



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI VYUŽITÍ NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU VE STROJÍRENSKÉ FIRMĚ

USE OF WJM/AWJ METHOD IN A FIRM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Pavel STRNAD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Strnad

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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

Možnosti využití nekonvenční technologie vodního paprsku ve strojírenské firmě

v anglickém jazyce:

Use of WJM/AWJ Method in a Firm

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Rozbor metody WJM/AWJ (plošné obrábění versus 3D).
3. Stroje na světovém trhu.
4. Účel a využití ve firmě.
5. Zhodnocení v podmínkách firmy (likvidace odpadu, ekonomické podmínky).
6. Diskuze.
7. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše zaměřená na stroje dostupné v současné době. Možnosti jejich využití jsou dokumentovány ukázkami z prostředí strojírenské firmy.

Seznam odborné literatury:

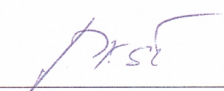
1. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie (Advanced methods of material removal). 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.
2. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 1. vyd. Ostrava-Poruba: Jirí Pustina, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
3. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi - WJM. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
4. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
5. Příručka obrábění, kniha pro praktiky. 1. vyd. Praha: Sandvik CZ, s. r. o. a Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-972299-4-6.
6. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Úvaly: ALBRA, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Kalivoda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 27.11.2013

L.S.



prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Posouzení využití technologie obrábění materiálu nekonvenční metodou řezání pomocí abrazivního vodního paprsku v prostředí strojírenské firmy. Možnosti využití této technologie s ohledem na její technologické možnosti a limity. Předvedení základních vlastností a chování této metody při řezání na vzorcích z korozivzdorné oceli. Posouzení a rozbor provedených zkoušek.

Klíčová slova

Abrazivní vodní paprsek, řezání vodním paprskem, obrábění, řezací hlava, vysokotlaké čerpadlo, kvalita povrchu řezu.

ABSTRACT

Assessment of the use of technology of machining material by unconventional method for cutting using abrasive waterjet in engineering company. The possibilities of this technology with respect to its technological possibilities and limits. Demonstration of basic capabilities and behavior of this method when cutting the samples of stainless steel. The assessment and analysis of the executed tests.

Key words

Abrasive waterjet, waterjet cutting, machining, cutting head, high pressure pump, the quality of the cut surface.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNAD, Pavel. *Možnosti využití nekonvenční technologie vodního paprsku ve strojírenské firmě*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 33 s. 2 přílohy. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti využití nekonvenční technologie vodního paprsku ve strojírenské firmě** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Pavel Strnad

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně, za vedení při realizaci této bakalářské práce za poskytnutí cenných rad a za spolupráci při laboratorním měření.

Dále tímto děkuji doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc. z VUT v Brně, za poskytnutí laboratorního vybavení a spolupráci při měření zkušebních vzorků.

Děkuji také kolektivu firmy IN-EKO Team, s.r.o. zvláště pak Ing. Petru Krábkovi za pomoc při výrobě zkušebních vzorků pro tuto bakalářskou práci.

V neposlední řadě bych také rád poděkoval všem členům mé rodiny za podporu a poskytnutí dostatečného prostoru pro studium a přípravu této závěrečné práce.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ABSTRAKT | 4 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 5 |
| PODĚKOVÁNÍ | 6 |
| OBSAH | 7 |
| ÚVOD | 9 |
| 1 ROZBOR METODY WJM/AWJ | 10 |
| 1.1 Základní rozdělení metod obrábění | 10 |
| 1.1.1 Nekonenční metody obrábění | 10 |
| 1.2 Obrábění vodním paprsek | 10 |
| 1.2.1 Metoda WJM/AWJ | 10 |
| 1.2.2 Využití rotační osy a technologie 3D hlavy..... | 11 |
| 1.2.3 Robotické systémy WJM | 12 |
| 1.2.4 Micro AWJ | 13 |
| 2 STROJE NA SVĚTOVÉM TRHU | 14 |
| 2.1 OMAX | 14 |
| 2.2 WARDJET | 14 |
| 2.3 FLOW | 14 |
| 2.4 KMT Waterjet..... | 14 |
| 2.5 TECHNI Waterjet | 14 |
| 3 ÚČEL A VYUŽITÍ VE FIRMĚ | 15 |
| 3.1 Typ zařízení využívaný ve firmě | 15 |
| 3.2 Účel využití ve firmě | 16 |
| 3.3 Likvidace odpadu..... | 16 |
| 4 PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ | 17 |
| 4.1 Příprava vzorků..... | 17 |
| 4.2 Posouzení kvality povrchu řezu jednotlivých vzorků..... | 19 |
| 4.3 Měření kvality řezné plochy | 21 |
| 4.3.1 Měření struktury řezné plochy kontaktní metodou..... | 22 |
| 4.3.2 Zobrazení textury povrchu nekontaktní optickou metodou..... | 25 |
| 4.4 Zkouška řezání tenké přepážky abrazivním vodním paprskem..... | 27 |
| 5 DISKUZE | 28 |
| 5.1 Zkosení plochy řezu..... | 28 |
| 5.2 Tvoření zóny s výskytem striace | 28 |
| 5.3 Narušení vstupní řezné hrany | 29 |

| | |
|--|----|
| 5.4 Řezání tenkých přepážek | 29 |
| ZÁVĚR | 30 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 31 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 32 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 33 |

ÚVOD

Tato bakalářská práce je vypracována za účelem popsat a zhodnotit možnosti využití technologie vodního paprsku v běžném provozu strojírenské firmy. Jejím účelem je popsat jaké je nynější využití technologie řezání vodním paprskem s ohledem na jeho výhody a také na nedostatky plynoucí z principu této metody řezání.

Dále v této práci budou popsány základní způsoby řezání vodním paprskem tedy metody AWJ/WJM což je řezání čistým vodním paprskem při metodě označované jako WJM a řezání vodním paprskem s přidáním abraziva v případě metody AWJ. Bude také uveden přehled některých významných výrobců zařízení využívající k řezání tuto technologii.

Pro účely této bakalářské práce byly vyrobeny vzorky z korozivzdorné oceli různých tloušťek a pro srovnání rozdílného chování při řezání vodním paprskem i jeden vzorek z keramiky. Na těchto vzorcích budou předvedeny některé vlastnosti vodního paprsku, které ovlivňují její použití a možnosti využití pro obrábění. Na zkušebních vzorcích bude také provedeno hodnocení kvality povrchu po řezání nejdříve vizuálním srovnáním s kategoriemi povrchu řezné plochy, dále pak měření struktury povrchu kontaktní metodou a také nekontaktní optickou metodou pro měření struktury povrchu hodnocené plochy na 3D optickém profilometru Talysurf CCI Lite od firmy Taylor Hobson. Příklady výsledků některých měření tímto přístrojem, pak budou součástí přílohy.

Provedené zkoušky budou na závěr této bakalářské práce hodnoceny formou diskuze k výsledkům jednotlivých měření a srovnáním provedených vzorků.

1 ROZBOR METODY WJM/AWJ

Tato kapitola se bude věnovat přehledu základních kategorií nekonvenčního obrábění, zvláště se pak bude zabývat metodou obrábění vysokotlakým vodním paprskem. Popsány zde tak budou metody AWJ a WJM a bude rovněž zmíněna metoda prostorového obrábění 3D, vodním paprskem.

1.1 Základní rozdělení metod obrábění

Obrábění řezáním má významnou úlohu z hlediska možnosti použít jej pro svoji všestrannost a schopnost dosáhnout nejvyšší pracovní přesnosti. Přibližně od devadesátých let minulého století se dělí řezání do třech kategorií [1]:

-**řezání**, které zahrnuje obrábění s definovanou geometrií nástroje,

-**broušení**,

-**progresivní nebo nekonvenční metody obrábění**, kde je k obrábění využíváno fyzikální, elektrické, chemické a jiné zdroje energie.

1.1.1 Nekonvenční metody obrábění

Nekonvenční metody obrábění využívají k odebrání materiálu mimo mechanické energie i jiné formy energie pro obrobění materiálu, které nejsou pouhým okem rozlišitelné (jedná se o mikro až nanočástice) a u tohoto typu obrábění nedochází k přímému kontaktu nástroje jako takového s obráběným materiálem, ale využívá se zde jevů elektrických, tepelných, nebo chemických. Nekonvenční metody obrábění dělíme na [1]:

-**elektrotepelné**, které zahrnují například elektrojiskrové obrábění, laserový paprsek, elektronový paprsek, plazmový paprsek,

-**elektrochemické**

-**mechanické**, které zahrnují řezání ultrazvukem, vodním paprskem, nebo abrazivním vodním paprskem.

1.2 Obrábění vodním paprsek

Řezání a dělení materiálů pomocí vodního paprsku spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem dopadu úzkého proudu vodního paprsku s vysokou rychlostí a kinetickou energií na jednotku plochy [1].

1.2.1 Metoda WJM/AWJ

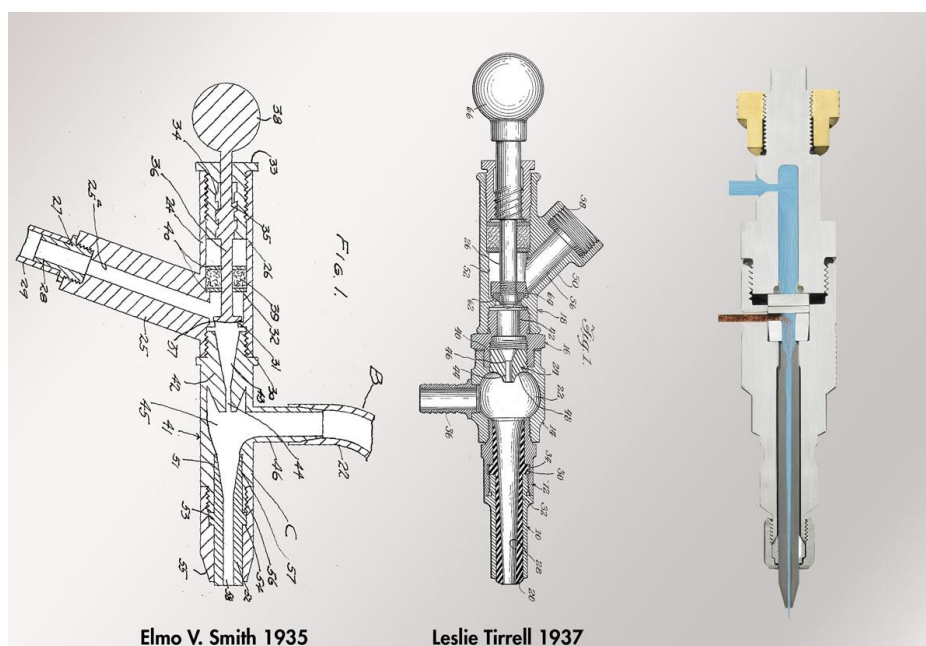
Základní rozdíl mezi samostatným vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je v přidávání jemného brusiva do proudu vody.

Dělení materiálů čistým vodním paprskem pracuje na principu úběru materiálu vysokotlakého proudu vody, který prochází tryskou o průměru přibližně 0,3 mm. Tento paprsek má asi dvakrát až čtyřikrát vyšší rychlost než rychlost zvuku. Proces řezání materiálu se odehrává ve dvou fázích [7]:

- působením vysokého tlaku kapaliny vzniká prohloubení, které se dále mění v díru,
- v druhé fázi dochází k dalšímu prohlubování a vytváření řezné mezery.

Metoda WJM je vhodná zvláště pro obrábění měkkých materiálů, které nekladou paprsku velký odpor, jako je například guma, některé plasty a dokonce i například mražené potraviny.

V případě abrazivního vodního paprsku, tedy metody AWJ, je do proudu vody přidáván abrazivní materiál a zvyšuje se tak mechanický účinek úběru materiálu [7]. Díky tomu je možné obrábět vodním paprskem celou řadu dalších materiálů, jako je například ocel, keramika, kámen a další. K řezání v těchto systémech pak slouží k tomuto účelu navržená speciální řezací hlava (obr. 1), která zajišťuje smíchání abraziva s vysokotlakým vodním proudem a vytvoření dostatečně tenkého a intenzivního abrazivního paprsku této směsi.



Obr. 1 Ukázka vývoje řezné hlavy pro AWJ od roku 1935 a v současnosti [14].

Používané abrazivní materiály dělíme na základě hustoty na lehké a těžké, kde mezi těžké materiály řadíme například granát ($\rho = 4 \text{ g.cm}^{-3}$) a ocelové piliny ($\rho = 8 \text{ g.cm}^{-3}$). Mezi lehké materiály patří křemičitý písek ($\rho = 2,5 \text{ g.cm}^{-3}$) a měděné piliny ($\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$). Hustota má vliv na pohyb částic a tím i na dělicí proces. Důležitý je poměr tvrdosti abrazivního materiálu vůči tvrdosti řezaného materiálu. Nejznámějším druhem abrazivního materiálu je tříděný křemičitý písek, granát, jemný oxid hlinitý, nebo částičky ledu, z kterých je tvořený tzv. kryogenní vodní paprsek [7].

1.2.2 Využití rotační osy a technologie 3D hlavy

Systémy AWJ umožňují kromě základních již popsaných funkcí řezání v ploše i obrábění tvarově složitějších prostorových obrobků. K tomu je možné doplnit zařízení o pětiosou řezací hlavu. Zařízení je pak schopno v jedné operaci obrábět například zkosené hrany a podobně.

Systémy AWJ je možné také doplnit i rotační osou což je přímo poháněné zařízení, schopné přesného polohování obrobku pod paprskem řezací vody. Extrémní přesnost

rotační osy je ideální pro přesné aplikace, jako jsou lékařské komponenty a zároveň je rotační osa dostatečně výkonná, aby dokázala otáčet relativně velké trubky například pro architektonické a průmyslové aplikace [5].



Obr. 2 Zařízení AWJ s rotační osou a 3D řeznou hlavou [5].

1.2.3 Robotické systémy WJM

Schopnost řezat vodním paprskem i objemné 3D objekty mají robotické systémy kombinované s řezací hlavou pro řezání vodním paprskem. Tento způsob je využíván pro řezání měkkých materiálů čistým vodním paprskem bez přidání abrazivního materiálu a mají využití například v automobilovém průmyslu, pro vyřezávání koberců, dveřních výplní a dalších dílů automobilů.



Obr. 3 Robotická ruka s WJM [14].

1.2.4 Micro AWJ

Vzhledem k výhodám řezání materiálu abrazivním vodním paprskem a jeho rozšíření do mnoha oblastí ve strojírenství, vzniká tlak na další vývoj těchto zařízení a umožnění výroby stále menších dílců, výrobci tak stále přemýšlejí jak toho dosáhnout. Zmenšování v této oblasti však brání mnohé komplikace. Jednou z nich je například zmenšování rozměrů trysky a průměru řezného paprsku, což vedlo k častému ucpávání trysky řezací hlavy abrazivního vodního paprsku. Vývoj vodních trysek již však dospěl tak daleko, že je možné nyní pomocí technologie řezání abrazivním vodním paprskem vytvářet součásti s detaily menšími než 0,3 mm [8].



Obr. 4 Příklad výroby komponentů do hodinových strojků metodou mikro AWJ [8].

Konstruktéři nedávno dokonce použili jednu z jejich miniaturních trysek k řezání dílu (obr. 5) vodním paprskem s rotačním řezným příslušenstvím. Kombinace miniaturní trysky, rotační osy a naklápěcí řezací hlavy tak poskytuje schopnost vytvářet maličké, komplexní 3D díly strojů [8].



Obr. 5 Implantát pro opravy kostí vyrobený metodou mikro AWJ s rotační osou [8].

2 STROJE NA SVĚTOVÉM TRHU

Tato kapitola je věnována přehledu některých z mnoha světových výrobců zařízení pro obrábění abrazivním vodním paprskem.

2.1 OMAX

Společnost OMAX je výrobce s již 350 let trvající zkušeností s výrobou vysokotlakých systémů. Svoje první obráběcí centrum JetMachining Center Model 2448, založené na technologii vodního paprsku představila již v roce 1993. Mimo základní řady center pro řezání vodním paprskem OMAX JetMachining Center je také výrobcem center MicroMAX což jsou centra pro ultra přesné obrábění vodním paprskem a vyrábí také obráběcí centra pod obchodní značkou MAXIEM [9].

2.2 WARDJET

WARDJet Inc. je přední výrobce strojů pro řezání vodním paprskem standardní velikosti. Vyniká v navrhování a budování vlastních systémů řezání vodním paprskem, jež jsou integrovány do složitých procesů [10].

2.3 FLOW

Společnost FLOW je další přední světový výrobce. Kořeny společnosti Flow leží na počátku 70. let, kdy bývalý výzkumník a vývojový vědec od společnosti Boeing založil Flow Research. První komerčně využitelná technologie této společnosti spočívala v používání vodního paprsku s velmi vysokým tlakem jako průmyslový řezný nástroj. Společnost Flow později vynalezla, patentovala a zdokonalila první systém řezání abrazivním vodním paprskem na světě, který dokázal řezat tvrdé materiály do tloušťky 300 mm [11].

2.4 KMT Waterjet

Společnost KMT Waterjet je výrobcem vysokotlakých čerpadel, řezacích hlav, zásobníků a podavačů abrazivních materiálů a je tedy výrobcem hlavních komponent, jež jsou součástí center pro obrábění abrazivním vodním paprskem. Tato společnost se věnuje vývoji a výrobě těchto zařízení od roku 1971 a patří tak k průkopníkům mezi výrobci vysokotlakých čerpadel a přesných řezacích hlav [12].

2.5 TECHNI Waterjet

Společnost byla založena v roce 1989 jako výrobce robotických a automatizačních systémů pro automobilový průmysl a využila tyto technologie ve vývoji robotického vodního paprsku pro vysokorychlostní ořezávání automobilových komponentů, jako jsou střešní obložení, obložení dveří a přístrojové desky. Nyní je výrobcem obráběcích center ekonomické řady Intec-G2 a také center řady Techjet-X3 což je řada pro vysokou přesnost obrábění [13].

3 ÚČEL A VYUŽITÍ VE FIRMĚ

Zařízení, které bylo využito pro tuto bakalářskou práci a na kterém byly vyrobeny vzorky pro předvedení možností technologie řezání vysokotlakým abrazivním vodním paprskem je kompletní systém vysokotlakého čerpadla a řezací hlavy STREAMLINE SL-V AMS III AQUALINE I od OEM dodavatele KMT Waterjet Systems, společnosti Rychlý TOM, s.r.o. která je rovněž výrobcem CNC řezacího stolu a dodavatelem související technologie. Toto zařízení bylo zakoupeno firmou IN-EKO Team, s.r.o. v roce 2005 a od té doby je intenzivně používáno, v posledních dvou letech vzhledem k narůstajícímu množství zakázek a také díky možnosti využívat zařízení i pro externí zadavatele, také ve třísměnném provozu.

3.1 Typ zařízení využívaný ve firmě

Celé zařízení pro řezání vysokotlakým vodním paprskem je sestaveno z vysokotlakého čerpadla řady STREAMLINE SL-V jež je hlavní součástí celého systému AWJ/WJM a je společně s používanou řezací hlavou AQUALINE I výrobkem firmy KMT WATERJET.



Obr. 6 Vysokotlaké čerpadlo firmy KMT WATERJET [4].

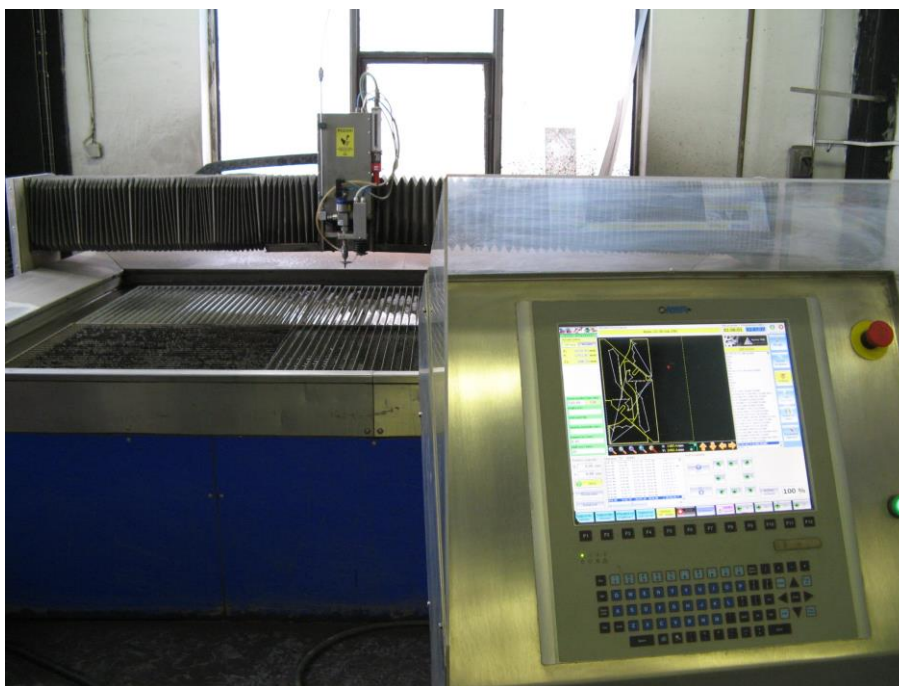
Konstrukce čerpadla a řezací hlavy této společnosti umožňuje použití jak v systémech pro čistou vodu, tak pro abrazivní aplikace. Tato čerpadla mohou být instalována a provozována buď nezávisle, nebo mohou být dálkově ovládána prostřednictvím jakéhokoli centrálního řídicího systému [5].

Pohyb řezací hlavy na základě předem připraveného řídicího programu zajišťuje CNC stůl od dodavatele společnosti Rychlý Tom, s.r.o. Použitý CNC stůl je z řady Blue Line a umožňuje základní pohyb ve třech osách X, Y, Z. Osa X a Y jsou základní osy pohybu, v kterých dochází k vyřezání požadovaného tvaru výrobku a pohyb v ose Z umožňuje automatické výškové nastavení řezací hlavy a umožňuje tak řezat i prostorově tvarované dílce. Jedná se ale vždy o kolmý řez, vzhledem k tomu, že používané zařízení není vybaveno doplňkovou pětiosou řezací hlavou. V případě našeho provozu však není zařízení využíváno k řezání prostorových objektů často. Je převážně využíváno k řezání materiálů s konstantní tloušťkou a proto se řezací hlava v ose Z nenastavuje automaticky.

Vždy pro každé nové řezání se nastavuje manuálně, na začátku ve výchozím bodě řezání a s ohledem na tloušťku materiálu.

3.2 Účel využití ve firmě

Společnost, ve které je zařízení používáno se zabývá převážně výrobou zařízení na čištění odpadních vod, jak komunálních, tak odpadní vody z průmyslových podniků. Vyráběná zařízení mají převážně větší rozměry v řádu jednotek metrů a při jejich výrobě je jako primární technologie pro spojování dílů, využíváno svařování metodou TIG v ochranné atmosféře inertního plynu. Z tohoto důvodu je zhotovení polotovarů určených pro vlastní výrobu pomocí technologie řezání abrazivním vodním paprskem i přes některé nedostatky plynoucí z této technologie plně dostačující a takto vyrobené polotovary již není před dalším použitím potřeba dále obrábět. Naopak velkou přidanou hodnotou této technologie je její rychlost a operativnost, jako i to že díly jsou ihned připraveny pro další zpracování bez nutnosti zbavování případných ořepů, odmašťování a podobně. V případě požadavku na rychlou změnu výroby, nebo úpravu vyráběného dílu není potřeb zařízení nijak složitě upravovat a změna se odehraje převážně jen změnou řídicího programu.



Obr. 7 Zařízení AWJ ve společnosti IN-EKO Team, s.r.o. [6].

3.3 Likvidace odpadu

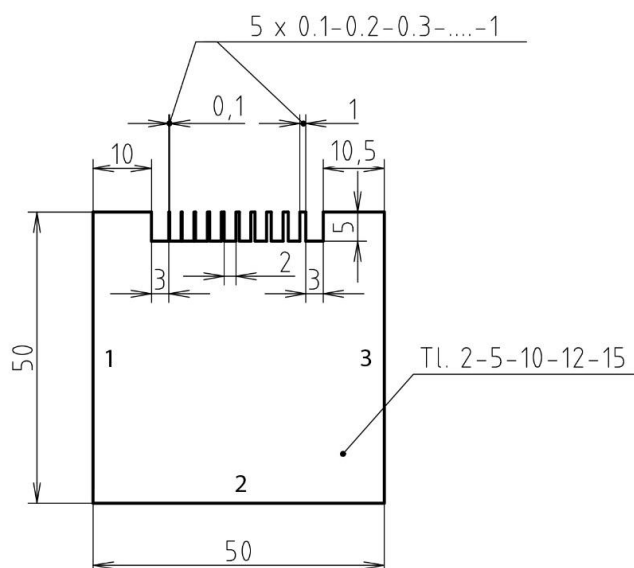
Odpad vyprodukovaný při výrobě řezáním abrazivním vodním paprskem, což je převážně sedimentovaná a následně vytěžená směs drobných částic obráběného materiálu spolu s abrazivním materiálem je likvidována svozem do společnosti zabývající se její likvidací. Tato směs je zde recyklována a dále použita jako příměs do stavebních materiálů, díky čemuž nedochází u tohoto způsobu obrábění k významnému zatěžování životního prostředí.

4 PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ

Tato kapitola se bude věnovat popisu přípravy vzorků a jejich měření pro ukázkou možností využití technologie řezání abrazivním vodním paprskem v prostředí běžné strojírenské firmy. Vzorky byly vyrobeny ve spolupráci s firmou IN-EKO Team, s.r.o., která centrum pro řezání vodním paprskem používá převážně pro přípravu polotovarů ve výrobě svých zařízení na čištění vody.

4.1 Příprava vzorků

Jako vzorek byl zvolen čtvercový výpalek o délce strany 50 mm. U tří ze stran vzorku byla řezána každá strana rozdílnou rychlostí a to $70 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dále označováno jako rychlost 1 (strana s označením 1), $130 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dále označováno jako rychlost 2 (strana s označením 2) a $260 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dále označováno jako rychlost 3 (strana s označením 3). Čtvrtá strana byla využita k ukázce minimální možné síly stěny při řezání vodním paprskem na testovaném zařízení. Na této straně bylo vodním paprskem vyřezáno deset přepážek o délce 5 mm v rozsahu tlouštěk 0,1 – 1,0 mm.



Obr. 8 Vzorek pro zkoušku řezání abrazivním vodním paprskem.

Výroba vzorků probíhala na CNC řezacím stole a pomocí systému vysokotlakého čerpadla a řezací hlavy STREAMLINE SL-V AMS III AQUALINE I od OEM dodavatele KMT Waterjet Systems, společnosti Rychlý TOM, s.r.o. a pro výrobu byl využit odpad z výroby polotovarů zařízení. Byl tak využitý stejný materiál, jaký je používán pro běžnou výrobu v závodě. Vzorky ro testování byly vyrobeny z korozi-vzdorné oceli třídy 17 241 (EN ISO X10CrNi18-8), která je ve výrobě používána jako hlavní materiál pro výrobu, vzhledem k tomu, že produkovaná zařízení jsou určena pro čištění vody a jejich větší část je tedy trvale nebo pravidelně v kontaktu s vodou.

Polotovar pro výrobu vzorků byl umístěn na ocelovém roštu CNC řezacího stolu, jehož součástí je i systém vysokotlaké řezací hlavy pro abrazivní řezání, pomocí které pak

dochází k vyřezání libovolného tvaru s ohledem na možnosti použité technologie a limity využívaného zařízení v ploše až do velikosti 2100 x 3100 mm a v ose Z s možným zdvihem až 200 mm.



Obr. 9 Průběh řezání vodním paprskem.

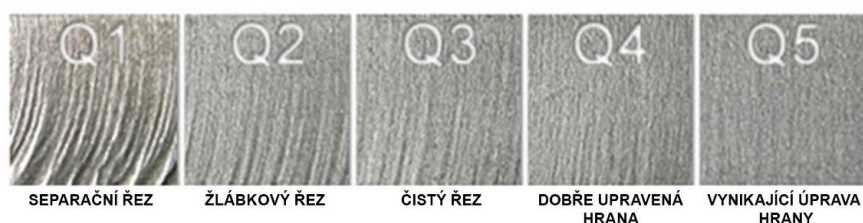
Jak je vidět z přiložené fotografie na obr. 9, výchozí materiál je při řezání umístěn na ocelovém roštu s roztečí nosníků 30 mm a je položen zpravidla volně v případě větších tabulí plechu, které mají vlastní stabilitu, nebo je částečně zajištěn pomocí těžkých ocelových ploten proti posuvu v případě menších výchozích polotovarů, u kterých by mohlo dojít působením tlaku vodního paprsku k nechtěnému posunutí v průběhu řezání, což se ne vždy podaří dodržet, jak je vidět z připojené fotografie na následujícím obr. 10.



Obr. 10 Příklad důsledku nedostatečného upevnění polotovaru.

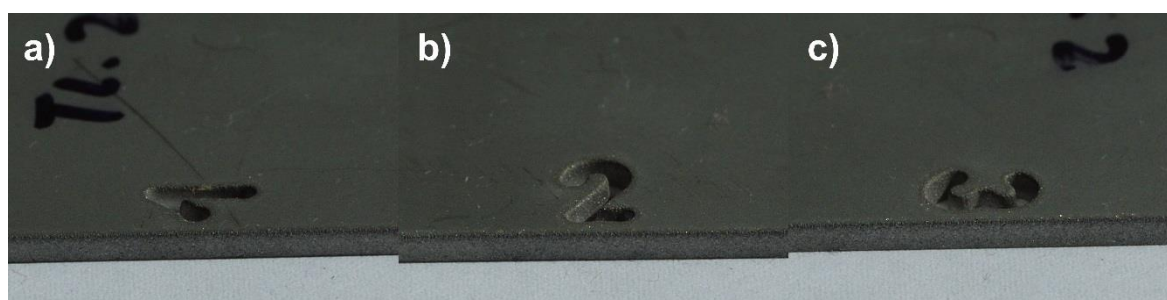
4.2 Posouzení kvality povrchu řezu jednotlivých vzorků

Při vizuálním srovnání kvality povrchu připravených vzorků je patrné, že se na struktuře povrchu v místě řezu projevuje výrazně jak rozdílná rychlost řezu, tak zároveň také rozdílná tloušťka řezaného materiálu. Vizuálním srovnáním je možné zařadit kvalitu plochy řezu do pěti kategorií Q1 – Q5, kde Q1 je řez s nejhorší kvalitou, který by bylo potřeba pro většinu aplikací před dalším použitím dále obrobit, což by bylo zbytečně nákladné, a proto se řez v této kvalitě nepoužívá. Naopak řez s kvalitou Q5 je řez nejlepší, který bude bez dalšího opracování vhodný k použití u většiny aplikací, u nichž je jako způsob výroby polotovaru nebo finálního výrobku vhodná metoda řezání abrazivním vodním paprskem.

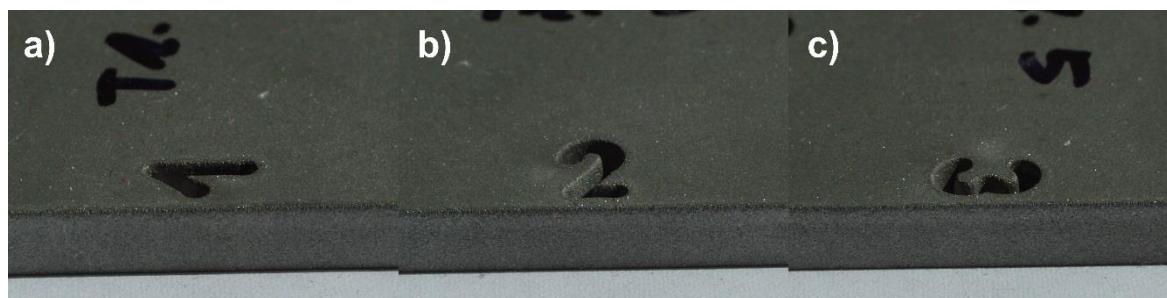


Obr. 11 Kategorie povrchu při řezání vodním paprskem [2].

Následující fotografie řezných ploch pořízených ze vzorků připravených pro tuto práci, je tedy možné na základě kategorií podle obr. 11 porovnat a určit tak vizuálně, který vzorek by vyhověl požadavkům na kvalitu s ohledem na případné další použití výrobku a který vzorek by bylo nezbytné pro daný účel vyřadit.



Obr. 12 Vzorek tl. 2 mm. a) rychlost 1, b) rychlost 2, c) rychlost 3.



Obr. 13 Vzorek tl. 5 mm. a) rychlost 1, b) rychlost 2, c) rychlost 3.



Obr. 14 Vzorek tl. 10 mm. a) rychlost 1, b) rychlost 2, c) rychlost 3.



Obr. 15 Vzorek tl. 12 mm. a) rychlost 1, b) rychlost 2, c) rychlost 3.



Obr. 16 Vzorek tl. 15 mm. a) rychlost 1, b) rychlost 2, c) rychlost 3.

Na připojených obrázcích obr. 12 – obr. 15 lze pozorovat, že u prvních dvou vzorků, tedy u plechů tloušťky 2 mm a 5 mm se vliv rychlosti řezání nijak zaznamenatelně neprojevuje na kvalitě řezné plochy a kvalita ve všech rychlostech řezu by se dala zařadit do kategorie kvality povrchu Q5, tedy je velmi kvalitní. U třetího vzorku, který byl vyřezán z plechu o tloušťce 10 mm se u druhé a třetí největší rychlosti začíná projevovat mírné žlábkování, která by se dala srovnat s kvalitou z kategorie Q4 respektive Q3. Teprve u vzorků o tloušťce 12 mm a 15 mm je již patrná ve třetí nejvyšší rychlosti výrazná striace, která je u vzorku tloušťky 15 mm rovněž spojená s nedokončením řezu. Vzorek z plechu o tloušťce 15 mm tedy musel být z řezaného materiálu vylomen, což je patrné na obrázku obr. 16 v části c), jako viditelný únavový lom na spodní hraně vzorku.

Vizuálním porovnáním kvality povrchu vyrobených zkušebních vzorků s kategoriemi hodnotícími kvalitu povrchu řezu abrazivním vodním paprskem v rozsahu Q1 – Q5 a je tedy možné konstatovat, že převážná část vzorků by vyhověla požadavkům na kvalitu řezu a teprve u nejvyšší rychlosti řezu $260 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ by vzorky pro další použití nevyhověly.

K přesnějšímu posouzení kvality povrchu v místě řezu použijeme dále měřicí přístroje, které nám poskytnou číselné a tedy průkaznější hodnoty k posouzení rozdílu v kvalitě řezu s ohledem na změnu řezné rychlosti a rozdílnou tloušťku řezaného materiálu a jejich vlivu na kvalitu povrchu řezné plochy.

4.3 Měření kvality řezné plochy

Výstupem měření řezné plochy vzorků o tloušťce 10 mm, 12 mm a 15 mm jsou veličiny R_a , R_z , R_q a měření proběhlo kontaktní metodou měření na měřicím zařízení Pertometer M2 s posuvným přístrojem PFM výrobce Mahr.

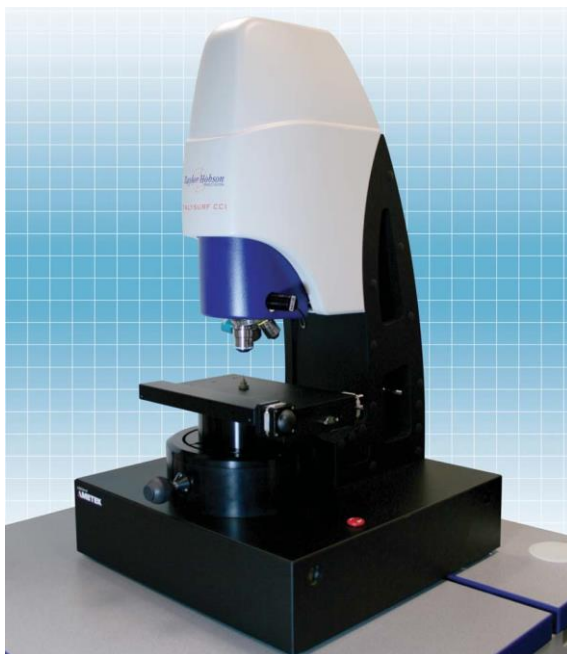


Obr. 17 Měření vzorku 12 mm na kontaktním měřicím přístroji Mahr.

Vzorky o tloušťce 2 mm a 5 mm byly pak měřeny na měřicím přístroji Talysurf CCI Lite což je bezdotykový 3D optický profilometr od firmy Taylor Hobson. Přístroj využívá počítačové zpracování interferenčního signálu, což výrobce nazývá koherenční korelační interferometrie. Přístroj tím, že vyhodnocuje kvalitu povrchu v ploše, dokáže poskytnout mnohem lepší představu o kvalitě měřené plochy, což může být zvláště u ploch s odhadovanou jemnější strukturou povrchu důležité.

Do následujících tabulek a grafů byly zaznamenány hodnoty průměrné aritmetické úchytky posuzovaného profilu dále označované jako R_a , průměrné kvadratické úchytky posuzovaného profilu dále označované jako R_q , hodnota největší výšky profilu dále

označovaná jako Rz, průměrné aritmetické výšky hodnocené plochy dále označované jako Sa, průměrné kvadratické výšky hodnocené plochy dále označované jako Sq a maximální výška hodnocené plochy dále označovaná jako Sz.



Obr. 18 Talysurf CCI Lite [3].

4.3.1 Měření struktury řezné plochy kontaktní metodou

Pro měření byly použity vzorky o tloušťce 10 mm, 12 mm a 15 mm. Vzorky o tloušťce 2 mm a 5 mm byly z tohoto měření vynechány, vzhledem k tloušťce vzorků a obavě z poškození měřicího zařízení, měřením v těsné blízkosti hrany vzorku. Tyto dva vzorky pak byly měřeny pouze optickou bezkontaktní metodou.



Obr. 19 Detail kontaktní měřicí hlavy.

Vzhledem k rozdílné kvalitě povrchu řezu na straně blíže horní hraně, tedy v místě vnikání vodního paprsku a na části blíže spodní hraně, tedy v místě kde vodní paprsek vystupuje, bylo měření provedeno na obou těchto stranách. U vzorků, kde byla kombinací nejvyšší řezné rychlosti a tloušťky materiálu způsobena výrazná striace spojená s kavitací, byly již tyto části mimo rozsah měřicího přístroje a u těchto vzorků byla měřená oblast posunuta blíže středu na měřitelné místo. V tabulce jsou tyto hodnoty umístěny v závorkách. Výsledky měření jsou jako průměr za tři jednotlivá měření zaznamenány v připojených tabulkách a grafech.

Tab. 4.1 Tabulka naměřených hodnot průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu.

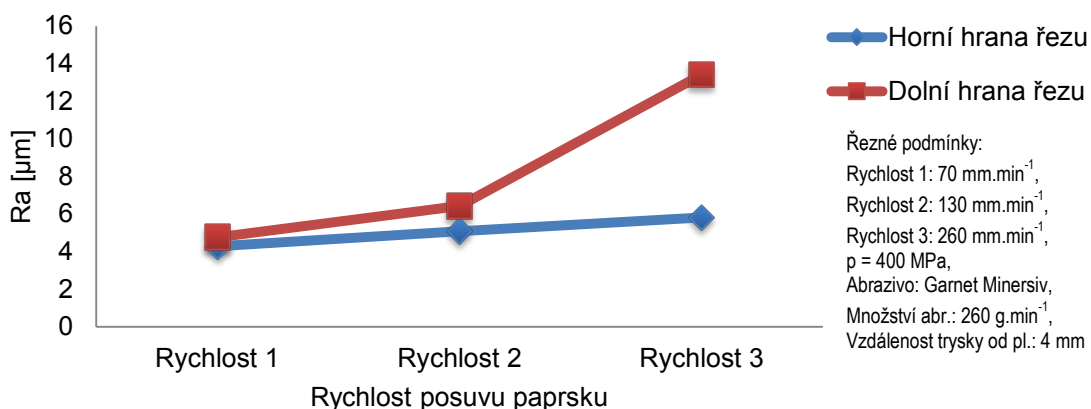
| Vzorek | Oblast | Ra [μm] | | |
|----------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 10 [mm] | Horní | 4,287 | 5,090 | 5,820 |
| | Dolní | 4,762 | 6,422 | 13,420 |
| Tl. 12 [mm] | Horní | 4,194 | 4,605 | 5,766 |
| | Dolní | 5,471 | 6,500 | (11,750) |
| Tl. 15 [mm] | Horní | 5,032 | 4,621 | 5,423 |
| | Dolní | 6,935 | 13,010 | 14,110 |

Tab. 4.2 Tabulka naměřených hodnot největších výšek profilů.

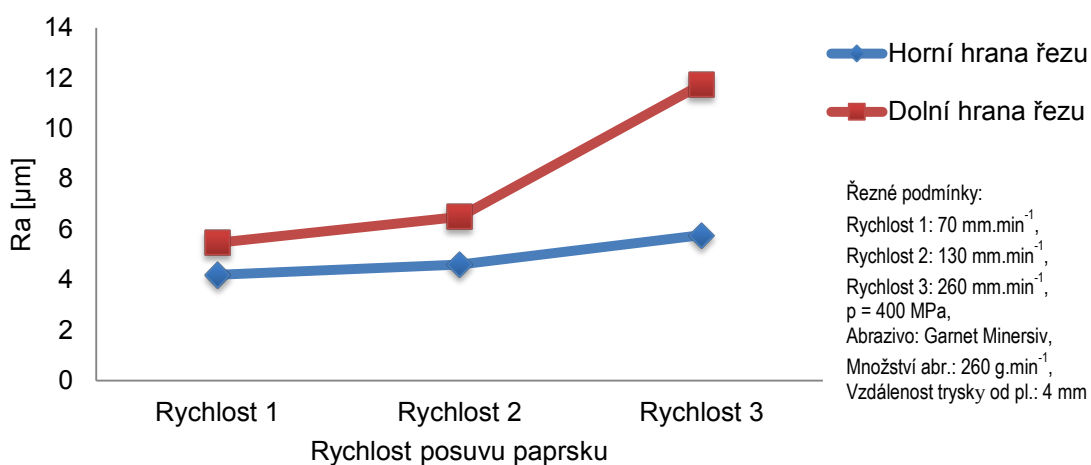
| Vzorek | Oblast | Rz [μm] | | |
|----------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 10 [mm] | Horní | 32,900 | 35,100 | 41,500 |
| | Dolní | 32,00 | 42,000 | 66,900 |
| Tl. 12 [mm] | Horní | 29,600 | 33,600 | 35,500 |
| | Dolní | 33,90 | 34,300 | (57,700) |
| Tl. 15 [mm] | Horní | 35,200 | 32,200 | 38,400 |
| | Dolní | 40,100 | 66,600 | (67,100) |

Tab. 4.3 Tabulka naměřených hodnot průměrné kvadratické úchyly posuzovaného profilu.

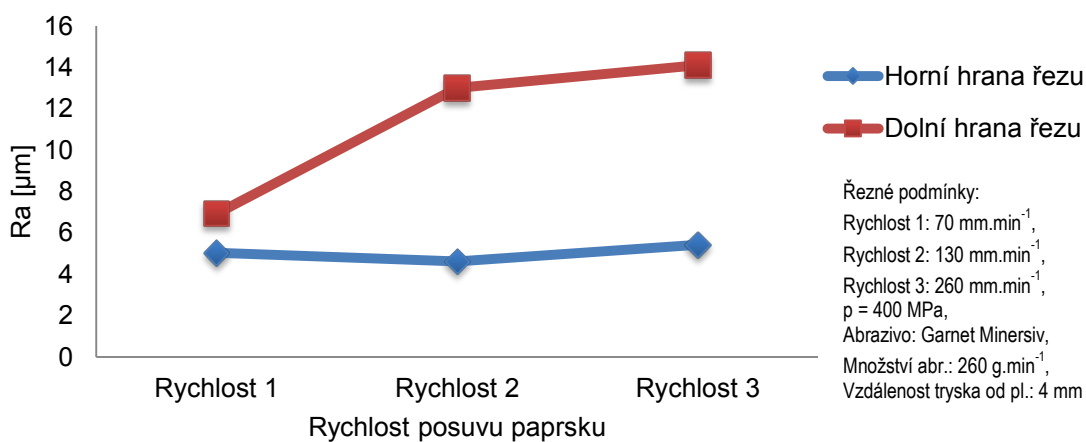
| Vzorek | Oblast | Rq [μm] | | |
|----------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 10 [mm] | Horní | 5,506 | 6,404 | 7,545 |
| | Dolní | 5,920 | 8,372 | 16,620 |
| Tl. 12 [mm] | Horní | 5,360 | 5,860 | 7,240 |
| | Dolní | 6,721 | 8,182 | (14,130) |
| Tl. 15 [mm] | Horní | 6,412 | 5,894 | 6,836 |
| | Dolní | 8,763 | 15,780 | (17,560) |



Obr. 20 Změna Ra v závislosti na rychlosti posuvu pro vzorek tl. 10 mm.



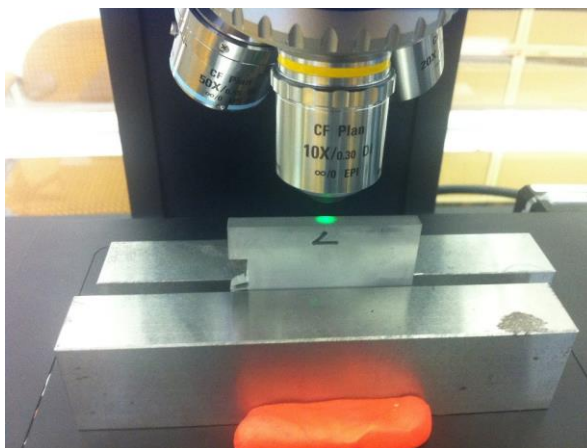
Obr. 21 Změna Ra v závislosti na rychlosti posuvu pro vzorek tl. 12 mm.



Obr. 22 Změna Ra v závislosti na rychlosti posuvu pro vzorek tl. 15 mm.

4.3.2 Zobrazení textury povrchu nekontaktní optickou metodou

Vzorky o tloušťkách 2 mm a 5 mm byly měřeny pro doplnění hodnot kvality povrchu na bezdotykovém 3D optickém profilometru Talysurf CCI Lite od firmy Taylor Hobson.



Obr. 23 Nekontaktní měření kvality povrchu.

Tab. 4.4 Tabulka naměřených hodnot průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu.

| Vzorek | Oblast | Ra [μm] | | |
|---------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Horní | 6,9142 | 6,4342 | 8,1505 |
| | Dolní | 4,7620 | 4,5015 | 3,2579 |

Tab. 4.5 Tabulka naměřených hodnot největších výšek profilů.

| Vzorek | Oblast | Rz [μm] | | |
|---------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Horní | 40,2640 | 42,4590 | 46,7750 |
| | Dolní | 33,3410 | 26,4690 | 19,4480 |

Tab. 4.6 Tabulka naměřených hodnot průměrné kvadratické úchyly posuzovaného profilu.

| Vzorek | Oblast | Rq [μm] | | |
|---------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Horní | 8,4795 | 8,1919 | 10,1610 |
| | Dolní | 4,7620 | 5,7688 | 4,0785 |

Tab. 4.7 Tabulka naměřených hodnot průměrné aritmetické výšky hodnocené plochy.

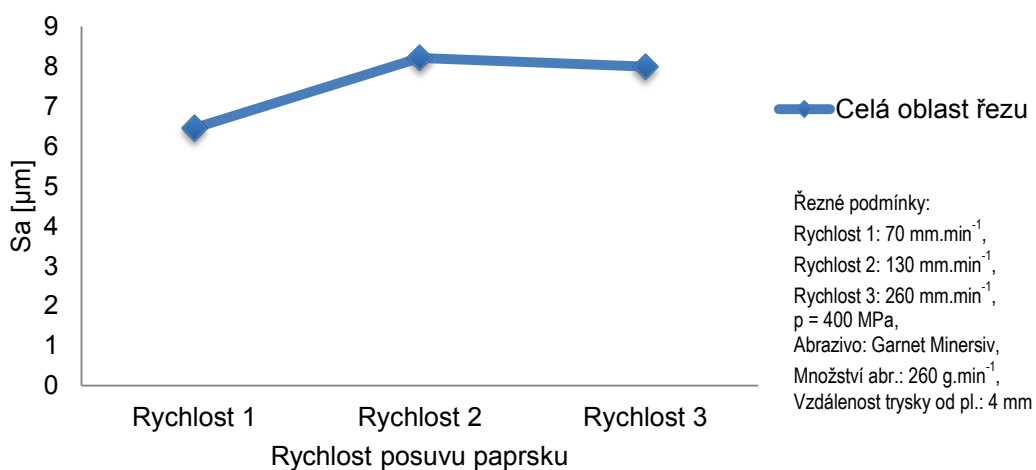
| Vzorek | Oblast | Sa [μm] | | |
|---------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Celá | 6,4577 | 8,2174 | 7,9953 |
| Tl. 5 [mm] | Horní | 4,4016 | 6,6609 | 5,5207 |
| | Dolní | 4,3947 | 5,3208 | 5,3131 |

Tab. 4.8 Tabulka naměřených hodnot maximální výšky hodnocené plochy.

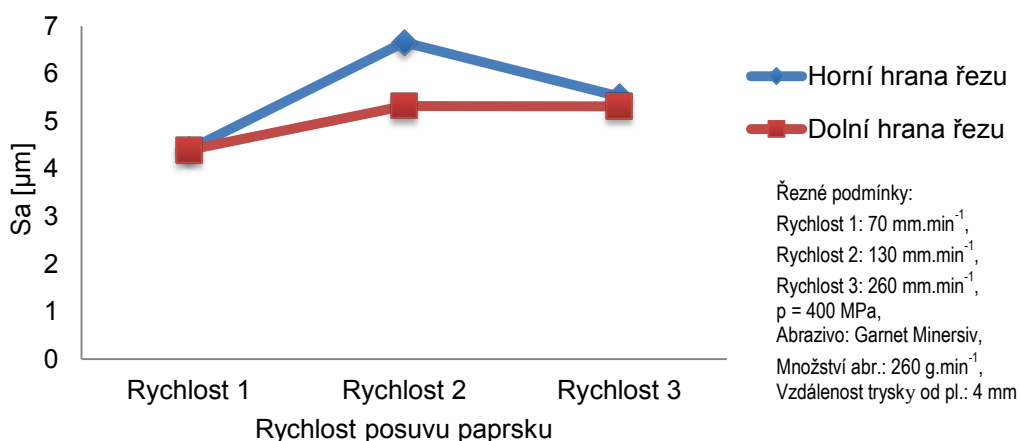
| Vzorek | Oblast | Sz [μm] | | |
|------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Celá | 63,140 | 90,714 | 106,770 |
| Tl. 5 [mm] | Horní | 49,866 | 108,080 | 88,826 |
| | Dolní | 48,958 | 69,689 | 61,138 |

Tab. 4.9 Tabulka naměřených hodnot průměrné kvadratické výšky hodnocené plochy.

| Vzorek | Oblast | Sq [μm] | | |
|------------|--------|----------------------|------------|------------|
| | | Rychlost 1 | Rychlost 2 | Rychlost 3 |
| Tl. 2 [mm] | Celá | 8,2240 | 10,5080 | 10,6060 |
| Tl. 5 [mm] | Horní | 5,5801 | 8,6941 | 6,8874 |
| | Dolní | 5,5265 | 6,6504 | 6,5548 |



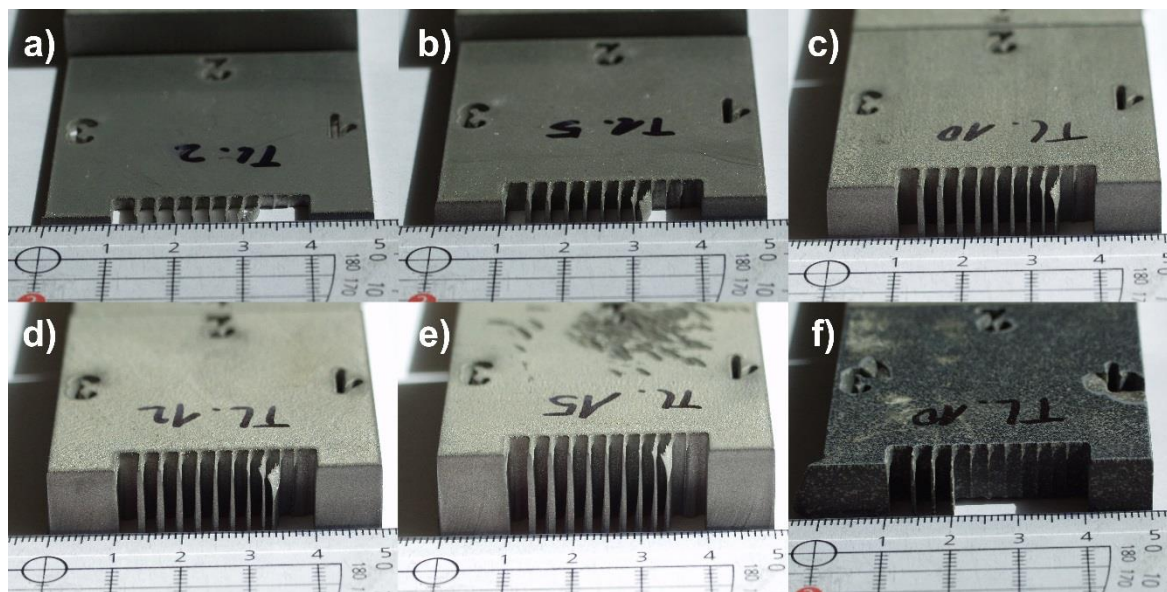
Obr. 24 Změna Sa v závislosti na rychlosti posuvu pro vzorek Tl. 2 mm.



Obr. 25 Změna Sa v závislosti na rychlosti posuvu pro vzorek Tl. 5 mm.

4.4 Zkouška řezání tenké přepážky abrazivním vodním paprskem

Jako ukázka krajních možností použitého obráběcího zařízení, je součástí práce i pokus vyřezat na jedné straně vzorku přepážku s co nejmenší možnou tloušťkou stěny v rozsahu 0,1 mm – 1 mm. Tato zkouška byla provedena na všech vzorcích z korozivzdorné oceli o tloušťce 2 mm – 15 mm a také na vzorku z keramiky o tloušťce 10 mm, na kterém je demonstrováno odlišné chování materiálu s ohledem na jeho větší křehkost.



Obr. 26 Výsledek obrábění tenké přepážky metodou AWJ.

Na připojených snímcích a) – f), na obr. 26 je patrné, že obrábění tenkých přepážek na běžném zařízení technologií řezání abrazivním vodním paprskem, není příliš přesné a v praxi nebude příliš využitelné. U vzorků na snímcích a) a b), tedy u plechů z korozivzdorné oceli tlouštěk 2 mm a 5 mm je patrné, že zcela chybí přepážky o požadované tloušťce 0,1 mm a 0,2 mm a u dalších vzorků o tloušťce 10 mm, 12 mm a 15 mm (snímky c) – e)) došlo k odřezání přepážky o tloušťce 0,1 mm. Zbylé přepážky sice zůstaly, ale jejich tvar je výrazně nesourodý tím, jak se u plechů větších tlouštěk začíná ve spodní části řezu projevovat výrazná striace. U velmi tenkých přepážek je na všech vzorcích rovněž patrné výrazné prohnutí zbylého materiálu, způsobené tlakem vodního paprsku. Vysoký tlak vodního paprsku v kombinaci s větší křehkostí materiálu, se pak na posledním vzorku z keramiky o tloušťce 10 mm projevil vylomením většiny tenkých přepážek a zbyly pouze přepážky o síle 0,8 mm, 0,9 mm a 1 mm.

5 DISKUZE

U testovaných vzorků obrobených pomocí technologie řezání abrazivním vodním paprskem se objevilo několik nedostatků souvisejících s touto technologií řezání materiálu. Některé byly očekávány, jelikož jsou přímo patrné pohledem a jsou viditelné na velkém počtu publikovaných fotografií a příkladů souvisejících s touto technologií. Jedná se například o výskyt zóny se striací, nebo zkosení, které je patrné zvláště u silnějších vzorků a větších rychlostí řezání. Měřeními a to zvláště při nekontaktním měření pomocí 3D optického profilometru byly ale také zjištěny nedostatky, které nejsou na první pohled patrné a to zvláště poměrně značné narušení vstupní hrany řezné plochy. V příloze 1 a 2 jsou následně uvedeny dvě ukázky grafického výstupu měření.

5.1 Zkosení plochy řezu

Při bočním pohledu na oblast řezu je na vzorcích rovněž patrné zkosení řezné hrany. U mnoha aplikací, zvláště pokud se jedná o řezání tenkých plechů například jako polotovárů určených pro vzájemné svařování, tento jev vůbec nemusí být na škodu, nebo dokonce může být při vhodném návrhu konstrukce dílů pro svařování výhodou. U zvláště silnějších materiálů již tento jev může být významný a případně může i vyžadovat další dodatečné obrábění. Podle provedených vzorků není ani možné tento jev zmírnit například změnou řezné rychlosti a tento jev pravděpodobně souvisí pouze s tloušťkou materiálu a postupným rozšiřováním proudu vodního paprsku průchodem materiálu a ztrátou kinetické energie. Možným způsobem eliminace tohoto jevu je doplnit zařízení o pětiosou řezací hlavu, což je běžná součást nabídky dnešních systémů AWJ. Přes to, že zařízení pak umožňuje řezat i tvarově náročnější dílce je v provozech podobné velikosti a zaměření vzhledem ke zvýšeným pořizovacím nákladům tento způsob nevyužíván. Důvodem může být i skutečnost, že kvalita řezné hrany i bez úvahy o zkosení není často příliš dobrá a u výrobků které se zpracovávají touto technologií je akceptovatelná horší kvalita řezu a tudíž i mírné zkosení. Na mírném zkosení nebo změny tvaru hrany by se mohl za určitých okolností projevit i způsob uložení obráběného materiálu. Ten je totiž ve většině případů uložen volně na nosném roštu a proti posuvu je zajištěn často pouze vlastní adhezí vůči tomuto roštu.

Mimo to, že může v průběhu řezání dojít k posunutí obráběného materiálu a tak ke znehodnocení právě obráběného dílu, je možné uvažovat i o nebezpečí samovolného naklonění z důvodu nedostatečného podepření vyřezávané součásti, což se může projevit zvláště u řezání malých dílů z tenkých, nebo měkkých materiálů. Opět je však otázkou do jaké míry v praxi v prostředí běžné strojírenské firmy tento fakt může být na obtíž a zda je tedy nezbytně nutné se zabývat zdlouhavým a komplikovaným zajišťováním materiálu, pokud na řezné hraně tenkého plechu bude změna úhlu řezu vůči obrobku v místě před dořezáním tvaru pravděpodobně těžko zaznamatelná.

5.2 Tvoření zóny s výskytem striace

Výskyt zóny striace je při řezání vodním paprskem obvyklý jev, který se projevuje žlábkováním ve směru proudění vodního paprsku s mírným zakřivením proti směru pohybu řezné hlavy. Tomuto jevu lze zabránit snížením rychlosti řezání. To se může projevit výraznou redukcí tohoto jevu, což je to patrné i na provedených vzorcích, kde již od prostřední rychlosti zóna striace téměř mizí i u nesilnějšího vzorku o tloušťce 15 mm.

5.3 Narušení vstupní řezné hrany

Překvapivým zjištěním, které ke kterému jsme při vyhodnocování vzorků dospěli, je i fakt, že při řezání abrazivním vodním paprskem dochází k výraznému narušení a drobnému zaoblení vstupní hrany řezné plochy. Toto narušení řezné hrany způsobuje u tenkých vzorků horší kvalitu v této části řezu, než v jeho zbytku. Což je zajímavé zvláště s ohledem na to, že u většiny řezaných materiálů bývá obava spíše z toho, že bude nedostatečná kvalita řezu na jeho spodní výstupní části. Pokud by byl v praxi nějaký reálný důvod tento nedostatek řešit, mohl by být částečně korigován použitím větší řezné rychlosti, což se jeví jako možný způsob na základě provedených měření.

5.4 Řezání tenkých přepážek

Na provedených vzorcích při zkoušce řezání tenkých přepážek je vidět, kde má v tuto chvíli metoda řezání materiálu abrazivním vodním paprskem největší slabiny, tedy při řezání drobných detailů. Na řezu je vidět mnoho nedostatků a některé tenké přepážky jsou zcela odříznuty, nebo v případě vzorku z keramiky vylomeny. U silnějších vzorků je řez výrazně zvlněný, u tenkých přepážek se zkosení plochy řezu projevuje částečným odříznutím horní strany přepážky a jejím ohnutím. Ve vnitřních rozích mezer mezi přepážkami je vidět výrazné podřezání, způsobené tím, jak řezná hlava mění směr chodu, a na chvíli tak zpomalí. Paprsek zde pak řeže o něco déle, než ve zbylých částech řezu. Ve vnitřních rozích se také projevuje nedostatek ve formě omezeného minimálního poloměru zaoblení hrany. To je dáno průměrem vodního paprsku, který je v našem případě přibližně 1 mm. Tyto nedostatky, je možné řešit a vývoj se tímto směrem ubírá, díky miniaturizaci v oblasti řezání vodním paprskem. S tím, jak bude postupovat vývoj zařízení a bude se zmenšovat průměr abrazivního vodního paprsku, což je dáno rozměry trysky, bude možné s touto technologií řezat mnohem jemnější detaily než je dnes běžné.

ZÁVĚR

Výsledkem této bakalářské práce je soubor naměřených hodnot, které jsou výstupem z měření struktury povrchu řezné plochy vzorků a tyto hodnoty byly zaznamenány do tabulek, jež jsou součástí práce.

Na základě posouzení těchto hodnot je konstatováno, že i přes skutečnost že přesnost, při řezání abrazivním vodním paprskem je relativně nízká, v porovnání s konvenčními dokončovacími metodami včetně některých nekonvenčních, jsou stále možnosti využití této technologie v provozu běžné strojírenské firmy velmi dobré. To prokazuje i její významné rozšíření ve strojírenské výrobě a to i v menších strojírenských firmách.

Výhodou této technologie je její rychlost, operativnost a výhodou může být i to, že nedochází při použití této technologie k zásadnímu znečišťování obráběných dílů, nebo vzniku otřepů. Při řezání touto metodou nedochází k tepelnému ovlivnění řezaných dílů. Na řezané díly nepůsobí extrémní silové namáhání a tím je minimální riziko vzniku drobných trhlin ve struktuře materiálu.

Některé závěry uvedené v této práci mohou být jen orientační a ovlivněny malým počtem provedených měření. Pokud by se závěry z této práce měly dostatečně potvrdit, bylo by potřeba provést další měření.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
2. WARDJET.COM. *Parametry vodního paprsku*. [online]. [cit. 2014-05-28]. Available from: <http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>
3. ZIMMERMANN SCIENTIFIC. *Tallysurf CCI*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.zimmerman.com.tw/uploads/talysurf-cci-lite.pdf4>.
4. HOCHDRUCKPUMPEN. *KMT Streamline*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://hochdruckpumpen.blogspot.cz>
5. RYCHLÝ TOM. *Úvod stránek*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.rychlytom.cz>
6. IN-EKO TEAM, s.r.o. *Přehled zařízení*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: www.in-eko.cz
7. MESAČNÍK STROJÁRSTVO. *Obrábanie vodným lúčom*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/1296-obrabanie-vodnym-luom-a-jeho-aplikacie>
8. THEFABRICATOR.COM. *Big oportunities in waterjet cutting microsize parts*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/big-opportunities-in-waterjet-cutting-microsize-parts>
9. OMAX. *OMAX Products*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.omax.com>
10. WARDJET. *Home page*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.wardjet.com/02-waterjet-relationship-parameters.html>
11. FLOW. *Home page*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.flowwaterjet.com>
12. KMT WATERJET. *Home page*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.kmtwaterjet.com>
13. TECHNI WATERJET. *About us*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.techniwaterjet.com>
14. CA MACHINE TOOLS. *Metalworking Blog*. [online]. [cit. 2014-05-29]. Available from: <http://www.camachinetools.com/blog/tag/water-jet/page/2/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|----------------|-----------------|-------------------------------------|
| AWJ | [-] | obrábění abrazivním vodním paprskem |
| WJM | [-] | obrábění vodním paprskem |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|--------------------------|-----------------------------------|---|
| Ra | [μm] | průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu |
| Rq | [μm] | průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu |
| Rz | [μm] | hodnota největší výšky profilu |
| Sa | [μm] | průměrná aritmetická výška hodnocené plochy |
| Sq | [μm] | průměrná kvadratická výška hodnocené plochy |
| Sz | [μm] | maximální výška hodnocené plochy |
| p | [MPa] | tlak |
| ρ | [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] | hustota |

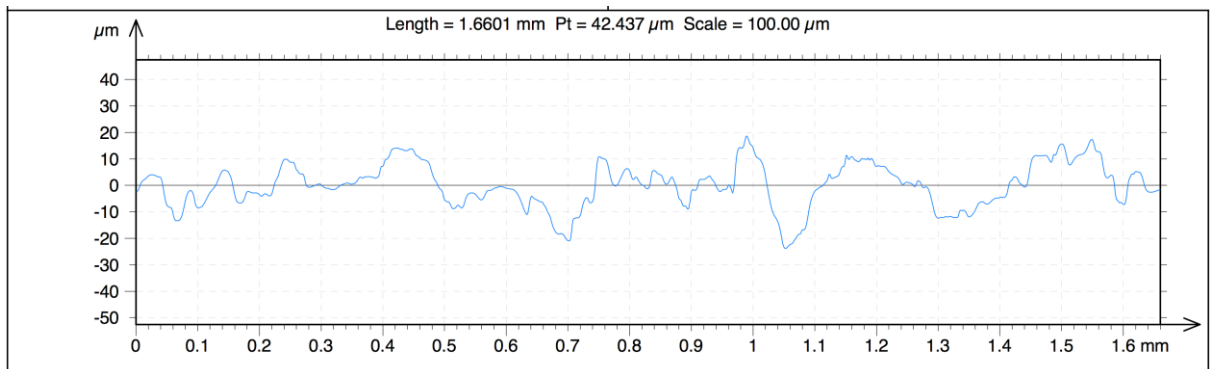
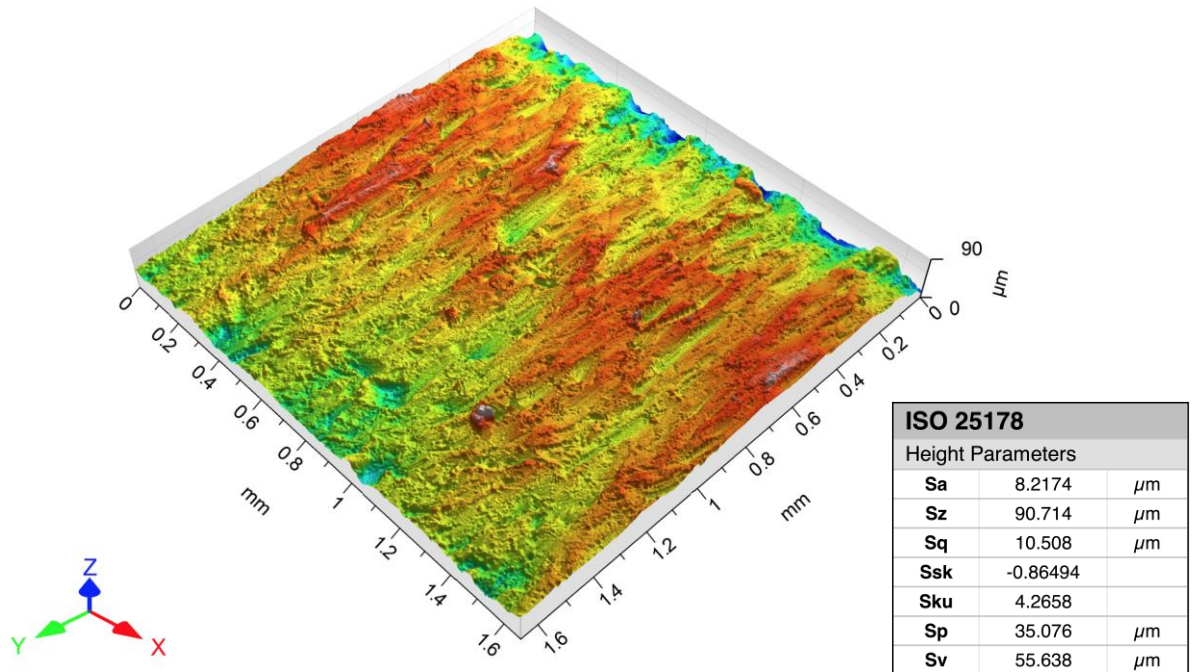
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Data z měření pro vzorek 2 mm, rychlost 2 a horní oblast řezné plochy

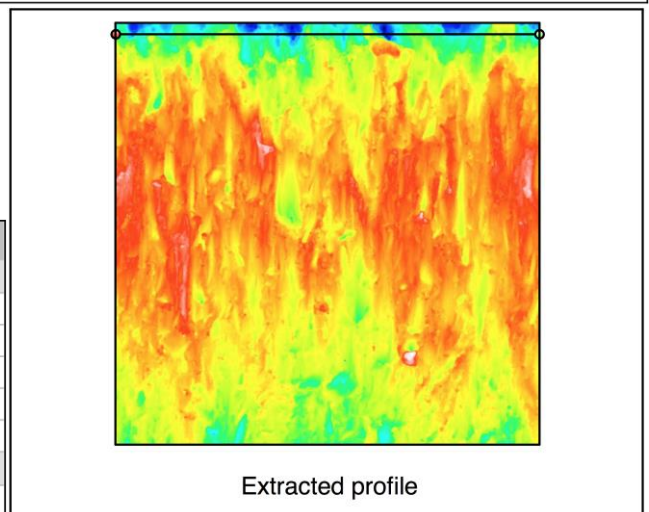
Příloha 2 Data z měření pro vzorek 2 mm, rychlost 2 a dolní oblast řezné plochy

PŘÍLOHA 1

Data z měření pro vzorek 2 mm, rychlost 2 a horní oblast řezné plochy.

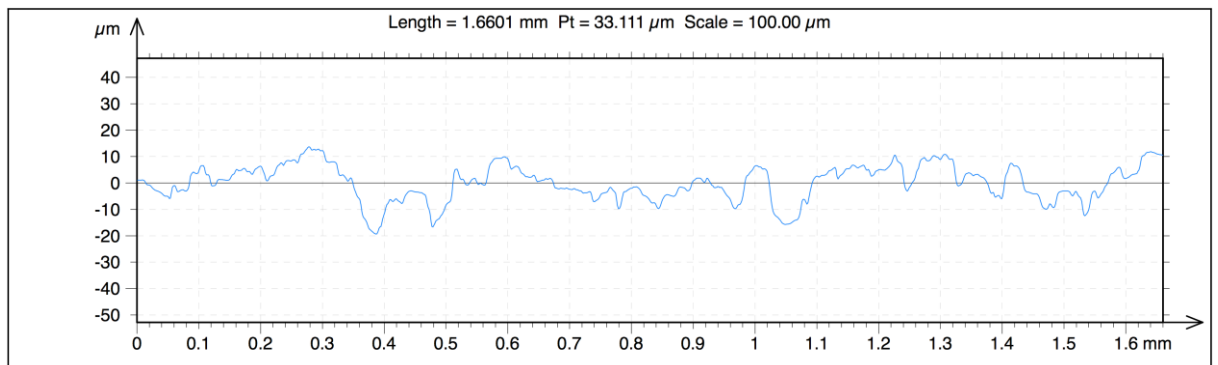
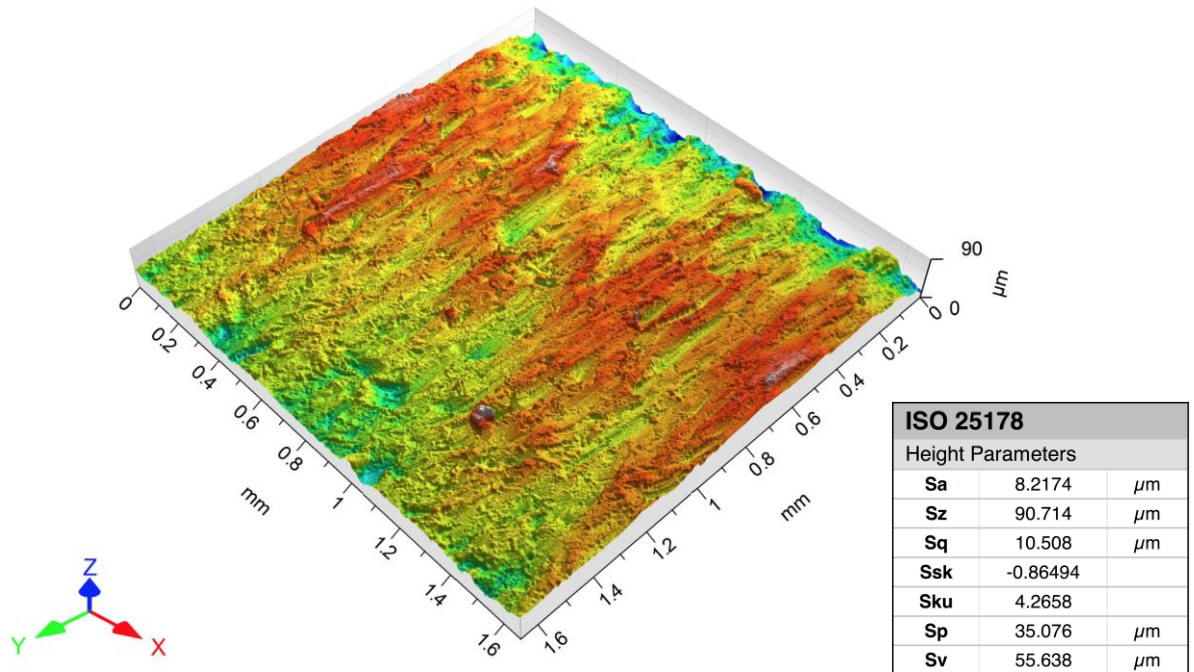


| ISO 4287 | | | |
|--|---------|---------------|-------------------------|
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | |
| Rz | 42.459 | μm | Gaussian filter, 1.6 mm |
| Ra | 6.4342 | μm | Gaussian filter, 1.6 mm |
| Rq | 8.1919 | μm | Gaussian filter, 1.6 mm |
| Rp | 19.221 | μm | Gaussian filter, 1.6 mm |
| Rv | 23.238 | μm | Gaussian filter, 1.6 mm |
| Spacing parameters - Roughness profile | | | |
| RSm | 0.14487 | mm | Gaussian filter, 1.6 mm |



PŘÍLOHA 2

Data z měření pro vzorek 2 mm, rychlost 2 a dolní oblast řezné plochy.



| ISO 4287 | | | |
|--|---------|----|-------------------------|
| Amplitude parameters - Roughness profile | | | |
| Rz | 26.469 | μm | Gaussian filter, 0.8 mm |
| Ra | 4.5015 | μm | Gaussian filter, 0.8 mm |
| Rq | 5.7688 | μm | Gaussian filter, 0.8 mm |
| Rp | 11.634 | μm | Gaussian filter, 0.8 mm |
| Rv | 14.835 | μm | Gaussian filter, 0.8 mm |
| Spacing parameters - Roughness profile | | | |
| RSm | 0.12468 | mm | Gaussian filter, 0.8 mm |

