

Optimalizace výroby těsnění využitím technologie vodního paprsku

Jan Voborník

Bakalářská práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Voborník**
Osobní číslo: **T16702**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Optimalizace výroby těsnění využitím technologie vodního paprsku**

Zásady pro vypracování:

- 1. Literární rešerše na dané téma**
- 2. Experimentální obrábění při změně technologických parametrů**
- 3. Statistické vyhodnocení výsledků, závěr**

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Klimeš, J. **Technická dokumentace**. Fragment, 1998. ISBN 80-7200-206-6.
2. Maňková, I. **Progresivní technologie**. Viena, Košice 2000. ISBN 80-7099-430-4.
3. Kocman, K., Prokop, J. **Technologie obrábění**. Vyd. 2. Brno: CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je srovnání kvality řezných ploch výrobků vyrobených technologií řezání vodním paprskem, s cílem optimalizace řezných podmínek pro výrobu těsnění. Porovnává rozměrovou přesnost výrobků a jejich kuželovitost a dále především jakost obrobeneho povrchu při různých řezných podmínkách. V práci je popsána technologie vodního paprsku, principy, výhody této metody a jakost povrchu v řezu. Způsob vyhodnocení jakosti povrchu je dále popisován na základě těchto poznatků.

Klíčová slova: vodní paprsek, optimalizace řezných podmínek, jakost povrchu

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to compare the quality of cutting surfaces by water jet cutting technology with the aim of optimizing cutting conditions for the production of industrial seals. The thesis compares the dimensional accuracy of the products, their conicity and, above all, the quality of the cutting surfaces under different cutting conditions. The theoretical part of this thesis describes water jet cutting technology, its principles and the advantages of this method. These insights are used to evaluate the quality of the cutting surfaces.

Keywords: water jet, optimization of cutting conditions, surface quality

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí své bakalářské práce, doc. Ing. Libuši Sýkrové Ph.D., za odbornou a velmi ochotnou pomoc při vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Kalina industries s.r.o za umožněním výroby vzorků pro tuto bakalářskou práci a především panu Janu Vybíralovi, za ochotu a odbornou konzultaci při výrobě vzorků.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG, jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE	11
1.1 TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPERU	11
1.2 HISTORIE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPEREM	12
1.3 PRINCIP METODY	13
1.3.1 Výhody	13
1.3.2 Nevýhody	15
1.4 DRUHY VODNÍCH PAPERŮ.....	15
1.4.1 Čistý vodní paprsek.....	16
1.4.2 Abrazivní vodní paprsek	17
1.5 APLIKACE VODNÍHO PAPERU	17
2 ZAŘÍZENÍ PRO VODNÍ PAPER.....	19
2.1 HYDRAULICKÁ JEDNOTKA.....	19
2.1.1 Multiplikátor	20
2.1.2 Akumulátor tlaku	20
2.1.3 Filtry	20
2.1.4 Rozvodné elementy – vysokotlaké potrubí	20
2.1.5 Lapač vodního paprsku	21
2.2 ŘEZACÍ HLAVA	21
2.3 ABRAZIVUM	21
2.3.1 Druhy abraziva	21
2.3.2 Zrnitost	22
3 KVALITA ŘEZU	23
3.1 ÚKOSY V ŘEZU	23
3.2 POVRCH ŘEZU.....	24
3.3 STUPNĚ KVALITY ŘEZU.....	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	28
5 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPEREM.....	29
5.1 PŘEDSTAVENÍ FIRMY	29
5.2 ZAŘÍZENÍ.....	29
5.3 OBRÁBĚNÉ MATERIÁLY	31
5.4 VÝROBA VZORKŮ	31
6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	33
6.1 KUŽELOVITOST	33
6.1.1 Měření kuželovitosti.....	33

6.1.2	Vyhodnocení kuželovitosti.....	34
6.2	DRSNOST ŘEZNÉHO POVRCHU	36
6.2.1	Měření drsnosti povrchu	36
6.2.2	Postup měření.....	37
6.2.3	Parametry drsnosti.....	42
6.2.4	Naměřené hodnoty drsnosti.....	43
6.2.5	Vliv řezné rychlosti na drsnost.....	44
6.2.6	3D snímky textury povrchu pro ocel.....	46
6.2.7	3D snímky textury povrchu pro hliník	48
6.2.8	Komentář k rozdílům	51
ZÁVĚR		52
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		53
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		55
SEZNAM OBRÁZKŮ		56
SEZNAM TABULEK.....		58
SEZNAM GRAFŮ		59

ÚVOD

Nekonvenční technologie obrábění jsou založeny na fyzikálním, chemickém a jiném způsobu úběru materiálu. Na materiál většinou nepůsobí žádné řezné síly, tudíž obráběný materiál se nedeformuje, nevzniká klasická tříska, jako u konvenčních metod obrábění, které využívají řezné nástroje. Obecně jsou tyto technologie využívány tam, kde z hlediska technického nebo ekonomického nelze použít obrábění klasickými řeznými nástroji. Tato práce se bude zaměřovat na technologii abrazivního vodního paprsku.

Vodní paprsek je progresivní technologií, která je oblíbená díky své všestrannosti, možnostem využití, široké škále zpracovatelných materiálu a vhodnosti pro malosériovou a zakázkovou výrobu, protože není nutná nákladná výroba speciálních nástrojů, nebo forem.

Tato bakalářská práce vznikla za účelem optimalizace řezných podmínek při malosériové výrobě těsnění vodním paprskem, aby byl možný výběr ideálních řezných podmínek pro výrobu potřebné kvality povrchu řezu a tvarové deformace výrobku v závislosti na řezné rychlosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE

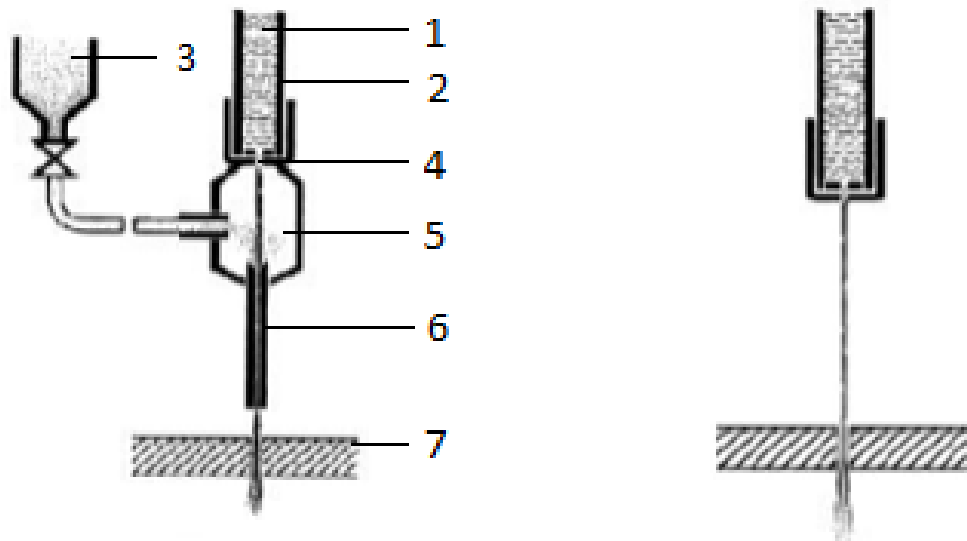
Progresivní technologie, čili nekonvenční metody obrábění, se od těch konvenčních odlišují zejména způsobem úběru třísky. Používají pro úběr materiálu jiné formy energie než mechanickou. Fungují na základě chemických, elektro-chemických, tepelných a jiných fyzikálních principů. Obrobitelnost materiálu není limitována jako u klasických způsobů třískového obrábění mechanickými vlastnostmi jako tvrdostí a pevností. Obrobitelnost při nekonvenčních způsobech obrábění je limitována převážně fyzikálními vlastnostmi materiálu (tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost, apod.) a chemickým složením materiálu. Proto jsou tyto metody využívány pro obrábění těžko obrobitelných materiálů konvenčními metodami o vysoké tvrdosti a pevnosti. V těchto případech jsou konvenční metody příliš ekonomicky náročné, málo účinné, nebo jejich nasazení úplně selhává [1], [7].

Příklad progresivních technologií:

- elektroerozivní obrábění;
- obrábění paprskem plazmy;
- obrábění laserem;
- ultrazvukové obrábění;
- elektrochemické obrábění;
- obrábění abrazivním paprskem.

1.1 TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Obrábění vodním paprskem, je velmi populární progresivní technologií, která má řadu využití nejen ve strojírenství. Mezi nejběžnější druhy obrábění vodním paprskem se řadí metoda řezání čistým vodním paprskem - Water Jet Machining (WJM) a metoda řezání abrazivním vodním paprskem- Abrasive Water Jet Machining (AWJM), která je charakteristická přidáním jemného abraziva do proudu vody [1].



Obrázek 1 - Schéma řezání s abrazivem a bez abraziva [11]

1 – tlaková kapalina, 2 - tlakové potrubí, 3 – zásobník abraziva, 4 – vodní tryska,
5 – směšovací komora, 6 – výstupní řezací tryska, 7 - obrobek

1.2 HISTORIE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM

Síla vody je lidstvu neustále demonstrována přírodou. Hlavně skrze vlnobití, formování koridorů řek, ale i erozi. Bylo jen otázkou času, než člověk začne vodní energii jako nástroj používat sám. Začalo to u dopravy po proudu, později se začala vyvíjet technologie vodního kola a v druhé polovině 19. století se v Americe začala používat voda vháněná do úzkých trysek pod vysokým tlakem k těžbě [1].

Průkopníkem této technologie, který použil vodní paprsek v podobě přirovnatelné té dnešní, byl Dr. Norman Franz. Dokázal, že použití velmi tenkého paprsku vody, který při výstupu z trysky dosahuje vysokých řezných rychlostí má dostatečnou řeznou energii, aby přerezal dřevo a jiné měkčí materiály. Do 70. let minulého století se proto používal především pro řezání dřeva a lepenky. [1]

Na práci Dr. Franze navázal, byl Dr. Mohamed Hashish. Zabýval se možnostmi zvýšení řezného výkonu vodního paprsku, aby dokázal řezat i tvrdší materiály, jako například kovy. Zjistil, že přidání abrazivního materiálu tomuto účelu významně dopomůže a v roce 1979 vyvinul technologii abrazivního vodního paprsku, který se začal už o 4 roky později komerčně využívat. V té době vodní paprsky dosahovaly řezného tlaku zhruba 380 MPa [1], [3].

Od té doby došlo ke značnému vývoji této technologie a už konci 20. století řezný tlak dosahoval hodnot okolo 670 MPa. Už v té době čerpadla dosahovaly dostatečných tlaků, proto se výrobci začali soustředit spíše na zlepšování kvality řezu [3], [4], [18].

1.3 PRINCIP METODY

Obrábění materiálů kapalinovým paprskem je založeno na přeměně kinetické energie molekul kapaliny, případně směsi kapaliny a zrn abraziva, na mechanickou práci. Následkem této práce dochází k takzvanému „microchippingu“. Odebírání částic materiálu, při dopadu tohoto úzkého, vysokotlakého a vysokorychlostního proudu vody, kdy abrazivum tento proces znatelně umocňuje [1], [4], [7].

Princip je tedy možno chápat jako obrušování řezaného materiálu tlakem vodního paprsku. Tlak je generován speciálním vysokotlakým čerpadlem a pohybuje se v rozmezí 800 – 4100 Bar. Tato čerpadla bývají charakterizována příkonem, který se pohybuje mezi 9 a 75 kW a průtokem vody, většinou v rozmezí 1,2 – 7,6 l/min [7], [11], [12].

Paprsek vzniká v řezací hlavě zakončené tryskou, vyrobenou například ze safíru. Tryska vytváří paprsek o tloušťce podle využití a použité technologie a podle řezaného materiálu. U měkkých materiálů, při použití technologie řezání čistým vodním paprskem se používá průměr paprsku cca 0,15 – 0,30 mm, kdežto při použití technologie abrazivního vodního paprsku, při řezání tvrdých materiálů se jedná o cca 0,3 – 1,5mm [11], [12].

Důležitým faktem je, že řezná hrana není nijak tepelně ovlivněna, jedná se tedy o studený řez. Tento fakt rozlišuje vodní paprsek od ostatních progresivních dělicích technologií, zvláště od laseru a od řezání plasmou [11].

1.3.1 Výhody

Tento druh obrábění nám poskytuje řadu výhod. Jednou z největších je, že nemusíme dbát obrobitelnosti nebo tepelné úpravy materiálů, navíc v místě řezu není materiál nijak tepelně ovlivněn. To nám mimo jiné umožňuje zpracovávat i materiály se špatným odvodem tepla, jako jsou plasty, guma, dřevo a sendvičové kompozitní materiály s výztuží ze skleněných nebo kevlarových vláken. To nám napomáhá i u obrábění materiálů, které jsou citlivé na oxidaci, např. Titanu, niklu, kobaltu a jejich slitin. Nízká teplota v řezu je užitečná i při obrábění běžných konstrukčních ocelí, protože nevzniká vlivem tepla v řezu de-

formační pnutí a nemůže dojít ani k nežádoucí přeměně struktury například na martenzit, nebo austenit [6], [9], [10], [11].

Protože na obrobek působí jen malé řezné síly, je možné řezat i tvarově složité a málo tuhé obrobky. Malou roli hraje i vzdálenost trysky od obráběného materiálu, takže si bez problémů můžeme dovolit řezat například vlnité plechy. Materiál není třeba upínat.[6], [8]

Kapalinový paprsek lze využít kromě řezání a vyřezávání tvaru i na operace jako vrtání, úkosování, otryskávání, soustružení, gravírování a frézování. Díky své flexibilitě má tato metoda vysoký tržní potenciál[10],[11].

Další výhodou je i vysoká přesnost řezu. Některé stroje dokáží vyrábět díly s odchylkou pouze 0,025mm. Standardní toleranční odchylky se pohybují od 0,075 do 0,125mm. Avšak s tloušťkou materiálu odchylky nevyhnutelně rostou kvůli odchylce způsobené lomem proudu vody při úbytku její kinetické energie, tento jev se nazývá váznutí paprsku. Navíc dochází ke zhoršování jakosti obrobenej plochy. Těmto negativním účinkům se lze vyvarovat tzv. oscilačním řezáním, kdy rychlost pohybu paprsku není konstantní, ale s určitou frekvencí se mění. Kvalitu řezu může ovlivnit výtokový průměr trysky, tlak vody, rychlost pohybu paprsku, vzdálenost trysky od povrchu materiálu, úhel sklonu paprsku, druhem abraziva a aditivy obsaženými ve vodě. Jako aditiva se používají různé polymery s lineárními molekulami. Používají se pro zamezení vzniku turbolencí v paprsku a tím napomáhají rovnoměrnosti a účinnosti paprsku. Ten si zachovává kompaktní jádro a při styku s obrobkem se netříští. Dalšími faktory, které ovlivňují přesnost, jsou rozdíly v technologiích, řízení, i odlišné konstrukce strojů jednotlivých firem[6], [8], [5], [10].

Za zmínku stojí i jeho šetrnost k životnímu prostředí. Nedochozí ke vzniku strusky, ani okují. Jako abrazivo se používají většinou recyklovatelné, opakovaně použitelné přírodní materiály. Opakovaně lze samozřejmě použít i řezná kapalina. Mimo životní prostředí je šetrný i ke zdraví pracovníků, probíhá v bezprašném prostředí bez vzniku par a plynů[6], [5].

Další výhody:

- vysoká spolehlivost;
- jednoduchost obsluhy;
- možnost CNC řízení;
- jedno čerpadlo může napájet více trysek;

- vysoká energetická účinnost, až 85% (laser mívá energetickou účinnost pouze okolo 10%);
- trysky mají poměrně vysokou životnost (cca 100 hodin u WJM a 50 hodin u AWJM);
- je možné řezat i pod hladinou vody;
- u kvalitnějších stupňů řezu není nutné další opracování.
- neporušení povrchové úpravy materiálu [1], [6], [9], [11].

1.3.2 Nevýhody

- hlučnost;
- vysoké pořizovací náklady;
- nároky na vzdělání obsluhy;
- je nutné počítat s cenou abraziva, popřípadě s možnou recyklací či likvidací;
- není možné řezat kalené sklo a hrnčířskou hlinu;
- zaoblení vnitřních rohů závisí na průměru paprsku;
- vznik úkosů a striací na řezaných plochách;
- Není vyhnutelný kontakt materiálu s vodou, to může způsobovat u nasákových materiálů delší dobu sušení, nebo může docházet k narušování materiálů korozí.
- Složitá výroba hodně malých dílů, lze ošetřit můstky, ale ty se musí následně odstranit.
- Špatně se obrábí duté profily, jelikož vodní paprsek řeže i po průchodu vrstvou materiálu, může tak ničit i podložku, která bývá typicky zastoupena kovovou mříží [1], [6], [8], [9], [11].

1.4 Druhy vodních paprsků

Vodní paprsek se rozděluje na mnoho odlišných technologií. Jak už bylo řečeno, nejpoužívanějšími jsou metody čistého a abrazivního vodního paprsku. Základní rozdělení ovšem probíhá podle kontinuity paprsku. Metody WJM a AWJM se řadí, se spoustou dalších, do skupiny kontinuálních paprsků. Kontinuální paprsky se tradičně používají k řezání materiálu, kdežto metody diskontinuální se často používají na vrtání, lámání a drcení hornin. Vý-

běr typu paprsku pro daný technologický úkon se řídí vlastnostmi řezaného materiálu a podmínkami realizace [1], [7].

Kontinuální paprsky:

- Čistý (WJM);
- Kavitační – funguje na principu jevu lokálního porušení materiálu destruktivní silou kavitačních bublin. Tento paprsek obsahuje kavitační bubliny [7].;
- Abrazivní:
 - Abrazivní vodní paprsek;
 - Paprsek abrazivní suspenze;
- Kryogenní - je zde používán místo vody kapalný dusík, o teplotě cca - 190°C, zařízení musí být odolné takovým teplotám. Využívá se u materiálů, které by neměli přijít do kontaktu s vodou, nebo v chemicky reaktivních prostředích [17];
- Ultra vysokotlaký – za použití vyšších tlaků, docílíme kvalitnějšího řezu a úspory vody a abraziva. Pořizovací náklady na zařízení jsou vyšší.
 - čistý;
 - abrazivní; [1], [7].

Diskontinuální paprsky - využívají tlakových špiček, které urychlují tvorbu řezné mezery, dělíme je na:

- Pulsní:
 - Nízkofrekvenční;
 - Přerušovaný;
- Modulovaný [1], [7];

1.4.1 Čistý vodní paprsek

Jedná se o základní technologii v tomto odvětví. Využívá se hydrodynamických vlastností vody pod vysokým tlakem. Většinou se používá na dělení měkkých a nekovových materiálů. Pracovním médiem většinou bývá filtrovaná voda zbavená minerálních látek, kvůli eliminaci zanášení trysky. Jako pracovní médium lze samozřejmě použít i jiné kapaliny.

Paprsek vystupuje z trysky o malém průměru pod velmi vysokým tlakem. Je nositelem velké kinetické energie, která se při dopadu na povrch obrobku přeměňuje na mechanickou práci a současně dochází k odpařování vody a narušení materiálu kavitací [1], [7].

Zpracovatelné materiály:

- pryž;
- dřevo;
- laminát;
- potraviny;
- kůže;

1.4.2 Abrazivní vodní paprsek

Základní rozdíl mezi čistým a abrazivním vodním paprskem spočívá přimíchávání jemného brusiva (abraziva) do proudu paprsku, což zlepšuje jeho řezné vlastnosti a urychluje erozní proces. Dále tento způsob rozdělujeme podle způsobu přívodu abraziva a konstrukce trysky na dva základní druhy [7].:

- Systém s přímým přívodem brusiva AWJ (Abrasive water jet) – Abrazivo je přiváděno do směšovací komory, kde se urychluje a míchá s vodním paprskem, ze zásobníku [1].
- Systém s přímým vstříkáváním brusiva ASJ (Abrasive slurry jet) – Do trysky se pod tlakem přivádí suspenze, která se v tlakové nádobě míchá s vodou. Má vyšší proudovou hustotu částic než AWJ a umožňuje kompaktnější konstrukci trysky a užší průměr paprsku [1].

Zpracovatelné materiály:

- všechny typy ocelí, bez závislosti na obrobitelnosti a tepelné úpravě;
- ostatní slitiny kovů;
- kompozity a sklolaminát;
- sklo, vícevrstvé sklo, přírodní i umělé kameny.

1.5 Aplikace vodního paprsku

Technologii vodního paprsku je možné aplikovat při různých strojírenských operacích. Mimo řezání lze vodní paprsek použít například při soustružení, vrtání, nebo frézování [6].

Vodní paprsek je vhodné aplikovat pro řezání tvrdých a pevných materiálů, těžko obrobitelných konvenčními metodami, jako je tepelně upravená ocel, slitiny kovů, sklo, kámen. Můžeme ho používat i na strukturované povrchy, na sendvičové materiály a na řezání velmi tenkých fólií. Přesnost této technologie umožňuje řezat úzké pásy a gravírovat reklamní loga nebo nápisy. Díky možnosti obrábění bez nákladů na výrobu nástroje nebo formy se skvěle hodí pro zakázkovou a malosériovou výrobu [1], [6].

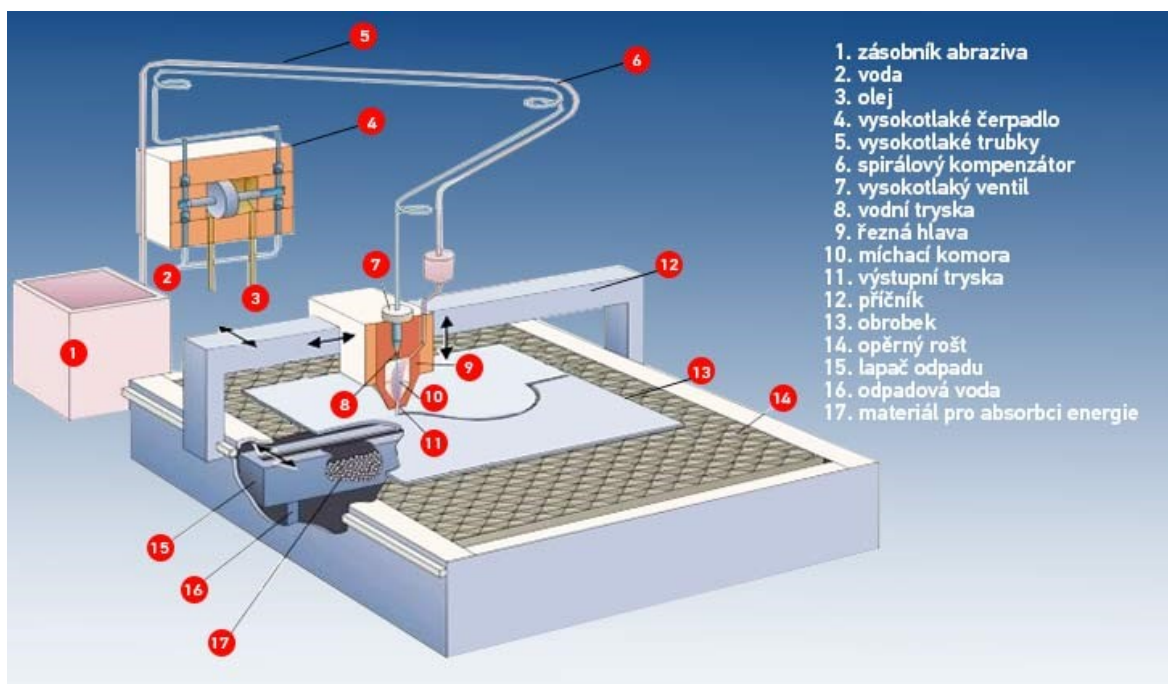
Není vhodná aplikace pro řezání tvrzených skel, které se vlivem vnitřního pnutí rozdrtí, nebo materiálů které špatně reagují na vodu (můžou nasáknout, nebo korodovat). Problematické je i obrábění dutých profilů, protože paprsek může poškodit další stěnu materiálu. Problematické bývá i zpracování tvarově složitých polotovarů s požadavky na vysokou přesnost, nebo řez tlustších vrstev materiálu, kvůli ztrátám kinetické energie paprsku [1], [6], [7].

2 ZAŘÍZENÍ PRO VODNÍ PAPERSEK

Každý výrobce má vlastní odlišnou architekturu zařízení pro řezání vodním paprskem, ale základní prvky vždy zůstávají téměř stejné a jsou přítomny ve všech zařízeních.

Mezi základní prvky zařízení pro řezání vodním paprskem se řadí:

- hydraulická jednotka s čerpadlem, multiplikátorem, akumulátorem tlaku a filtry;
- tryska;
- systém pro dávkování abraziva;
- systém pro úpravu vody;
- lapač vodního paprsku [7].



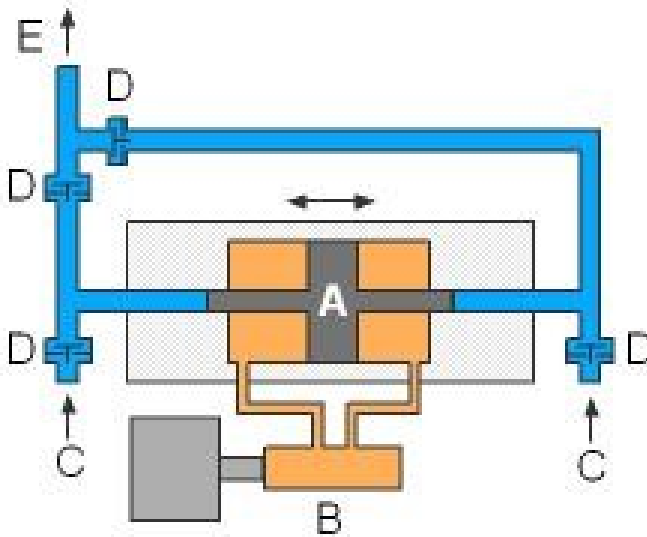
Obrázek 2 – Schéma zařízení vodního paprsku [19]

2.1 Hydraulická jednotka

Hydraulická jednotka má za úkol generování řezného tlaku vodního paprsku pomocí systému hydraulických pump. Vysokotlaký vodní paprsek se přitom generuje hydraulickým zařízením s konstrukcí podle výrobce. Používá se buď multiplikátor, nebo triplexový píst. Varianta s multiplikátorem je využívána firmou Flow International a triplexový píst prosazují většinou japonské firmy [7].

2.1.1 Multiplikátor

Multiplikátor je částí hydraulické jednotky, která se používá na zvyšování tlaků. Funguje na principu dvou spojených pístů, kdy olej působí nízkým tlakem na větší píst, a menší píst vyvíjí vysoký tlak na vodu. Multiplikátory jsou regulovatelné, klasicky do 380 MPa [7].



Obrázek 3 – Schéma multiplikátoru [20]

A – píst, B – olejové čerpadlo, C – přívod vody, D – zpětné ventily, E – výstup vody

2.1.2 Akumulátor tlaku

Je tlaková tlustostěnná nádoba, která tlumí rázy v kapalině vyvolané jako následek stlačení vody. Úkolem akumulátoru je udržovat rovnoměrný tlak a rychlost proudění vody [7].

2.1.3 Filtry

Filtry jsou důležitou částí zařízení, filtrují kapalinu a zachytávají veškeré nečistoty do velikosti 1,2 až 0,5 μm . Pevné částice by mohly vést k rychlejšímu opotřebení stěn válců a trubek a mohly by způsobit ucpaní, či poškození trysky [7].

2.1.4 Rozvodné elementy – vysokotlaké potrubí

Skládá se z různých druhů trubek a spojovacích elementů vyrobených z nerezové ocele. Potrubí je přizpůsobeno flexibilnímu pohybu řezné hlavice. Tyto komponenty jsou normalizované a standardizované, obvykle s průměrem 6 – 14 mm [7].

2.1.5 Lapač vodního paprsku

Lapač vodního paprsku je nádoba umístěná pod řezaným materiálem, do které po řezu dopadá voda s abrazivem a ubranou třískou. Má za úkol tlumit hluk a zachytávat vodní paprsek se zbytkovým tlakem a rychlostí po provedení řezu. Lapač musí mít dostatečnou hloubku, aby vodní paprsek nemohl poškodit dno. V praxi se používají hloubky 300 – 600 mm, při nedostatečné hloubce nádoby se na dno dávají kovové kuličky [7], [17].

2.2 Řezací hlava

Je to základní a důležitá část zařízení pro řezání vodním paprskem. Ovlivňuje tvar vodního paprsku i kvalitu řezu. Je v ní uchycena tryska, která bývá obvykle vyrobena z rubínu, safíru, korundu, slinutého karbidu, nebo syntetického diamantu. Diamantové trysky mají největší životnost, až 10x větší než trysky ze safíru nebo rubínu, ale jejich cena je až desetinásobná. Vliv na životnost trysky má počet cyklů, voda a abrazivo. Kvůli prodloužení životnosti trysky se voda filtruje a přidávají se do ní aditiva. Řezací hlavy fungují na různých principech, podle použité technologie a způsobu přívodu brusiva [7], [17].

2.3 Abrazivum

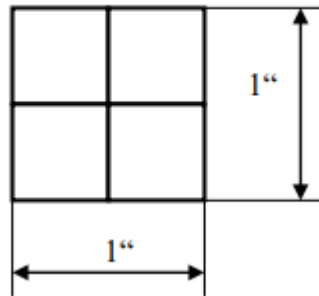
Abrazivum brusná směs, s vysokou tvrdostí a brusností, přidáním abraziva do vodního paprsku se výrazně zvyšují jeho řezné vlastnosti. Výběr abraziva a jeho dodávané množství řezné vlastnosti výrazně ovlivňuje [6], [12].

2.3.1 Druhy abraziva

Mezi běžně používaná abraziva patří:

- granát – nejčastěji používaný, vyšší cena, dobrá účinnost, větší opotřebení trysky;
- oxid hlinitý - Al_2O_3 ;
- olivín;
- křemičitý písek – nižší cena, účinek a opotřebení trysky, je nevhodný pro recyklaci;
- ocelová drť nebo broky [1], [6], [12].

2.3.2 Zrnitost



Obrázek 4 – Hodnota mesh = 4 [12]

Zrnitost (mesh) popisuje počet ok síta na 1“, kterým zrno propadne. Standardně se používají zrna o zrnitosti mesh = 80 – 120, to odpovídá příčnému rozměru zrna cca 0,15 mm [12].

3 KVALITA ŘEZU

Technologické a provozní charakteristiky technologií WJM a AWJM vycházejí z Bernoulliho rovnice pro proudění nestlačené kapaliny.

$$v^2 = \frac{2p}{\rho}$$

Kde v je rychlost proudění kapaliny (m/s), p je tlak kapaliny, který je úměrný kinetické energii kapaliny (MPa) a hustota média (kg/m^3). [7]

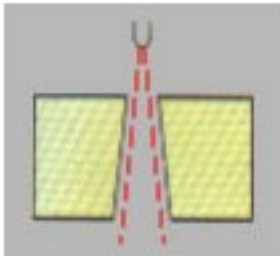
Parametry, které ovlivňují povrch a jakost materiálu v řezu jsou:

- Pracovní tlak vody:
 - Pro technologii AWJM 300-400 MPa;
 - Pro technologii WJM standardně 60 - 415 MPa, ale při dělení kovů touto technologií může pracovní tlak dosahovat až 690 MPa;
- abrazivo;
- vzdálenost mezi tryskou a obrobkem, běžně od 2,5 do 6,35 mm, nebo od 10 do 25 mm, tato vzdálenost se často mění při obrábění tvarově složitějších dílů;
- šířka paprsku;
- spotřeba vody podle parametrů zařízení, pro průměr trysky 0,127 mm bývá udáváno 26 l/hod;
- rychlost paprsku, cca 600-900 m/s;
- materiál trysky: safír, slinutý karbid, diamant, kubický nitrid bóru, rubín, korozivzdorná ocel;
- šířka řezu, která z pravidla bývá větší než průměr trysky, řádově v desetinách milimetrů;
- úhel sklonu paprsku [1], [7].

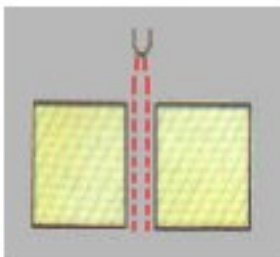
3.1 Úkosy v řezu

Ve většině případů při řezání technologiemi WJM nebo AWJM vznikají určité úkosy maximálně však 1 – 1,5 stupně. Cílem je optimalizovat řeznou rychlost, abychom dosáhli co nejválnocovitějšího řezu. Je potřeba dbát i na sílu řezání a vzdálenost trysky od materiálu,

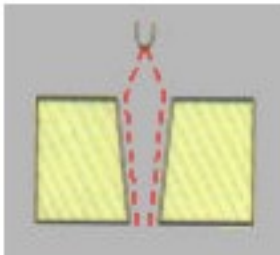
protože pokud se zvětší, zvětšuje se i šířka řezu a mění se kvalita opracování. Úkosy vznikají i v závislosti na množství abraziva, tvaru řezu atd.



a) Tohoto řezu se dá docílit, při řezání moc měkkého materiálu, nebo pokud bude řezná rychlost moc nízká a paprsek stihne vytvořit svou přirozenou kuželovitou stopu.



b) Takto by měl vypadat správně optimalizovaný řez, bylo dosaženo rovnováhy mezi řeznou rychlostí, odolností a tloušťkou materiálu, úkos nevzniká.



c) Dalším případem je příliš rychlý řez v odolnějším materiálu, v tomto případě paprsek nestihne „probrousit“ celý materiál a směrem dolů se uzavírá [1], [11].

Obrázek 5 – Vznik úkosů v řezaném materiálu [11].

3.2 Povrch řezu

Jedním ze závažných faktorů při obrábění vodním paprskem je vznik kvalitativně odlišných zón v řezu, kvůli efektu váznutí paprsku. Toto může při některých aplikacích na první pohled odrazovat od použití této technologie, ale většinu negativních jevů je možné volbou vhodných řezných podmínek eliminovat.

Zóny jsou definovány v souvislosti s jevem váznutí paprsku takto:

- a) Hladká zóna, nachází se v horní části materiálu, kde paprsek naráží na obrobek a má dostačnou kinetickou energii a osovou sílu řezání pro hladký řez materiálem. Tudíž řezeme bez vzniku rýh (striací) a úkosů.
- b) Rýhovaná zóna (zóna striace), kde paprsek ztrácí svou kinetickou energii a dochází ke slábnutí osové síly. Dochází tedy spíše k uvíznutí a tlačení částic napříč materiálem, tudíž tato oblast povrchu řezné spáry vzniká spíše v důsledku deformačního

opotřebení materiálu. Paprsek je vychylován ze své původní dráhy a řez začne zastávat. Vzdálenost a tvar řezu mezi vstupem a výstupem paprsku ve směru pohybu nástroje závisí na rychlosti, řezných parametrech, tloušťce a materiálu [13].



Obrázek 6 – Povrch obrobenej plochy technologií AWJM [11].

Drsnosti R_a jsou považovány v rámci kvality řezu na nejdůležitější parametr, protože komplexně vypovídají o účincích volby technologických parametrů i o interakci řezných sil s materiálem a o charakteru vzniklých reakcí. Pohybují se od R_a 3,2 v hladké zóně řezu, až po R_a 40 v rýhované zóně [10], [13].

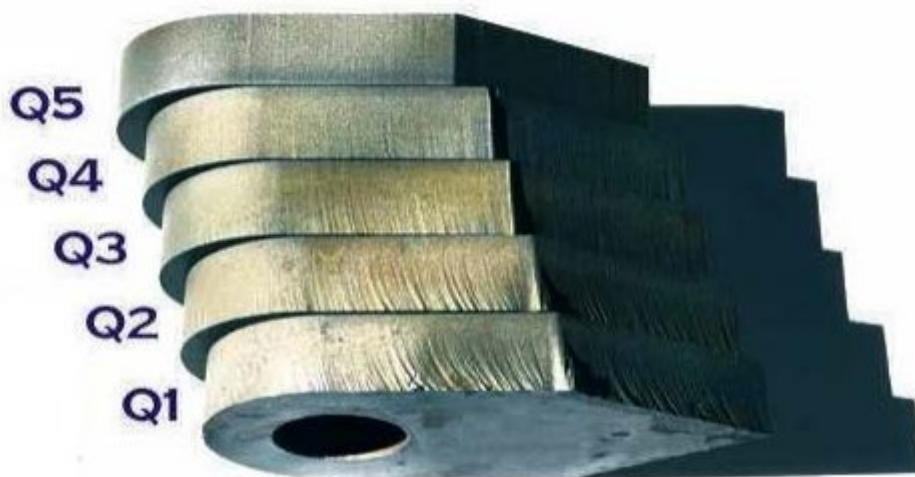
3.3 Stupně kvality řezu

Kvalitu řezu dělíme klasicky do pěti stupňů, ve kterých zohledňujeme stupně drsnosti a přesnost v obou zónách řezu a úkosy. Zhotovení jednotlivých kvalit řezu může být buď úmyslné, za účelem snížení ekonomických nákladů, nebo můžeme dosáhnout horších výsledků kvůli špatné optimalizaci řezného procesu.

Tabulka 1 – Povrch obrobené plochy technologií AWJM [12].

Kvalitativní stupeň	Charakteristika	Ra v horní kontuře [μm]	Ra v dolní kontuře [μm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	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	±0,1	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	cca 12,5	±0,15	dle síly a typu materiálu	dle síly a typu materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	±0,2	dle síly a typu materiálu	dle síly a typu materiálu
Q1	dělicí řez	4,0 - 6,3	do 40	±0,2	dle síly a typu materiálu	výrazný kladný úkos

Se zhoršující kvalitou můžeme jasněji rozpoznávat zóny řezu. Hladká zóna se spolu se snižující kvalitou postupně zmenšuje a zvětšuje se zóna striací.



Obrázek 7 – Stupně jakosti řezu

PRAKTICKÁ ČÁST

4 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Rešerše zpracovaná v teoretické části je zaměřována na technologii vodního paprsku a pochopení principu řezání materiálu touto technologií. Má za úkol poskytnout teoretický základ, ze kterého se bude vycházet v praktické části.

Cílem praktické části, v návaznosti na informace z literární rešerše, bude dle tématu práce optimalizace výroby těsnění použitím technologie vodního paprsku.

Praktická část bude zaměřena na výrobu vzorků pro měření jakosti řezaného povrchu. Vyráběná kovová těsnění, mívají průměr řádově v desítkách centimetrů. Kvůli ekonomické náročnosti a praktičnosti při měření, byly pro výrobu zvoleny kruhové vzorky s průměrem 60 mm a tloušťkou 10 mm. Vzorky byly vyráběny z konstrukční oceli 11373 a hliníku, při konstantních řezných podmínkách, dimenzovaných pro ocel a různých řezných rychlostech, používaných pro vytvoření různých kvalit řezu. Bude provedeno vyhodnocení kuželovitosti a drsnosti povrchu řezů při různých řezných rychlostech.

5 EXPERIMENTÁLNÍ OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM

5.1 Představení firmy

Výroba byla provedena ve firmě Kalina industries, s.r.o., která patří mezi přední výrobce všech plochých automobilových a průmyslových těsnění, těsnících či vymezovacích podložek a kovových lisovaných dílců. Firma Kalina používá pro dělení o opracování materiálů nejmodernější technologie, např.: vodní paprsek, vyřezávací plotry, rychloběžné lisovací linky a elektroerozivní vyřezávání. Kvalitu výrobků zajišťuje propracovaný systém řízení jakosti podle norem ISO 9001, který je ve firmě certifikován od roku 1998. Své výrobky expeduje nejen na tuzemský trh, ale do celého světa a pravidelně se účastní na největších strojírenských veletrzích v Evropě [16].

5.2 Zařízení

Firma Kalina industries s.r.o. používá pro řezání vodním paprskem stroj Flow Mach 3 - 3020b, který umožňuje pouze 2D řezání. Tento stroj je využíván pro hlavně pro zakázkovou a malosériovou výrobu. Stroj má pro jednoduchou manipulaci s výrobky otevřený pracovní prostor a je ovládán pomocí softwaru FlowPath. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 – Technické parametry stroje

Technické parametry stroje	
Přesnost rovnosti řezu	0,0381 mm/m
Rychlost řezu	7,6 m/min
Posuvová rychlost	12,7 m/min
Opakovatelnost řezu	0,05 mm
Prostor v ose Z	178 mm
Pracovní prostor	3 x 2 m

Zařízení disponuje i dalším příslušenstvím jako například laserovým zaměřovacím křížem, nebo oddělenou kontrolní stanicí s PC na kolečkách pro snadnou manipulaci. Využívá čerpadlo 30HP Hplex II, které je schopno generovat tlak až 380 MPa – obr. 9.



Obrázek 8 – Flow Mach 3 – 3020b



Obrázek 9 – Čerpadlo 30 HP Hyplex II

5.3 Obráběné materiály

Pro obrábění byly zvoleny dva materiály s rozdílnou tvrdostí, z důvodu zkoumání kvality řezu při různé řezné rychlosti. Jako tvrdší materiál byla zvolena nelegovaná konstrukční ocel 11 373. Tato ocel je vhodná ke svařování, na stavbu staticky, ale i mírně dynamicky namáhaných konstrukcí a na výrobu méně namáhaných svařovaných potrubí. Má pevnost v tahu minimálně 370 MPa [15].

Druhým vybraným materiálem byla slitina hliníku 424401. Tento materiál má lepší obrobitelnost než ocel 11 373, dá se i dobře tvářet a leštit. Je chemicky stálý, dobře svařitelný a používá se například v potravinářském průmyslu. Pevnost v tahu je cca 245 MPa [14].

Polotovarem pro výrobu vzorků byly desky tloušťky 10 mm.

5.4 Výroba vzorků

Pro výrobu byl použit abrazivní vodní paprsek, přístroje Flow Mach 3. Čistý vodní paprsek na řez 10mm tlusté oceli není vzhledem k její tvrdosti vhodný. Řízení přístroje probíhalo v softwaru FlowPath, který funguje na operačním systému Windows. Můžou do něj být importovány výkresové soubory různých formátů např.: dwg, dxf, igs, atd. Pro výrobu námi zvolených vzorků nebylo za potřeby složitějších výkresů, takže postačilo výkresové prostředí programu FlowPath. Po nakreslení tvaru řezu bylo nutné nastavit průběh a směr řezu a místo výběhu paprsku. Dále byly nastaveny řezné parametry pro řezání oceli o tloušťce 10mm.

Pro řez byla použita rubínová výstupní tryska průměru 0,3mm. Tlak vody byl nastaven na 375MPa. Směšovací trubka měla délku 78mm a průměr 1,1mm. Hmotnostní průtok abra- ziva byl nastaven na 0,36 kg/m. Jako abrazivo byl použit Garnet MESH 80. Program FlowPath jako rychlosti pro výrobu kvalit řezu Q5 – Q1 určil řezné rychlosti od 34,13 po 341,15 mm/min.

Hliníkový polotovar byl obráběn za stejných podmínek.

Po umístění polotovaru na pracovní stůl stroje materiál nebylo díky jeho váze potřeba upínat. Pomocí laserového kříže byl zaměřen počátek řezu a byl spuštěn řezný proces.



Obrázek 10 – Výroba vzorků

Z vyrobených vzorků nebyl odstraněn můstek pro výjezdu materiálu, ani po obroušení by tato část povrchu nebyla vhodná pro provádění měření.

6 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Vytvořené vzorky byly podrobeny měření, abychom mohli vyhodnotit kvalitu řezné plochy.

6.1 Kuželovitost

Měření kuželovitosti provádíme kvůli zjištění úkosu vzniklého při prořezávání materiálu paprskem. Největší vliv na vznik úkosu má řezná rychlost a tvrdost obráběného materiálu. Příliš rychlý řez paprskem způsobuje kladný úkos a příliš pomalý řez měkkým materiálem způsobuje záporný úkos. V ideálním případě je úkos co nejmenší.

6.1.1 Měření kuželovitosti

Měření bylo prováděno v náhodných směrech na každém výrobku na horní (vstupní) hraně a spodní (výstupní) hraně obrobku. Na každé hraně bylo provedeno 5x a výsledná kuželovitost byla počítána z průměrných hodnot měřeného průměru. Měření bylo provedeno posuvným měřítkem Mitutoyo Absolute Digimatic 0-150 mm s rozlišitelností 0,01 mm.



Obrázek 11 – Posuvné měřítko Mitutoyo

Tabulka 3 – Naměřená data pro ocel

Číslo měření	Q5 [mm]		Q4 [mm]		Q3 [mm]		Q2 [mm]		Q1 [mm]	
	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1.	60,05	60,15	60,03	60,1	60,06	60,05	60,13	60,1	60,16	60,43
2.	60,06	60,14	60,01	60,06	60,04	60,12	60,07	60,23	60,15	60,38
3.	60,09	60,19	60,06	60,11	60,03	60,09	60,04	60,22	60,09	60,33
4.	60,06	60,15	60,04	60,09	60,07	60,08	60,05	60,06	60,14	60,28
5.	60,05	60,17	60,03	60,08	60,05	60,07	60,12	60,17	60,08	60,36
Průměr	60,06	60,16	60,03	60,09	60,05	60,08	60,08	60,16	60,12	60,36
Sm. odchylka	0,016	0,020	0,018	0,019	0,016	0,026	0,041	0,074	0,036	0,056

Tabulka 4 – Naměřená data pro hliník

Číslo měření	Q5 [mm]		Q4 [mm]		Q3 [mm]		Q2 [mm]		Q1 [mm]	
	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1.	59,89	59,75	59,95	59,78	59,95	59,76	59,93	59,71	59,94	59,55
2.	59,91	59,78	59,96	59,83	59,93	59,78	59,92	59,75	59,89	59,57
3.	59,90	59,8	59,90	59,82	59,90	59,82	59,96	59,78	59,92	59,68
4.	59,89	59,78	59,98	59,73	59,98	59,79	59,99	59,83	59,90	59,59
5.	59,88	59,8	59,92	59,79	59,96	59,84	60,00	59,85	59,96	59,61
Průměr	59,89	59,78	59,94	59,79	59,94	59,80	59,96	59,78	59,92	59,60
Sm. odchylka	0,011	0,020	0,032	0,039	0,030	0,032	0,035	0,057	0,029	0,050

6.1.2 Vyhodnocení kuželovitosti

Kuželovitost byla vypočítána dle vztahu:

$$\varphi = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{D_{vs}-D_{vy}}{h}\right)}{2}$$

Kde: φ – úhel kuželovitosti řezné spáry [°],

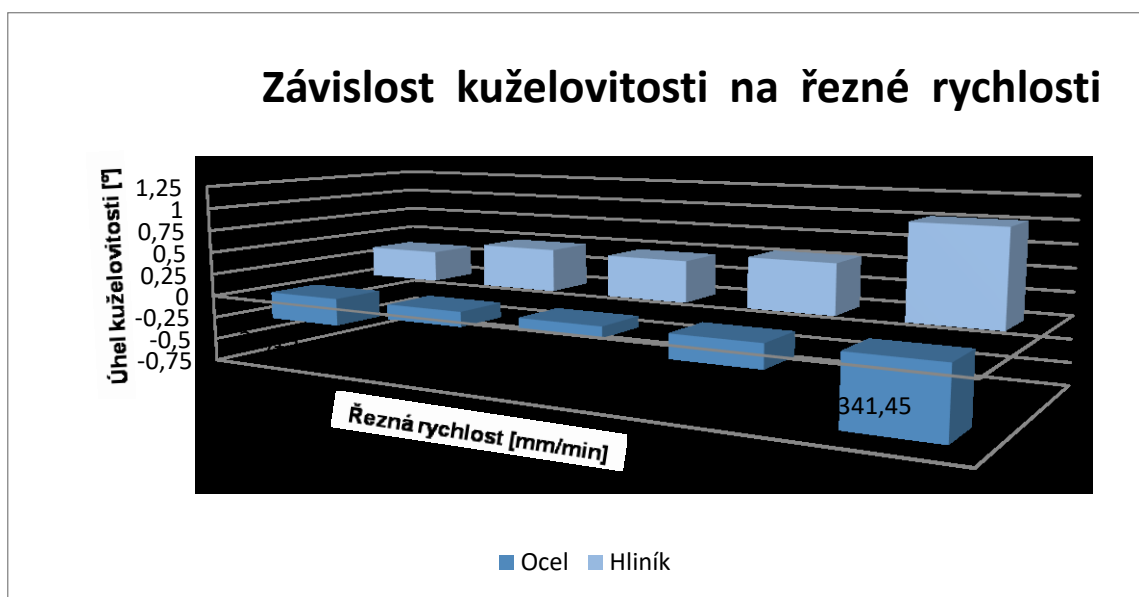
h – tloušťka materiálu [mm],

D_{vs} – průměr obrobku na horní řezné hraně [mm],

D_{vy} – průměr obrobku na dolní řezné hraně [mm],

Tabulka 5 - Kuželovitost při určitých řezných rychlostech

Řez	Řezná rychlost [mm/min]	Ocel	Hliník
		Úhel kuželovitosti	
Q5	34,13	-0° 18'	0° 21'
Q4	68,3	-0° 10'	0° 29'
Q3	136,58	-0° 7'	0° 28'
Q2	204,82	-0° 15'	0° 33'
Q1	341,45	-0° 44'	1° 1'



Graf 1 – Závislost kuželovitosti na řezné rychlosti

Z výsledků můžeme vypořizovat, že řezná rychlost zcela jistě má na velikost úkosu vliv. Patrná je též rozdílná tvrdost řezaných materiálů. Při řezu za stejné řezné rychlosti a tlaku vzniká na hliníkových výrobcích úkos na opačnou stranu. Protože je materiál měkký a řezné podmínky jsou nastaveny na řezání oceli, spára vytvořená paprskem napodobuje jeho přirozený tvar. U oceli lze pozorovat růst úkosu s rostoucí řeznou rychlostí, protože paprsek nestihne svou přirozenou řeznou stopu prořezat. Proto můžeme pozorovat, že řezné rychlosti jsou při těchto podmínkách pro ocel moc vysoké a pro hliník moc nízké. I přes velkou rozmanitost řezných podmínek, úkosy nedosahují kritických hodnot přes 1,5°.

6.2 Drsnost řezného povrchu

Drsnost a kvalita řezného povrchu je jedno z nejdůležitějších kritérií při optimalizaci obrábění. Lepší kvalita se samozřejmě projeví i na ceně řezu. Takže je vhodné volit správnou kvalitu řezu dle využití daného výrobku.

6.2.1 Měření drsnosti povrchu

Zařízení pro snímání drsností povrchů dělíme do několika skupin, podle přenosnosti a podle způsobu snímání. Podle způsobu snímání nejčastěji rozlišujeme zařízení na kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní zařízení jsou nejrozšířenější a jejich největší výhodou je, že jsou použitelné na všechny druhy povrchů a nejsou tolik náročné na čistotu měřené plochy. Jejich velkou nevýhodou je styk měřicího hrotu s měřeným povrchem. Pro měření potřebujeme těsný kontakt a dostatečný odpor materiálu, kdyby byl měřený materiál nedostatečně tvrdý, mohlo by docházet k porušení jeho povrchu a k nepřesnostem v měření. Ale kdyby byl tvrdý moc a přitlačná síla by byla moc velká, mohlo by dojít k poškození měřicího hrotu. Bezkontaktní měření je využíváno téměř výhradně v laboratorních podmínkách. Uskutečňuje se pomocí paprsků elektromagnetického záření. Konkrétně pomocí odrazu, rozptylu, nebo jejich kombinací.

Měření bylo provedeno pomocí 3D scanneru Talysurf CLI500, který je určen na měření menších výrobků.



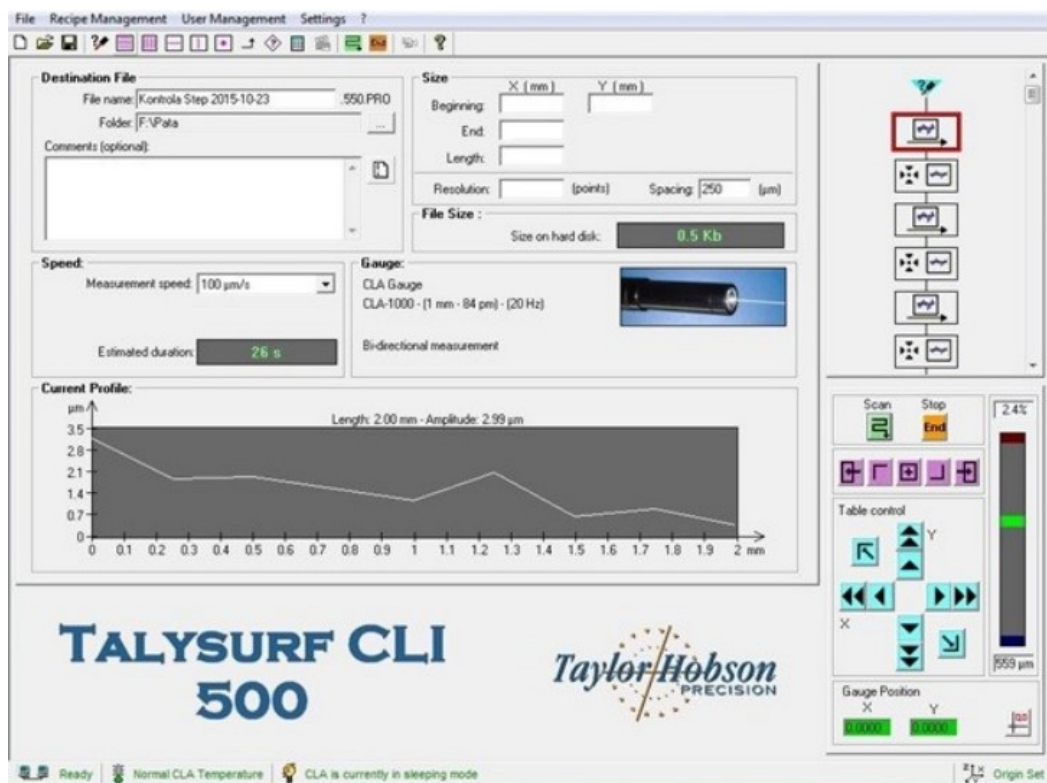
Obrázek 12 – Scanner Talysurf CLI500

Technické parametry scanneru:

- rozměry - D x H x V - 500 x 310 x 450 mm
- pracovní prostor - 50 x 50 x 50 mm
- nosnost - 10 kg
- osové rozlišení - 0,5 μm
- rychlost měření - 30, 15, 10, 5, 1,05 mm/s
- maximální rychlost rychloposuvu - 30 mm/s
- hmotnost - 55 kg

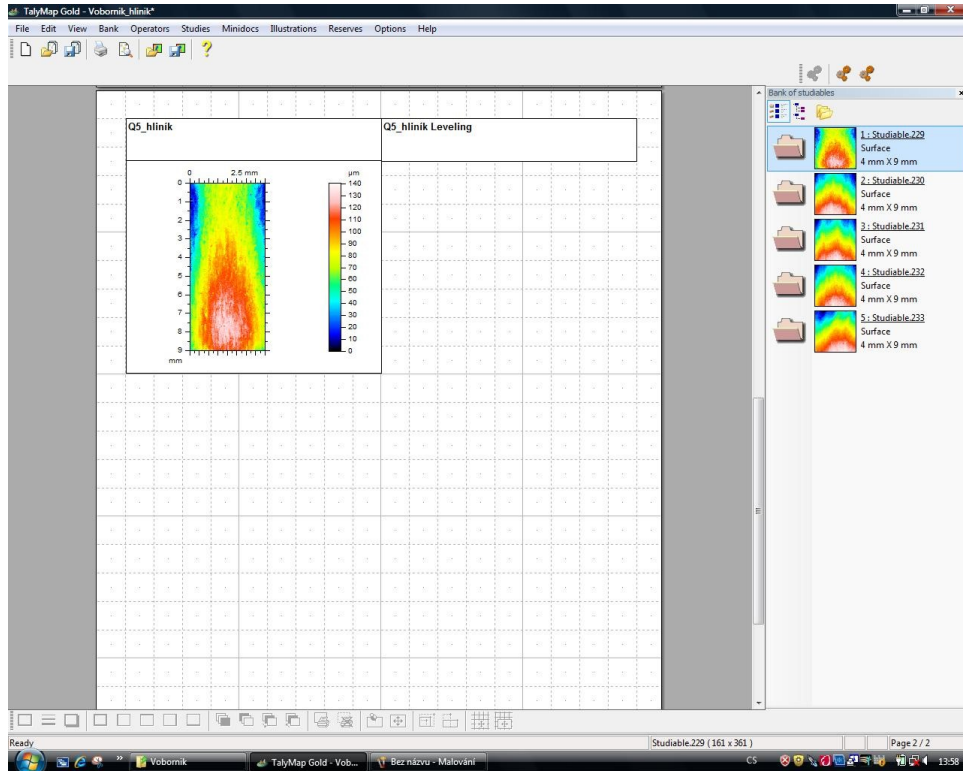
6.2.2 Postup měření

Při měření drsnosti povrchů námi vyrobených vzorků bylo nejprve nutné měřený povrch řádně vyčistit, odmastit a vysušit námi zvolenou část povrchu. Poté bylo nutné upevnit výrobek na měřicí plochu a vhodně nastavit v programu Talysurf velikost měřené plochy, parametry průběhu měření a na přístroji nastavit počáteční bod měření a vzdálenost měřicí čočky od výrobku. Námi měřená plocha měla rozměry 4x9 mm a měření bylo prováděno kolmo na řeznou stopu paprsku, od západu k východu v 361 přejezdech.



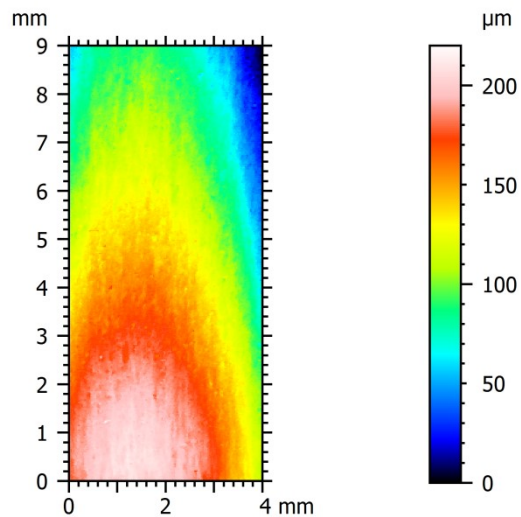
Obrázek 13 – Program Talysurf

Po scannu řezné plochy získáme graf drsnosti, tvaru a vlnitosti povrchu. Naším dalším úkolem je získání drsnosti, vyfiltrování tvaru a vlnitosti povrchu. Veškeré editace a výzkum provádíme v programu Talymap gold.

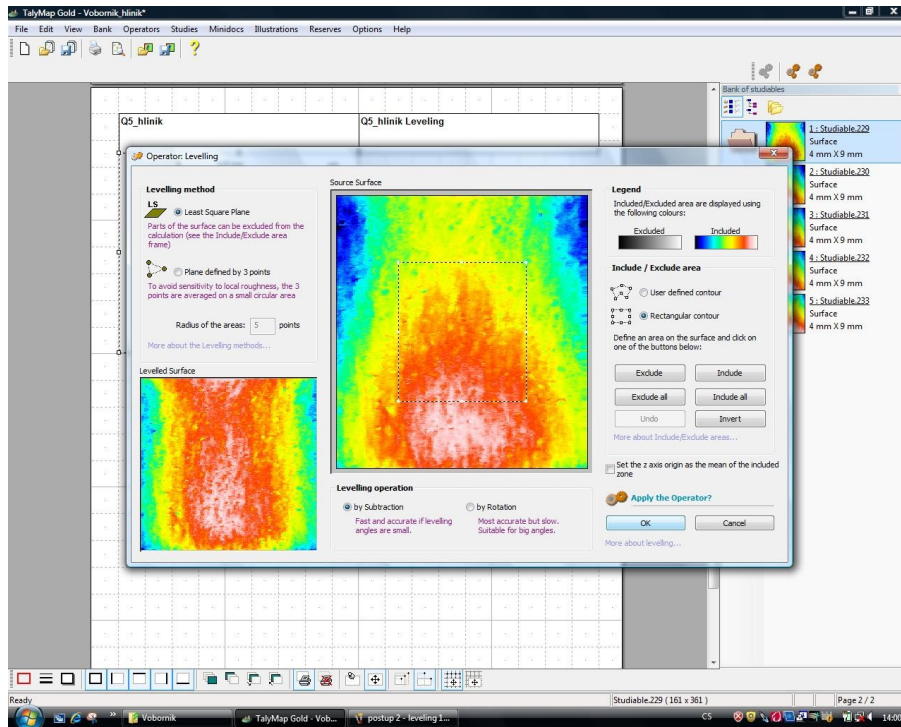


Obrázek 14 – Exportované data v programu Talymap gold

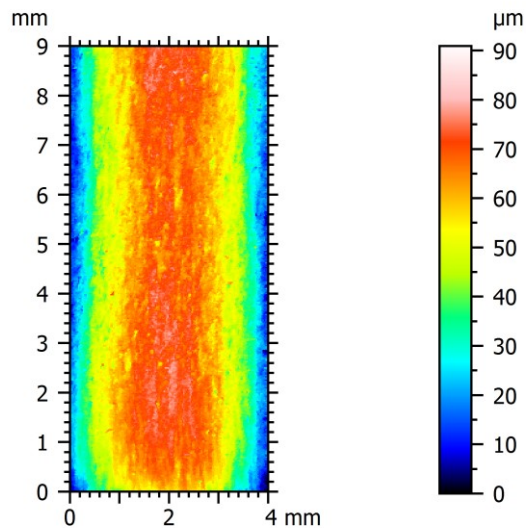
Na obrázku 14 můžeme vidět uživatelské prostředí programu Talymap gold a výsledek scannu drsnosti povrchu společně s tvarem a vlnitostí pro vzorek vyrobený z hliníku, kvality řezu Q5



Obrázek 15 – Graf drsnosti, vlnitosti a tvaru povrchu



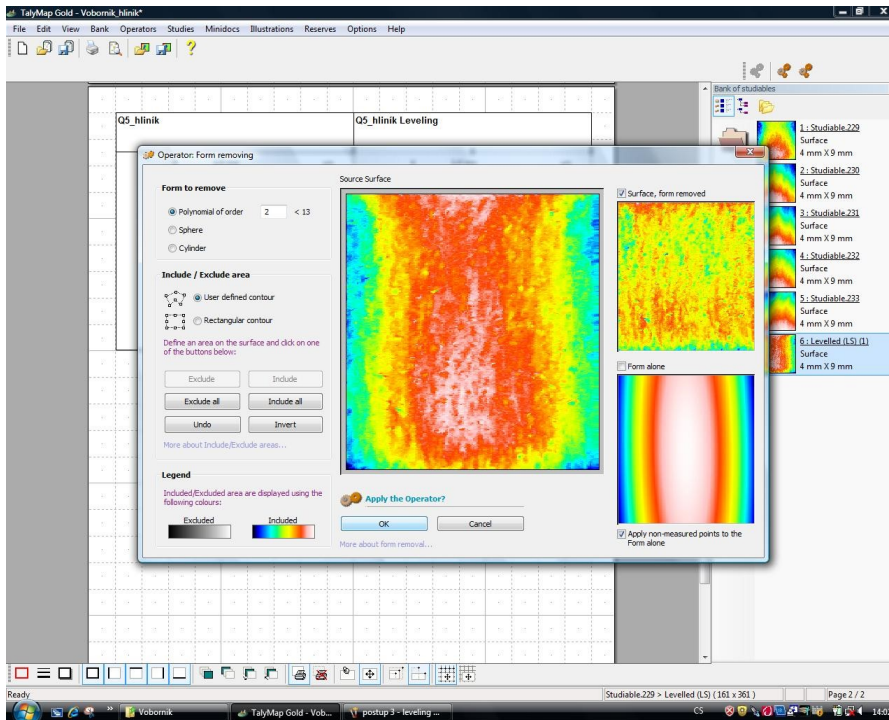
Obrázek 16 – Operátor „levelling“



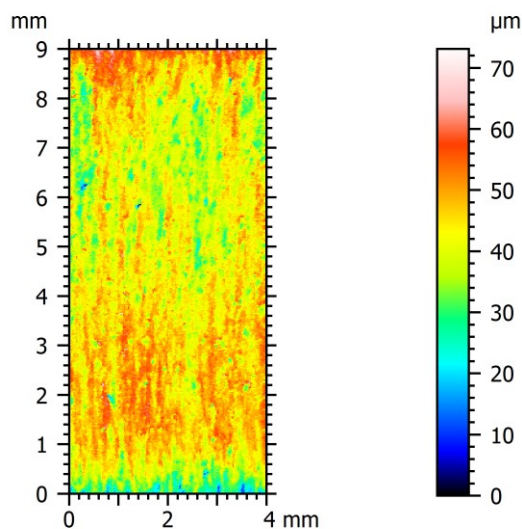
Obrázek 17 – Graf drsnosti po použití operátoru „levelling“

Abychom eliminovali vliv úkosu na výsledky drsnosti, musíme pomocí operátoru „levelling“ odebrat vytvořený úhel a srovnat výsledky na jednu hladinu ve směru řezu. Výsledek této operace můžeme vidět na obrázku 17, ze kterého je zároveň patrné, že kvůli oválnému tvaru výrobku je nejvyšší bod materiálu ve středu scannu a směrem do stran odchyl-

ky klesají. Abychom získali obraz povrchu v rovině, musíme tvar profilu odebrat. Tento úkon se provádí pomocí operátoru „form removing“ – obr. 18.

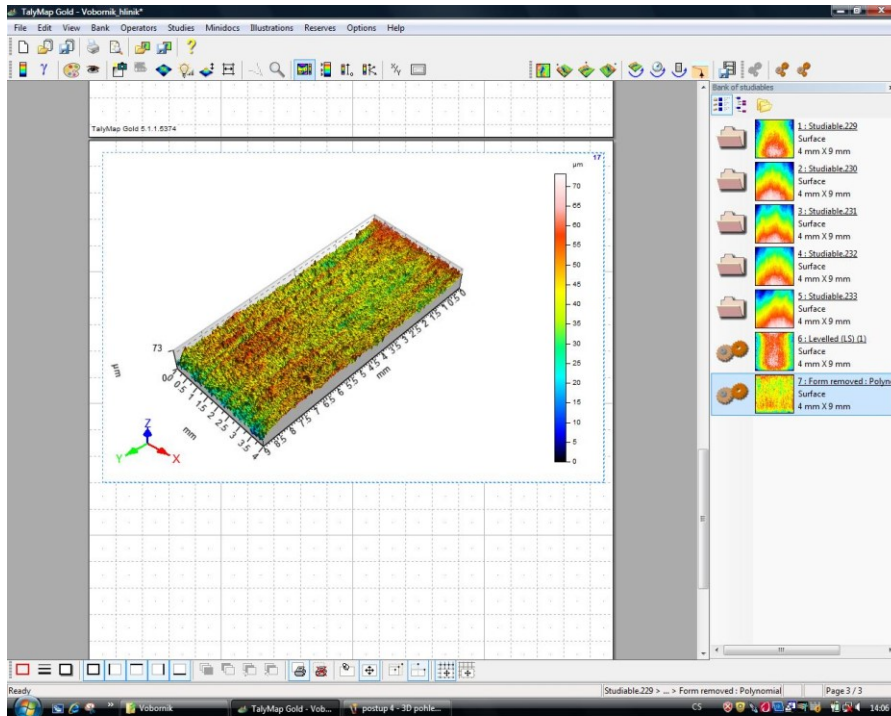


Obrázek 18 – Operátor „form removing“



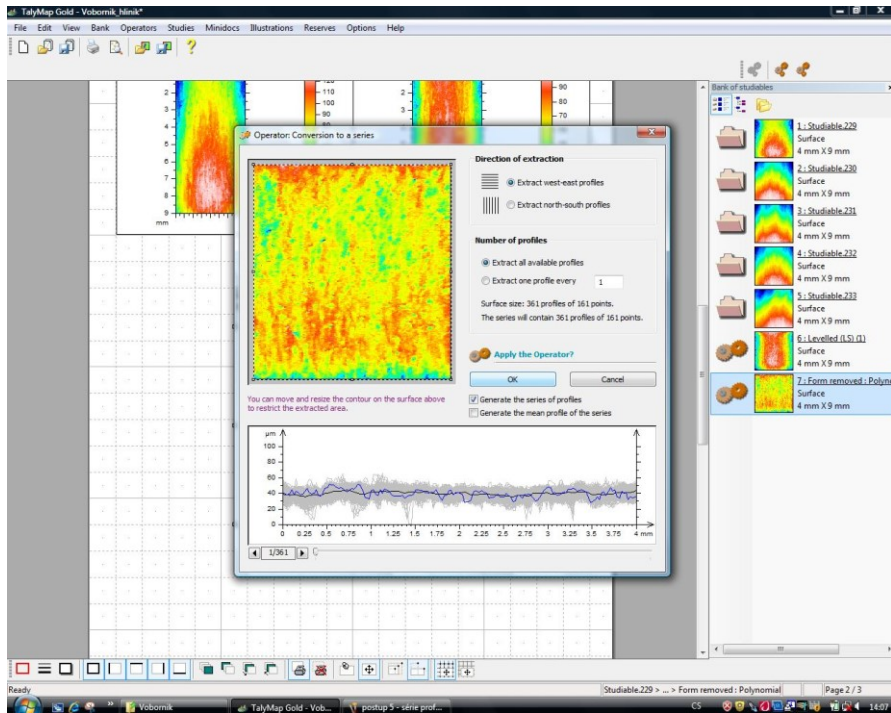
Obrázek 19 – Graf drsnosti po odebrání tvaru a vlnitosti povrchu

Po odebrání tvaru profilu získáme 2D graf drsnosti – obr. 19, který můžeme pomocí programu TalyMap Gold snadno převést do 3D. Ve vytvořeném 3D obrazu struktury povrchu byli dále přidány popisky os, rozměry plochy a barevná stupnice pro lepší orientaci – obr. 20.



Obrázek 20 – 3D graf drsnosti v programu Talymap gold

Dalším krokem je generování profilu drsnosti z 2D grafu drsnosti s odebraným profilem. Ten vygenerujeme pomocí operátoru „conversion to a series“, který vytvoří čárový graf drsnosti profilu s potlačenou vlnitostí spojením hodnot, ze všech 361 měřících přejezdů.



Obrázek 21 – Operátor „conversion to a series“

Z tohoto grafu můžeme dále vygenerovat tabulku drsností povrchu, podle normy ISO 4287 – tabulka 6.

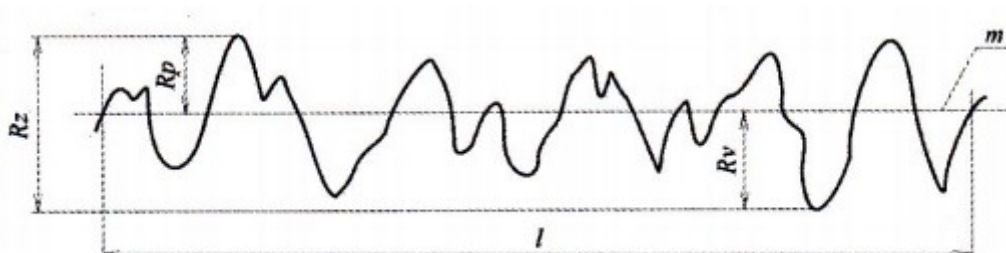
Tabulka 6 – Drsnosti vyhodnocené programem Talymap gold

		Mean	Std dev	Min	Max
ISO 4287					
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	μm	5.24	0.847	3.26	8.52
Rv	μm	6.11	1.20	3.48	11.9
Rz	μm	11.3	1.69	7.04	17.3
Rc	μm	6.76	1.00	3.79	10.6
Rt	μm	15.5	3.47	8.81	32.1
Ra	μm	2.16	0.272	1.39	3.16
Rq	μm	2.72	0.356	1.74	4.03
Rsk		-0.206	0.294	-1.07	0.616
Rku		3.03	0.570	1.90	5.35
Material ratio parameters - Roughness profile					
Rmr	%	2.06	1.44	0.775	7.75
Rdc	μm	4.46	0.608	2.86	6.17

6.2.3 Parametry drsnosti

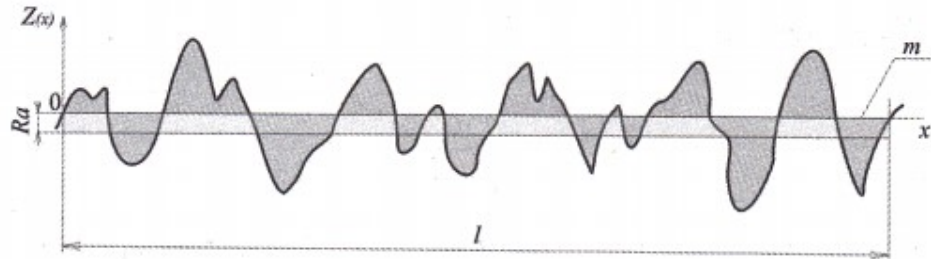
Jak můžeme vidět v tabulce 6, existuje mnoho parametrů, které drsnost povrchu popisují. Tato práce bude vyvozovat výsledky především z těchto parametrů.:

- Rp – Výška největšího výstupku profilu.
- Rv – Hloubka největší prohlubně profilu.
- Rz – Největší výška celého profilu, získáme ji součtem největší hloubky profilu Rv a největšího výstupku profilu Rp.



Obrázek 22 – Maximální výchylky drsnosti [21]

- Ra – Střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky [21].



Obrázek 23 – Střední aritmetická hodnota drsnosti [21]

6.2.4 Naměřené hodnoty drsnosti

Pro jednotlivé kvality řezů u obou materiálů byly srovnány hodnoty Ra a Rz u obou materiálů.

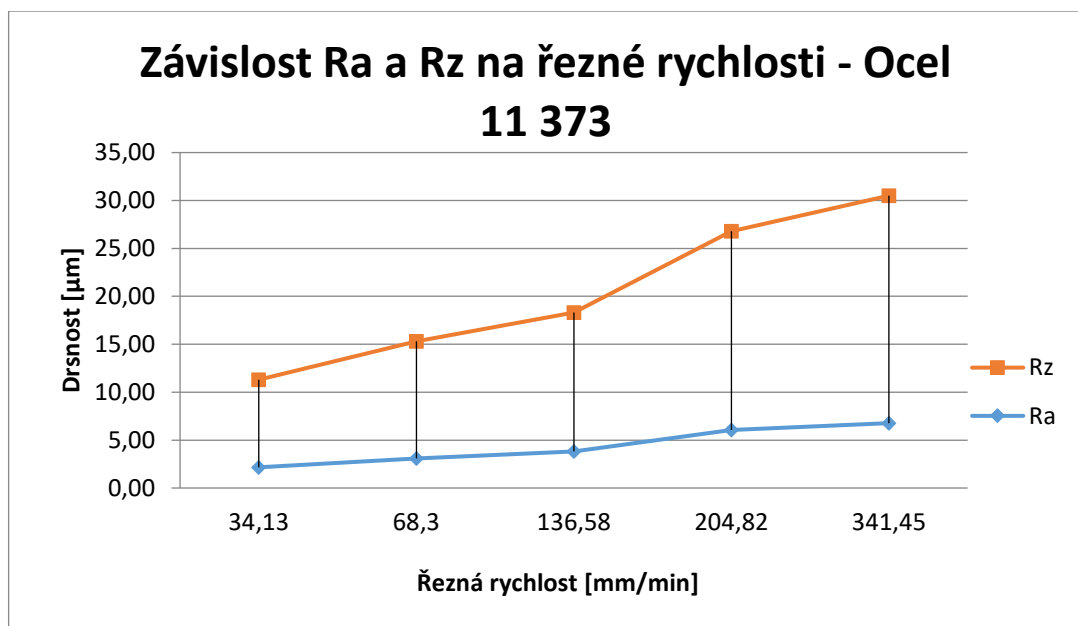
Tabulka 7 – Výsledky měření Ra a Rz pro ocel 11 373

Kvalita řezu	Řezná rychlost [mm/min]	Drsnost	Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
Q5	34,13	Rz	11,30	1,69
		Ra	2,16	0,27
Q4	68,30	Rz	15,30	3,20
		Ra	3,07	0,54
Q3	136,58	Rz	18,30	5,35
		Ra	3,80	1,20
Q2	204,82	Rz	26,80	11,10
		Ra	6,06	3,02
Q1	341,45	Rz	30,50	14,90
		Ra	6,77	3,19

Tabulka 8 – Výsledky měření Ra a Rz pro hliník

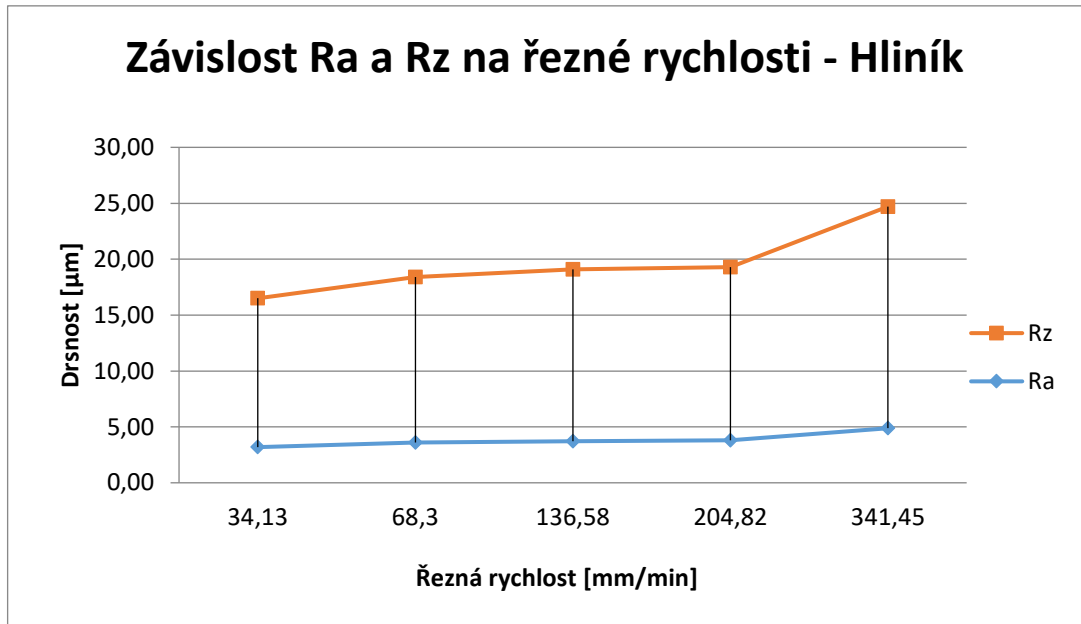
Kvalita řezu	Řezná rychlost [mm/min]	Drsnost	Průměrná hodnota [μm]	Směrodatná odchylka [μm]
Q5	34,13	Rz	16,50	2,47
		Ra	3,19	0,40
Q4	68,30	Rz	18,40	2,19
		Ra	3,61	0,35
Q3	136,58	Rz	19,10	2,35
		Ra	3,71	0,38
Q2	204,82	Rz	19,30	2,33
		Ra	3,80	0,46
Q1	341,45	Rz	24,70	4,12
		Ra	4,88	0,83

6.2.5 Vliv řezné rychlosti na drsnost



Graf 2 – Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti – ocel 11 373

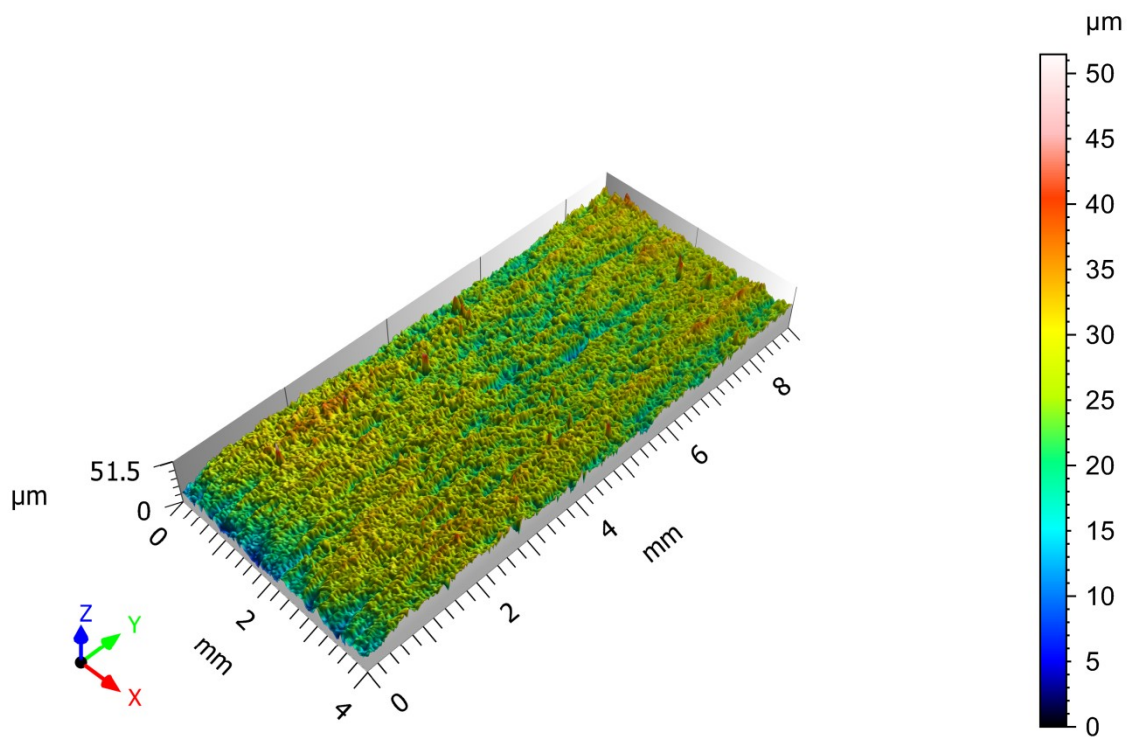
U výrobků z oceli 11 373 může být pozorován v grafu 2 růst drsností Ra i Rz se zvyšující se řeznou rychlostí.



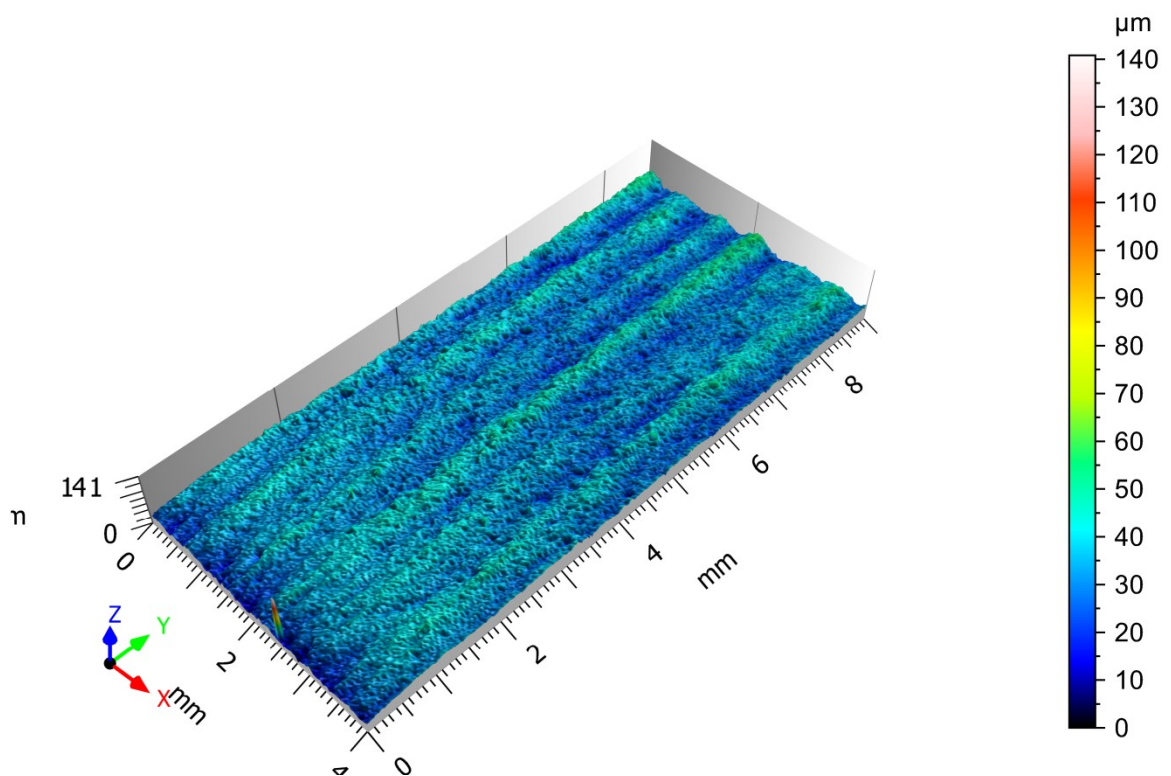
Graf 3 – Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti – hliník

Výrobky z hliníků mají při nejnižší řezné rychlosti vyšší drsnost a při největší řezné rychlosti nižší drsnost, než výrobky ocelové. Drsnosti při řezných rychlostech od 68,30 po 204,82 mm/min jsou si velmi podobné. Příčinou může být příliš vysoký tlak pro tento materiál.

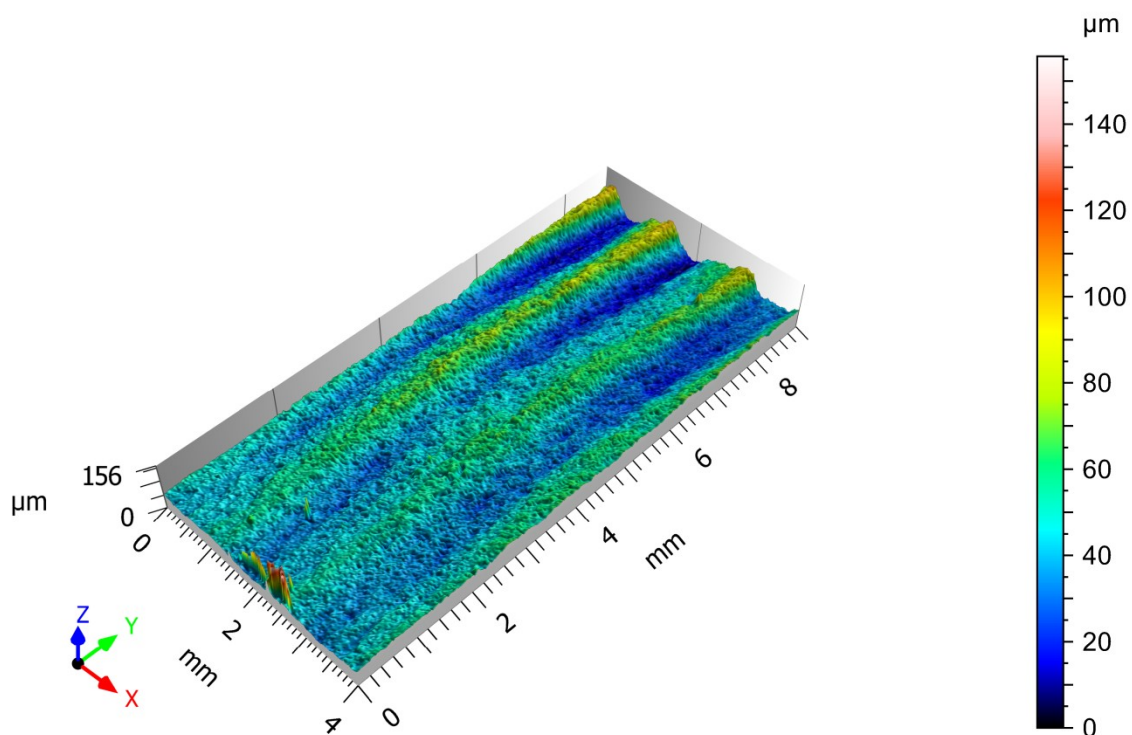
6.2.6 3D snímky textury povrchu pro ocel



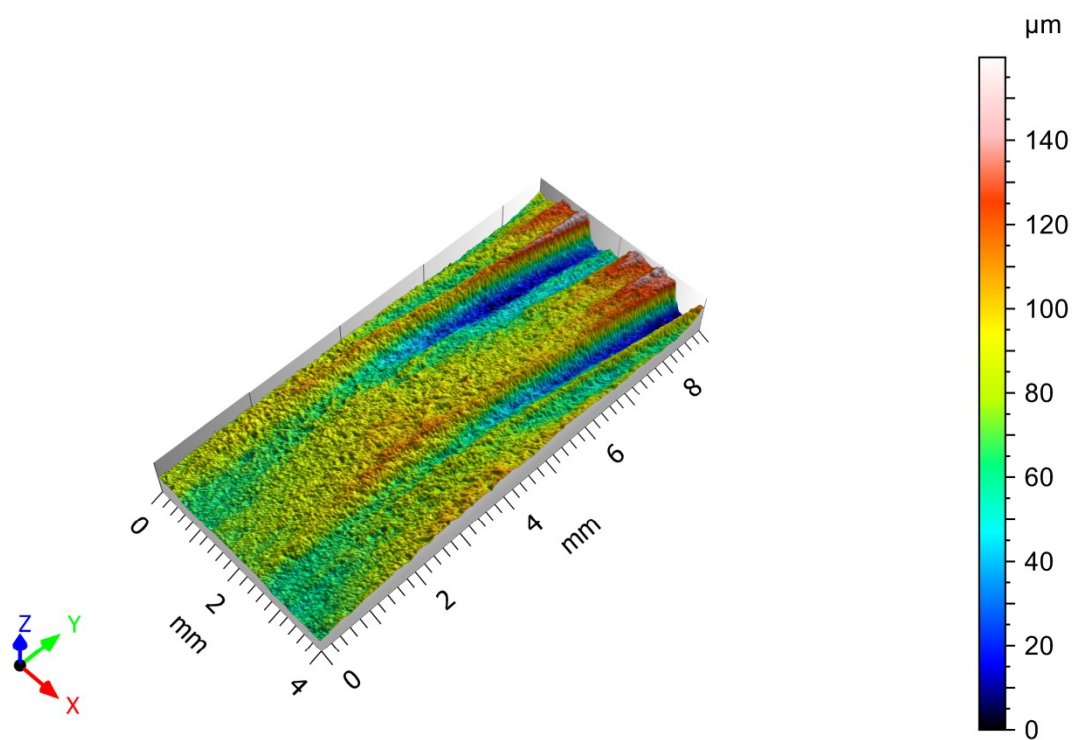
Obrázek 24 – 3D textura povrchu kvality řezu Q5 u oceli



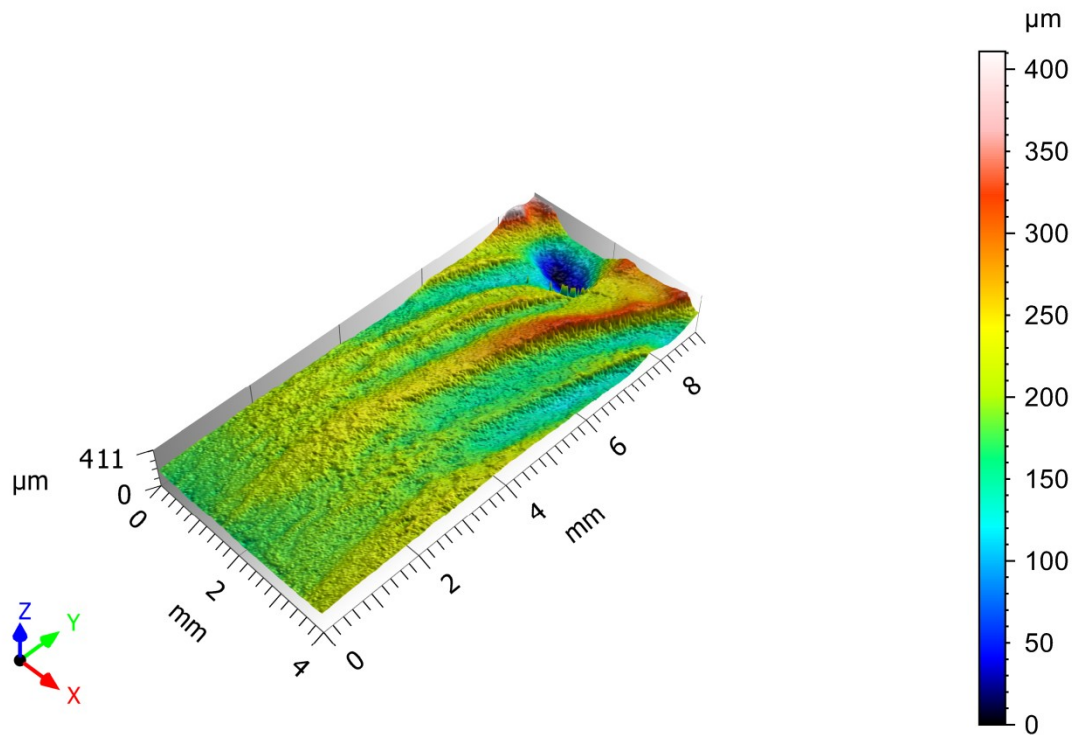
Obrázek 25 – 3D textura povrchu kvality řezu Q4 u oceli



Obrázek 26 – 3D textura povrchu kvality řezu Q3 u oceli

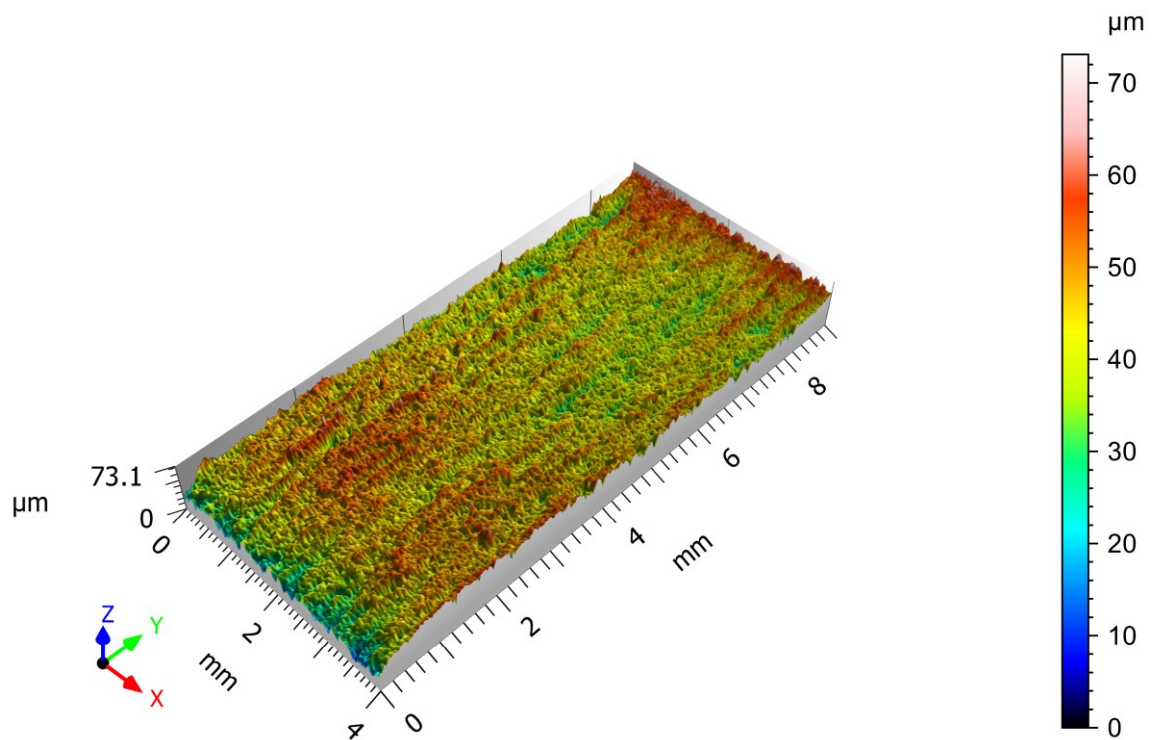


Obrázek 27 – 3D textura povrchu kvality řezu Q2 u oceli

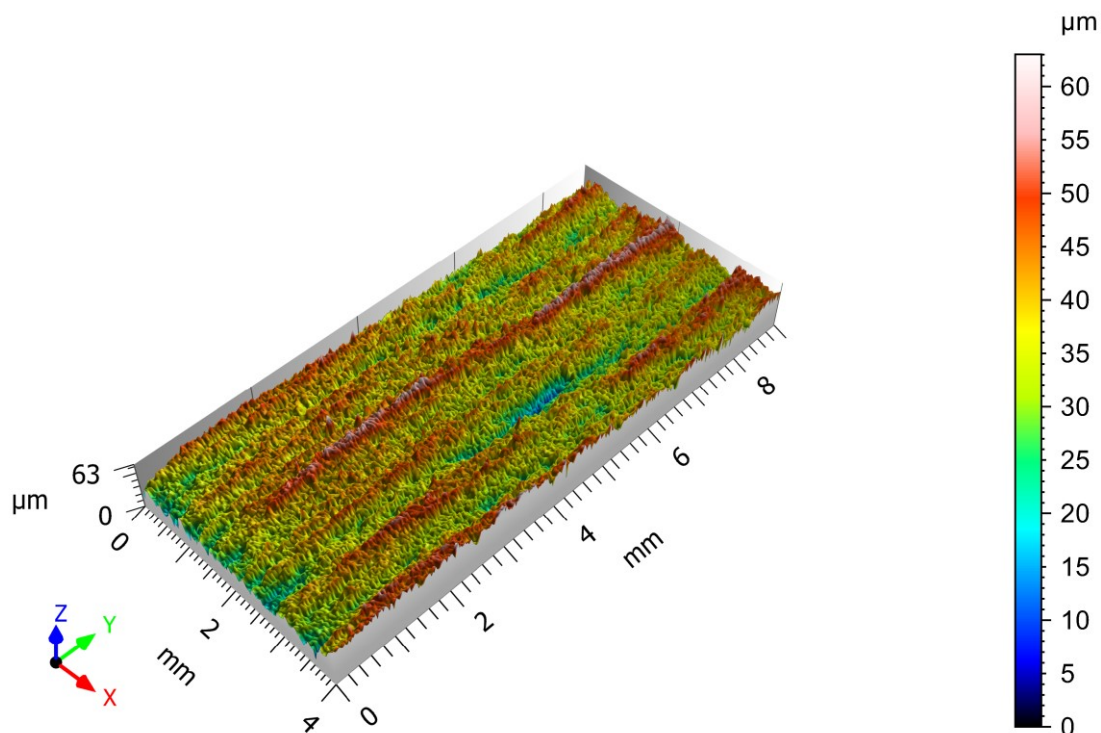


Obrázek 28 – 3D textura povrchu kvality řezu Q1 u oceli

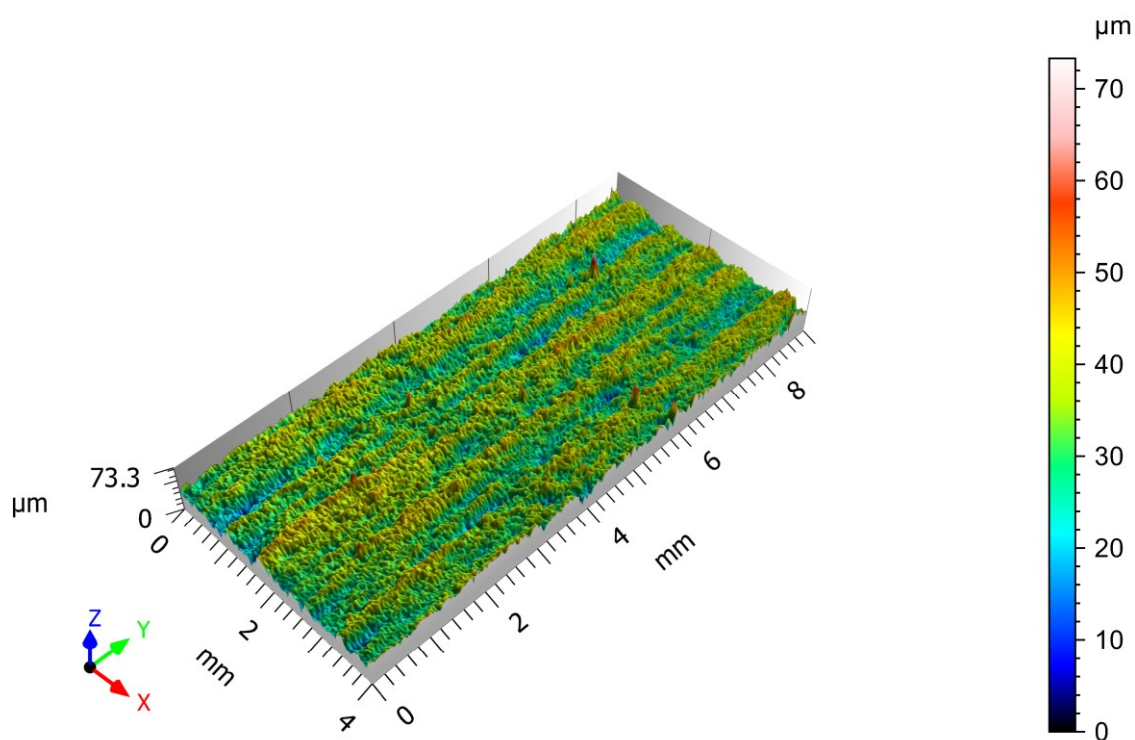
6.2.7 3D snímky textury povrchu pro hliník



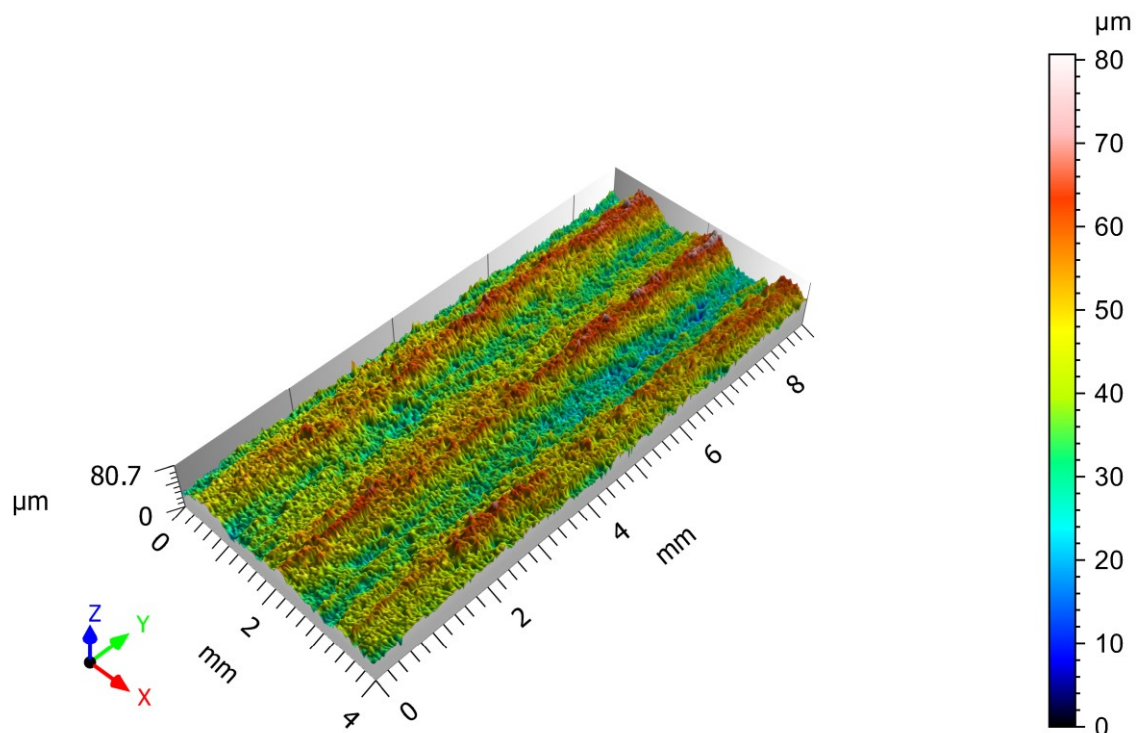
Obrázek 29 – 3D textura povrchu kvality řezu Q5 u hliníku



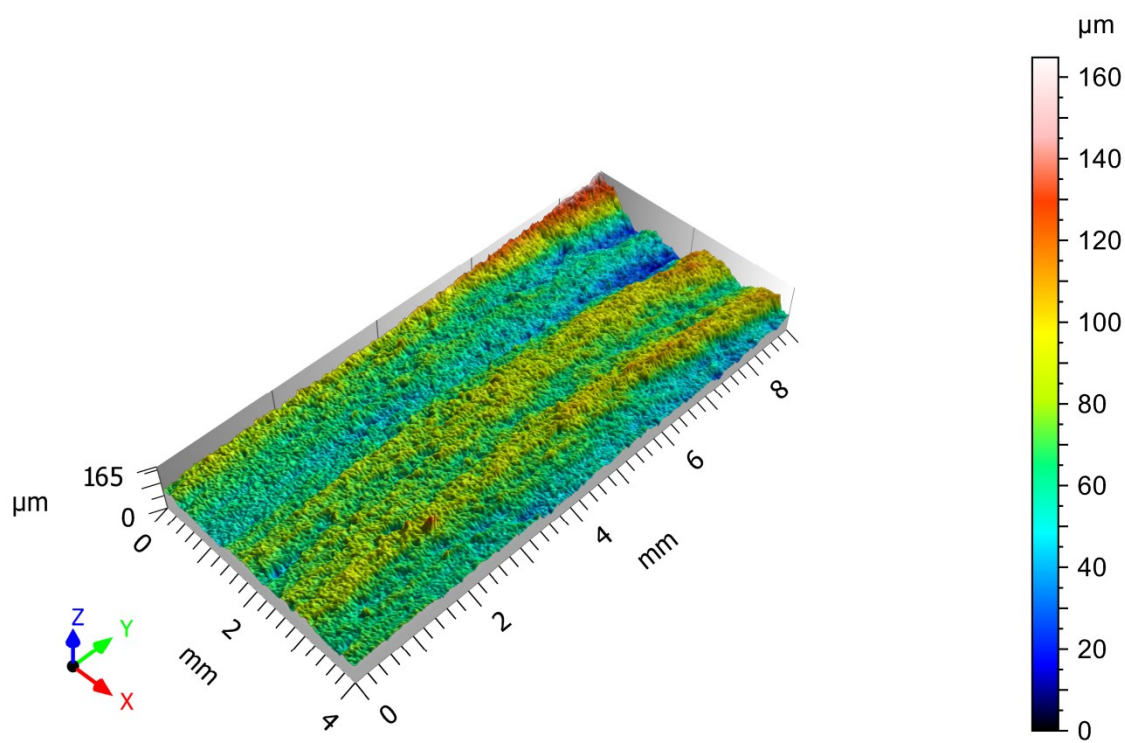
Obrázek 30 – 3D textura povrchu kvality řezu Q4 u hliníku



Obrázek 31 – 3D textura povrchu kvality řezu Q3 u hliníku



Obrázek 32 – 3D textura povrchu kvality řezu Q2 u hliníku



Obrázek 33 – 3D textura povrchu kvality řezu Q1 u hliníku

6.2.8 Komentář k rozdílům

U 3D textur povrchu pro ocel (obrázky 24 – 28) lze sledovat postupné zhoršování kvality řezu a zároveň pozvolné zvětšování zóny striací v důsledku nedostatečného prořezání paprsku materiálem. Oproti tomu textury slitiny hliníku se vizuálně mezi kvalitami Q3 až Q5 téměř nemění a jako hladkou zónu můžeme označit téměř celou plochu řezu. To je pravděpodobně způsobeno příliš velkým řezným tlakem optimalizovaným spíše na řez oceli.

ZÁVĚR

Teoretická část byla vypracována s ohledem na principy metody obrábění vodním paprskem a stanovení základních poznatků potřebných k vyhodnocení jakosti povrchů, které bylo provedeno v praktické části.

Prvním krokem praktické části byla výroba vzorků, které jsou modelovými případy pro malosériovou výrobu ocelových těsnění. Tyto vzorky byly vyrobeny z různých materiálů kvůli zkoumání vlivu technologických parametrů na kvalitu řezné plochy. Pro výrobu vzorků byly zvoleny běžně používané materiály ve strojírenství: konstrukční ocel 11 373 a slitina hliníku 424401. Vzorky byly vyráběny na vodním paprsku Flow Mach 3 za konstantních řezných podmínek pro řez 10 mm tlusté oceli 11 373 s měnící se řeznou rychlostí.

Bylo provedeno měření průměru vstupní a výstupní hrany paprsku z materiálu posuvným měřidlem a následně bylo na základě naměřených údajů provedeno měření kuželovitosti. Z výsledků vyplývá, že pro prořezání optimální řezné stopy by řezné rychlosti musely být pro ocel nižší, protože dochází ke vzniku kladných úkosů. Naopak u hliníku dochází k poměrně výraznému podřezu, takže by bylo vhodné na základě kuželovitosti volit vyšší řezné rychlosti.

Nakonec bylo provedeno vyhodnocení drsnosti povrchů, které byly měřeny zařízením Taylor Hobson Talysurf CLI 500 v náhodně vybraných místech vzorků. Z naměřených dat byl vytvořen prostorový snímek povrchu řezné plochy a byly získány parametry drsnosti Ra a Rz pro vyhodnocování kvality. U vzorků byla porovnávána průměrná hodnota Ra a Rz vzhledem k řezné rychlosti. Z výsledků bylo patrné, že řezný tlak pro hliník byl příliš vysoký. Kvůli vysokému tlaku docházelo k malým rozdílům v drsnostech Ra a Rz při různých řezných rychlostech a výsledky na rozdíl od ocelí, kde byly rozdíly výrazné, splývaly.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SADÍLEK, Marek. Nekonvenční metody obrábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8
- [2] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej Hloch. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1.vyd. Jiří Pustina: Ostrava - Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [3] Flow [online]. 2011 [cit. 22.05.2019]. History. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/FlowWaterjet/media/Flow/8_Footer/Resources/Downloads/HyperPressure_Whitepaper.pdf
- [4] DVOŘÁKOVÁ, Jana, DVOŘÁK, Jaromír. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. MM Průmyslové spektrum [online]. 2007, č. 4 [cit. 22.05.2019]. Dostupný z <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologiei-awj.html>
- [5] Stroje pro řezání vodním paprskem - Flow Waterjet [online]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/Prectete-si-vice/Vyhody-vodniho-paprsku.aspx#simplicity>
- [6] HUMÁR, Anton. Technologie I-Technologie obrábění-3.část [online]. Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005, 57 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [7] MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [8] Strojnícka fakulta TUKE [online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: https://www.sjf.tuke.sk/umpadi/taipvpp/2013/journal/21_Panda_Pristupcak_PROGRESIVNE.pdf
- [9] Talpa-rfv.: Řežeme vodou. [online]. [cit. 22. 05. 2019]. Dostupné z: <http://www.rezemevodou.cz/rezani-vodnim-paprskem.php>. DVOŘÁK, Jaromír a Jana
- [10] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ.[online].[cit. 22.05.2019].Dostupnéz:<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencnitechnologiei-awj.html>

- [11] HLA VATÝ, Ivo. VŠB – Technická univerzita Ostrava [online][cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-17.pdf>
- [12] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. OPUS – Vzdělanostní síť I výrobním technologiím. Nekonenční technologie obrábění. Brno, 2012. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
- [13] DVOŘÁKOVÁ. Glassrevue: Technika, technologie. [online]. 15/2008. [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
- [14] Hliníkové profily, hliníkové plechy e-shop [online]. Copyright © [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>
- [15] CZ FERRO STEEL - hutní materiál, ocelové trubky kalibrované, tažené, uzavřené profily [online]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11373.pdf>
- [16] Produkty a služby. Produkty a služby [online]. Dostupné z: <https://www.kalina.cz/>
- [17] KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1. Vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [18] KOCMAN, K a PROKOP, J. Technologie obrábění. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1992-2.
- [19] Princip řezání vodním paprskem | Řezání CNC. Řezání vodním paprskem na zakázku | Řezání CNC [online]. Copyright © Copyright 2016 Morkus Morava s.r.o. Všechna práva vyhrazena [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>
- [20] WaterJet - cięcie materiałów strumieniem wody.. Skandom. Cięcie wodą - Łódź i region łódzki. [online]. Copyright © 2013 [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://www.skandom.pl/waterjet.html>
- [21] Ing. Lenka Petřkovská, Ph.D. - TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD [cit. 22.05.2019]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

WJM	Obrábění čistým vodním paprskem
AWJM	Obrábění abrazivním vodním paprskem
ASJ	Paprsek abrazivní suspenze
Q1	Dělicí řez
Q2	Hrubý řez
Q3	Střední řez
Q4	Kvalitní řez
Q5	Nejlepší řez
v	Rychlost proudění
p	Tlak v kapalině
ρ	Hustota kapaliny
Rp	Výška největšího výstupku profilu
Rv	Hloubka největší prohlubně profilu
Rz	Největší výška celého profilu
Ra	Střední aritmetická odchylka průměru
h	Tloušťka materiálu
D _{vy}	Průměr výstupní hrany
D _{vs}	Průměr vstupní hrany
φ	Úhel kuželovitosti řezné spáry
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma řezání s abrazivem a bez abraziva [11]	12
Obrázek 2 – Schéma zařízení vodního paprsku [19]	19
Obrázek 3 – Schéma multiplikátoru [20].....	20
Obrázek 4 – Hodnota mesh = 4 [12].....	22
Obrázek 5 – Vznik úkosů v řezaném materiálu [11].	24
Obrázek 6 – Povrch obrobené plochy technologií AWJM [11].	25
Obrázek 7 – Stupně jakosti řezu	26
Obrázek 8 – Flow Mach 3 – 3020b.....	30
Obrázek 9 – Čerpadlo 30 HP Hplex II.....	30
Obrázek 10 – Výroba vzorků.....	32
Obrázek 11 – Posuvné měřítko Mitutoyo	33
Obrázek 12 – Scanner Talysurf CLI500	36
Obrázek 13 – Program Talymap	37
Obrázek 14 – Exportované data v programu Talymap gold.....	38
Obrázek 15 – Graf drsnosti, vlnitosti a tvaru povrchu.....	39
Obrázek 16 – Operátor „levelling“	39
Obrázek 17 – Graf drsnosti po použití operátoru „levelling“	39
Obrázek 18 – Operátor „form removing“	40
Obrázek 19 – Graf drsnosti po odebrání tvaru a vlnitosti povrchu.....	40
Obrázek 20 – 3D graf drsnosti v programu Talymap gold	41
Obrázek 21 – Operátor „conversion to a series“.....	41
Obrázek 22 – Maximální výchylky drsnosti [21]	42
Obrázek 23 – Střední aritmetická hodnota drsnosti [21]	43
Obrázek 24 – 3D textura povrchu kvality řezu Q5 u oceli	46
Obrázek 25 – 3D textura povrchu kvality řezu Q4 u oceli	46
Obrázek 26 – 3D textura povrchu kvality řezu Q3 u oceli	47
Obrázek 27 – 3D textura povrchu kvality řezu Q2 u oceli	47
Obrázek 28 – 3D textura povrchu kvality řezu Q1 u oceli	48
Obrázek 29 – 3D textura povrchu kvality řezu Q5 u hliníku.....	48
Obrázek 30 – 3D textura povrchu kvality řezu Q4 u hliníku.....	49
Obrázek 31 – 3D textura povrchu kvality řezu Q3 u hliníku.....	49
Obrázek 32 – 3D textura povrchu kvality řezu Q2 u hliníku.....	50

Obrázek 33 – 3D textura povrchu kvality řezu Q1 u hliníku..... 50

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Povrch obrobené plochy technologií AWJM [12].....	26
Tabulka 2 – Technické parametry stroje.....	29
Tabulka 3 – Naměřená data pro ocel	34
Tabulka 4 – Naměřená data pro hliník.....	34
Tabulka 5 - Kuželovitost při určitých řezných rychlostech	35
Tabulka 6 – Drsnosti vyhodnocené programem Talymap gold.....	42
Tabulka 7 – Výsledky měření Ra a Rz pro ocel 11 373	43
Tabulka 8 – Výsledky měření Ra a Rz pro hliník.....	44

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Závislost kuželovitosti na řezné rychlosti	35
Graf 2 – Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti – ocel 11 373.....	44
Graf 3 – Závislost Ra a Rz na řezné rychlosti – hliník.....	45