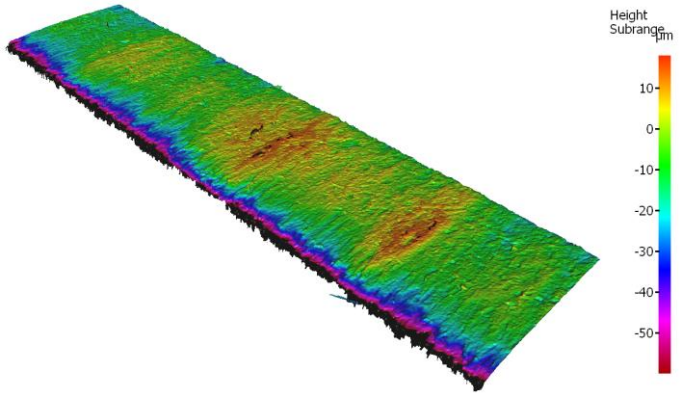
Obrázek 61: nerez, vzorek 1, MESH120, 160[g/min]



Obrázek 62: nerez, vzorek 1, MESH200, 48[g/min]

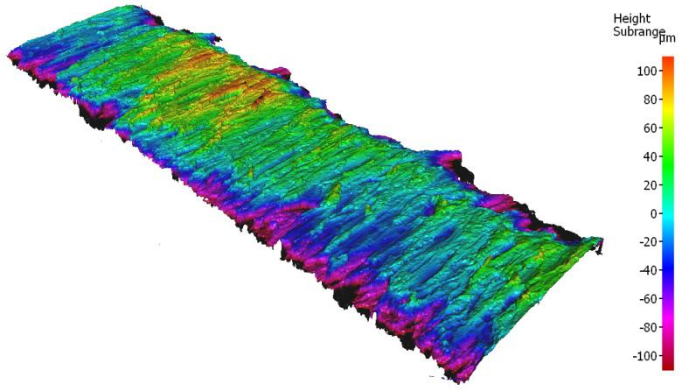


Obrázek 63: nerez, vzorek 1, MESH200, 40[g/min]

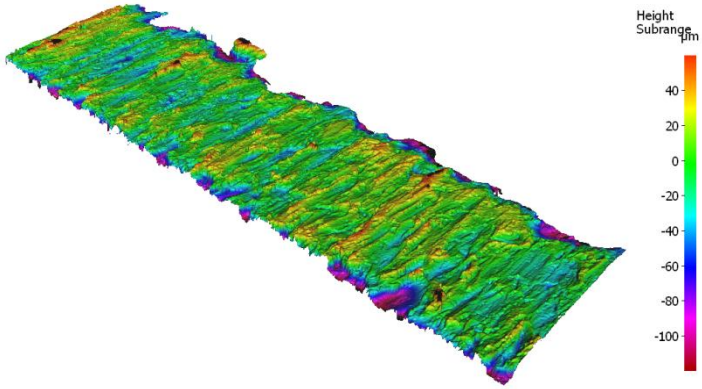


Obrázek 64: nerez, vzorek 1, MESH200, 32[g/min]

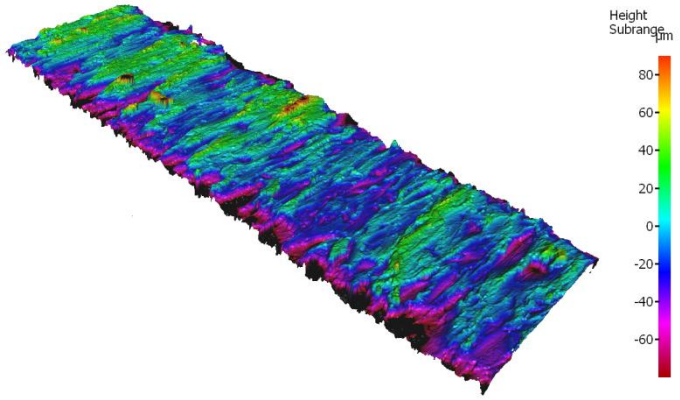
Na následujících obrázcích jsou vzorky hliníku a jejich barevná spektra. Nejlepší dosažený výsledek je stejně jako u nerezu, s MESH200 a trysce o ∅0,5[mm]. Odchylky od ideální roviny jsou -/+15[µm]. Při dávce q = 30[g/min] má na povrchu hodně vrcholů s černou barvou nad +20[µm]. Ty se ještě vyskytují také na vzorku s q = 24[g/min], ale v menší míře. Tyto vrcholy například u vzorku q = 36[g/min] nejsou vůbec. U vzorků řezaných s MESH120 a širší tryskou ∅0,899[mm] jsou odchylky -35[µm] až +15[µm]. U vzorků řezaných s MESH80, také širší tryska ∅0,899[mm], jsou odchylky -40[µm] až +80[µm], tedy o dost větší než vzorky řezané s MESH120.



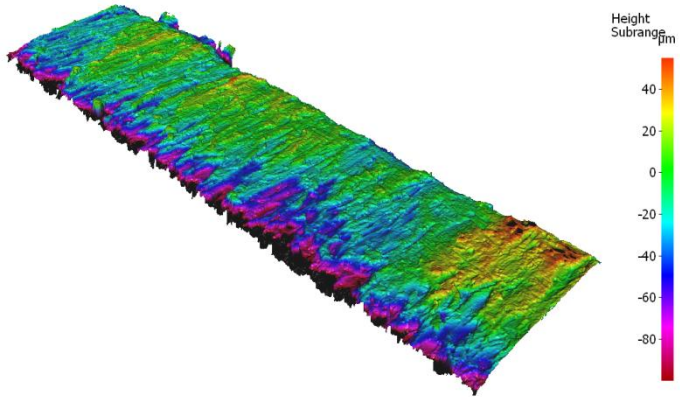
Obrázek 65: hliník, vzorek 1, MESH80, 240[g/min]



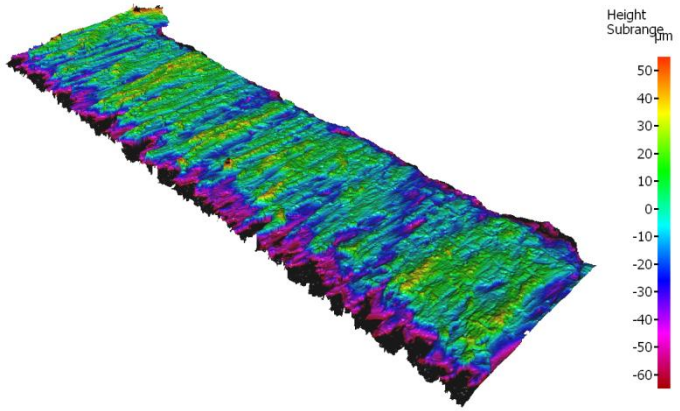
Obrázek 66: hliník, vzorek 1, MESH80, 200[g/min]



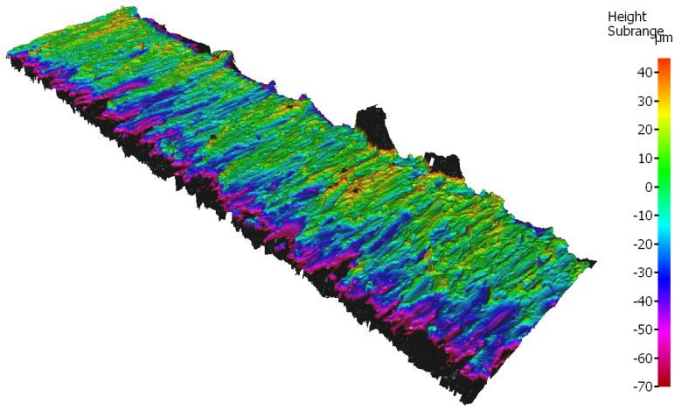
Obrázek 67: hliník, vzorek 1, MESH80, 160[g/min]



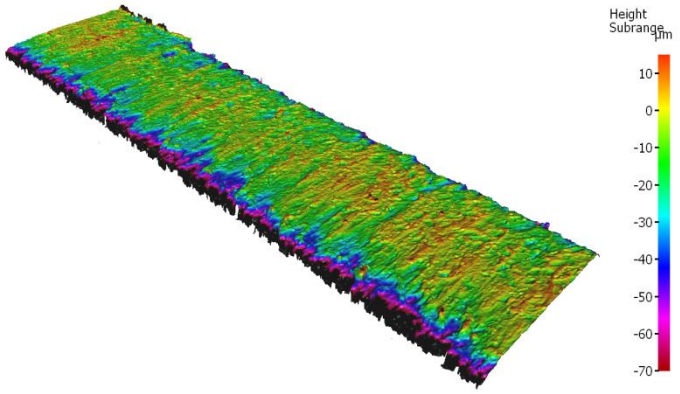
Obrázek 68: hliník, vzorek 1, MESH120, 240[g/min]



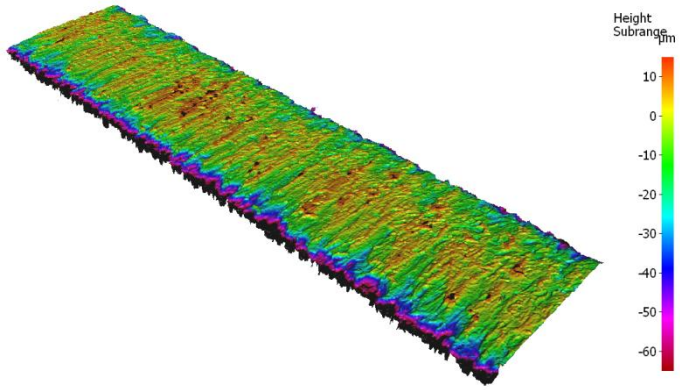
Obrázek 69: hliník, vzorek 1, MESH120, 200[g/min]



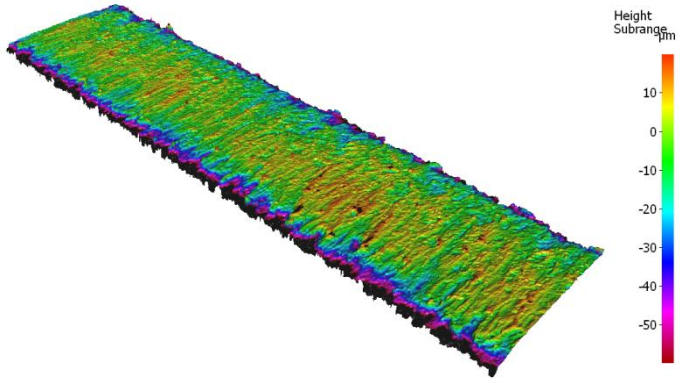
Obrázek 70: hliník, vzorek 1, MESH120, 160[g/min]



Obrázek 71: hliník, vzorek 1, MESH200, 36[g/min]



Obrázek 72: hliník, vzorek 1, MESH200, 30[g/min]



Obrázek 73: hliník, vzorek 1, MESH200, 24[g/min]

3.1.3 Snímky otřepů

Otřepy byly vyfoceny na mikroskopu MULTICHECK PC500 v dílnách KTO. Otřepy byly vyfoceny v několika zvětšeních. Vždy jsou snímky se zvětšením 20x, které zobrazují délku 17,5[mm]. Stejně jako u měření drsnosti jsou snímky z prostřední části. Dále jsou zhotoveny detailní snímky se zvětšením 120x(3[mm]) u hliníkových vzorků a 180x (2[mm]) u nerezových vzorků, aby byly vidět dobře detaily otřepů. Všechny obrázky se zvětšením 20x jsou popsány následovně: materiál, typ abraziva, velikost dávky q a napravo v horním rohu zda se jedná o vzorek první nebo druhý.

Při pohledu na otřepy, které vznikly při řezání hliníkového plechu, jsou nejmenší na vzorcích řezaných abrazivem MESH200 a tryskou s ∅ 0,5[mm]. Při porovnání vzorků nařezaných abrazivy MESH80 a MESH120 se dá říct, že otřepy vzniklé po řezání s MESH120 jsou menší a užší. Tím je myšleno to, že otřepy vytvořené s MESH80 jsou širší než otřepy vytvořené s MESH120. Velikost otřepů (délka) je vyobrazena v grafu č. 17, který také vypovídá o velikosti otřepů. Při porovnávání vzorků, které byly nařezány stejným typem abraziva, avšak jiným množstvím dávky q, je patrné že dávka abraziva q nemá vliv na velikost a tvar otřepu. To stejné platí pro délku otřepů.

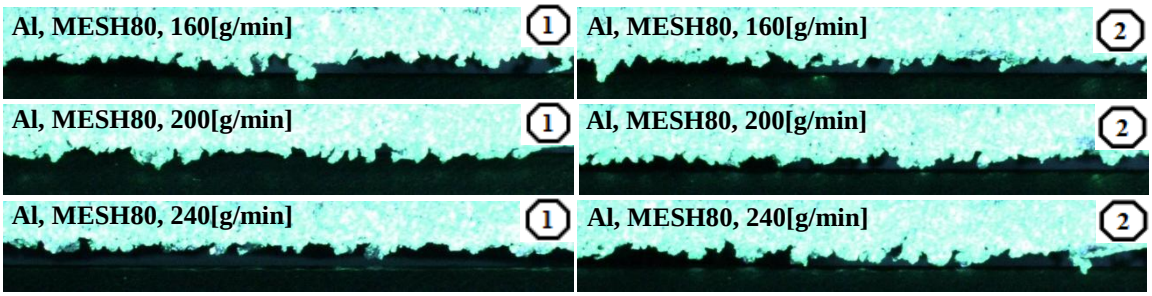
Při srovnání otřepů vzniklých na nerezovém plechu, nejmenší otřepy vznikly při řezání abrazivem MESH200 a tryskou s ∅ 0,5[mm]. Při srovnání MESH80 a MESH120 ze snímků, jsou nepatrně menší otřepy vzniklé po řezání s abrazivem MESH120. Znovu dávkování nemělo vliv na velikost otřepů.

Při focení otřepů na mikroskopu, byly otřepy měřeny, proto jsou věty v odstavcích výše podloženy i konkrétními hodnotami. Měření otřepů probíhalo na více místech po délce vzorků. Jelikož hodnoty délky otřepů byly velmi podobné (+/- 0,01) u jednotlivých materiálů a typů abraziv a byly nezávislé pro jednotlivé dávky q, v tabulce 14 jsou hodnoty délky otřepů jako aritmetický průměr všech měření při řezání daným abrazivem.

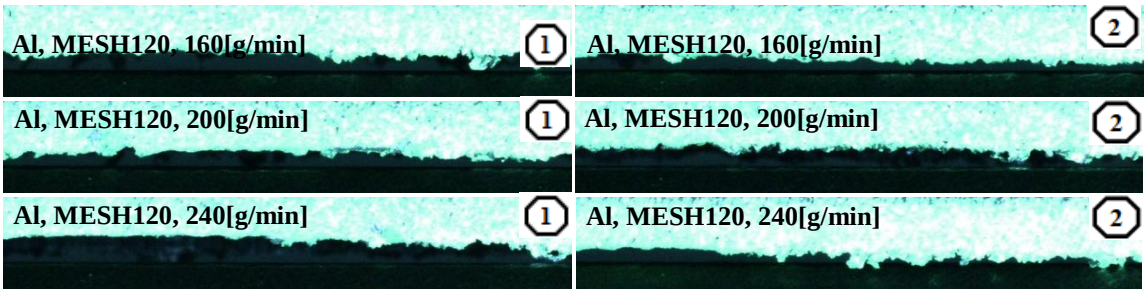
Abrazivo	HLINÍK	NEREZ
MESH80	0,505	0,135
MESH120	0,381	0,127
MESH200	0,069	0,035

Tabulka 14: Rozměry velikostí otřepů [mm]

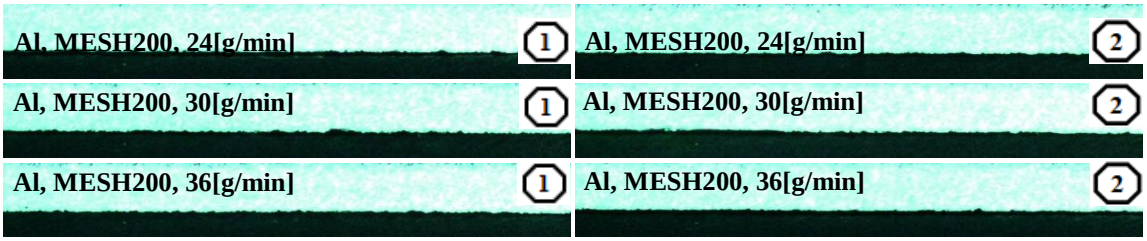
Jak je vidět z naměřených rozměrů otřepů, potvrzují závěry, které plynuly z hodnocení snímků otřepů. Čím větší MESH, tím menší otřepy. Zároveň je třeba připomenout i výrazný vliv menšího průměru trysky, při řezání s MESH200. Při porovnání MESH80 a MESH120 u nerezového plechu, nejsou hodnoty délek otřepů od sebe tolik odlišné. Při pohledu na snímky je však rozdíl ve velikosti markantnější.



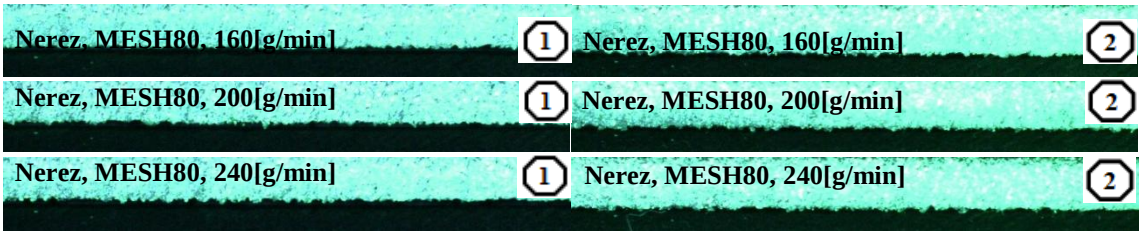
Obrázek 74: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH80



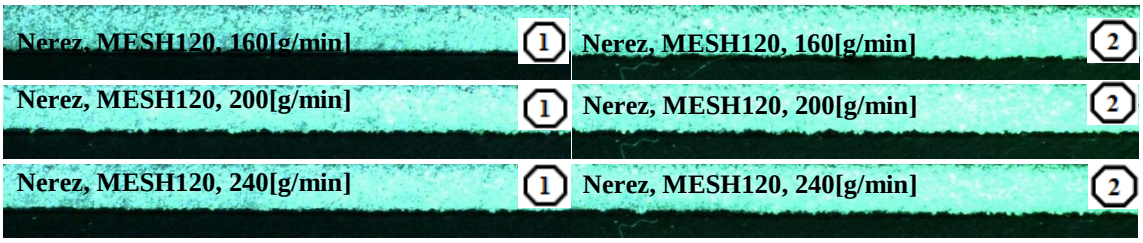
Obrázek 75: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH120



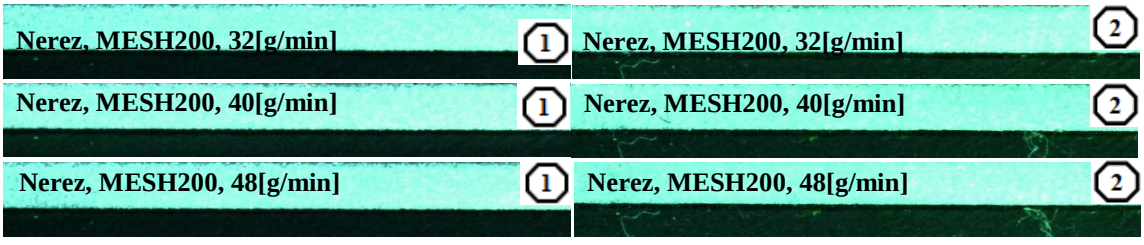
Obrázek 76: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH200



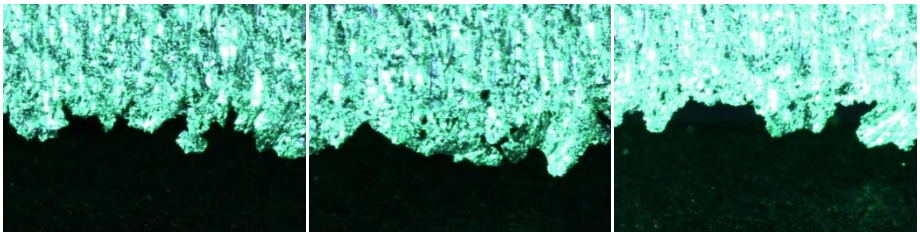
Obrázek 77: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH80



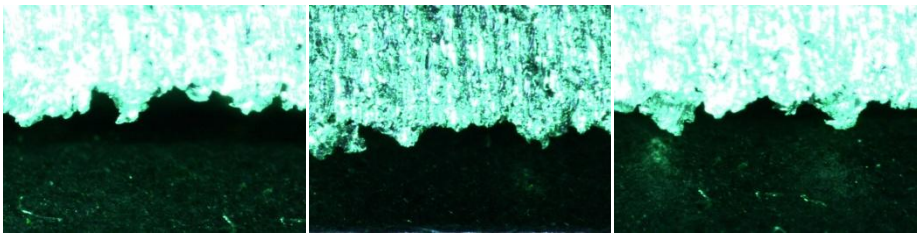
Obrázek 78: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH120



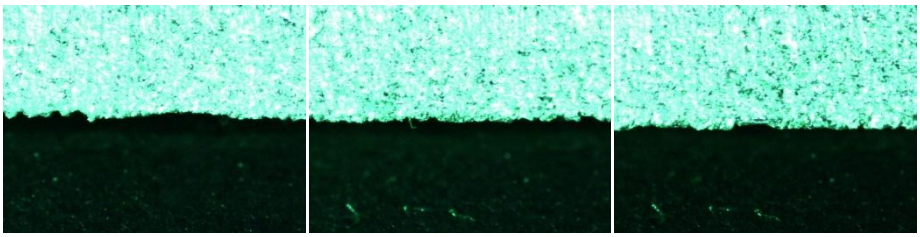
Obrázek 79: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH200



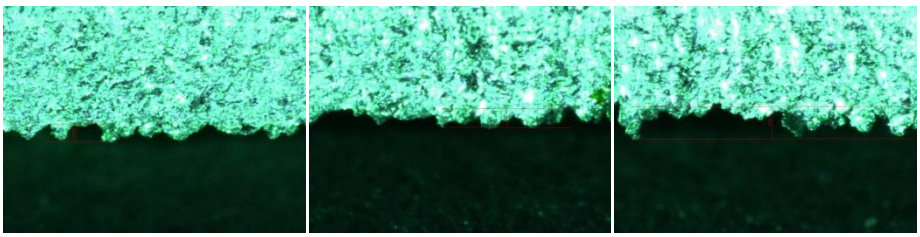
Obrázek 80: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH80, zleva: 160, 200, 240[g/min]



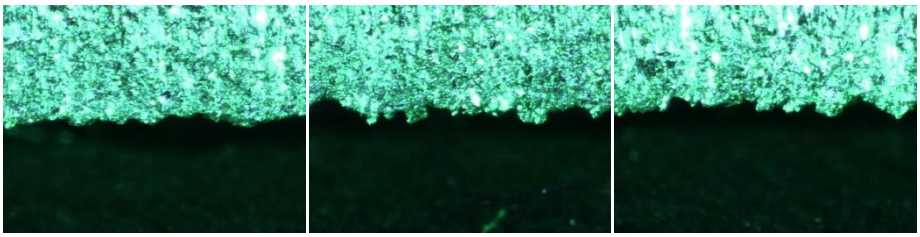
Obrázek 81: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH120, zleva: 160, 200, 240[g/min]



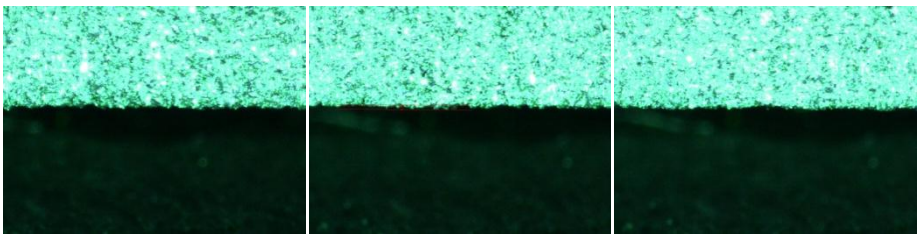
Obrázek 82: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH200, zleva: 24, 30, 34[g/min]



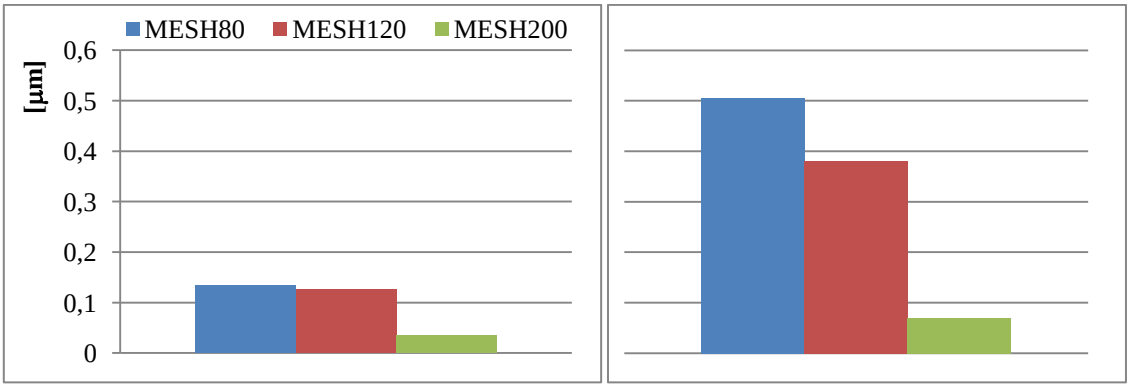
Obrázek 83: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH80, zleva: 160, 200, 240[g/min]



Obrázek 84: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH120, zleva: 160, 200, 240[g/min]



Obrázek 85: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH200, zleva: 32, 40, 48[g/min]



Graf 17: Hodnoty délek otřepů, vlevo nerez, vpravo hliník

3.1.4 Rozměry vzorků

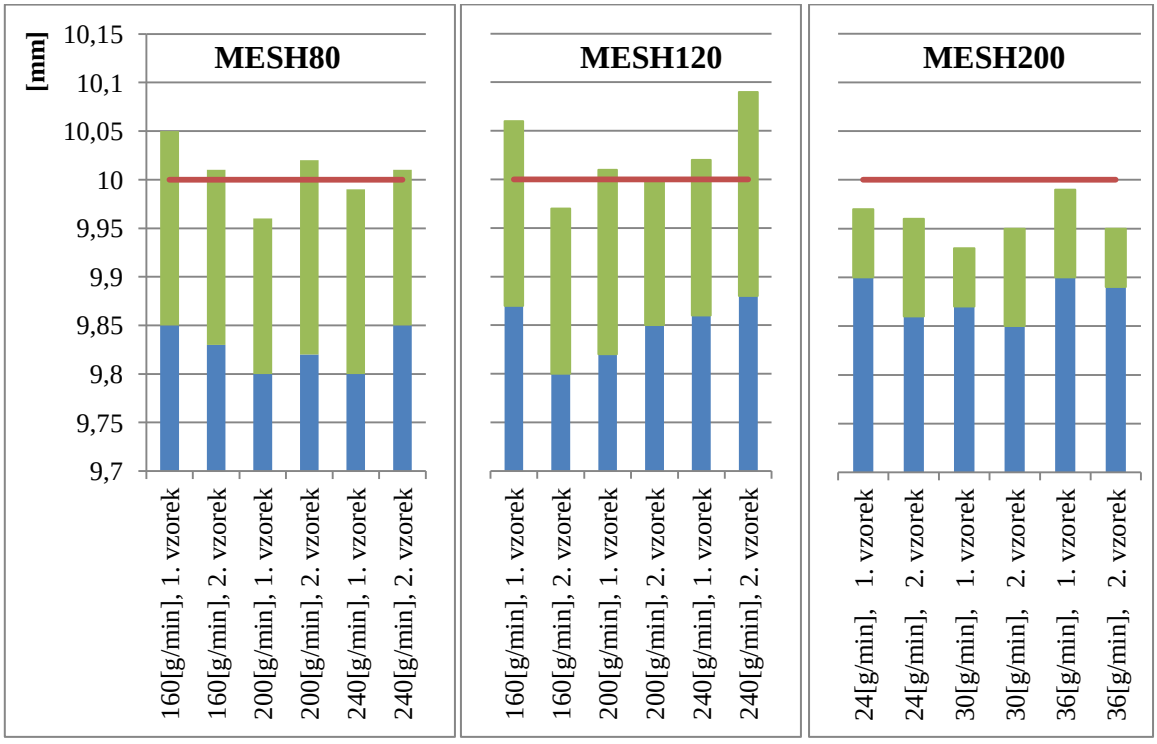
V této části jsou uvedeny hodnoty rozměrů nařezaných vzorků. Měřila se hodnota 10[mm] a to ve více místech po délce 50[mm]. Do tabulky byla zapsaná průměrná hodnota rozměru. Měřilo se posuvným měřítkem s přesností 2 setin s digitálním ukazatelem rozměru. Pro kontrolu bylo naměřeno několik rozměrů na optickém mikroskopu, aby se potvrdila správnost měření. Jelikož se na každém vzorku měřily dvě hodnoty – v horní a dolní části řezu, tak měření kladlo velkou náročnost na správnost techniky měření, zvláště při měření v horní části řezu. Čelisti posuvného měřítka bylo potřeba nastavit přesně na horní okraj.

HLINÍK							
MESH80	**Dávka**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,85	9,83	9,8	9,82	9,8	9,85
	Dolní h. [mm]	10,05	10,01	9,96	10,02	9,99	10,01
	Rozdíl [mm]	0,2	0,18	0,16	0,2	0,19	0,16
MESH120	**Dávka**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,87	9,8	9,82	9,85	9,86	9,83
	Dolní h. [mm]	10,06	9,97	10,01	10,00	10,02	10,05
	Rozdíl [mm]	0,19	0,17	0,19	0,15	0,16	0,22
MESH200	**Dávka**	**24[g/min] 1. vzorek**	**24[g/min] 2. vzorek**	**30[g/min] 1. vzorek**	**30[g/min] 2. vzorek**	**36[g/min] 1. vzorek**	**36[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,9	9,86	9,87	9,85	9,9	9,89
	Dolní h. [mm]	9,97	9,96	9,93	9,95	9,99	9,95
	Rozdíl [mm]	0,07	0,1	0,06	0,1	0,09	0,06

Tabulka 15: Hodnoty rozměrů vzorků – hliník

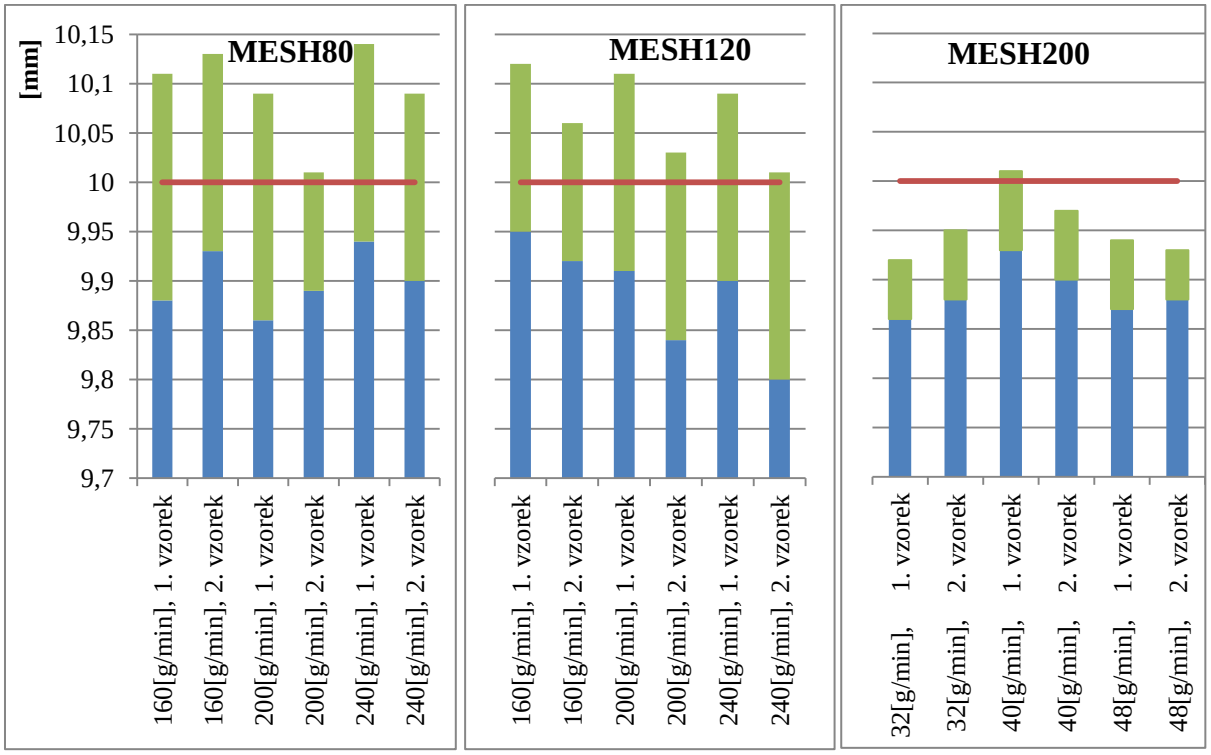
NEREZ							
MESH80	**Dávka**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,88	9,93	9,86	9,89	9,94	9,9
	Dolní h. [mm]	10,11	10,13	10,09	10,01	10,14	10,09
	Rozdíl [mm]	0,23	0,2	0,23	0,12	0,2	0,19
MESH120	**Dávka**	**160[g/min] 1. vzorek**	**160[g/min] 2. vzorek**	**200[g/min] 1. vzorek**	**200[g/min] 2. vzorek**	**240[g/min] 1. vzorek**	**240[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,95	9,92	9,91	9,84	9,9	9,88
	Dolní h. [mm]	10,12	10,06	10,11	10,03	10,09	10,09
	Rozdíl [mm]	0,17	0,14	0,2	0,19	0,19	0,21
MESH200	**Dávka**	**32[g/min] 1. vzorek**	**32[g/min] 2. vzorek**	**40[g/min] 1. vzorek**	**40[g/min] 2. vzorek**	**48[g/min] 1. vzorek**	**48[g/min] 2. vzorek**
	Horní h. [mm]	9,86	9,88	9,93	9,9	9,87	9,88
	Dolní h. [mm]	9,92	9,95	10,01	9,97	9,94	9,93
	Rozdíl [mm]	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,05

Tabulka 16: Hodnoty rozměrů vzorků - nerez



Graf 18: Rozměry vzorků – 10[mm], hliník

Na okraji měřeného vzorku, kde začínal řez obdélníku a pak i končil řez, byly naměřeny hodnoty i 6,65 – 6,8[mm]. V tomto místě se hodnoty do naměřených hodnot nezapočítaly. Tyto rozměry vznikly, jelikož řezaný vzorek se zkroutil pod tlakem parsku. Ke zkroucení paprsku došlo, jelikož vzorek byl v této fázi řezu připoután k polotovaru jen malou částí materiálu.



Graf 19: Rozměry vzorků – 10[mm], nerez

U obou grafů je zvoleno měřítko na ose y se začátkem v 9,7[mm] a koncem v 10,15[mm]. Toto měřítko bylo zvoleno z důvodu, aby bylo dobře vidět rozdíl mezi rozdílem rozměru naměřeného pod horní hranou a na dolní hraně. Modrý sloupec tedy vždy označuje rozměr pod horní hranou a zelený sloupec dohromady s modrým sloupcem rozměr na dolní hraně. Přičemž samotný zelený sloupec je velikost rozdílu mezi oběma rozměry.

Při pohledu na graf a hodnoty rozměrů u hliníku, vidíme u vzorků nařezaných pomocí abraziva MESH80, že dolní rozměr je okolo ideálního rozměru 10[mm]. Rozměr v horní části vzorku je většinou okolo 0,2[mm] menší. To samé platí pro MESH120. Při srovnání s MESH80, tedy nejsou patrné rozdíly. U vzorků nařezaných s abrazivem MESH200 a tryskou s průměrem 0,5[mm] jsou rozdíly mezi horním a dolním rozměrem menší a to okolo 0,1[mm]. Avšak horní rozměry byly naměřeny mezi 9,85[mm], a 9,9[mm], tudíž 0,15-0,11[mm] pod ideálním rozměrem 10[mm]. Dávkování q nemělo vliv na rozměry.

Při prostudování naměřených hodnot nerezového plechu jsou vidět odchylky mezi dolním a horním rozměrem okolo 0,2[mm], u vzorků nařezaných abrazivem MESH80 a MESH120, podobně jako u hliníkových vzorků. Při pohledu do tabulky 16 jsou nějaké rozdíly mezi rozměry dole a nahoře menší u vzorků MESH120 než u vzorků MESH80. Horní rozměry jsou blíž ideálnímu rozměru 10[mm], než u hliníku a dolní rozměr je nad ideálním rozměrem. U vzorků nařezaných s abrazivem MESH200 a tryskou s průměrem 0,5[mm], byly dosaženy rozměry s rozdílem mezi horním a dolním okolo 0,07[mm], Horní rozměry jsou podobné těm, které byly dosaženy abrazivem MESH80 a MESH120. Dávkování q nemělo vliv na rozměry.

3.1.5 Výměna abraziva během experimentu.

Při experimentu byly použity tři druhy abraziva. Jelikož na stroji jsou nainstalované dvě trysky (∅ 0,889[mm] a ∅ 0,5[mm]) a nad každou z nich je dávkovač (malý zásobník) abraziva. V dávkovači pro trysku s ∅ 0,889[mm] bylo abrazivo MESH80. V dávkovači pro trysku s ∅ 0,5[mm] bylo abrazivo MESH200. Nejdřív se nařezaly vzorky menší tryskou. MESH200 se do zásobníku nad malou tryskou sype ručně. MESH80 je natlakovanou trubicí dopravována z externího zásobníku vedle stroje do malého zásobníku nad tryskou o průměru ∅ 0,889[mm]. Jelikož MESH120 musela být použita v této trysce, odpojila se trubice, která dopravuje MESH80 do zásobníku. Poté se vysypalo abrazivo MESH80 z dávkovače. MESH120 byl nasypán do dávkovače ručně pomocí trychtýře. Výměna zabrala celkově cca 10 minut. Před řezáním se spustilo řezání jen do vody, aby se z trysky dostaly zbytky MESH80. Abrazivo MESH120 bylo na stroji použito vůbec poprvé.

Obrázek 86: vlevo - řezání do hliníkového plechu, vpravo - sypání MESH80 ze zásobníku

4 Závěr

V teoretické části byla shrnuta historie vodního paprsku, teoretické znalosti o principu vodního paprsku, různé typy vodního paprsku, faktory ovlivňující řezivost, struktura vodního paprsku nebo také informace o stroji a strojním vybavení, které bylo použito při řezání experimentu. V další části diplomové práce jsou popsány dva experimenty, při kterých se měnily parametry řezání. Tato část obsahuje obrázky, grafy a informace pro hodnocení dosažené kvality jednotlivých vzorků.

U prvního experimentu se hodnotila kvalita nařezaných obrobků rozměrovou přesností, vizuální kontrolou vzorků a naskenováním části povrchu strojem IMF, z čehož se získaly hodnoty drsností a barevná spektra vzorků. Řezáním vznikly na řezaných plochách úkosy, což dokazují naměřené hodnoty vzorků u tří rozměrů. Rozdíly mezi rozměrem v horní a dolní části byly 0,53-0,7[mm](mimo několika výjimek), při vypnuté korekci ProgressJet. Při řezání se zapnutou korekcí ProgressJet se dosáhlo výrazného snížení úkosů, když rozdíly mezi horní a dolní hranou byly 0,25-0,33[mm](mimo několika výjimek). Typ materiálu měl minimální vliv na přesnost. Horní rozměr oceli 12 050 měl blíž v průměru o 0,1[mm] k ideálnímu rozměru než oceli 19 573 u rozměru 85[mm]. Čím menší rozměr, tím se rozdíly smazávali. Dá se říci, že se nedosáhlo přesných rozměrů a většina rozměrů v horní části u ideálního rozměru 85[mm] měla například rozměr okolo 84,5[mm]. Tloušťka vzorků neměla vliv na přesnost rozměrů. Při vizuálním hodnocení dosáhly požadované kvality Q5 jen ojedinělé vzorky. Ve většině případů byla kvalita Q3 nebo Q4. U šikmých řezů bylo dosaženo horší kvality povrchu než u rovných řezů stejné tloušťky. U vnitřní kontury v dolní části je vyřezaný pravý úhel a dořízntutí kontury kvalitnější se zapnutými korekcemi. Kdežto rádius R5 kvalitnější při řezání s vypnutými korekcemi. Čím silnější vzorek, tím se kvalita řezu v dolní části vnitřní kontury zhoršuje. Typ materiálu se projevil na kvalitu jen u vzorku tloušťky 20[mm] v rádiusu R5, kde v 12 050 jsou výrazné stopy paprsku. Malé rádiusy jako je tento R5 nebo pravý úhel se dají vyříznout vodním parskem, ale od silnějších vzorků (10[mm]) paprsek vytvoří rádius s odklonem od ideální kontury nebo prohlubeň v pravém úhlu. Tloušťka obrobku má vliv při změně interpolace, kde se vytvoří buď prohlubeň, nebo hrbol v dolní části řezu. Čím silnější obrobek tím výraznější nerovnost hrany řezu. Zároveň lze říci, že pro tyto změny interpolace je vhodnější nepoužívat korekce. U drsnosti vzorků v horní části řezu, je dobře vidět, že tím silnější vzorek, tím klesá hodnota drsnosti. Je to dáno delším působením parsku v materiálu při řezání. Při pohledu na hodnoty drsnosti v dolní části řezu se nedá říct, že by se dosáhlo lepších výsledků se zapnutými nebo vypnutými korekcemi. Před řezáním je tedy důležité si rozmyslet, jaký tvar kontury bude řezán a podle toho zapnout či vypnout korekce.

U experimentu 2 při řezání do nerezu bylo dosaženo nejnižších hodnot drsností Sa při řezání s tryskou menšího průměru a abrazivem MESH200. Tato drsnost byla naměřena okolo 2,6[μm] v horní části. Drsnost v dolní části má hodnoty Sa vyšší jen o setiny než v horní části řezu a to u všech různých dávek abraziva q. U vzorků nařezaných s MESH80 a MESH120 a stejným průměrem trysky byla naměřena drsnost v rozmezí 5-6[μm](až na několik výjimek) a měli rozdílné hodnoty drsností v horní a dolní části řezu. U drsností nelze najít rozdíly, zda by se s jemnějším abrazivem MESH120 dosáhlo lepších výsledků než s MESH80. Rozdíly jsou

ale dobře vidět na barevných spektrech povrchů, kde u vzorků řezaných s MESH80 je povrch více strukturovaný. Otřepy jsou také menší při řezání s MESH120 než s MESH80. Při pohledu na hodnoty a grafy rozměrové přesnosti je vidět, že s MESH200 je úkos mezi horní a dolní hranou nejmenší. Ale ani jeden ze vzorků nedosáhl na ideální rozměr. Podle všech bodů hodnocení tedy nejlépe vyšli vzorky s MESH200.

U hlinkového plechu se stejně jako u plechu nerezového dosáhlo nejlepších výsledků s užší tryskou a abrazivem MESH200. Hodnoty drsností jsou vyšší, ale to je způsobeno tvrdostí materiálu, kdy v hliníku abrazivo zanechává výraznější stopy, což je dobře vidět u obrázků barevných spekter. I otřepy jsou mnohem výraznější než při řezání nerezy. U rozměrové přesnosti mají vzorky řezané s MESH120 a MESH80 ideální rozměr mezi rozměrem na horní a spodní hraně. Kdežto u vzorků s MESH200 je i spodní hrana pod ideálním rozměrem.

Obecně do tohoto závěru ale nelze počítat jen působení abraziva MESH200, ale i výrazně nižší řeznou rychlost a menší průměr trysky. Přestože dávkování q bylo oproti střední hodnotě navýšeno a sníženo o 20%, tak to na kvalitu řezů nemělo téměř žádný dopad u obou typů materiálu. Proto může být řezáno i s vyšším dávkováním q, a tedy vyšší řeznou rychlostí a to v konečném důsledku znamená zvýšení produktivity práce a ušetření peněžitých prostředků. To vše však na rovném řezu. Je otázkou jak by si vyšší rychlost poradila s řezáním tvarů těchto plechů. Pro dělení nerezového plechu by se dala využít i širší tryska s abrazivem MESH120. Spíše ale pro dělení na hrubo s tím, že zákazník nepotřebuje materiál s kvalitní hranou. Pro hliníkový plech bych širokou trysku nevyužíval vůbec, jelikož otřepy na spodní hraně jsou příliš veliké, stejně jako hodnoty drsností.

Seznam použité literatury

[1] MARCEL KOLB. *Waterjet cutting: material processing with a high-pressure waterjet*. München: Moderne industrie, 2006. ISBN 39-378-8954-X.

[2] KUMAR, Manish. *CONTROLLED HIGH PRESSURE SLURRY INJECTION IN WATER JETTING APPLICATIONS-A NEW APPROACH*. India, 2002.]

[3] *ANT Applied New Technologies AG* [online]. Lübeck, ©2004-2006 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://ant-ag.com/en/suspension-vs-injection.html

[4] *Flow* [online]. 2015 [cit. 2016-01-28]. Dostupné z: http://www.flowwaterjet.com/

[5] http://www.cncdelfin.cz/cnc-technologie

[6] Water jet cutter. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2014 [cit. 2016-1-28]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter

[7] Vodní paprsek. *INNET | VŠB - Technická univerzita Ostrava* [online]. 2010 [cit. 2014-06-19]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf

[8] Řezání vodním paprskem. *BFT* [online]. Hönigsberg [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://cz.bft-pumps.com/Rezani-vodnim-paprskem/VYSOKOTLAKE-CERPADLO-HYPERTRON

[9] DVOŘÁK, Jiří. *TECHNOLOGIE VÝROBY VYMEZOVACÍ PODLOŽKY*. Brno, 2011.

[10] In-process generation of water ice particles for cutting and cleaning purposes. *Water jetting 20* [online]. 2010, , 275-283 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:2018/eth-2018-01.pdf

[11] CryoJet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/CryoJet

[12] JÁCHYM, Jan. *ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM*. Brno, 2009.

[13] Cavitation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation

[14] VESELÝ, Radek. *ŘEZÁNÍ MATERIÁLU VODNÍM PAPRSKEM*. Brno, 2008.

[15] KUČERA, Michal. *3D VODNÍ PAPRSEK*. Brno, 2014.

[16] *VÝROBA STROJŮ PRO ŘEZÁNÍ VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPRSKEM SPECIALIZACE NA INDIVIDUÁLNÍ ŘEŠENÍ* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: www.ptv.cz

[17] *Abraziva.cz Portál se specializací na tryskací a brusné materiály* [online]. Česká republika: RENO-TECH, 2012 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.abraziva.cz/

[18] *ENETEX TECHNOLOGY ABRAZIVA* [online]. [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://enetex.grafixor.cz/produkty/tryskani-a-automatizace/tryskaci-zarizeni/abraziva/

[19] *VÝROBA STROJŮ PRO ŘEZÁNÍ VYSOKOTLAKÝM VODNÍM PAPRSKEM SPECIALIZACE NA INDIVIDUÁLNÍ ŘEŠENÍ* [online]. 2014 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.ptv.cz/abrazivo/

[20] *Technologické riešenia pestovania rastlín* [online]. 2015 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.profesionalservis.sk/sk/co-znamena-mesh

[21] SUCHÁNEK, Libor. *Nekonvenční metody obrábění při výrobě malých otvorů*. Plzeň, 2014.
[22] *Waterjet Cutting up to 900 MPa*. Hannover, 2004.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma principu vytvoření vodního paprsku[2] 13
Obrázek 2: Typy vodních paprsků [9] 13
Obrázek 3: Typy vodních paprsků 14
Obrázek 4: Abrasive vstřikovací waterjet[1] 15
Obrázek 5: Abrazivní suspenzivní paprsek[1] 16
Obrázek 6: Princip kryogenního paprsku [11] 18
Obrázek 7: Několik paprsků při různých teplotách a konstantním tlaku 55MPa [12] 18
Obrázek 8: Typy paprsků a průběhy tlakových zatížení při dopadu na obrobek [15] 20
Obrázek 9: Vliv tlaku vodního paprsku na hloubku řezu[2] 22
Obrázek 10: Vliv množství abraziva na hloubku řezu[2] 23
Obrázek 11: Rozpad vodního paprsku[22] 24
Obrázek 12: Hloubka řezu je funkcí vzdálenosti trysky [22] 26
Obrázek 13: Typy řezů - vodní paprsek[21] 26
Obrázek 14: Stupně kvality řezu[21] 27
Obrázek 15: Stroj Cobra pro řezání vodním abrazivním paprskem[16] 31
Obrázek 16: Okno nastavení parametrů řezání[16] 32
Obrázek 18: Rotační šestá osa[16] 33
Obrázek 17: Náklon trysky při použití ProgressJet 33
Obrázek 19: Světelná bariéra a lankový systém[16] 34
Obrázek 20: a) schéma pulzní dopravy abraziva, b) pulzní dopravník abraziva, c) dávkovač abraziva[16] 35
Obrázek 21: Odkalovací zařízení[16] 35
Obrázek 22: z leva: recyklační jednotka RAMS 2, výstup abraziva z recyklační jednoty, abrazivo před recyklací v šnekovém dopravníku[16] 36
Obrázek 23:Abraziva organická: skořápky ořechů, kukuřičný granulát, plastové abrazivo[17] 37
Obrázek 24: Abraziva kovová: ocelová drť, litinová drť, ocelový granulát, nerezový granulát[17] 37
Obrázek 25: Abraziva minerální: granát, korund, karbid[17,19] 37
Obrázek 26: Kontura, experiment 1 39
Obrázek 27: Upnutí obrobku 40
Obrázek 28: Etalon kvality řezu, strana hodnocení jakosti 47
Obrázek 29: Vzorky 20[mm] 47
Obrázek 30: Vzorky - 15[mm] 48
Obrázek 31: 15[mm], 12 050, korekce vypnuté, druhá strana 48
Obrázek 32: Vzorky - 10[mm] 48
Obrázek 33: Vzorky - 5mm 48
Obrázek 34: tloušťka vzorku: 20[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050 49
Obrázek 35: tloušťka vzorku: 15[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050 49
Obrázek 36: tloušťka vzorku: 10[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050 49
Obrázek 37: tloušťka vzorku: 5[mm], vlevo 19 573, vpravo 12 050 49

Obrázek 38: Materiál 12 050, tloušťka 5[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 50
Obrázek 39: Materiál 19 573, tloušťka 5[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 50
Obrázek 40: Materiál 12 050, tloušťka 10[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 50
Obrázek 41: Materiál 19 573, tloušťka 10[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 51
Obrázek 42: Materiál 12 050, tloušťka 15[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 51
Obrázek 43: Materiál 19 573, tloušťka 15[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 51
Obrázek 44: Materiál 12 050, tloušťka 20[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 51
Obrázek 45: Materiál 19 573, tloušťka 20[mm], vlevo korekce vypnuté, vpravo korekce zapnuté 51
Obrázek 46: Vnitřní kontura, řez na horní části, 19 573 52
Obrázek 47: detail řezu, vlevo horní část, vpravo dolní část 53
Obrázek 48: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 5[mm], vpravo vzorek 10[mm] 53
Obrázek 49: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm] 54
Obrázek 50: detail přechodu, 19 573, korekce zapnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm] 54
Obrázek 51: detail přechodu, 19 573, korekce vypnuté, vlevo vzorek 15[mm], vpravo vzorek 20[mm] 54
Obrázek 52: Barevné spektrum povrchu - 19 573 – 5[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo) 55
Obrázek 53: Barevné spektrum povrchu – 12 050 – 5[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo) 55
Obrázek 54: Barevné spektrum povrchu - 19 573 – 10[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo) 56
Obrázek 55: Barevné spektrum povrchu – 12 050 – 10[mm] - Korekce zapnuté (vlevo), vypnuté (vpravo) 56
Obrázek 56: nerez, vzorek 1, MESH80, 240[g/min] 64
Obrázek 57: nerez, vzorek 1, MESH80, 200[g/min] 64
Obrázek 58: nerez, vzorek 1, MESH80, 160[g/min] 64
Obrázek 59: nerez, vzorek 1, MESH120, 240[g/min] 65
Obrázek 60: nerez, vzorek 1, MESH120, 200[g/min] 65
Obrázek 61: nerez, vzorek 1, MESH120, 160[g/min] 65
Obrázek 62: nerez, vzorek 1, MESH200, 48[g/min] 65
Obrázek 63: nerez, vzorek 1, MESH200, 40[g/min] 66
Obrázek 64: nerez, vzorek 1, MESH200, 32[g/min] 66

Obrázek 65: hliník, vzorek 1, MESH80, 240[g/min] 66
Obrázek 66: hliník, vzorek 1, MESH80, 200[g/min] 67
Obrázek 67: hliník, vzorek 1, MESH80, 160[g/min] 67
Obrázek 68: hliník, vzorek 1, MESH120, 240[g/min] 67
Obrázek 69: hliník, vzorek 1, MESH120, 200[g/min] 67
Obrázek 70: hliník, vzorek 1, MESH120, 160[g/min] 68
Obrázek 71: hliník, vzorek 1, MESH200, 36[g/min] 68
Obrázek 72: hliník, vzorek 1, MESH200, 30[g/min] 68
Obrázek 73: hliník, vzorek 1, MESH200, 24[g/min] 68
Obrázek 74: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH80 70
Obrázek 75: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH120 70
Obrázek 76: hliník - otřepy, zvětšení 20x, MESH200 70
Obrázek 77: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH80 70
Obrázek 78: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH120 70
Obrázek 79: nerez - otřepy, zvětšení 20x, MESH200 70
Obrázek 80: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH80, zleva: 160, 200, 240[g/min] 71
Obrázek 81: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH120, zleva: 160, 200, 240[g/min] 71
Obrázek 82: hliník - otřepy, zvětšení 120x, MESH200, zleva: 24, 30, 34[g/min] 71
Obrázek 83: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH80, zleva: 160, 200, 240[g/min] 71
Obrázek 84: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH120, zleva: 160, 200, 240[g/min] 71
Obrázek 85: nerez - otřepy, zvětšení 180x, MESH200, zleva: 32, 40, 48[g/min] 71
Obrázek 86: vlevo - řezání do hliníkového plechu, vpravo - sypání MESH80 ze zásobníku .. 75

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání výkonů dvou různých technologií míšení abrazivního paprsku[1] 17
Tabulka 2: Velikosti drsností řezu podle kvality[21] 27
Tabulka 3: Chemické složení granátu[19] 38
Tabulka 4: Cena abraziva - granát MESH80 - Kč/1kg[17] 38
Tabulka 5: Rozměry jednotlivých rozměrů pro materiál 12 050 41
Tabulka 6: Rozměry jednotlivých rozměrů pro materiál 19 573 41
Tabulka 7: Časy vyříznutí vzorků 45
Tabulka 8: Umístění snímků 47
Tabulka 9: Umístění snímků 49
Tabulka 10: Hodnoty plošné drsnosti Sa[μm] 57
Tabulka 11: Hodnoty profilové drsnosti Ra[μm] 58
Tabulka 12: Hodnoty drsností Sa[μm], nerez 61
Tabulka 13: Hodnoty drsností Sa[μm], hliník 61
Tabulka 14: Rozměry velikostí otřepů [mm] 69
Tabulka 15: Hodnoty rozměrů vzorků – hliník 72
Tabulka 16: Hodnoty rozměrů vzorků - nerez 73

Seznam grafů

Graf 1: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 85[mm] - materiál 12 050 42
Graf 2: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 40[mm] - materiál 12 050 42
Graf 3: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 20[mm] - materiál 12 050 42
Graf 4: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 85[mm] - materiál 19 573 43
Graf 5: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 40[mm] - materiál 19 573 43
Graf 6: Průběh rozměrů jednotlivých tloušťek - rozměr 20[mm] - materiál 19 573 43
Graf 7: Závislost přesnosti na typu ocele - 85[mm] 44
Graf 8: Závislost přesnosti na typu ocele – 40[mm] 45
Graf 9: Závislost přesnosti na typu ocele – 20[mm] 45
Graf 10: Závislost časové náročnosti řezu na tloušťce oceli 46
Graf 11: Plošné drsnosti Sa - vzorky 5[mm] (vlevo) a 10[mm] (vpravo) 57
Graf 12: Plošné drsnosti Sa - vzorky 15[mm] (vlevo) a 20[mm] (vpravo) 57
Graf 13: Profilové drsnosti Ra - vzorky 5[mm] (vlevo) a 10[mm] (vpravo) 58
Graf 14: Profilové drsnosti Ra - vzorky 15[mm] (vlevo) a 20[mm] (vpravo) 59
Graf 15: Drsnosti Sa[μm], nerez 62
Graf 16: Drsnosti Sa[μm], hliník 63
Graf 17: Hodnoty délek otřepů, vlevo nerez, vpravo hliník 72
Graf 18: Rozměry vzorků – 10[mm], hliník 73
Graf 19: Rozměry vzorků – 10[mm], nerez 74