



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

DOSAHOVANÁ PŘESNOST VÝROBKU PŘI ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPERSEM

THE USE OF A WATERJET TECHNIQUE IN FINISHING OPERATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Marek JANTAČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Jantač

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:

Dosahovaná přesnost výrobku při řezání vodním paprskem

v anglickém jazyce:

The Use of a Waterjet Technique in Finishing Operations

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Vytipování součástkové základny.
3. Rozbor použitých technologií ve firmě.
4. Porovnání výsledků na základě měření.
5. Diskuze.
6. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

Vzájemné porovnání vyrobených vzorků v závislosti na parametrech výrobních metod.

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. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi - WJM. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
3. HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 1. vyd. Ostrava-Poruba: Jiří Pustina, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
4. ZEMČÍK, Oskar. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
5. LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou řezání abrazivním vodním paprskem. V první části práce se rozebírají možnosti využití abrazivního paprsku v různých průmyslových odvětvích, jeho výhody a nevýhody. Dále způsoby obrábění abrazivním paprskem jako řezání, soustružení a frézování. Potom se zaměřuje na technologie ve firmě AWAC, ve které byly uříznuty vzorky pro následné měření. Cílem měření bylo stanovit a porovnat drsnosti uříznutých ploch vzorků, které byly řezány metodou Abrasive Waterjet (AWJ) a Dynamic Waterjet (DWJ).

Klíčová slova

abrazivní vodní paprsek, multiplikátor, řezací hlavice, Dynamic Waterjet, struktura povrchu, AWJ, DWJ

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with abrasive waterjet cutting. In the first part we discuss the possibility of using an abrasive jet in various industries, its advantages and disadvantages. Furthermore, abrasive jet machining methods such as cutting, turning and milling. Then focuses on the technology at AWAC company, which were cut off samples for subsequent measurement. The aim of the measurements was to determine and compare the surface roughness of the samples were cut at different parameters.

Keywords

abrasive water jet, high-pressure pump, cutting head, Dynamic Waterjet, surface structure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANTAČ, Marek. *Dosahovaná přesnost výroby při řezání vodním paprskem*. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 35 s. 5 příloh. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Dosahovaná přesnost výrobku při řezání vodním paprskem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum_____
Marek Jantač

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu moji práce Ing. Milanu Kalivodovi, VUT Brno, doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc., VUT Brno, a za firmu AWAC, s.r.o. Ing. Dušanu Lukšovi a Jaroslavu Mašovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ	7
OBSAH	8
ÚVOD.....	10
1 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEKM	11
1.1 Historie využití vodního paprsku	11
1.2 Technologie WJM a AWJ.....	11
1.3 Porovnání AWJ s ostatními NMO	12
1.4 Výhody a nevýhody AWJ	12
1.5 Strojní zařízení	13
1.5.1 Vysokotlaké vodní čerpadlo.....	13
1.5.2 Akumulátor	14
1.5.3 Řezací hlavice	15
1.5.4 Abrazivo	15
2 SOUČÁSTKOVÁ ZÁKLADNA.....	16
2.1 Oblasti použití AWJ.....	16
2.2 Druhy řezaných materiálů	17
2.3 Druhy technologií obrábění AWJ	17
2.3.1 Frézování	17
2.3.2 Soustružení	18
2.3.3 Vrtání a vyvrtávání.....	18
2.3.4 Gravírování.....	19
3 ROZBOR TECHNOLOGIÍ VE FIRMĚ	20
3.1 O společnosti AWAC, s.r.o.....	20
3.2 Výrobní možnosti firmy AWAC.....	20
3.3 Dynamic WaterJet.....	23
3.4 Dynamic Waterjet XD.....	23
4 STRUKTURA POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ METODOU AWJ	24
4.1 Mechanismus úběru materiálu technologií AWJ	24
4.2 Struktura povrchu.....	25
4.3 Parametry drsnosti povrchu	25
4.3.1 Maximální výška na pozorované ploše S_z).....	25
4.3.2 Průměrná aritmetická úchylna pozorované plochy S_a).....	25

4.4	Dotyková metoda hodnocení struktury povrchu	25
4.5	Optická metoda hodnocení struktury povrchu	26
4.6	Vliv faktorů na jakost povrchu při řezání metodou AWJ	26
5	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VLASTNÍHO MĚŘENÍ	27
5.1	Zadání úkolu	27
5.2	Měření vzorků	27
6	DISKUZE	30
	ZÁVĚR	31
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	32
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	35
	SEZNAM PŘÍLOH.....	36

ÚVOD

Využití proudy vody, která rozrušuje zeminu, využívali již kolem roku 1850 v Americe, pro povrchovou těžbu zlata.

Obrábění abrazivním vodním paprskem se řadí mezi nekonvenční technologie obrábění. Tyto technologie se vyznačují úběrem materiálu na principu chemickém nebo fyzikálním. Odlišují se zpravidla i tím, že na materiál nepůsobí silově a netvoří se klasické třísky, které se vyskytují při obrábění řeznými nástroji.

Nejvíce rozšířená technologie, z hlediska mechanického úběru materiálu, je technologie vysokotlakého (abrazivního) vodního paprsku. Tato technologie však stále není zcela prozkoumaná a pro řízení kvality povrchu nejsou zavedeny normy.

Zdrojem vysokého tlaku vody mohou být multiplikátory, které dokážou vyvinout tlak až 6000 bar (600 MPa). Mechanický účinek úběru materiálu může být zvýšen přidáním abrazivních částic, nejčastěji granátu, do vodního proudu.

Praktická část této bakalářské práce se bude zabývat porovnáním drsností povrchu uříznutých vzorků metodou Abrasive Waterjet a Dynamic Waterjet. Vzorky budou uříznuty čtyřmi rychlostmi řezací hlavice a drsnost povrchu se bude měřit 1 mm od horní a dolní hrany vzorku.

1 OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEKM

Princip dělení materiálu vodním paprskem spočívá ve vytvoření vysokého tlaku kapaliny, která prochází úzkou tryskou, kde kapalina získává kinetickou energii. Tímto vzniká všestranný nástroj, který dokáže obrábět většinu technických materiálů.[1]

1.1 Historie využití vodního paprsku

Působení vody a její erozní účinky na pevné látky v přírodě jsou známy již dlouhou řadu let. Bylo zjištěno, že pokud se voda dovede pod tlakem do trysky s malým otvorem, zvýší se erozní působení vody a zároveň se dosáhne vyšší erozní účinnosti při odstraňování materiálu. V USA byl díky těmto poznatkům v roce 1853-1886 v důlním průmyslu zaveden erozní úběr horniny pomocí vodního proudu, čehož se využívalo také při těžbě zlata (obr. 1.1).[4]

Řezání materiálu pomocí vodního paprsku (hydrodynamické obrábění) je známo už několik desítek let. Avšak stabilní a účinný vodní paprsek se začal využívat kolem roku 1970 pro dělení dřeva a plastů.[2]



Obr. 1.1 Těžba zlata využitím vodního proudu v Kalifornii roku 1860.[25]

1.2 Technologie WJM a AWJ

Rozdíl mezi WJM a AWJ:

- WJM = Water Jet Machinig neboli hydrodynamické obrábění (čistý vodní paprsek),
- AWJ = Abrasive Waterjet Machinig neboli obrábění vodním paprskem s abrazivem.

Tato technologie je založena na principu přirozené eroze materiálu, která je vyvolaná vysokoenergetickým vodním paprskem, který je vytvořen vysokotlakým vodním čerpadlem.[6]

Fyzikální podstata řezání vychází z toho, že paprsek se pohybuje až čtyřnásobnou rychlostí zvuku, proto jej lze považovat za pevné těleso. Řezání spočívá v odebrání materiálu mechanickým účinkem paprsku s vysokou kinetickou energií. Abrazivo zvyšuje mechanický účinek.[2]

1.3 Porovnání AWJ s ostatními NMO

Porovnání možností technologie AWJ s ostatními nekonvenčními metodami obrábění (NMO) viz tab. 1.1.

Tab. 1.1 Srovnání vodního paprsky s ostatními nekonvenčními metodami obrábění.[7],[1]

	Vodní paprsek	Plazma	LASER	EDM
Proces	erozní proces	proces spalování a tavení	proces tavby	erozní proces
Materiál	téměř všechny materiály	především ocel, nerez a hliník	především ocel, nerez a hliník	pouze elektricky vodivé materiály
Tloušťka	až 600 mm	až 75 mm	až 30 mm	až 300 mm
Přesnost	vysoká	nižší	vysoká	vysoká
Rychlost	nízká rychlost u tvrdých materiálů	tvrdost nemá vliv na rychlost	tvrdost nemá vliv na rychlost	tvrdost nemá vliv na rychlost
Investice	vysoké	nízké	vysoké	vysoké

1.4 Výhody a nevýhody AWJ

Výhody:

- Řez probíhá bez tepelného ovlivnění (max. ohřev cca 50°C), dílce se tepelně nedeformují (nelze vyloučit deformaci kvůli vlastnímu vnitřnímu napětí v materiálu),
- dílce lze umísťovat vedle sebe, jde použít tzv. společný řez,
- možnost řezání velké většiny technických materiálů,
- možnost sloučit operace jako vrtání, frézování a dělení do jednoho technologického procesu,
- v kvalitnějších stupních řezu již není nutné další zpracování,
- tvarové omezení řezu je limitováno pouze tvarem paprsku,
- při řezu nevznikají žádné nevhodné zplodiny.[3]

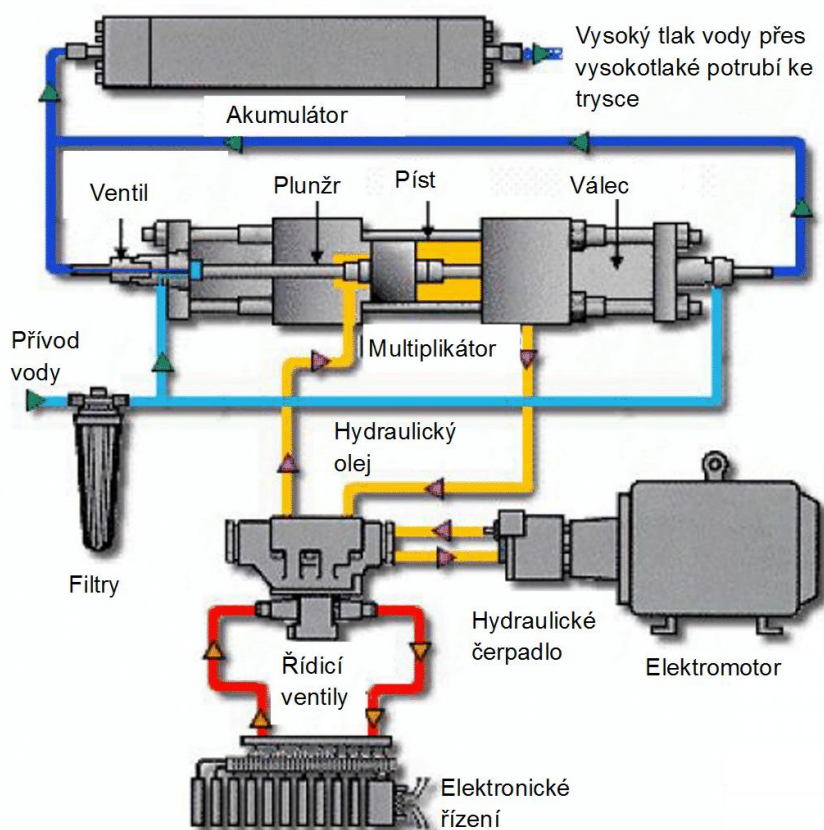
Nevýhody:

- Nevyhnutelný kontakt s vodou a abrazivním materiálem – bez vhodného ošetření rychlý nástup povrchové koroze,
- při horších kvalitativních stupních řezu u tlustších materiálů dochází ke změně kontury ve spodní straně řezu vlivem výběhu paprsku.[3]

1.5 Strojní zařízení

V této podkapitole bude rozebráno hlavní strojní zařízení pro technologii AWJ (viz obr. 1.2).

Předpokladem pro dlouhodobý chod zařízení je filtrace vstupní kapaliny. Pevné částice přítomné ve vodě urychlují opotřebení stěn trubek a válců, dochází k ucpávání ventilů a při kontaktu s těsněním omezují jeho funkci. Kromě filtrace se také voda deionizuje a změkčuje.[1]



Obr. 1.2 Schéma a princip tvorby vysokého tlaku vody.[27]

1.5.1 Vysokotlaké vodní čerpadlo

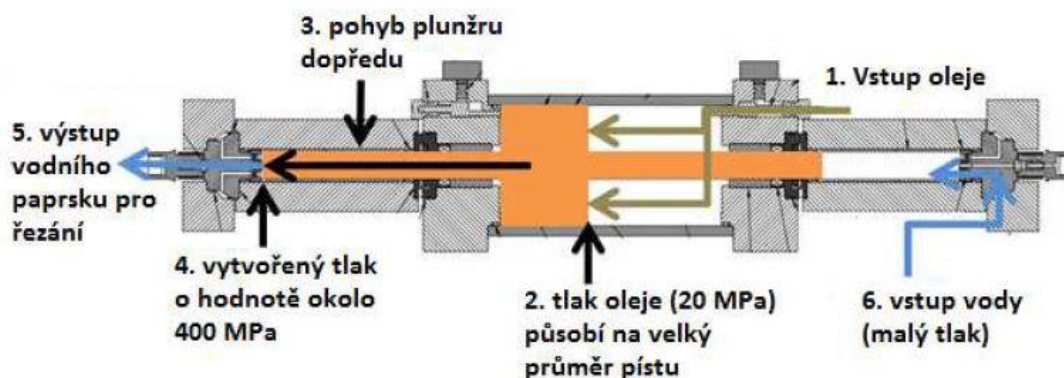
Vysoký tlak vody je možné generovat použitím plunžrového čerpadla nebo multiplikátorem.

Plunžrové čerpadlo pracuje na principu, kdy při pohybu pístu vzhůru se otevře sací ventil a kapalina se nasaje do pracovního prostoru. Při pohybu pístu dolů se uzavře sací ventil a otevře se výtlačný ventil.[6]

V minulosti se plunžrová čerpadla využívala např. pro odstraňování povrchových vrstev, protože jejich pracovní tlak dosahoval hodnoty 200 MPa. V současnosti dosahují tato čerpadla tlaku 350 MPa, což lze využít při dělení materiálů.[1]

Funkce multiplikátoru (viz obr. 1.3) je založena na dvou spojených pístech, kde nízký tlak oleje přivedený na větší průměr pístu je přeměněn na vysoký tlak vody v malém pístu.[5]

Tato čerpadla vyvíjejí tlak kapaliny 300 – 700 MPa. [1]

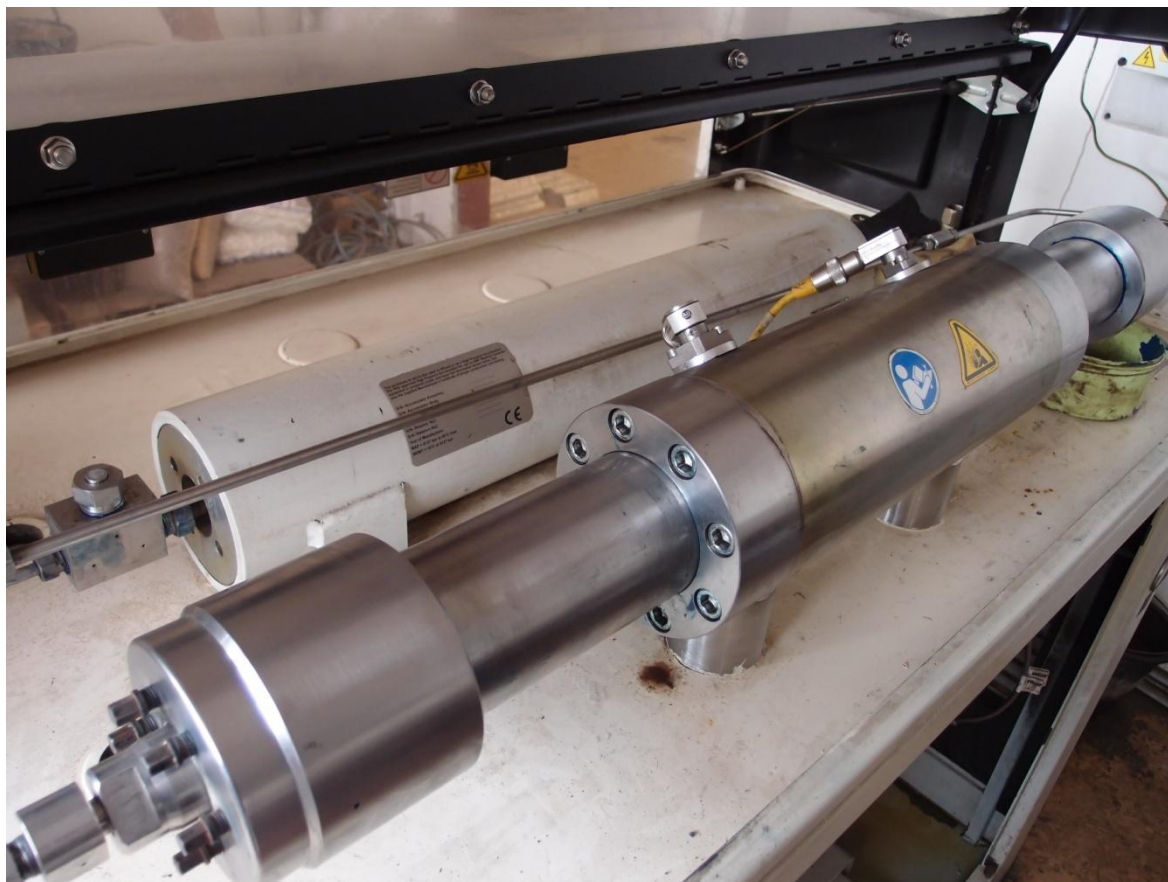


Obr. 1.3 Schéma a princip multiplikátoru.[26]

1.5.2 Akumulátor

Akumulátor je vysokotlaková nádoba (viz obr. 1.4), která tlumí rázy v kapalině následkem stlačování vody. Úkolem akumulátoru je udržovat stejný tlak a rychlost proudění vody.[2]

Nádoba je upravována autofretáží, což je proces, při kterém je nádoba natlakována tak, že vzniknou plastické deformace v materiálu. Touto úpravou dojde k zamezení růstu trhlin.[5]



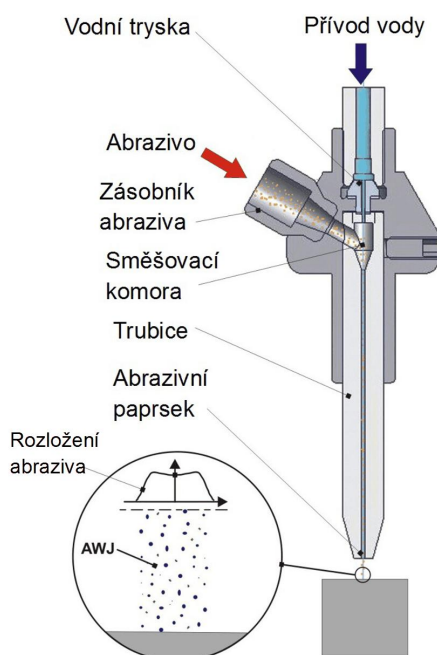
Obr. 1.4 Ukázka multiplikátoru (vpředu) a akumulátoru (vzadu).

1.5.3 Řezací hlavice

Důležitou součástí řezací hlavice je tryska (viz obr. 1.5). Tryska má průměr od 0,075 mm po 1,5 mm. Pro použití čistého a abrazivního vodního paprsku se používají různé trysky.[2]

Materiál používaný pro výrobu trysek je safír, diamant, kubický nitrid bóru nebo slinutý karbid. Trvanlivost safírové trysky jsou cca dvě hodiny.[5]

Při průchodu kapaliny tryskou se potencionální energie kapaliny mění na kinetickou. Kvalita a způsob této přeměny mají významný vliv na účinnost nástroje.[1]



Obr. 1.5 Schéma řezací hlavice.[33]

1.5.4 Abrazivo

Je to brusný materiál, který společně s vysokou energií vodního paprsku dodává technologii mnohem větší mechanický účinek. Nejčastěji se používá přírodní australský granát nebo olivín. V potravinářském průmyslu se využívá kakao, sůl a leďová tříšť.[5]

Zrnitost abraziva se řídí normou ČSN 22 4012 (např. 80 MESH = 0,180 mm). Druh použitého abraziva ovlivňuje zejména životnost použitých trysek.[8]

Vlastnosti abraziva:

- Tvrdost – vyšší účinnost při dělení materiálu, ale dochází k rychlejšímu opotřebení zaostřovací trubice.
- Velikost zrn – při použití menších zrn se dosáhne lepší drsnosti povrchu, ale prodlouží se čas řezu.
- Tvar zrn – rozlišujeme kulatost a kruhovitost. Při použití kulatějších zrn dosáhneme lepší drsnosti avšak nižší hloubky řezu.
- Hmotnostní tok – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje hloubka řezu, protože se zvyšuje kinetická energie paprsku. Po překročení kritického hmotnostního toku, hloubka řezu klesá.[13]

2 SOUČÁSTKOVÁ ZÁKLADNA

V této kapitole bude rozebráno v jakých oblastech a jaké materiály dokáže AWJ obrábět. Budou rozebrány i technologie obrábění pomocí AWJ.

2.1 Oblasti použití AWJ

Téměř neomezené možnosti využití technologie AWJ ilustruje následující přehled.

- Chemický průmysl (řezání výbušných látek – dynamit, tuhá paliva do raketových motorů),
- potravinářský průmysl (řezání ovoce, zeleniny a ryb v zmraženém stavu dále darty, sýry a další), viz obr. 2.1,
- papírenský průmysl (papír, folie a buničina),
- stavební průmysl (řezání polyuretanu, polystyrénu, sanace betonu, keramiky a dlaždic), viz obr. 2.2,
- obuvnický a gumárenský průmysl (řezání kůže, vláken KEVLAR a gumy),
- strojírenský průmysl (řezání titanu, wolframu, extrémně tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů; obrábění tvarově složitých součástek jako lopatky turbín a díly raketových motorů).[2]



Obr. 2.1 Řezání ryb technologií WJM.[20]



Obr. 2.2 Obnažování betonu metodou AWJ.[24]

2.2 Druhy řezaných materiálů

Pro řezání technologií AWJ je vhodný téměř každý materiál, který umí snášet přímý kontakt s vodou. Mezi tyto materiály patří všechny druhy oceli, neželezné kovy, porézní druhy materiálů, plasty, sklo, keramika, mramor, dřevo, koberce, kůže, sendvičové materiály a další (viz tab. 2.1).[10]

Materiály, které nejsou vhodné pro řezání metodou AWJ zejména patří kalené sklo a hrnčířská hlína v nezpracovaném stavu.[10]

Tab. 2.1 Druhy řezaným materiálů.[9, 19]

Materiál	Tloušťka [mm]	Rychlost řezání [mm.min ⁻¹]
Konstrukční ocel	až 70	20 - 3300
Korozivzdorná ocel	až 50	15 – 2500
Titan	až 70	25 - 3000
Guma	až 100	200 - 8000
Keramika	až 100	300 – 2000
Vrstvená skla	až 150	200 - 5000

2.3 Druhy technologií obrábění AWJ

V této podkapitole budou rozebrány jednotlivé technologie obrábění pomocí AWJ. Kromě běžně užívaného řezání materiálu se v poslední době tato technologie začíná prosazovat a vyvíjet v dalších technologiích obrábění, jako např. soustružení, frézování, vrtání a řezání závitů.[12]

2.3.1 Frézování

Při frézování technologií AWJ (viz obr. 2.3) nedochází k prořezání obrobku v celé jeho tloušťce. Hloubka řezu je tedy menší než tloušťka materiálu. Při tomto procesu vodní paprsek opakovaně přechází po obráběné ploše a postupně tak tvoří tvar blízký konečnému obrobku. Použití této technologie se zdá být perspektivní v oblasti výroby tvářecích nástrojů.[11]



Obr. 2.3 Příklad frézování.[21]

2.3.2 Soustružení

Při soustružení (viz obr. 2.4) obrobek rotuje a vodní paprsek se posouvá ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je vyvolaný radiálním posuvem paprsku do požadované hloubky řezu.[2]

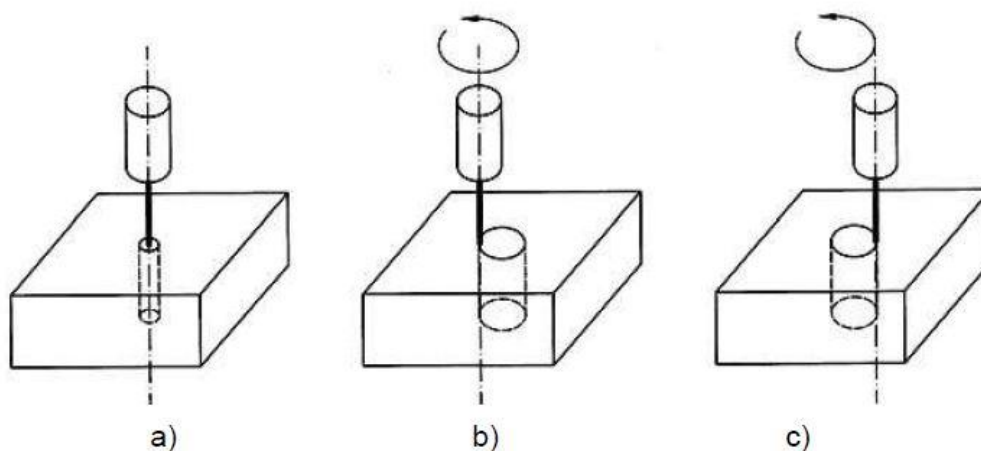


Obr. 2.4 Ukázka soustružení pískovce AWJ.[23]

2.3.3 Vrtání a vyvrtávání

Vrtání těžkoobrobitelných materiálů jako je keramika, sklo a slitiny niklu se využitím AWJ dostávají do popředí jako perspektivní technologie. V současnosti je vyvinutých několik způsobů vrtání otvorů charakterizovaných vzájemným pohybem vodního paprsku a obrobku (viz obr. 2.5).[2]

Zpravidla se využívá vrtání se stacionárním obrobkem a paprskem, vrtání rotujícím paprskem a stacionárním obrobkem anebo vibrujícím vodním paprskem a stacionárním obrobkem, což je tzv. vyřezávání.[2]



Obr. 2.5 Způsoby tvorby otvorů technologií AWJ.[2]

a)vrtání, b)vyřezávání, c)frézování

2.3.4 Gravírování

Jako u frézování technologií AWJ je i u gravírování (viz obr. 2.6) podstata v tom, že nedochází k úběru materiálu v celé tloušťce obrobku. Vodním paprskem je vytvářen přímo hotový reliéf, nebo je ještě dokončen umělcem pomocí konvenčních nástrojů. Při tvorbě reliéfů paprsek postupně odebírá jednotlivé vrstvy a vytváří tak požadovaný prostorový efekt, který vznikne při použití vícevrstevných materiálů.[11]



Obr. 2.6 Gravírování do skla technologií AWJ.[27]

3 ROZBOR TECHNOLOGIÍ VE FIRMĚ

Praktická část této bakalářské práce mi byla umožněna provést ve firmě AWAC, s.r.o. se sídlem v Brně na ulici Košuličova.

3.1 O společnosti AWAC, s.r.o.


Společnost AWAC, spol. s r.o. byla založena v říjnu 1990. Hlavní činností bylo poskytování služeb v té době málo známou metodou dělení materiálů vysokotlakým vodním paprskem. Přes počáteční nedůvěru zákazníků v tuto technologii se zájem o řezání stále zvětšoval. Zvítězily totiž přednosti vysokotlakého vodního paprsku – řez bez mikrotrhlin, chladný řez, dosažení tvarového výrobku jedinou operací, možnost dělit i velmi problematické materiály. Společnost od svého založení prošla velkým vývojem. K provozovně v Praze otevřela v průběhu let další zakázkové pracoviště v Plzni a Brně.[17]

3.2 Výrobní možnosti firmy AWAC

Na pracovištích lze řezat materiály v tloušťkách od 0,1 mm až po 250 mm. Firma AWAC s pracovištěm v Brně disponuje těmito stroji: FLOW MACH 4 4020C, MICROSTEP AQUACUT 4001.25 WW, 4001.25 a 1501.20 W. Základní údaje o strojích jsou v následujících tabulkách (viz Tab. 3.1 až Tab. 3.4).

Základní parametry multiplikátorových čerpadel STREAMLINE SL-V 50, ACCUSTREAM AS-6075 a TECHNI QUANTUM NXT ESP 55 jsou v tabulkách (viz tab. 3.5 až tab. 3.7)

Tab. 3.1 Popis stroje FLOW MACH 4 4020C.[32]

	FLOW MACH 4 4020C	
	Rozměry stolu [mm]	4000 x 2000
	Zdvih [mm]	200
	Pracovní tlak [bar]	6000
	Řídicí systém	Flow Xpert
	Počet hlav	1
	Přesnost [mm.m ⁻¹]	±0,02
	Vzdálenost trysky od materiálu [mm]	cca 2

Tab. 3.2 Popis stroje MICROSTEP AQUACUT 4001.25 WW.[31]


**MICROSTEP AQUACUT
4001.25 WW**

Rozměry stolu [mm]	6000 x 2500
Zdvih [mm]	150
Pracovní tlak [bar]	3800
Řídicí systém	MSNC
Počet hlav	2
Přesnost	podle DIN 28 206
Vzdálenost trysky od materiálu [mm]	cca 2

Tab. 3.3 Popis stroje MICROSTEP AQUACUT 4001.25.[31]


**MICROSTEP AQUACUT
4001.25**

Rozměry stolu [mm]	4000 x 2000
Zdvih [mm]	150
Pracovní tlak [bar]	3800
Řídicí systém	MSNC
Počet hlav	1
Přesnost	podle DIN 28 206
Vzdálenost trysky od materiálu [mm]	cca 2

Tab. 3.4 Popis stroje MICROSTEP AQUACUT 1501.20 W.[31]



**MICROSTEP AQUACUT
1501.20 W**

Rozměry stolu [mm]	4000 x 2500
Zdvih [mm]	150
Pracovní tlak [bar]	3800
Řídicí systém	MSNC
Počet hlav	1
Přesnost	podle DIN 28 206
Vzdálenost trysky od materiálu [mm]	cca 2


Tab. 3.5 Parametry čerpadla KMT STREAMLINE SL-V 50 PLUS.[35]

	KMT STREAMLINE SL-V 50 PLUS	
	Výkon [kW]	37
	Max. tlak [bar]	4137
	Max. průtok [l/min]	3,79
	Objem akumulátoru [l]	0,96
Rozměry d x š x v [mm]	1700 x 914 x 1453	

Tab. 3.6 Parametry čerpadla ACCUSTREAM AS-6075.[36]

	ACCUSTREAM AS-6075	
	Výkon [kW]	37
	Max. tlak [bar]	4137
	Max. průtok [l/min]	5,68
	Objem akumulátoru [l]	2,00
Rozměry d x š x v [mm]	1930 x 1016 x 1422	

Tab. 3.7 Parametry čerpadla TECHNI QUANTUM NXT ESP 55.[37]

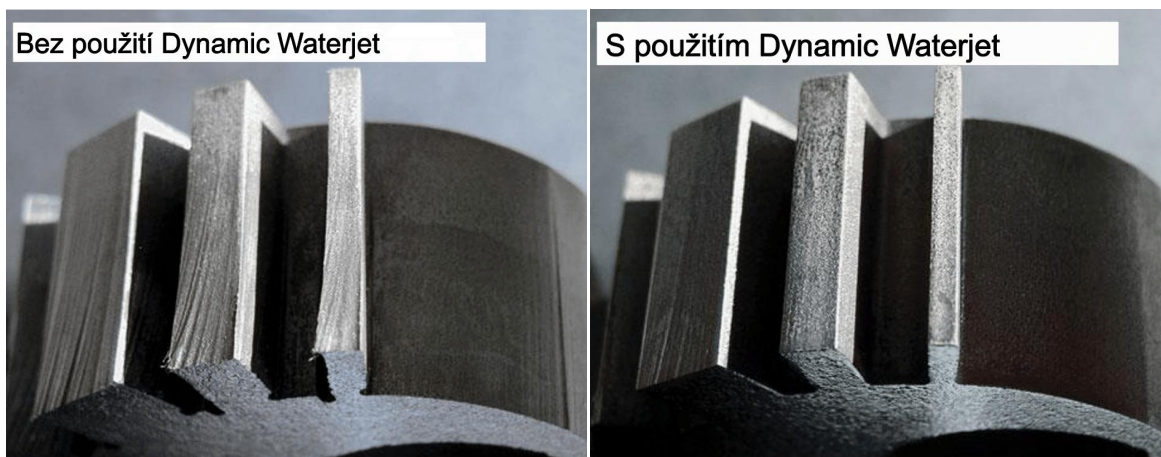
	TECHNI QUANTUM NXT ESP 55	
	Příkon	400 V, 60 A
	Max. tlak [bar]	3792
	Max. průtok [l/min]	3,8
	Hluk [dB]	68
Rozměry d x š x v [mm]	1600 x 600 x 1100	

3.3 Dynamic WaterJet

Při řezání vodním paprskem se zpravidla vyskytují dvě zvláštnosti. A to ohyb vodního paprsku a úkos řezné hrany (viz obr. 3.1). Ohyb vodního paprsku nastává, když vstupní bod paprsku do materiálu řeže rychleji, než výstupní bod. Je to tím, že paprsek se vzrůstající tloušťkou materiálu ztrácí svoji energii. Tím dochází na spodní straně řezu ke geometrickým nepřesnostem. Úkos ve tvaru „V“ vzniká ztrátou energie paprsku s narůstající tloušťkou.[16]

Zpoždění vodního paprsku i kuželovitost řezných hran se dá minimalizovat snížením rychlosti posuvu. To však znamená vyšší časy na výrobu a vyšší náklady.

Technologie Dynamic Waterjet vyvinutá společností Flow je založena na aktivním řízení eliminace úkosu. Principem je naklápění řezací hlavy na stranu podle potřeby eliminace úkosu. Tuto eliminaci vypočítávají matematické modely SmartStream™, které pracují na pozadí řídicího počítače. Pracovník jednoduše zadá základní parametry řezání, typ materiálu, tloušťku materiálu a požadovanou kvalitu řezu. Součást je vyrobena rychle a s vysokou přesností.[16]



Obr. 3.1 Rozdíl při použití technologie Dynamic Waterjet.[22]

3.4 Dynamic Waterjet XD

Technologie byla vynalezena a patentována společností Flow. Tento systém nabízí tvarově složitě řezání (viz Obr. 3.2) ve 3D díky korekci zpoždění paprsku a úkosu. Kinematika umožňuje řezací hlavě se naklápět ve všech směrech. Řez je možné provést pod úhlem až 60°. Je možné řezat pod vodní hladinou.[18]



Obr. 3.2 Díl vyrobený technologií Dynamic Waterjet XD.[30]

4 STRUKTURA POVRCHU PŘI ŘEZÁNÍ METODOU AWJ

V této kapitole je popisován mechanismus úběru materiálu, obecné metody hodnocení povrchu a vlivy, které ovlivňují jakost povrchu při řezání technologií AWJ.

4.1 Mechanismus úběru materiálu technologií AWJ

Mechanismus úběru je doposud málo prozkoumaná oblast. Řada odborníků se shodují na tom, že na dezintegraci materiálu se podílí řezání (cutting), únava (fatigue) a lom (fracture). Tyto mechanismy působí ve vzájemné kombinaci. Výsledkem mechanismů vzniká povrch, který je charakteristický svojí topografií. Horní část je hladká a od určité hloubky se tvoří rýhovaná oblast. To je způsobeno tím, že paprsek ztrácí svoji kinetickou energii, vychyluje se a z převládajícího řezného opotřebení se stává opotřebení deformační.[14]

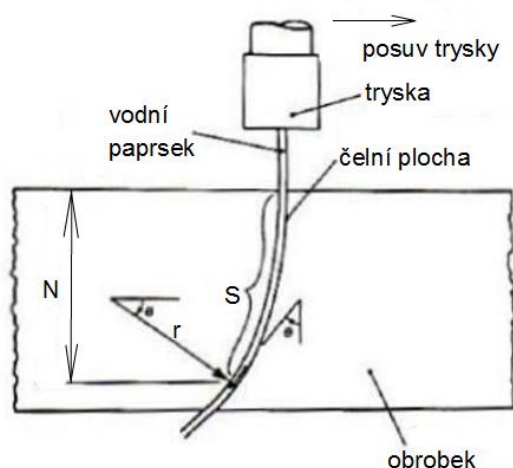
Podle charakteru topografických nerovností na hloubce dělicího řezu je možno konvenčně zavést čtyři pásma:

- pásmo iniciační,
- hladké,
- přechodné,
- deformační. [2]

Tyto oblasti se vyznačují tím, jako by byly obráběny různými technologiemi. [1]

Při řezání dochází k vychylování a zpomalování proudu jako důsledek tření mezi povrchem proudu a povrchem materiálu obrobku. Dráha proudu je zaoblená a její poloměr se mění podle předcházející délky oblouku (viz obr. 4.1). Tyto vlastnosti ovlivňují výslednou topografii povrchu obrobku.[2]

Vodní paprsek je při vstupu do materiálu stabilní a koncentrovaný. Stopa dělicího řezu se ještě intenzivněji nezakřivuje vlivem zpoždění oproti řezné hlavě. Když proud dosáhne kritické hloubky, je zpomalován a dekoncentrován. V emulzi přibývá podíl drtě materiálu a abraziva, které ztratilo svoji kinetickou energii. Míšení abraziva a drtě má i s dalšími faktory vliv na počátek tvorby hlubších rýh.[1]



N – dráha ve svislém směru, kterou projde paprsek za čas t ,
r – poloměr zaoblení paprsku,
S – délka stopy paprsku podle čelní plochy řezu,
 θ – úhel vychýlení paprsku mezi skutečným a výchozím směrem paprsku v řezu.

Obr. 4.1 Schéma úběru materiálu.[2]

4.2 Struktura povrchu

Normy pro hodnocení struktury povrchu v oblasti technologie AWJ nebyly dosud zavedeny. Proto tato práce používá strojírenskou normu ČSN EN ISO 25178-2. Vytvořené dělicí plochy metodou AWJ nejjednodušeji a konvenčně hodnotíme podle horní části kvalitního, hladkého řezu a dolní části deformovaného řezu. Nerovnosti v horní části jsou převážně v řádech drsnosti. Nerovnosti v dolní části jsou v řádu vlnitosti a vyskytuje se zde rýhování.[1]

Podle normy ČSN EN ISO 4277 se rozlišuje:

- základní profil P,
- profil vlnitosti W,
- profil drsnosti R.

4.3 Parametry drsnosti povrchu

Parametry plošné drsnosti povrchu se řídí podle normy ČSN EN ISO 25178-2.

4.3.1 Maximální výška na pozorované ploše S_z ¹⁾

Součet maximální hodnoty výšky píku a maximální hodnoty hloubky prohlubně na pozorované ploše.[34]

4.3.2 Průměrná aritmetická úchylna pozorované plochy S_a ²⁾

Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic na pozorované ploše.[34]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad (4.1)$$

kde: S_a – střední aritmetická úchylna profilu [μm]
 A – pozorovaná plocha
 $z(x,y)$ – výšky pořadnic [μm]

4.4 Dotyková metoda hodnocení struktury povrchu

Mechanická (dotyková) metoda je nejrozšířenější ve strojírenské praxi (viz tab. 4.1). Její výhodou je přímé měření a použití pro všechny typy povrchů. Záznam topografie lze převádět do digitální podoby. V důsledku tlaku na měřicí hrot dochází k elastickým a plastickým deformacím v povrchové vrstvě, což je nevhodné pro výsledky měření a pro měřený povrch.[1]

¹⁾ Oficiální název v normě ČSN EN ISO 25178-2 je „maximální výška omezené stupnice povrchu“. Z důvodu srozumitelnosti byl tento název přeložen z angličtiny (maximum height of the scale-limited surface) na „maximální výška na pozorované ploše“.

²⁾ Oficiální název v normě ČSN EN ISO 25178-2 je „aritmetický průměr omezené stupnice povrchu“. Z důvodu srozumitelnosti byl tento název přeložen z angličtiny (arithmetical mean height of the scale-limited surface) na „průměrná aritmetická úchylna pozorované plochy“.

Tab. 4.1 Výhody a nevýhody mechanické metody.[1]

Výhody	Nevýhody
Přímé měření výškových nerovností vůči referenční rovině	Destrukce povrchů u měkčích materiálů
Vysoká rozlišovací schopnost	Pouze 2D měření
Velký měřicí rozsah	Relativně pomalý pohyb hrotu
Možnost měření v nečistém prostředí	Neumožňuje řízení kvality povrchu

4.5 Optická metoda hodnocení struktury povrchu

Metoda je založena na tom, že bílé světlo ze zdroje je přivedeno přes optické vlákno na čočku, kde jednotlivé složky bílého světla jsou zaostřovány do různých výšek. Po dopadu na měřený povrch je ideálně odraženo zpět do spektrometru, kde hodnota odraženého světla je převedena na vzdálenost senzoru od povrchu vzorku. Vzorek je umístěn na skenovacím stolku, který se přesně pohybuje v definovaných liniích. Tím se získají údaje o topografii povrchu. Výsledkem je matice hodnot výškových nerovností měřeného povrchu.[1]

4.6 Vliv faktorů na jakost povrchu při řezání metodou AWJ

Faktory, které ovlivňují jakost povrchu, jsou přímé (viz tab. 4.2) a nepřímé. Mezi faktory nepřímé můžeme zařadit např. tlak kapaliny, průměr a délka zaostřovací trubice, hmotnostní tok abraziva a tvar abrazivních částic.[1]

Tab. 4.2 Přímé faktory ovlivňující topografii povrchu.[14]

Druh	Označení	Jednotka
Rychlost posuvu	v_p	$\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$
Směr posuvu	s_p	$^\circ$
Počet přechodů	n_p	1
Zdvih	x_z	mm
Úhel působení	φ_p	$^\circ$
Tloušťka materiálu	b	mm

5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VLASTNÍHO MĚŘENÍ

Praktická část byla prováděna za pomoci firmy AWAC, s.r.o se sídlem v Brně.

5.1 Zadání úkolu

Provedte měření drsnosti (průměrná aritmetická úchylka pozorované plochy S_a a maximální výška pozorované plochy S_z) na uříznutých plochách ve vzdálenosti 1 mm od horní a dolní hrany vzorku přibližně uprostřed. Vzorky budou z materiálu hliník EN AW 5083 (viz příloha 1) o tloušťce 20 mm. Vzorky budou uříznuty dvěma různými technologiemi. A to na stroji FLOW MACH 4 4020C technologií AWJ a na stejném stroji technologií Dynamic Waterjet. Vzorky budou uříznuty v různých stupních kvality řezu (různými rychlostmi), které firma AWAC označuje jako Q20, Q40, Q60 a Q80. Vlastní měření drsnosti probíhalo na Ústavu výrobních strojů a zařízení při VUT v Brně.

5.2 Měření vzorků

V následujících tabulkách (tab. 5.2 a tab. 5.3), které jsou rozděleny podle jednotlivých technologií, jsou napsány vstupní parametry pro konkrétní stroje jako např. pracovní tlak, hmotnostní tok abraziva, zdvih trysky, použité abrazivo a průměr trysky. Fotografie uříznutých ploch jsou na obr. 5.2.

Rychlosti řezací hlavičky pro jednotlivé stupně kvality řezu jsou následující:

- Q20 = 158 mm.min⁻¹,
- Q40 = 305 mm.min⁻¹,
- Q60 = 467 mm.min⁻¹,
- Q80 = 632 mm.min⁻¹.

Měření vzorků probíhalo na přístroji Taylor&Hobson CCI MP (viz obr. 5.1) na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky při VUT v Brně. Základní parametry přístroje jsou v tab. 5.1.

Měření bylo prováděno s 10x zvětšením a velikost zkoumané plochy byla 1,65 mm x 1,65 mm. Byly měřeny plošné parametry S_a a S_z .



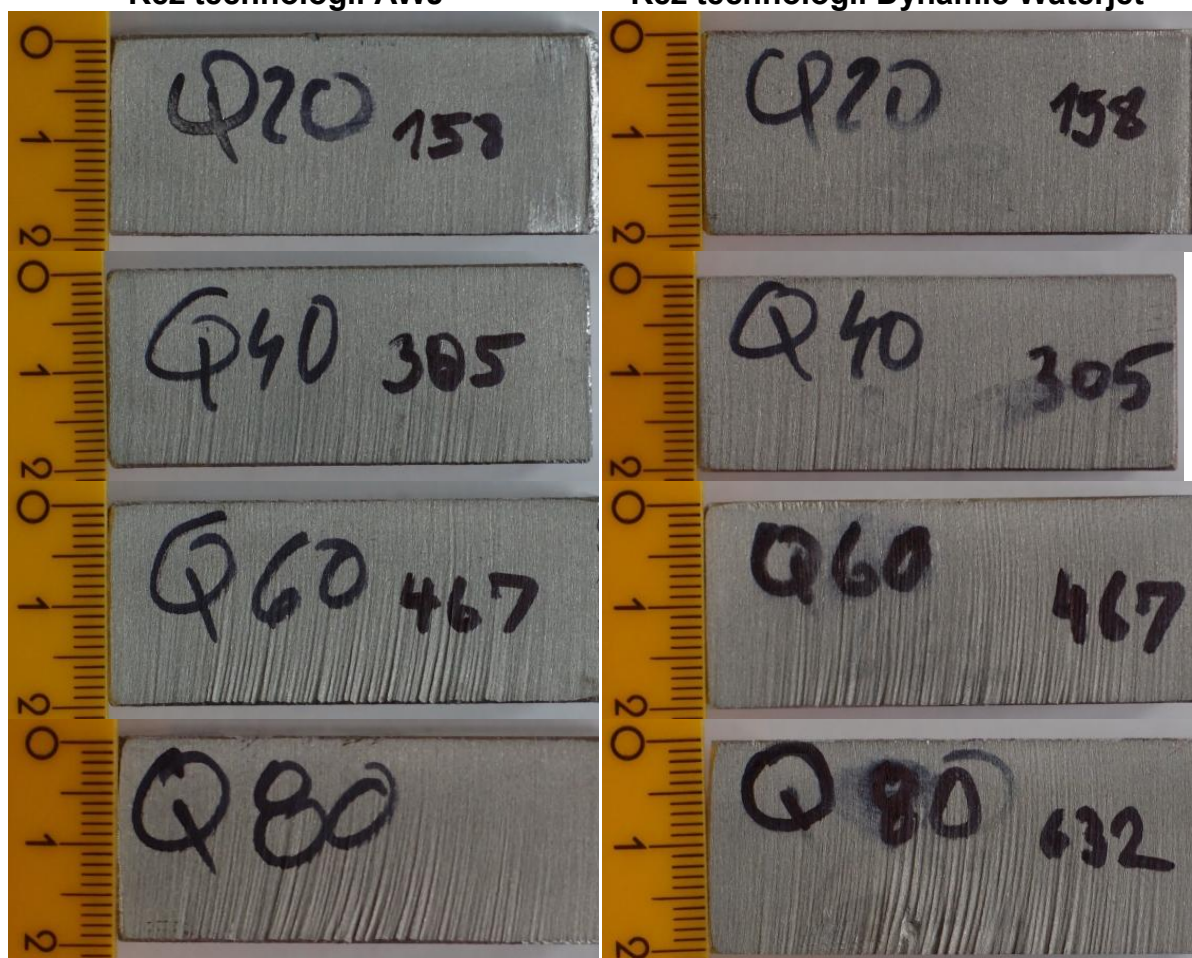
Obr. 5.1 Optický měřicí přístroj Taylor&Hobson CCI MP.

Tab. 5.1 Základní parametry přístroje Taylor&Hobson CCI MP.

Princip měření	koherentní korelační interferometrie
Vertikální rozlišení (max.)	0,01 nm
Velikost měřené součástky	X, Y < 150 mm, Z < 100 mm
Hmotnost součástky (max.)	10 kg
Posuv stolku X x Y	112 x 75 mm
Naklápění stolku X x Y	±4°
Počet měřených bodů	1024 x 1024 standardní
Čas měření	5 až 40 s (typicky)

Řez technologií AWJ

Řez technologií Dynamic Waterjet



Obr. 5.2 Fotografie vzorků.

Fotografie s vysokým rozlišením jsou v příloze 2 a 3.

Tab. 5.2 Hodnoty Sa a Sz pro stroj FLOW Mach4 bez technologie Dynamic Waterjet.

Stroj: FLOW MACH 4 4020C								
Technologie: Abrasive WaterJet (AWJ)								
Pracovní tlak:			6000 bar		Hmotnostní tok			
Zdvih trysky:			2 mm		abraziva:			
Průměr trysky vodní a abrazivní:			0,3556 mm a 1,02 mm		Abrazivo:			
Vzorek: hliník, tloušťka 20 mm	Q20		Q40		Q60		Q80	
	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana
Sa [μm]	3,831	5,707	5,391	10,252	4,633	21,787	4,673	16,225
Sz [μm]	45,654	68,258	53,916	84,594	64,616	163,76	53,880	113,16

Tab. 5.3 Hodnoty Sa a Sz pro stroj FLOW Mach4 s technologií Dynamic Waterjet.

Stroj: FLOW MACH 4 4020C								
Technologie: Dynamic WaterJet (DWJ)								
Pracovní tlak:			6000 bar		Hmotnostní tok			
Zdvih trysky:			2 mm		abraziva:			
Průměr trysky vodní a abrazivní:			0,3556 mm a 1,02 mm		Abrazivo:			
Vzorek: hliník, tloušťka 20 mm	Q20		Q40		Q60		Q80	
	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana	horní hrana	dolní hrana
Sa [μm]	4,734	6,758	5,008	9,017	5,428	21,139	5,601	47,168
Sz [μm]	49,159	70,227	58,210	79,430	56,711	152,78	61,432	225,09

Potvrdil se předpoklad, že horní část řezu je kvalitnější než dolní část řezu. Při tomto konkrétním měření se dá říci, že drsnosti horních hran vzorků uříznutých metodou AWJ je nižší, než u DWJ. Rovněž i parametr Sz na horních hranách je nižší u metody AWJ. To ovšem může být způsobeno tím, že se neměřilo přesně na stejném místě (na stejné úrovni). Při řezu Q20 na dolní hraně je parametr Sa i Sz nižší u metody AWJ. U kvalit řezu Q40 a Q60 na dolní hraně jsou naopak parametry Sa i Sz nižší u metody DWJ. Řez kvality Q80 má na dolní hraně parametry Sa a Sz nižší metoda AWJ. Tyto výkyvy (např. u Q80 na dolní hraně při metodě AWJ je Sa = 16,225 μm a u metody DWJ je Sa = 47,168 μm) mohou být rovněž způsobeny tím, že vzorek má nehomogenní texturu a měření plochy o rozměru 1,65 x 1,65 mm nemusí zahrnout i hlubší rýhy.

6 DISKUZE

Principem dělení materiálu abrazivním vodním paprskem (AWJ) je vytvoření vysokého tlaku kapaliny, která prochází přes úzkou trysku, kde kapalina získává svoji kinetickou energii. Přidáním abraziva se mechanický účinek rozrušování materiálu zvyšuje. Takto vzniká všestranný nástroj, který dokáže obrábět většinu technických materiálů.

Vodního paprsku (proudu) se využívalo už v roce 1860 pro povrchovou těžbu zlata, kde vodní proud rozrušoval zeminu.

Obrábění metodou AWJ se řadí mezi nekonvenční metody obrábění. Jeho výhodou je, že může řezat většinu materiálů, nedochází k tepelnému ovlivnění řezu a dílce se tepelně nedeformují. Metodou AWJ se může materiál dělit, frézovat, soustružit, vrtat a gravírovat.

Základním strojním vybavením pro technologii AWJ je vysokotlaké vodní čerpadlo. Čerpadlo používané pro dělení materiálu může být buď plunžrové anebo typu multiplikátor, který dosahuje tlaků kapaliny až 700 MPa. Funkce multiplikátoru je založena na dvou spojených pístech, kdy na větší průměr pístu se přivede nízký tlak oleje, který se převede na vysoký tlak kapaliny na menším průměru pístu.

Původní zadání firmy bylo takové, že by se měřilo 12 vzorků uříznutých na třech různých strojích, v tloušťkách 20 mm a 40 mm a navíc ze dvou materiálů (korozivzdorná ocel a hliník). Celkem 96 měření. Ovšem z důvodu časové náročnosti (cca 15 hodin měření) mně bylo doporučeno, aby se změřily pouze dva reprezentativní vzorky. Tedy 16 měření. Původně bylo v plánu vzorky změřit na dotykovém drsnoměru Perthometer Mahr 2. Ovšem při měření dolní hrany u kvality řezu Q60 a Q80 byl překročen měřicí rozsah, který je u tohoto přístroje 100 μm . Z tohoto důvodu a důvodu zachování vzájemné porovnatelnosti měření byly vzorky měřeny na koherentním korelačním interferometru Taylor&Hobson CCI MP na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

Před vlastním měřením bylo nutné na vzorcích srazit hrany, které by jinak mohly poškodit měřicí přístroj. Doba měření horních hran vzorků se pohybovala kolem 160 sekund. Měření dolní hrany u kvality Q80, kde jsou značné rýhy, trvalo 7 minut.

Měření bylo prováděno s desetinásobným zvětšením na ploše o rozměrech 1,65 mm x 1,65 mm. Výstupem měření byl model pozorované plochy a hodnoty S_a a S_z . Pro vypovídací hodnoty měření by bylo nutné měřit vzorky na více místech, avšak z důvodu časové potažmo finanční náročnosti to nebylo možné.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala přesností výrobku z hlediska drsnosti povrchu měřené na horní a dolní části uříznuté plochy. Vzorky byly řezány dvěma technologiemi a to AWJ a DWJ.

Při řezání metodou AWJ dochází ke zpoždování vodního paprsku a úkosu uříznutých stěn. To se dá eliminovat snížením posuvové rychlosti, avšak prodlouží se čas výroby.

Metoda Dynamic Waterjet (DWJ) eliminuje úkos na řezané stěně, který se vyskytuje při řezání metodou AWJ. Principem je naklápění řezací hlavy v různých směrech podle potřeby. Eliminaci zajišťují matematické algoritmy, které pracují na pozadí řídicího systému FlowXpert. Rozměrová přesnost výrobku, kterou udává firma FLOW je $\pm 0,02 \text{ mm.m}^{-1}$.

Praktická část probíhala ve spolupráci s firmou AWAC, s.r.o. Cílem praktické části této práce bylo porovnat drsnosti povrchu na vzorcích uříznutých technologií AWJ a Dynamic Waterjet (DWJ). Vzorky byly měřeny optickou metodou na přístroji Taylor&Hobson CCI MP.

Potvrdil se předpoklad, že horní část řezu je kvalitnější než dolní část řezu. Při porovnání hodnot S_a i S_z změřených na horních hranách řezu technologie AWJ a DWJ se při tomto konkrétním měření dá říci, že drsnosti povrchu jsou nižší při řezání metodou AWJ. To ovšem může být dáno tím, že vzorky nebyly měřeny přesně na stejných místech (na stejné úrovni).

Při řezu Q20 na dolní hraně je parametr S_a i S_z nižší u metody AWJ. U kvalit řezu Q40 a Q60 na dolní hraně jsou naopak parametry S_a i S_z nižší u metody DWJ. Řez kvality Q80 má na dolní hraně parametry S_a a S_z nižší metoda AWJ. Tyto výkyvy (např. u Q80 na dolní hraně při metodě AWJ je $S_a = 16,225 \mu\text{m}$ a u metody DWJ je $S_a = 47,168 \mu\text{m}$) mohou být rovněž způsobeny tím, že vzorek má nehomogenní texturu a měření plochy o rozměru $1,65 \times 1,65 \text{ mm}$ nemusí zahrnout i hlubší rýhy.

Na základě měření vzorků v této práci se nedá potvrdit předpoklad o lepší jakosti uříznutých ploch metodou DWJ.

Pro kvalitnější měření by bylo zapotřebí měřit vzorky ve více úrovních. Také na začátku vzorku, kde se rychlost posuvu hlavy zvyšuje; uprostřed, kde rychlost posuvu je nejvyšší a na konci, kde řezací hlava zpomaluje. Vhodnější by asi bylo zabývat se pouze kvalitně uříznutými povrchy, u kterých se už nebude vyžadovat následné opracování, v tomto případě Q20, max. Q40. U horších kvalit řezu již asi nemá smysl měřit drsnost povrchu, protože rýhování je zde značné. Horší kvalita řezu je možná pro řezy, kde uříznutá plocha nebude plochou funkční. Je to výhodné i z hlediska ekonomického.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. Vyd. 1. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie (Advanced methods of material removal)*. 1. vyd. Košice: Viennala, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.
3. CHPS, s.r.o.: *Technologie* [online]. [cit. 2014-02-03]. Dostupné z: <http://chps.cz/vodni-paprsek/technologie>
4. HÍREŠ, Ondřej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
5. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
6. Abeceda vodních pohonů. *Plunžrové čerpadlo*. [online]. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/jineturbiny/plunzrove-cerpadlo.htm>
7. Srovnávací řezání. *Flow* [online]. c 2014 [vid. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/comparative-cutting.aspx>
8. BARCAL, Jaroslav. *Nekonvenční metody obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1989, 122 s.
9. MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999, 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
10. Aquadem, s.r.o.: *Řezání vodním paprskem* [online]. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://aquadem.cz/rezani-vodnim-paprskem.htm>
11. MM Průmyslové spektrum: *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ* [online]. 2007 [vid. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologieii-awj.html>
12. Glassrevue: *Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II*. [online]. 2008 [vid. 2014-02-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologieii-awj.html>
13. MARTINEC, P., FOLDYNA, J., SITEK, L., ŠČUČKA, J., VAŠEK, J., *Abrasives for AWJ cutting*. Academy of Sciences, Ostrava, 2002, 80 s.
14. KRAJNÝ, Z. *Vodný lúč v praxi WJM*. Mračko – Bratislava, 1998, 384 s. ISBN 80-8057-091-4
15. PERNÍKÁŘ, J., TYKAL, M., VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001, 151 s. ISBN 80-214-1997-0
16. Flow International: *Dynamic Waterjet* [online]. 2014 [vid. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/dynamic-waterjet.aspx>
17. AWAC, s.r.o.: *O společnosti* [online]. 2014 [vid. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/cz/32-O-spolecnosti>
18. Flow International: *Dynamic Waterjet XD* [online]. 2014 [vid. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/cs-CZ/waterjet-technology/dynamic-waterjet-xd.aspx>

19. NOVÁK, J., MĚŠTÁNEK, J., ŘASA, J., VAŠEK, J., JEŘÁBEK, Z., JANČUŠKA, I. Vysokoenergetický kapalinový paprsek – využití v čs. průmyslu. Dům techniky ČSVTS Praha 1989. 68s.
20. *Wikimedia Commons: Waterjet-cutting-apple.jpg* [online]. [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waterjet-cutting-apple.jpg>
21. HARRIS, Stephen. *The Engineers: Abrasive water-jet model could enable lower-cost milling* [online]. 2011 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.theengineer.co.uk/channels/production-engineering/news/abrasive-water-jet-model-could-enable-lower-cost-milling/1011031.article>
22. *Modern Machine Shop: Waterjet Taper Control, Pump Speed Part Production* [online]. 2011 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmsonline.com/articles/waterjet-taper-control-pump-speed-part-production>
23. *Institute of Geonics AS CR, v.v.i.: New areas of high-speed water jet utilization* [online]. 2000-2013 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.ugn.cas.cz/?l=en&a=&p=depart/depart-22/wjet-utilization.php>
24. *World Fishing and Aquaculture: Increased value with new X-ray cutting machine* [online]. 2014 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.worldfishing.net/news101/fish-processing/increased-value-with-new-x-ray-cutting-machine>
25. *Inside Science: There's Gold In Them, Thar Hills -- And Toxic Mercury* [online]. 2014 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.insidescience.org/content/there%E2%80%99s-gold-them-thar-hills-and-toxic-mercury/1475>
26. KOPEČNÝ, Libor. *Abrazivní vodní paprsek*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, PhD.
27. DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>
28. *Jet Edge: How a Water Jet Machine Works* [online]. 2013 [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: http://www.jetedge.com/content.cfm?fuseaction=dsp_applications_101
29. SABRE High Pressure Water Jetting: *Hydro Demolition* [online]. [vid. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.sabrejetting.co.uk/index.php?webpage=hydro-demolition>
30. Stainless Technologies: *Waterjet Cutting Services* [online]. 2013 [vid. 2014-03-23]. Dostupné z: http://www.sawaterjet.co.za/images/highres/sidemenu/XD_Sample_Metal-2_RGB.jpg
31. *MICROSTEP s.r.o.: AquaCut* [online]. 2013 [vid. 2014-04-01]. Dostupné z: http://www.microstep.eu/products/machines/waterjet_machines/aquacut/
32. *Flow: MACH 4C WATERJET MODELS* [online]. 2014 [vid. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/cutting-systems/mach-4/cutting%20systems/Mach%204c%20Models.aspx>
33. *Scandiavian WaterJet: Industrial WaterJet* [online]. 2014 [vid. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.swa.se/page/132/industrial-waterjet.aspx>

34. ČSN EN ISO 25178-2
35. KMT WATERJET. *Streamline SL-V Plus Series: High Performance Waterjet Technology* [online]. 2008, 12 s. [vid. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.kmtwaterjet.com/KMT%20Streamline%20SL-V%20Pumps%20Catalog.pdf>
36. ACCUSTREAM. *AS-6075: Intensifier Pump*. [2014], 2 s. Dostupné z: <http://www.accustream.com/download/as-6075.pdf>
37. Electric Servo Pump ESP 55. TECHNİ WATERJET. *TECHNI Waterjet* [online]. [2014] [vid. 2014-04-06]. Dostupné z: <http://www.techniwaterjet.com/ESP55.html>
38. GLEICH ALUMINIUM. *EN AW 5083: Technický datový list* [online]. 2012 [vid. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-en-aw-/en-aw-5083#sheet>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
AWJ	[-]	Abrasive Waterjet
DWJ	[-]	Dynamic Waterjet
MESH	[-]	Velikost zrn sypkých hmot
NMO	[-]	Nekonvenční metody obrábění
Q20	[-]	Požadovaná kvalita uříznutého vzorku nastavitelná v řídicím systému stroje
Q40	[-]	Požadovaná kvalita uříznutého vzorku nastavitelná v řídicím systému stroje
Q60	[-]	Požadovaná kvalita uříznutého vzorku nastavitelná v řídicím systému stroje
Q80	[-]	Požadovaná kvalita uříznutého vzorku nastavitelná v řídicím systému stroje
WJM	[-]	Waterjet Machinig

Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	pozorovaná plocha
S _a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka pozorované plochy
S _z	[μm]	maximální výška na pozorované ploše
b	[mm]	tloušťka materiálu
n _p	[-]	počet přechodů
s _p	[°]	směr posuvu
v _p	[mm.min ⁻¹]	rychlost posuvu
x _z	[mm]	zdvih
z(x,y)	[μm]	výšky pořadnic v osách x a y
φ _p	[°]	úhel působení

SEZNAM PŘÍLOH

1. Technický datový list materiálu EN AW 5083
2. Fotografie vzorků uříznutých metodou DWJ
3. Fotografie vzorků uříznutých metodou AWJ
4. Model povrchu horní hrany vzorku při řezu metodou AWJ a DWJ
(kvalita Q20)
5. Model povrchu dolní hrany vzorku při řezu metodou AWJ a DWJ
(kvalita Q80)

PŘÍLOHA 1

Technický datový list materiálu EN AW 5083. [38]

Znaky slitiny	
Název slitiny	EN AW 5083, (AlMg4,5Mn0,7)
Typ slitiny	nevytvrditelná, přirozeně tvrdá
Povrch	H111
Stav materiálu	válcovaný povrch

Mechanické vlastnosti	Typické hodnoty
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	115 – 125
Pevnost v tahu R_m [MPa]	270 – 275
Tažnost A_{50} [%]	15 – 16
Tvrdość [HB]	73 – 75

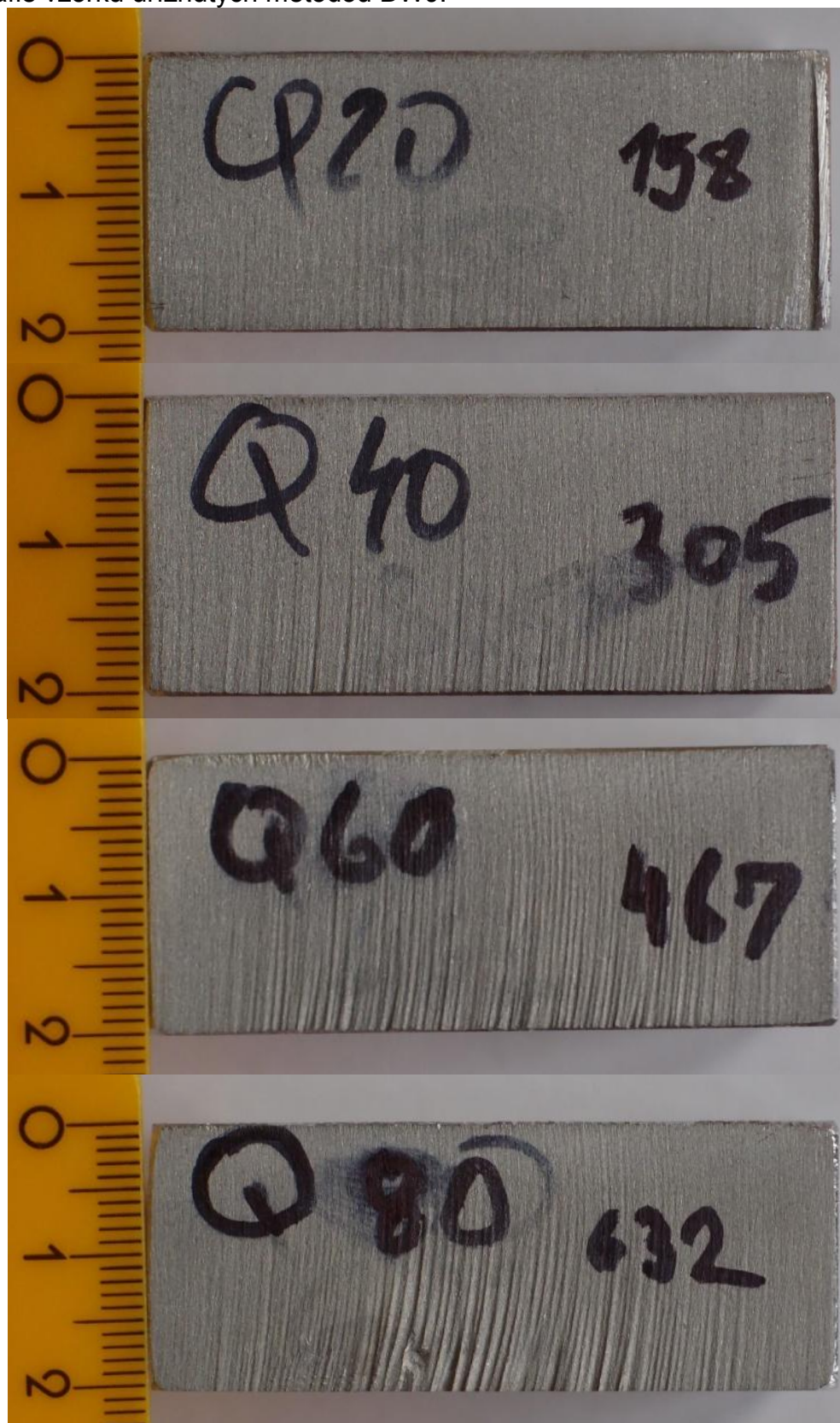
Fyzikální vlastnosti	Typické hodnoty
Hustota [g.cm^{-3}]	2,66
Modul pružnosti [GPa]	70
Tepelná vodivost [W/m.K]	110 – 140
Specifická tepelná kapacita [J/kg.K]	900

Technologické vlastnosti	Relativní hodnoty hliníkových materiálů (1 – velmi dobrý, 6 – nevhodný)
Tvarová stálost a vnitřní napětí	3 – 4
Obrobitelnost	2
Vhodnost pro erozivní obrábění	1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / odporové / EB)	4 / 2 / 2 / 2 / 1
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětrnostní vlivy)	1 / 1
Kontakt s potravinami (podle EN 602)	ano

Chemické složení [hm. %]									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
min.				0,04	4,00				zbytek
max.	0,70	0,40	0,10	0,60	6,00	0,30	0,20	0,20	

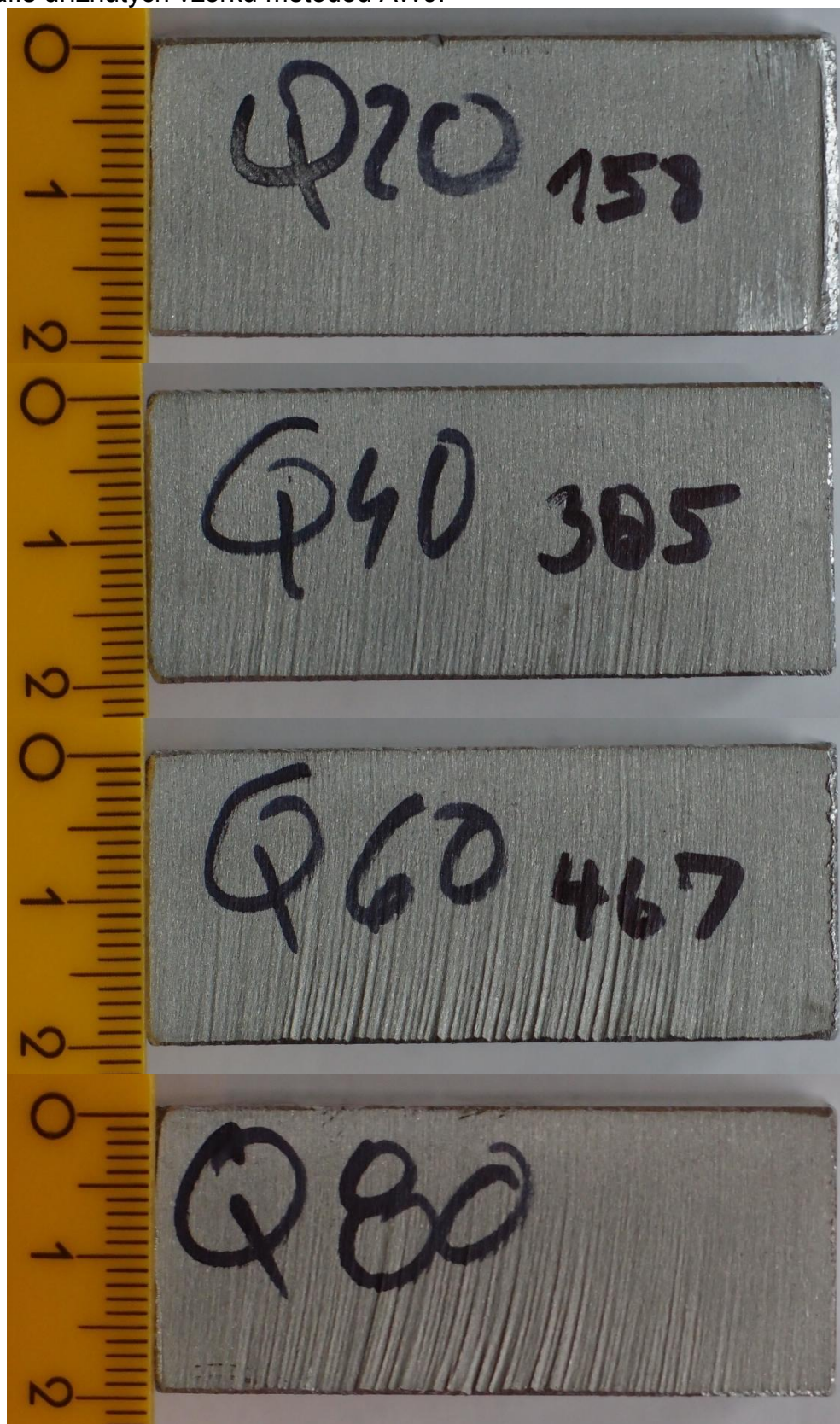
PŘÍLOHA 2

Fotografie vzorků uříznutých metodou DWJ:



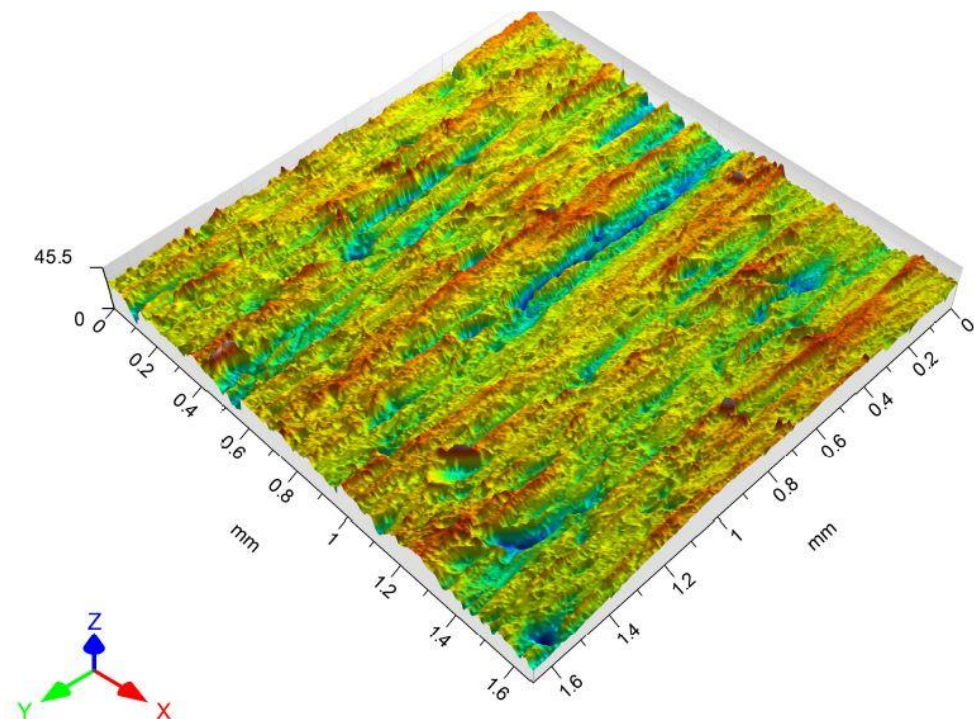
PŘÍLOHA 3

Fotografie uříznutých vzorků metodou AWJ:

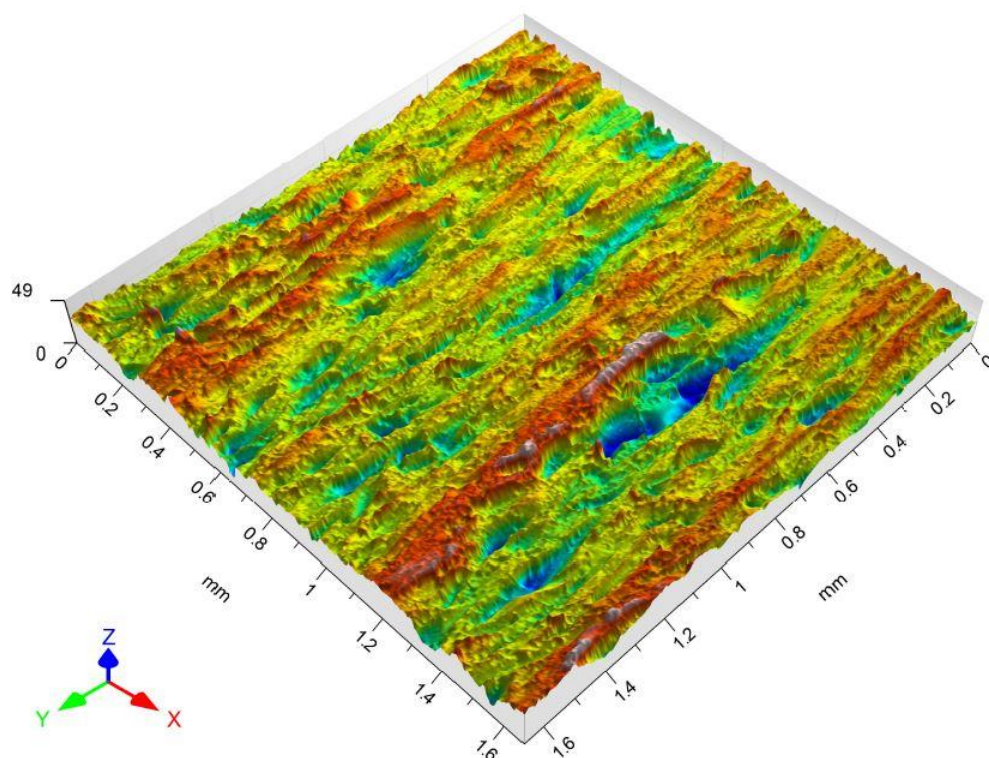


PŘÍLOHA 4

Model povrchu horní hrany vzorku při řezu metodou AWJ a DWJ (kvalita Q20)



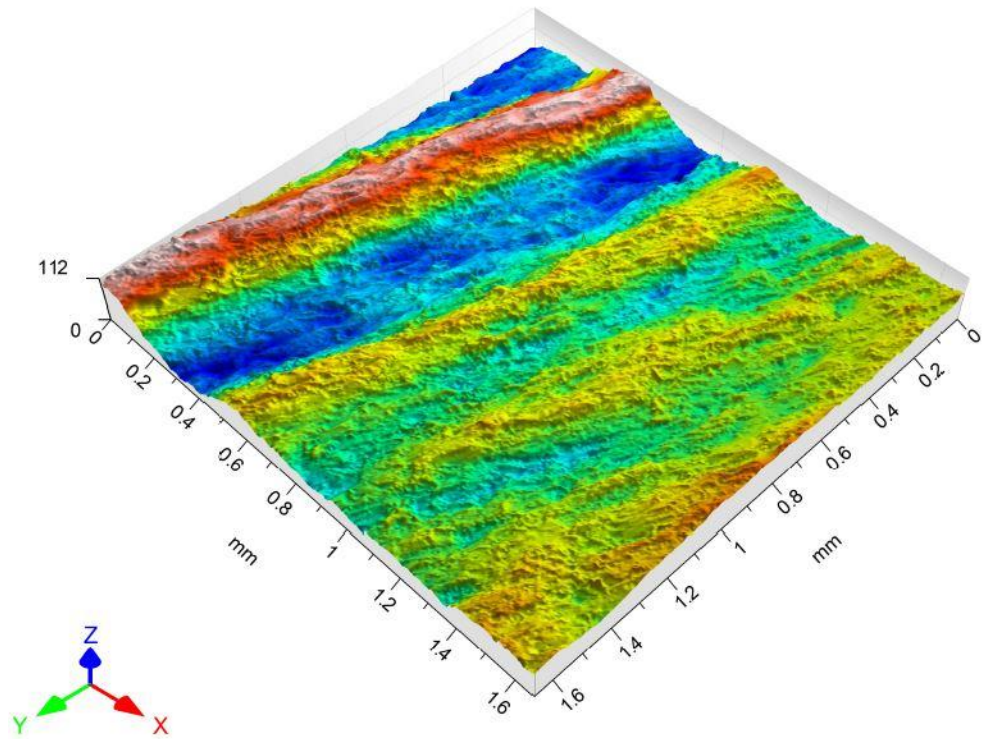
Řez metodou AWJ. $S_a = 3,831 \mu\text{m}$, $S_z = 45,654 \mu\text{m}$.



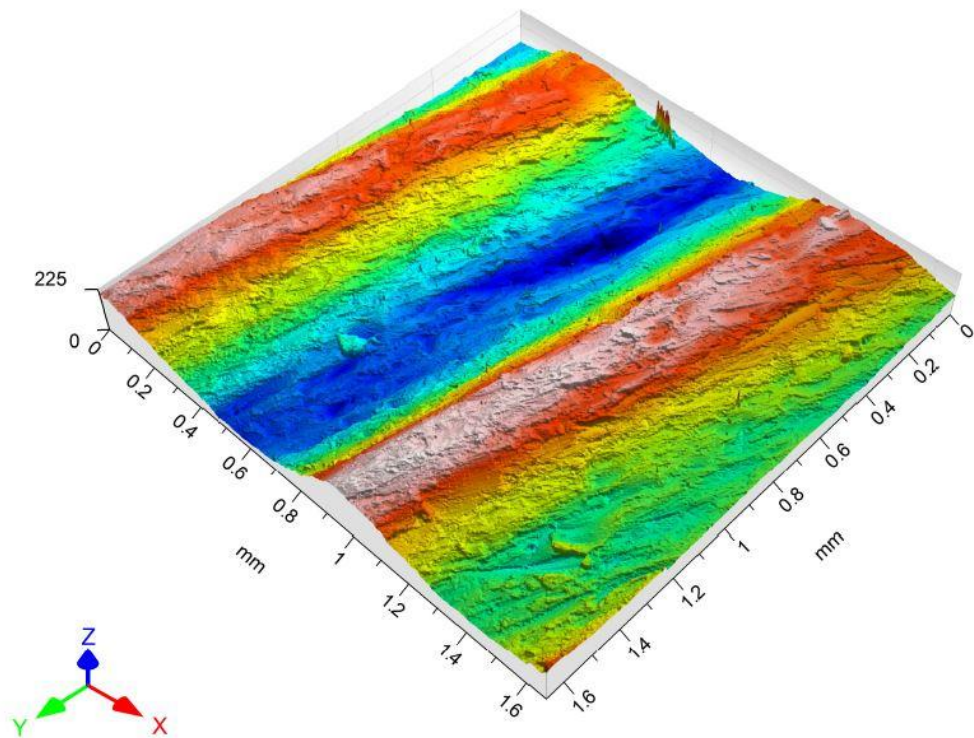
Řez metodou DWJ. $S_a = 4,734 \mu\text{m}$, $S_z = 49,159 \mu\text{m}$.

PŘÍLOHA 5

Model povrchu dolní hrany vzorku při řezu metodou AWJ a DWJ (kvalita Q80)



Řez metodou AWJ. $S_a = 16,225 \mu\text{m}$, $S_z = 113,6 \mu\text{m}$.



Řez metodou DWJ. $S_a = 47,168 \mu\text{m}$, $S_z = 225,09 \mu\text{m}$.

