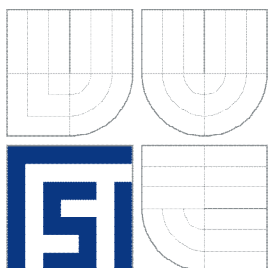


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI VYUŽITÍ TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU V MALÉ STROJÍRENSKÉ FIRMĚ

USE OF UNCONVENTIONAL METHOD WJM IN CONDITION A SMALL FIRM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Adam MASAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan KALIVODA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Adam Masařík

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 technologie vodního paprsku v malé strojírenské firmě

v anglickém jazyce:

Use of Unconventional Method WJM in Condition a Small Firm

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod.
2. Představení strojového zařízení.
3. Výběr obráběných součástí.
4. Vyrobení vzorků.
5. Měření a vyhodnocení vzorků.
6. Diskuze.
7. Závěr.

Cíle bakalářské práce:

V podmínkách malé strojírenské firmy zhodnotit možnosti technologie vodního paprsku. Vhodné součásti k produkci odzkoušet a vyhodnotit přímo v zázemí 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. KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi - WJM. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
3. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. Strojnírenská metrologie II. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 180 s. ISBN 80-214-3338-8.
4. KARPÍŠEK, Zdeněk. Matematika IV: Statistika a pravděpodobnost. 3. vyd. Olomučany: CERM, s. r. o., 2007. 170 s. ISBN 978-80-241-3380-9.
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

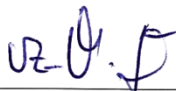
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na možnost využití technologie vodního paprsku pro řezání materiálu ve svazku. Teoretická část se zabývá dvěma typy vodních paprsků používaných pro řezání materiálů a jejich vhodnou a nevhodnou aplikací. Dále obsahuje popis základních prvků zařízení na řezání vodním paprskem. V praktické části jsou vyrobeny vzorky dílce svazkovým řezáním abrazivním vodním paprskem. Následně je posouzen vliv této metody řezání na výrobní náklady a kvalitu obrobeneho povrchu.

Klíčová slova

Abrazivní vodní paprsek, řezání svazku, kvalita řezu.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the possibility of using the technology of water jet for stack cutting. The theoretical part deals with two types of water jets used for cutting materials and their appropriate and inappropriate application. It also includes a description of basic elements of a water jet cutting machine. In the practical part of this thesis a few samples of a component are made by abrasive water jet stack cutting. The impact of this cutting method on production costs and cutting quality is assessed afterwards.

Keywords

Abrasive water jet, stack cutting, cutting quality.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MASAŘÍK, Adam. *Možnosti využití technologie vodního paprsku v malé strojírenské firmě*. Brno 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 44 s. 1 příloha. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti využití technologie vodního parsku v malé strojírenské firmě** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Adam Masařík

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Milanu Kalivodovi z VUT v Brně, za cenné připomínky a rady při vypracování této bakalářské práce.

Dále děkuji firmě WASHINA engineering, spol. s r. o., zvláště panu Robertu Jíříčkovi za poskytnutí technické podpory a cenných poznatků při výrobě vzorků pro tuto bakalářskou práci.

Mé velké poděkování patří doc. Ing. Róbertu Jankových, CSc. z VUT v Brně, za poskytnutí laboratorního vybavení a výpomoci při měření vzorků.

Na závěr chci poděkovat své rodině a přítelkyni za velkou podporu během studia na vysoké škole.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPERU	10
1.1 Princip řezání vodním paprskem	10
1.2 Druhy vodních paprsků.....	12
1.2.1 Čistý vodní paprsek.....	12
1.2.2 Abrasivní vodní paprsek.....	13
1.3 Technologické možnosti využití vodního paprsku.....	14
1.4 Vhodné a nevhodné aplikace řezání	16
2 ZAŘÍZENÍ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPEREM.....	17
2.1 Komponenty zařízení.....	18
2.2 Pracovní médium.....	19
2.2.1 Abrasivum	20
2.4 Technologie Dynamic Waterjet.....	21
3 VÝBĚR OBRÁBĚNÉ SOUČÁSTI.....	22
3.1 Materiál.....	22
3.2 Polotovar	23
3.3 Kvalita povrchu řezu	23
3.4 Technologické parametry	24
4 VÝROBA VZORKŮ	25
4.1 Představení firmy.....	25
4.2 Výrobní zařízení	25
4.3 Návrh technologie	26
4.3.1 Stanovení parametrů řezání.....	29
4.4 Výrobní proces	30
5 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ	31
5.1 Výrobní náklady.....	31
5.2 Nerovnost obrobeného povrchu	33
5.2.1 Vliv výšky řezu	36
6 DISKUZE	37
ZÁVĚR	39

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	44

ÚVOD

V současné době prochází technologie vodního paprsku prudkým rozvojem a patří mezi jednu nejrychleji se rozvíjející oblast nekonvečního obrábění materiálu. Použití technologie vodního paprsku pro řezání má značné výhody, které se mohou projevat v různých oblastech výrobního procesu. Přední výhodou mezi ostatními nekonvečními metodami je studený řez, při kterém nedochází k tepelnému ovlivnění struktury.

Tato bakalářská práce vznikla za účelem zhodnocení možnosti řezání svazku materiálu vodním paprskem a vlivu této metody na řezanou oblast a výrobní náklady v podmínkách malé strojírenské firmy.

V teoretické části práce je popsán princip čistého a abrazivního vodního paprsku používaného k řezání nebo vyřezávání tvarů ve strojírenském průmyslu. Pro využití technologie řezání v praxi jsou zde rozebrány vhodné a nevhodné aplikace. K celkovému přehledu jsou zde popsány jednotlivé prvky zařízení na řezání vodním paprskem a softwary umožňující rychlejší a kvalitnější výrobu pro rozrůstající se konkurenční trh.

V praktické části jsou vyrobeny vzorky dílce z korozivzdorné oceli metodou svazkového řezání abrazivním vodním paprskem. Při řezání svazku je použito více vrstev stejného materiálu. Tato výroba byla prováděna ve spolupráci strojírenské firmy WASHINA engineering s.r.o. s nově zakoupeným zařízením na řezání vodním paprskem. Požadavek této firmy bylo zhodnocení výrobních nákladů a vlivu paprsku na obrobený povrch při řezání až třech vrstev materiálu. Navrhnutá technologie řezání byla vytvořena za pomoci inteligentního řídicího systému zařízení a uvedena do výrobního procesu přímo ve firmě.

Pro zhodnocení vlivu vodního paprsku na řezanou oblast je měřena textura povrchu jednotlivých vzorků pomocí dotykové a bezdotykové metody měření.

1 TECHNOLOGIE VODNÍHO PAPRSKU

Technologie obrábění vodním paprskem je zařazena do nekonvenční technologie obrábění.

Mezi nekonvenční technologie obrábění patří:

- elektroerozivní obrábění,
- obrábění paprskem plazmy,
- obrábění laserem,
- obrábění paprskem elektronů,
- elektrochemické a chemické obrábění,
- obrábění ultrazvukem,
- obrábění vodním paprskem [1].

Tyto metody obrábění nachází uplatnění ve zpracování materiálů s vysokými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi, které vyžadují zvýšené nároky na kvalitu obrábění a výsledné vlastnosti výrobků [2].

První použití vodního paprsku bylo v těžbě a dobývání nerostných surovin pro odstraňování velkého objemu materiálu. Trend dnešní doby jde právě opačným směrem, kde je úběr odstraňovaného materiálu velmi malý. Využívá se vysokotlakého proudu kapaliny usměrněného do úzkého paprsku. Tento vodní paprsek slouží jako řezný nástroj a nahrazuje nedostatky konvenčních nástrojů, kterými jsou např. ohraničená řezná rychlost, malá životnost a tvorba velkého objemu třísek [2, 3].

Tato moderní technologie se vyznačuje zajímavými přednostmi a výhodami, z kterých nejdůležitější jsou:

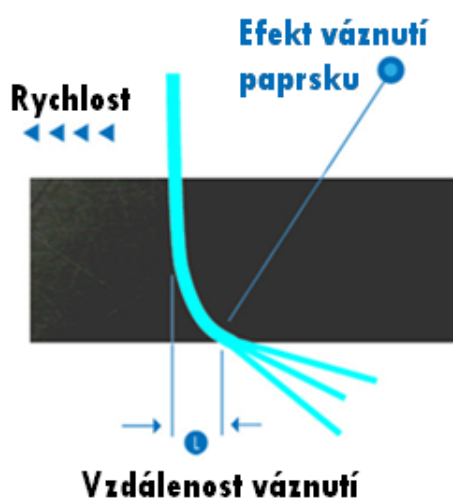
- vysoká rychlost řezání,
- schopnost provádět tvarově složité plochy v úzkých tolerancích,
- studený řez – nedochází ke změně struktury ani k zakalení plochy řezu,
- malé deformační napětí v opracovaném povrchu,
- univerzálnost – použití pro libovolné materiály i jejich tloušťky,
- vysoká ekologičnost – bez vzniku škodlivých emisí,
- vysoký stupeň automatizace [2, 3].

1.1 Princip řezání vodním paprskem

Princip řezání je založen na obrušování děleného materiálu úzkým vysokotlakým vodním paprskem s vysokou kinetickou energií [4]. Voda slouží jako pracovní médium a za použití čerpadel různých provedení je stlačována na velice vysoké tlaky, které dosahují až 600 MPa. Vysokotlaký proud vody je veden pomocí korozivzdorných trubek do řezací hlavičky. V závislosti na řezaném materiálu

se rozděluje hlavice pro čistý vodní paprsek nebo abrazivní vodní paprsek (paprsek s abrazivními částicemi). V řezací hlavici prochází vysokotlaký proud vody přes trysku s malým průměrem otvoru (0,1 – 0,5 mm). Průchod přes trysku zvyšuje rychlost paprsku až na $990 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Taková rychlost překračuje až trojnásobně rychlost zvuku. Pohyb řezací hlavy je řízen řídicím systémem, což umožňuje i 3D řezání tvarově složitých obrazců [3, 4].

Při řezném procesu dochází v určité hloubce pod povrchem materiálu ke zpomalování paprsku, který je brzděný o vytržené částice obrobku a vzniká tzv. efekt váznutí paprsku (obr. 1.1). Na váznutí paprsku má značný vliv posuvová rychlost paprsku, druh a tloušťka materiálu [5].

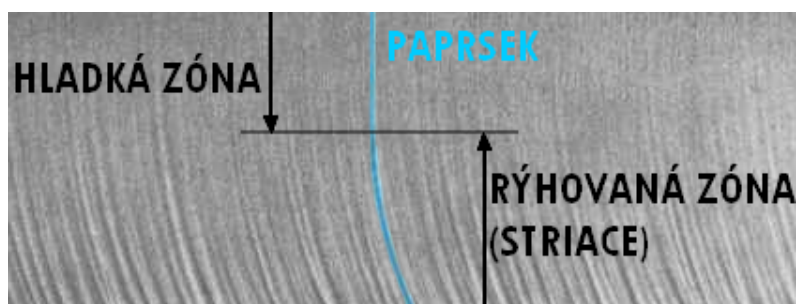


Obr. 1.1 Efekt váznutí paprsku [6].

Váznutí paprsku tvoří na obrobené ploše rýhování neboli striace (obr. 1.2), které negativně ovlivňují rozměrovou přesnost a kvalitu obrobeného povrchu [7].

Obrobený povrch lze rozdělit na dvě zóny:

- **hladká zóna** – horní část řezu je výsledek řezného opotřebení [2],
- **rýhovaná zóna** – spodní část řezu je důsledek deformačního opotřebení paprskem. Moderní softwary umožňují uživateli nastavit kvality řezu založené na požadované hodnotě průměrné aritmetické úchyly profilu a tvarové přesnosti [2].



Obr. 1.2 Povrch obrobené plochy po řezání abrazivním vodním paprskem [8].

1.2 Druhy vodních paprsků

Vodní paprsek se rozděluje na kontinuální a diskontinuální. Diskontinuální vodní paprsek se využívá při vrtání, lámání a drcení hornin [9]. Nejrozšířenější metodou je řezání materiálu kontinuálním vodním paprskem. Tento paprsek se rozděluje na dvě technologie řezání:

- čistým vodním paprskem – (WJM – Water Jet Machining),
- abrazivním vodním paprskem – (AWJM – Abrasive Water Jet Machining) [3].

Použití vhodného typu paprsku závisí na druhu operace, vlastnostech řezaného materiálu a podmínkách realizace [3]. V laboratorním testování jsou další typy vodních paprsků. Podrobné rozdělení vodního paprsku je zobrazeno na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Rozdělení vodního paprsku [3].

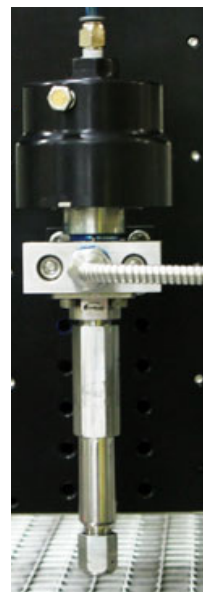
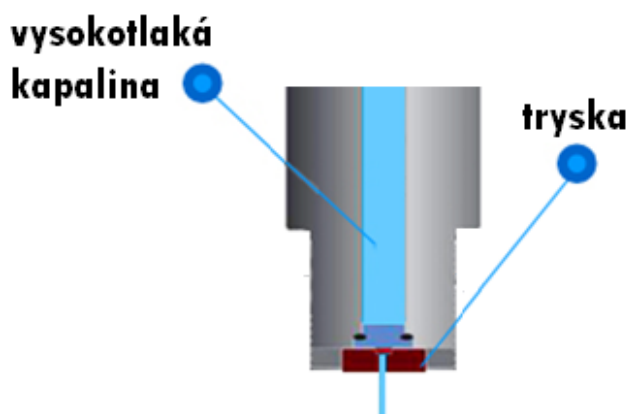
1.2.1 Čistý vodní paprsek

Při použití čistého vodního paprsku se využívá vlastnosti vody při vysokých tlacích, které dosahují hodnot až 600 MPa. Tento typ paprsku se používá na dělení nekovových a měkkých materiálů. Jako pracovní médium se nejčastěji používá filtrovaná voda z vodovodu, případně zbavena minerálních látek. V závislosti na řezaném materiálu lze použít i jiné pracovní médium např. mléko, kakao, líh a další látky. Z tohoto hlediska technologie nachází uplatnění v mnoha odvětví průmyslu např. potravinářském nebo medicínském [3, 9].

Vodní paprsek vystupuje z trysky malého průměru pod vysokým tlakem (obr 1.4). Tento paprsek je nositelem velké kinetické energie. Úběr materiálu je způsoben kinetickou energií molekul kapaliny, která se při dopadu na povrch obrobku přemění na mechanickou práci a současně se část kapaliny odpaří a naruší materiál kavitací [9, 10]. Hlavní parametry čistého vodního paprsku jsou uvedeny v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Parametry čistého vodního paprsku [9].

Pracovní tlak vody	do 600 MPa
Průměr trysky	0,08 – 0,25 mm
Šířka paprsku	0,1 – 1,5 mm
Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem	2,5 – 6,35 mm



Obr. 1.4 Generování čistého vodního paprsku [6]. Obr. 1.5 Řezací hlavice pro WJM [11].

V současnosti nachází čistý vodní paprsek uplatnění zvláště při řezání jednorázových plen, hedvábného papíru a vybavení interiéru automobilů. Mezi další řezané materiály patří například:

- pěnové materiály, těsnící materiály,
- koberec, textil, kůže,
- laminát, pryž [12].

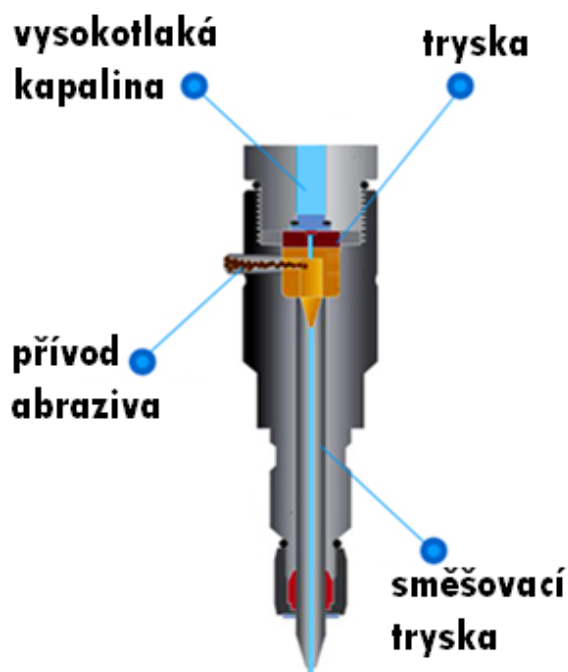
1.2.2 Abrazivní vodní paprsek

Princip vytváření abrazivního vodního paprsku (AWJ) je podobný čistému vodnímu paprsku s rozdílem v přidávání abraziva (jemného brusiva) do proudu vody, které umožňuje řezat velice tvrdý materiál. Abrazivum je ze zásobníku vedeno do směšovací komory, kde je strháváno vodním paprskem nebo přidáváno pod tlakem. Směs je poté urychlována abrazivní tryskou a usměrněná do úzkého paprsku s vysokou řeznou účinností [2, 7]. Princip generování abrazivního vodního paprsku je zobrazen na obr. 1.6.

Mechanismus úběru materiálu při řezání abrazivním vodním paprskem je podobný jako u mechanismu úběru materiálu při broušení. Přidané abrazivum představuje řezné částice. Proud vody urychluje pohyb těchto abrazivních částic a ty rozrušují materiál, nikoliv voda jako u použití čistého vodního paprsku [10].

Tab. 1.2 Parametry abrazivního vodního paprsku [9].

Pracovní tlak vody	60 – 400 MPa
Průměr trysky	0,8 – 2 mm
Šířka paprsku	1,2 – 2,5 mm
Vzdálenost mezi tryskou a obrobkem	10 – 25 mm



Obr. 1.6 Generování AWJ [10].

Obr. 1.7 Řezací hlavice pro AWJ [11].

Abrazivní vodní paprsek nachází uplatnění pro materiály odolné vůči chemickému působení, těžko opracovatelných nebo neopracovatelných za použití jiných metod obrábění a dělení materiálu [7].

Vhodnými materiály pro dělení abrazivním vodním paprskem jsou:

- všechny typy ocelí včetně korozivzdorných, nástrojových, tepelně zpracovaných a pružinových,
- slitiny hliníku, titanu, mědi, niklu a veškeré další kovy i slitiny,
- sklolaminát, kompozity, průmyslové a reklamní plasty včetně vrstvených,
- mramor, žula, pískovec a jiné přírodní nebo umělé kameny,
- sklo čiré, barevné, vícevrstvé (neprůstřelné) či jinak upravené s výjimkou tvrzených skel [13].

1.3 Technologické možnosti využití vodního paprsku

Technologie vodního paprsku má díky své univerzálnosti široké uplatnění v řadě výrobních oborů. Nejběžnější aplikací vodního paprsku je řezání a vyřezávání obrysů s možností tvarového 3D řezání. Mimo řezání se tato technologie rozvíjí i v dalších obráběcích operacích (gravírování, vrtání, frézování a soustružení) [9].

- **Gravírování**

Pro gravírování se nejčastěji využívá vodní paprsek bez abraziva. Nedochozí k řezání, ale pouze k orýsování povrchu. Tato technika se může používat pro značení. Nevýhodou je vysoká hlučnost. Metodu gravírování čistým vodním paprskem nelze použít pro křehké materiály, u těchto materiálů se musí pracovat s abrazivem a při nízkém tlaku vody [14].



Obr. 1.8 Gravírování reliéfů do skla [15]. Obr. 1.9 Vytvořený nápis v oceli [15].

- **Vrtání**

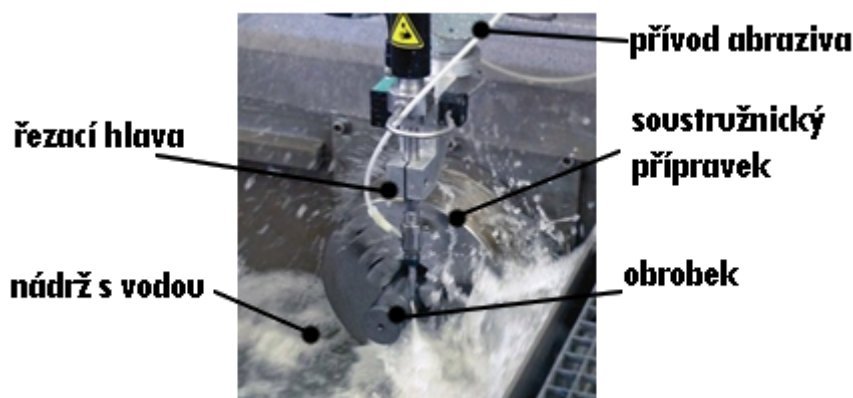
Metoda AWJM nachází uplatnění při vrtání těžko obrobitelných materiálů (laminát, sklo, keramický kompozit, pískovec atd.). Vrtání se provádí buď stacionárním, rotujícím nebo pulzujícím paprskem [15].

- **Frézování**

Možnost řízení hloubky řezu nabízí využití pro frézování, kde nedochází k prořezání celé tloušťky obrobku, ale pouze k odstranění povrchové vrstvy do požadované hloubky [15].

- **Soustružení**

Abrazivní vodní paprsek lze využít na soustružení těžkoobrobitelných materiálů a součástek složitého tvaru (obr. 1.10). Při soustružení obrobek rotuje a vodní paprsek se pohybuje v axiálním směru vzhledem k osám obrobku [3].



Obr. 1.10 Soustružení abrazivním vodním paprskem [16].

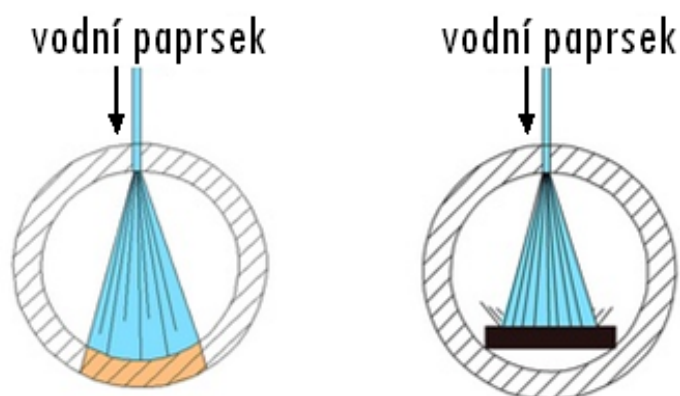
1.4 Vhodné a nevhodné aplikace řezání

Mezi technicky a ekonomicky vhodné aplikace řezání vodním paprskem se zařazuje:

- řezání hrubých polotovarů větších tloušťek s minimálním přídavkem,
- řezání vrstvených (nesourodých) materiálů – např. pryž na kovu,
- řezání materiálů určených k zušlechtní nebo tepelné úpravě,
- řezání nápisů, log apod. pro reklamní a prezentační účely,
- dílčí operace na polotovarech jako jsou otvory, zářezy apod.,
- možnost řezání velice úzkých pásků v řádu milimetrů,
- kusové a malosériové zakázky, které vodní paprsek umožňuje zhotovit s minimálními přípravnými náklady bez výroby nástrojů a přípravků [13].

Naopak za technicky či ekonomicky nevhodné aplikace lze označit:

- řezání materiálů, které se při kontaktu s vodou fyzikálně či opticky poškodí,
- řezání tvrzených skel (vlivem vnitřního pnutí se sklo roztříští),
- řezání svazku materiálu s velkou tloušťkou (kvalita řezu ve spodních částech prudce klesá),
- použití na tvarově složité polotovary, kde se tryska nemůže přiblížit k povrchu řezaného materiálu,
- zpracování již velice přesně obrobených polotovarů s požadavkem na vysokou přesnost (lepší než 0,2 – 0,5 mm) umístění řezů (neexistuje možnost optického či jiného takto přesného zaměření polotovaru),
- řezání dutých profilů – po prořezání první stěny se při vstupu do vzduchové mezery paprsek otvírá a naráží na další stěnu profilu a tvoří velkou díru (obr. 1.11). Tento problém lze řešit vyplněním duté části jiným materiálem, přes který paprsek neprojde. Tento materiál se paprskem poškodí, což má za následek zvýšení výrobních nákladů [13, 17].



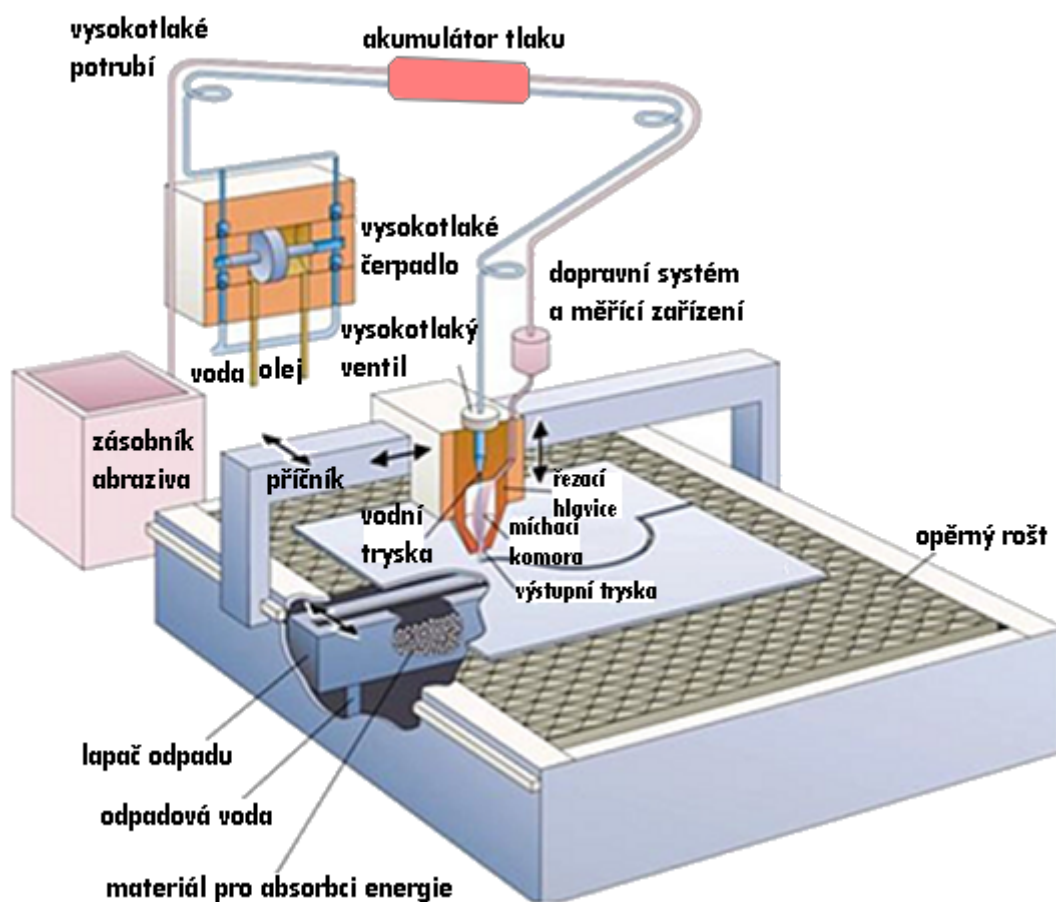
Obr. 1.11 Řezání dutého profilu [17].

2 ZAŘÍZENÍ PRO ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPSKEM

Každý model stroje určený pro řezání vodním paprskem se odlišuje výrobcem. Skládá se však ze základních prvků (obr. 2.), které jsou přítomny ve všech zařízeních.

Mezi hlavní prvky zařízení pro řezání vodním paprskem patří:

- hydraulická jednotka s čerpadlem a multiplikátorem,
- akumulátor tlaku,
- filtrační jednotka,
- vysokotlaké potrubí,
- řezací hlavice,
- nádoba na zachytávání vody (lapač vodního paprsku),
- systém dávkování abraziva,
- manipulační systém [7].

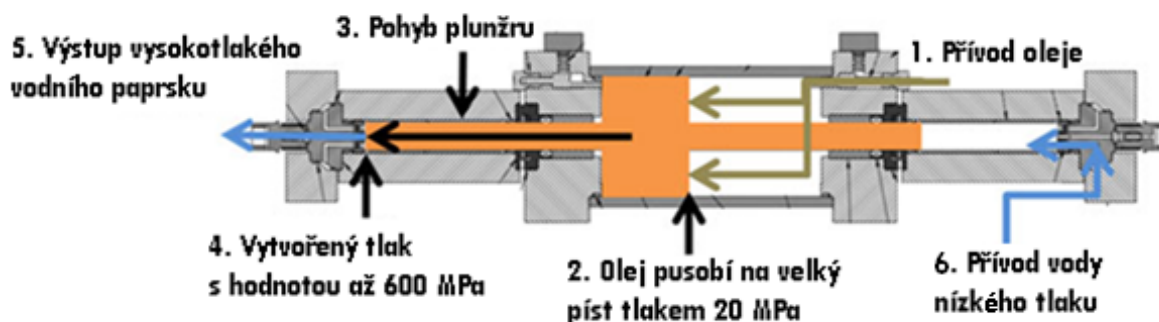


Obr. 2 Stroj pro řezání vodním paprskem [10].

2.1 Komponenty zařízení

Hydraulická jednotka – vytváří vysoký tlak vodního paprsku pomocí systému hydraulických pump [2].

Multiplikátor – je část hydraulické jednotky, která pracuje jako zesilovač tlaku na principu dvou spojených pístů. Nízký tlak oleje na větším pístu je převeden na vysoký tlak vody na malém pístu. Takto dodávaný tlak vody je možné regulovat v rozmezí 0 až 600 MPa [18].



Obr. 2.1 Princip multiplikátoru [11].

Akumulátor tlaku – je tlaková tlustostěnná nádoba tlumící rázy v kapalině, které vznikají při stlačování vody v multiplikátoru. Vyrovňuje a udržuje konstantní tlak pracovní kapaliny vystupující z vysokotlakého čerpadla [2].

Filtry – odstraňují nečistoty z přiváděné pracovní kapaliny a tím chrání trysku před poškozením. Pevné částice urychlují opotřebení částí zařízení (stěny trubek a válců) [6].

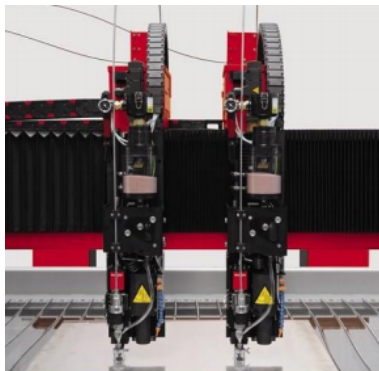
Řezací hlavice – je prvek zařízení, ve kterém je uchycena vodní tryska. Tato tryska je koncipována do tvaru zužující se dýzy formulující paprsek [18].

Na výrobu trysek se obvykle používá safír, rubín, syntetický diamant. Trysky se obecně odlišují podle své životnosti. Rubínové trysky mají životnost zhruba 40 – 80 hodin a diamantové 800 – 1000 hodin, které jsou až 10 násobně dražší. Provozní životnost (obr. 2.2) je ovlivněna kvalitou vody, počtem řezacích cyklů a použitým abrazivem [2, 7].



Obr. 2.2 Tryska opotřebovaná pracovním médiem [11].

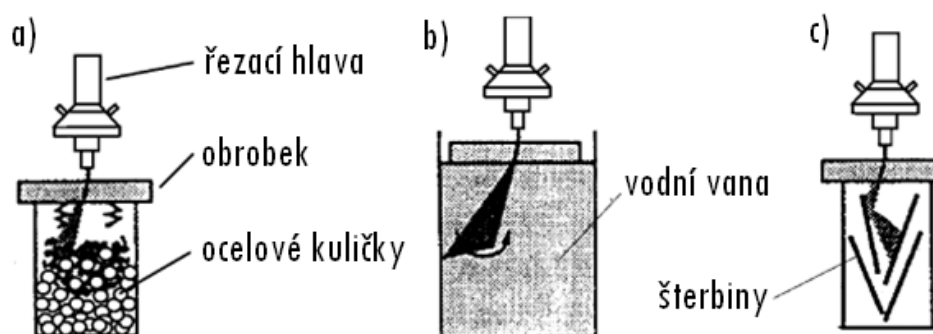
Zařízení na vodní paprsek umožňuje řezání více hlavami i za použití jediné vysokotlaké pumpy (obr 2.3). Každá hlava však vyžaduje samostatný přívod vody, takže je zapotřebí větší pumpy [6].



Obr. 2.3 Řezný most se dvěma řeznými hlavami [6].

Vysokotlaké potrubí – je vyráběno z korozi-vzdorné oceli a přivádí pracovní kapalinu k řezací hlavě [2].

Lapač vodního paprsku – zachytává vodní paprsek, který může mít po přechodu materiálem až 75 % své počáteční energie. Je tvořen kontejnerem obsahující látku, nejčastěji vodu, která pohlcuje energii paprsku (obr. 2.4). Lapač zároveň slouží k tlumení hluku a zachytávání třísek [19].



Obr. 2.4 Lapač vodního paprsku a) ocelové kuličky b) vodní vana c) šterbinový [19].

Manipulační systém – řídí vzájemný pohyb řezací hlavy a obrobku pomocí CNC.

2.2 Pracovní médium

Technologie řezání vodním paprskem využívá jako nástroj proud vody a abraziva, umožňující řezat různé druhy materiálů. Voda patří mezi průmyslově nepoužívanější a nejlevnější kapalinu nemající vliv na životní prostředí a zdraví obsluhy. Na základě řezaného materiálu průmyslového odvětví se používají i jiné kapalné látky:

- lékařství (požadavek sterility): líh a alkoholy,
- potravinářský průmysl (požadavek nedotčenosti chuti výrobků): mléko, rostlinné oleje, kakao apod.,
- strojírenský průmysl (požadavek nekorozivzdornosti): antikoroziční roztoky a emulze [3].

Každý výrobce si určuje požadavky na kvalitu vody pro své konkrétní zařízení. Kvalita vody má přímý vliv na životnost komponent zařízení jako jsou zpětné ventily, otvory a těsnění [5].

Pro zlepšení kvality se v praxi používají tři základní postupy úpravy vody:

- mechanická (filtry) – odstranění pevných částic ve vodě,
- fyzikálně – chemická – zabezpečení kvality vody určené do kanalizace,
- biologická – zabezpečení kvality vody určené do kanalizace [3].

2.2.1 Abrazivum

Abrazivum je směs brusných částic, které mají vysokou abrazivní schopnost a výraznou tvrdost. Přidáním abraziva do kontinuálního vodního paprsku vzniká abrazivní vodní paprsek (AWJ). Výběr abraziva a jeho technologických parametrů (materiál, tvar, velikost a hmotnostní tok) má vliv na kvalitu, výkon a výslednou cenu řezání [20].

Cena abraziva se pohybuje od 7 – 10 Kč/kg a likvidace 1 kg použitého abraziva stojí okolo 1 Kč. Náklady na abrazivum představují největší položku při dělení abrazivním vodním paprskem. Ve většině případů je abrazivum dodáváno na paletách v 25 kg papírových pytlích [2, 21].

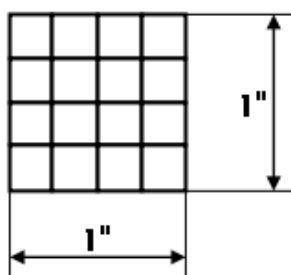
V současnosti se jako abrazivní materiál používá:

- granát – vyšší cena, vyšší účinek a opotřebení trysky,
- křemičitý písek – nízká cena, nižší účinek a opotřebení trysky, nevhodný pro recyklaci,
- oxid hlinitý (Al_2O_3),
- ocelové nebo skleněné kuličky [1].



Obr. 2.6 Druhy abrazivního materiálu (zleva: olivín, oxid hlinitý, granát, skleněné kuličky a ocelové kuličky) [20].

Tvar abrazivních částic se vyjadřuje podle kruhovitosti a kulatosti (tab. 2.1). Nejlepší tvar částic je s malou kruhovitostí a velkou kulatostí. Dále se abrazivum posuzuje podle zrnitosti (mesh) udávající velikost oka v sítu o velikosti 1". Velikost mesh se pohybuje od 16 – 250, kde velikost mesh = 16 je hrubé abrazivum (obr. 2.7) a mesh = 250 je velmi jemné abrazivum. Hrubší abrazivum se používá pro řezání kovů a velkých obrazců [3, 21].



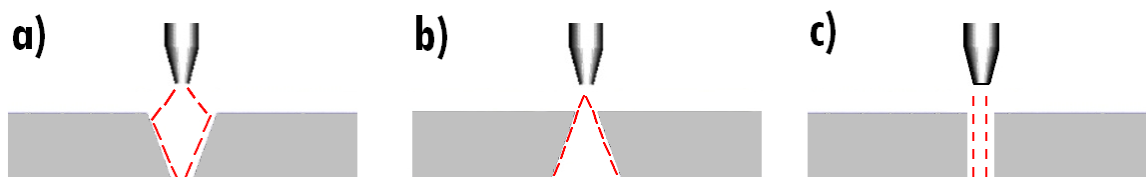
Obr. 2.7 Hodnota mesh = 16.

Tab. 2.1 Vlastnosti nejpoužívanějších abrazivních materiálů [3].

Materiál	Mesh	Kruhovitost	Kulatost
Granát	16 – 250	0,18	0,78
Křemičitý písek	16 – 120	0,57	0,78
Ocelová drť	16 – 100	0,55	0,82

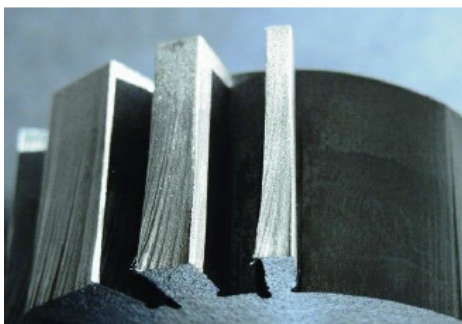
2.4 Technologie Dynamic Waterjet

Při řezání abrazivním vodním paprskem dochází ke zpoždování paprsku a ke vzniku úkosu řezné hrany (obr. 2.8) [13].

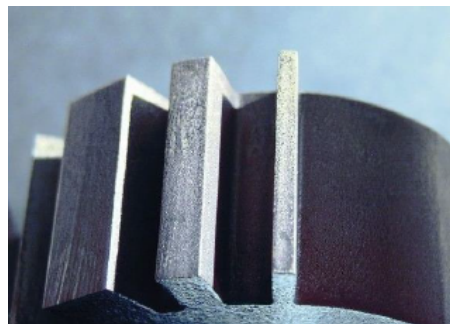


Obr. 2.8 Úkos řezné hrany a) zúžený dole b) rozšířený dole, c) optimální [13].

Tento problém řeší technologie Dynamic Waterjet (DWJ), která využívá připevněný kloub k řezací hlavě umožňující naklání řezací hlavy v jakémkoliv směru do 10°. Naklání je řízeno speciálními matematickými modely řezání, které kompenzují zpoždění paprsku a úkos řezné hrany. To umožňuje vyrábět přesnější díly při vyšší řezné rychlosti než u konvenčních systémů řezání vodním paprskem [12]. Rozšířenou verzí této technologie je Dynamic Waterjet XD umožňující naklánět řezací hlavu do 60° a vyrábět tak i 3D dílce [22].



Obr. 2.8 Řezání bez využití DWJ [12].



Obr. 2.9 Řezání s využitím DJW [12].

3 VÝBĚR OBRÁBĚNÉ SOUČÁSTI

Technologie řezání abrazivním vodním paprskem (AWJM) je použita na výrobu vzorků členu podávacího mechanismu (obr. 3). Tento dílec má tloušťku 2 mm a z tohoto hlediska se nabízí metoda svazkového řezání, při které je řezáno více vrstev materiálu pro možné snížení výrobních nákladů v budoucí malosériové výrobě. Vyráběný člen bude pracovat v prostředí, kde je pravděpodobnost vzniku nežádoucí koroze materiálu. Požadavek zadávající firmy bylo zhodnocení výrobních nákladů a vlivu paprsku na řezaný povrch při řezání až třech vrstev stejného materiálu.



Obr. 3 Model součásti.

3.1 Materiál

Člen mechanismu byl vyráběn z korozivzdorné oceli 1.4301 (X5CrNi 18-10) ČSN 10088-1. Tento materiál byl použit na požadavek výrobní firmy. Chemické složení a vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tento materiál je odolný proti korozi v prostředí běžného typu (voda, slabé alkálie, slabé kyseliny, průmyslové a velkoměstské atmosféry). V technické praxi se využívá na součásti k obecnému použití (vnější konstrukce, externí architektura, vodárny) [23].

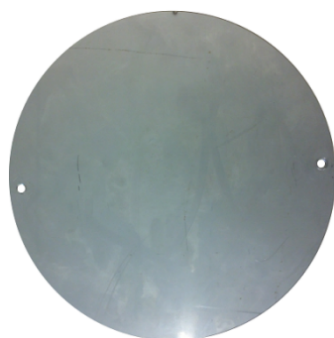
Tab. 3.1 Vlastnosti a chemické složení oceli 1.4301 [23].

Skupina ocelí		vysokolegovaná ocel	
Označení materiálu	1.4301 (X5CrNi 18-10)		
Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	520 - 720		
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	210		
Tažnost A [%]	45		
Legování			
C [%]	max. 0,07		
Cr [%]	17-19,5		
Ni [%]	8-10,5		

3.2 Polotovary

Na výrobu vzorků byly použity celkem 3 polotovary $\varnothing 25$ mm s tloušťkou 2 mm z korozivzdorné oceli 1.4301 ČSN 10088-1, které byly postupně vrstveny na sebe a upnuté do svazku. Tyto polotovary byly zbytkovým materiálem nespécifikované výroby a posloužily k výrobě vzorků.

Při vytváření svazku můžou mezi polotovary vznikat vzduchové mezery, ve kterých se má paprsek snahu otvírat a řezat spodní vrstvu hrubě. Tento nežádoucí jev je nutno eliminovat vhodným upnutím [12]. Pro udržení svazku pohromadě a eliminací vzduchovým mezer byly na okraji polotovaru vyvrtány dvě díry (obr. 3.1) sloužící pro upnutí šroubovým spojem (obr. 3.2).



Obr. 3.1 Upravený polotovar.



Obr. 3.2 Polotovary spojené šrouby.

3.3 Kvalita povrchu řezu

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a a tvarová přesnost řezaného povrchu je definována kvalitativními stupni od Q1 do Q5. Stupeň Q1 je používán pro rychlý hrubý dělicí řez, naopak stupeň Q5 je používán pro pomalý vysoce kvalitní řez [13]. Orientační popis užívaných stupňů kvality řezu zobrazuje (tab. 3.2).

Tab. 3.2 Stupně kvality řezu [13].

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	R_a v horní kontuře [μm]	R_a ve spodní kontuře [μm]	Tvarová přesnost v horní kontuře [mm]	Tvarová přesnost ve spodní kontuře [mm]	Úkos
Q5	nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	většinou mírný podřez
Q4	kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	většinou minimální
Q3	střední řez	cca 4,0	do 12,5	$\pm 0,15$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q2	hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	dle typu a síly materiálu
Q1	dělicí řez	4,0 - 6,3	do 40	$\pm 0,2$	dle typu a síly materiálu	výrazný úkos

Vizuální pohled na kvalitu povrchu stupně řezů je zobrazen na obr. 3.3. Na jednotlivých řezech lze sledovat stupňující se rýhování, které ovlivňuje rozměrovou přesnost a hodnotu průměrné aritmetické úchytky profilu. Zvolení kvalitativního stupně řezu má vliv nejen na kvalitu, ale i na výslednou cenu řezání, která je důležitým faktorem výroby [7].



Obr. 3.3 Kvalita povrchu jednotlivých stupňů [24].

Podle výrobního výkresu součásti (příloha 1) je požadována tvarová přesnost $\pm 0,2$ mm a průměrná aritmetická úchytka profilu $R_a = 6,3$ μm . Těmto hodnotám podle tab. 3.2 nejlépe odpovídá kvalitativní stupeň Q4. Cílem výroby je však nejnižší výrobní cena, které lze dosáhnout horším kvalitativním řezem. Pro výrobu je tedy zvolen řez Q3, s kterým je podle tab. 3.2 možné předepsané požadavky R_a a tvarové přesnosti také splnit. Tímto stupněm řezu bude řezán celý obrys i díry.

3.4 Technologické parametry

Pro dosažení efektivního řezání z ekonomického i energetického hlediska je nutné stanovit optimální technologické parametry abrazivního vodního paprsku (tab. 3.3). Zvolení a odůvodnění parametrů pro vyráběnou součást je detailně rozepsáno při návrhu technologie v následující kapitole 4.

Tab. 3.3 Technologické parametry ovlivňující vodní paprsek [7].

Technologické parametry		Druh
Nezávislé (přímo se dotýkající procesu řezání)	Hydraulické	Tlak kapaliny
		Množství kapaliny (průměr vodní trysky)
	Abrazivní	Materiál abraziva
		Rozměr a tvar abrazivních částic
		Hmotnostní tok abraziva
	Směšovací	Stav abraziva (suchý prášek, suspenze)
		Rozměr směšovací komory
Rozměr a tvar abrazivní trysky (průměr, délka)		
Závislé	Technologické	Hloubka řezu
		Šířka řezné spáry
		Kvalita řezné plochy

4 VÝROBA VZORKŮ

Tato kapitola řeší návrh technologie a výrobní proces řezání vzorků abrazivním vodním paprskem s využitím technologie (DWJ) v podmínkách malé strojírenské firmy. Na požadavek této firmy bylo při výrobě použito až třech vrstev materiálu řezaných ve svazku. Výroba vzorků probíhala ve třech řezných procesech. Jednotlivé procesy se odlišovaly počtem řezaných polotovarů, které byly postupně vrstveny na sebe. Z použitých třech polotovarů bylo celkem vyrobeno šest vzorků součástí.

4.1 Představení firmy

Výroba vzorků probíhala ve strojírenské firmě WASHINA engineering s.r.o. vyrábějící strojírenské dílce pro různá odvětví průmyslu v České republice i v zahraničí. Hlavní činnost firmy je zaměřena na výrobu strojních zařízení, robotizovaných pracovišť, manipulační techniky, měřících a montážních přípravků. Technologii řezání čistým a abrazivním vodním paprskem využívá pro kusovou a malosériovou výrobu. Vodní paprsek umožňuje firmě výrobu s minimálními přípravnými náklady bez výroby nástrojů a přípravků. Doplnuje stávající konvenční technologie v podniku a rozšiřuje oblast působení na trhu [25].

4.2 Výrobní zařízení

Firma WASHINA engineering s.r.o. užívá pro řezání vodním paprskem stroj modelové řady Mach 3 od společnosti Flow International Corporation (obr. 4.1), který umožňuje realizaci pouze 2D řezání. Stroj je vhodný pro zakázkovou, malosériovou a prototypovou výrobu [12].

Zařízení používá čerpadlo typu Hplex Hybrid s intenzifikátorem 415 MPa a další příslušenství např. laserový zaměřovací kříž (obr. 4.2) nebo systém přívodu abraziva Super Stack Sand. Pohyb je řízen softwarem FlowMaster s integrovanou technologií Dynamic Waterjet také od společnosti Flow International Corporation [12]. Technické parametry stroje jsou uvedeny v tab. 4.1.



Obr. 4.1 Zařízení pro řezání vodním paprskem Mach 3 [12].

Tab. 4.1 Technické parametry zařízení Mach 3 [12].

Technické parametry	
Přesnost řezu	$\pm 0,04$ mm na 0,9 m
Rychlost posuvu paprsku v řezu	až 12,7 m/min dle materiálu a jeho tloušťky
Pracovní prostor	4000 x 2000 mm

Laserový zaměřovací kříž – je laserová pomůcka, která umožňuje operátorovi systému řezání vodním paprskem nastavit polohu systému vůči řezanému obrobku [12]. Laserový kříž není vhodný pro jemné polohování nebo nastavení, ale výrazně zjednodušuje nastavení nulové polohy. Toto doplňkové zařízení je připevněno k řezací hlavici stroje [22].



Obr. 4.2 Laserový zaměřovací kříž [12].

The Super Sack Sand – je systém přívodu abraziva, který zahrnuje stojan zásobníku, jednotku přepravy sypkého materiálu a malé zásobníky (obr. 4.3). Přijímá abrazivum přiváděné gravitací uložené pod přístrojem [12]. V současnosti firma využívá jako abrazivní materiál granát.

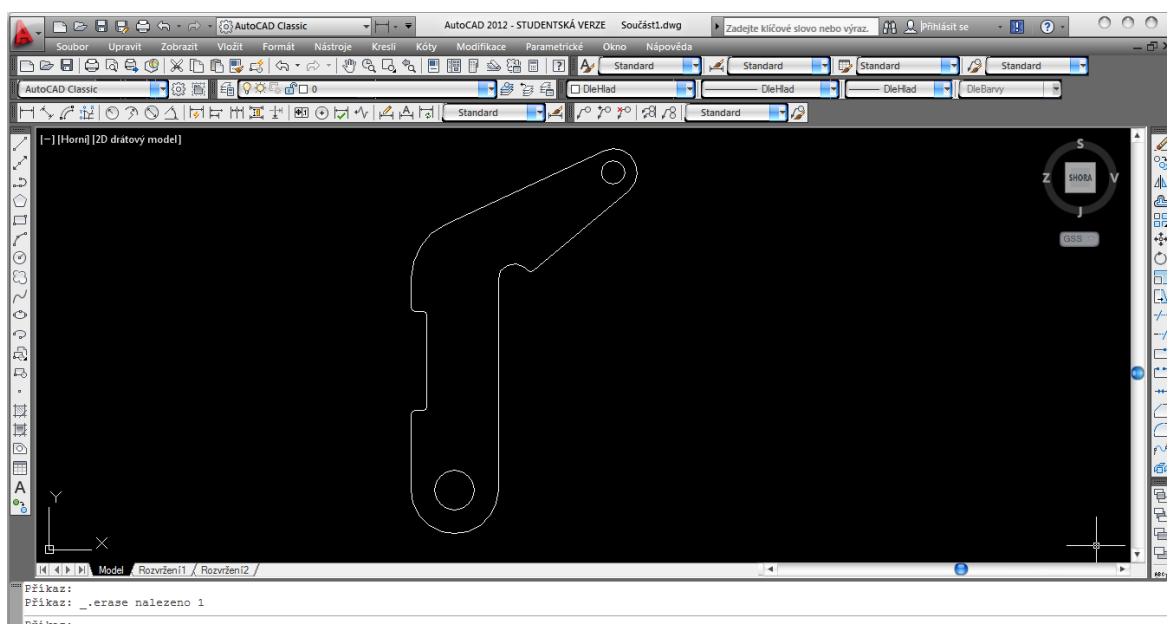


Obr. 4.3 The Super Sack Sand [12].

4.3 Návrh technologie

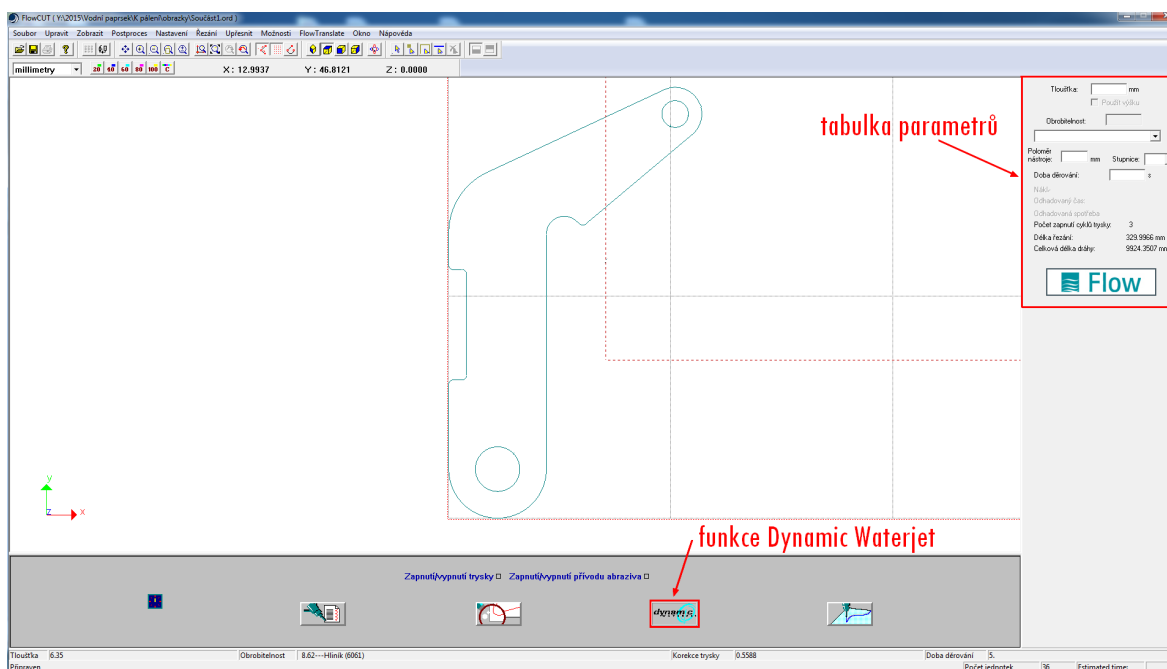
Pro řízení procesu řezání abrazivním vodním paprskem byl použit software FlowMaster, který pracuje pod operačním systémem Windows. Do softwaru může být importován standardní výkresový formát (dxf, iges, atd.) a nebo může být vytvořen přímo v systému [12].

Návrh technologie řezání zahrnoval vytvoření výkresu součásti (příloha 1) v softwaru AutoCAD 2012 ve výkresovém formátu dxf.



Obr. 4.4 Obrýs součásti vytvořený v AutoCAD 2012.

Následně byl vytvořený výkres importován do softwaru FlowMaster (obr. 4.5). Tento software obsahuje integrovanou databázi parametrů řezání pro prakticky všechny materiály a tloušťky [12]. V tabulce parametrů byly zadány základní parametry řezání (materiál, rozměry trysky, tlak, typ abraziva, kvalita řezu) a software optimalizoval řezné rychlosti a řeznou dráhu.



Obr. 4.5 Pracovní prostředí FlowMaster.

Pro řezné dráhy se v odpadové části materiálu využívají náběhy a výběhy vodního paprsku. Při řezání bez využití těchto náběhů a výběhů může dojít k poškození kontury vznikající prohlubní v místě začátku a konci řezu. Typy náběhů a výběhů se volí podle druhu řezaného materiálu a jeho tloušťky [11]. Na obr. 4.6 jsou zobrazeny nejběžnější typy využívaných náběhů a výběhů.

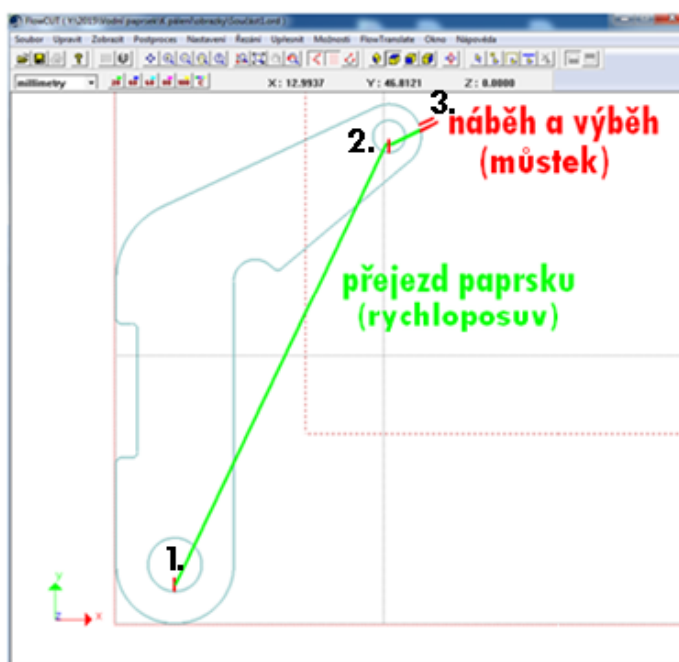


Obr. 4.6 Typy náběhů a výběhů [11].

Legenda k obr. 4.6:

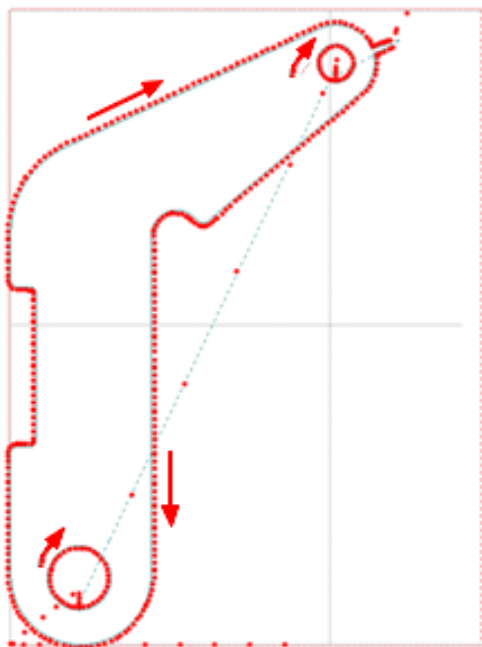
1. Náběhová přímka s velmi malou výběhovou přímkou pro ostrý roh.
2. Náběhový oblouk s malým výběhovým obloukem pro měkké a tenké materiály.
3. Náběhová přímka se stejnou výběhovou přímkou pro silné a tvrdé materiály.
4. Náběhová přímka s malým výběhovým obloukem.

Pro řeznou dráhu otvorů součásti byla použita přímá náběhová a výběhová přímka, protože se jedná o tvrdý materiál. Pro řezání obrysu součásti byla využita přímá náběhová a výběhová přímka, která má plnit funkci můstku zabraňující propadu součásti do vodní nádrže. Pořadí řezání jednotlivých prvků (obr. 4.7) je důležité z technického i ekonomického hlediska. První má být vyřezána největší díra, následuje přejezd paprsku rychloposuvem a vyřezání menší díry. Poslední je řezán obrys celé součásti.



Obr. 4.7 Náběhy a výběhy pro řeznou dráhu.

Řezná dráha a směr řezání vodního paprsku je zobrazen na obr. 4.8. Na zvoleném detailu řezné dráhy (obr. 4.9) lze pozorovat zpomalování vodního paprsku při řezání rohů a otvorů.



Obr. 4.8 Řezná dráha vodního paprsku.



Obr. 4.9 Detail řezné dráhy.

4.3.1 Stanovení parametrů řezání

Parametry řezání (tab. 4.2) jsou závislé na tloušťce, druhu materiálu a požadované kvalitě řezu [7].

Vzhledem na materiálovou charakteristiku korozivzdorné oceli je nutné součást řezat abrazivním vodním paprskem. Jako abrazivum je použit granát o velikosti mesh = 80. V použitém softwaru je rychlost řezání zadávána v rozmezí 0 až 100 %. Pro zvolenou hodnotu z tohoto rozmezí software optimalizuje řezné rychlosti. Požadované kvalitě řezu Q3 odpovídá hodnota rychlosti 50 %. V náběžích je hodnota rychlosti snížena na 20 %. Nastavení hodnoty vysokého tlaku závisí na nejvyšším dosahovaném tlaku používaného čerpadla, jehož nejvyšší tlak je 413 MPa. Nastavení nízkého tlaku vody cca 100 MPa lze využít pro děrování počátečních otvorů v citlivých materiálech, které by při vysokém tlaku praskly, například sklo, kámen nebo kombinace materiálů. Obrys je následně řezán vysokým tlakem [14]. Korozivzdorná ocel mezi tyto citlivé materiály nepatří a lze ji děrovat vysokým tlakem.

Tab. 4.2 Zvolené parametry řezání abrazivním paprskem.

Průměr trysky (d_o)	0,35 mm
Průměr směšovací trubky (d_s)	1,016 mm
Délka směšovací trubky (l_s)	76,2 mm
Tlak vody (p_v)	413 MPa
Hmotnostní průtok abraziva (m_a)	0,58 kg.min ⁻¹
Typ abraziva	Garnet MESH80

4.4 Výrobní proces

Na stůl řezacího stroje byl pomocí upínačů upevněn první připravený polotovár. Ukázka upnutí je zobrazena na obr. 4.10. Pro nastavení polohy řezací hlavy byl využit laserový zaměřovací kříž, který byl nastaven na nulový bod obrobku. Řezací hlava se přesunula na tuto polohu a tato poloha byla předána systému řízení jako nová výchozí pozice. Následně byly na ovládacím panelu zařízení zadány navrhnuté parametry řezání s využitím technologie Dynamic Waterjet a po zapnutí čerpadla byl spuštěn proces řezání (obr. 4.11).



Obr. 4.10 Upnutí polotovaru.



Obr. 4.11 Proces řezání AWJ.

Po dokončení operace řezání (obr. 4.12) musel být dílec z polotovaru vylomen (obr. 4.13). Následně byla vyrobená součást osušena a připravena na odstranění můstku a sražení hran.



Obr. 4.12 Vyřezaná součást v polotovaru.

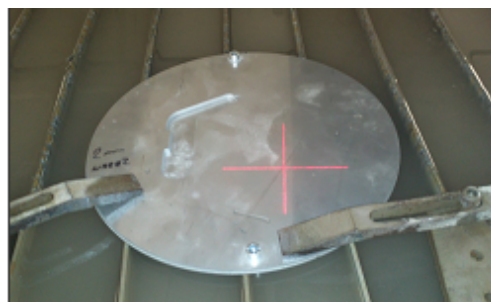


Obr. 4.13 Vylomená součást.

Po vyřezání prvního vzorku byl upevněn další polotovár k předchozímu pomocí šroubů (obr. 4.14). Tím se částečně eliminoval vznik vzduchových mezer mezi jednotlivými polotovary, ve kterých má paprsek snahu se otvírat a řezat spodní vrstvu hrubě. Dále následovaly stejné kroky jako v předchozím výrobním procesu.



Obr. 4.14 Upnutí dvou polotovarů.



Obr. 4.15 Nastavení laserového kříže.

5 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ

Tato kapitola hodnotí výrobní náklady a výslednou nerovnost povrchu řezaných vzorků. Měření nerovnosti povrchu je provedeno kontaktní i nekontaktní metodou.

5.1 Výrobní náklady

Provozní náklady na řezání abrazivním vodním paprskem lze rozdělit do dvou skupin:

- systémové provozní náklady (čerpadlo, řezací hlava, nástroj - voda),
- střediskové provozní náklady (podlahový prostor, operátor, leasing).

Náklady těchto jednotlivých položek zde nejsou na požadavek firmy WASHINA engineering s.r.o. zveřejněny.

Všechny tři řezné procesy byly monitorovány systémem FlowMaster. Tento systém počítal čas řezání, čas děrování, délku řezu, posuvovou rychlost a cenu řezu. Naměřené hodnoty těchto položek jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Naměřené hodnoty řezných procesů.

počet řezaných vzorků (i)	1	2	3
výška řezu (h) [mm]	2	4	6
čas řezání (t _r) [min]	1,13	1,36	1,56
čas děrování (t _d) [s]	0,1	0,20	0,36
délka řezné dráhy (L) [mm]	330	330	330
posuvová rychlost (f) [m.min ⁻¹]	0,25	0,24	0,21
cena řezu (c) [Kč]	24,9	36,2	44,5

V ceně řezu jsou započteny všechny provozní náklady na řezání. Podle vztahu (4.1) jsou pro každý řezný proces vypočteny náklady na výrobu jednoho vzorku. V těchto nákladech není započtena operace vrtání děr pro upnutí polotovaru, která by celkové náklady mírně zvýšila.

$$n = \frac{c}{i} \text{ [Kč]} \quad (4.1)$$

kde: n [Kč] - výrobní náklady,
 c [Kč] - cena řezu,
 i [-] - počet řezaných polotovarů,

Výrobní náklady jednoho vzorku u řezání jednoho polotovaru:

$$n_1 = \frac{c_1}{i_1} = \frac{24,9}{1} = 24,9 \text{ Kč}$$

Výrobní náklady jednoho vzorku u řezání dvou polotovarů:

$$n_2 = \frac{c_2}{i_2} = \frac{36,2}{2} = 18,1 \text{ Kč}$$

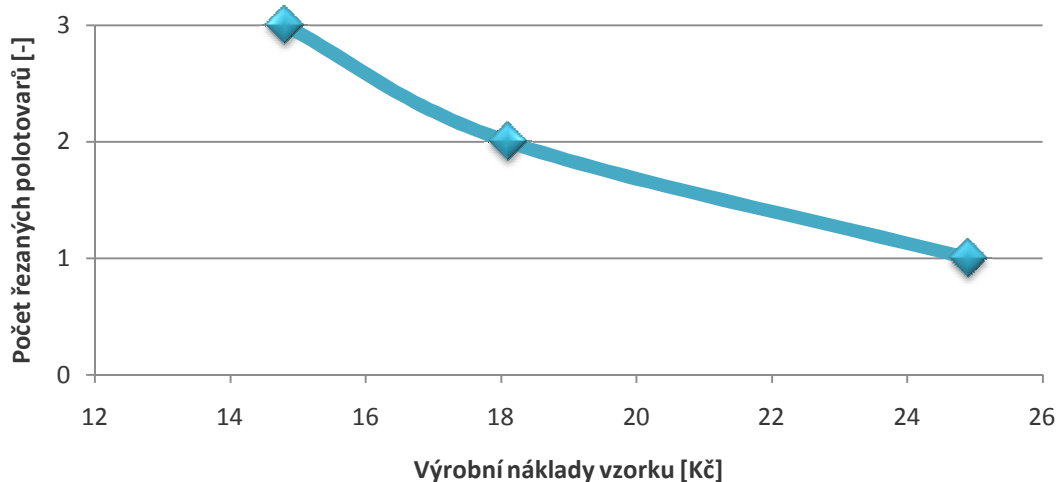
Výrobní náklady jednoho vzorku u řezání tří polotovarů:

$$n_3 = \frac{c_3}{i_3} = \frac{44,5}{3} = 14,8 \text{ Kč}$$

Rozdíl výrobních nákladů vzorku u řezání jednoho a tří polotovarů:

$$n_r = n_1 - n_3 = 24,9 - 14,8 = 10,1 \text{ Kč} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Náklady na výrobu jednoho vzorku u řezání rozdílného počtu polotovarů jsou názorně shrnuty v grafu (obr. 5.1). Na tomto grafu lze sledovat snižování výrobních nákladů se zvyšujícím se počtem řezaných polotovarů ve svazku.



Obr. 5.1 Závislost výrobních nákladů na počtu řezaných polotovarů

Pro výpočet nákladů na řeznou dráhu jednoho vzorku byl sestaven vztah (4.2).

$$n_L = \frac{c}{i \cdot L} [\text{Kč} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4.2)$$

kde: L [mm] - délka řezu.

Náklady na řeznou dráhu vzorku u řezání jednoho polotovarů:

$$n_{L1} = \frac{c_1}{i_1 \cdot L} = \frac{24,9}{1 \cdot 330} = 0,075 \text{ Kč} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Náklady na řeznou dráhu jednoho vzorku u řezání dvou polotovarů:

$$n_{L2} = \frac{c_2}{i_2 \cdot L} = \frac{36,2}{2 \cdot 330} = 0,055 \text{ Kč} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Náklady na řeznou dráhu jednoho vzorku u řezání třech polotovarů:

$$n_{L3} = \frac{c_3}{i_3 \cdot L} = \frac{44,5}{3 \cdot 330} = 0,045 \text{ Kč} \cdot \text{mm}^{-1}$$

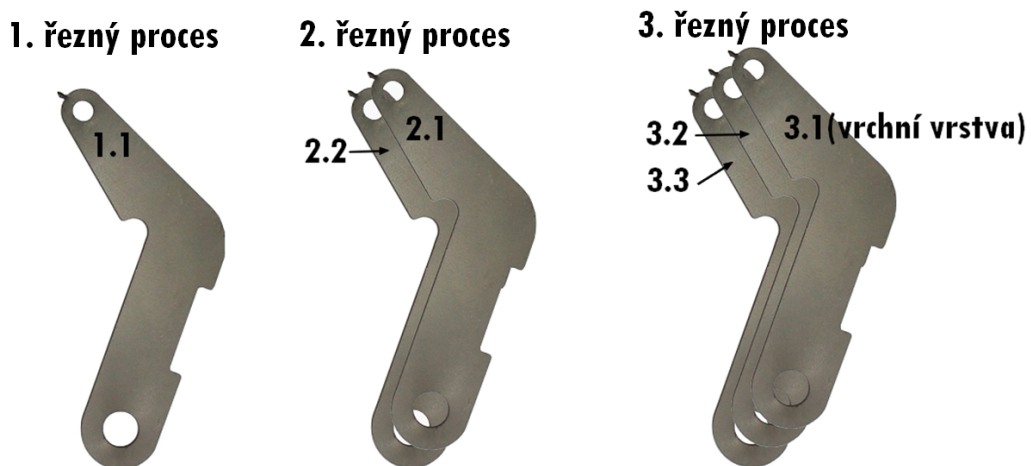
Rozdíl nákladů na řeznou dráhu vzorku u řezání jednoho a tří polotovarů:

$$n_L = n_{L1} - n_{L3} = 0,075 - 0,045 = 0,03 \text{ Kč} \cdot \text{mm}^{-1}$$

5.2 Nerovnost obrobeneho povrchu

Nerovnost obrobeneho povrchu byla měřena dotykovým profilometrem od výrobce Taylor Hobson. Nevýhodou metody kontaktního měření je možnost hodnocení povrchu pouze ve 2D zobrazení. Další nevýhodou je přímý kontakt s měřenými vzorky, při kterém může dojít ke zkreslení měřených dat [5].

Měřené vzorky byly rozděleny podle řezných procesů a vrstev materiálu daného svazku. Princip označení měřených vzorků je zobrazen na obr. 5.3.

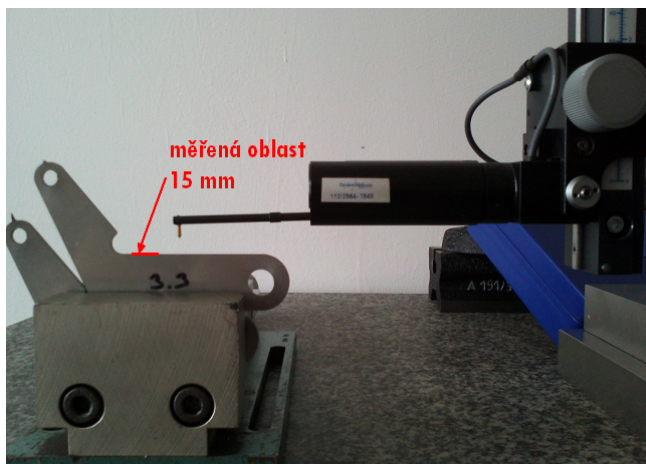


Obr. 5.3 Označení měřených vzorků.

Vzorky byly na pracovní ploše jednotlivě upnuty do svěráku a pro měření byl zvolen 15 mm profil povrchu (obr. 5.2), který po vizuální kontrole jevil největší nerovnost.

Výstupem měření byly podle ČSN ISO 4287 zvoleny tyto charakteristiky profilu:

- R_a [μm] (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu),
- R_z [μm] (největší výška profilu),
- R_q [μm] (průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu) [26].



Obr. 5.2 Měření vzorku dotykovým profilometrem.

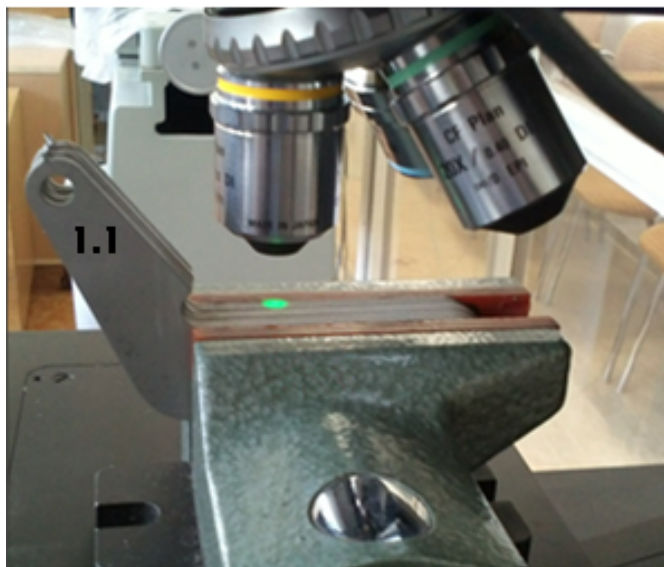
Tab. 5.2 Naměřené hodnoty Ra.

Vzorek	1.1	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3
Ra [μm]	4,271	3,371	5,371	3,107	4,284	6,774
Rz [μm]	26,688	21,056	33,717	25,556	28,693	39,181
Rq [μm]	5,399	4,156	6,794	4,047	5,332	8,534

Největší rozdíl hodnot průměrné aritmetické úchytky Ra = 2,503 μm byl naměřen u vzorků s označením 1.1 a 3.3.

Nekontaktní metoda měření byla zvolena pro prostorové (3D) zobrazení povrchu. Měření probíhalo na moderním 3D bezkontaktním interferometru Talysurf CCI SunStar (obr. 5.4), který využívá koherenční skenovací interferometrii pro analýzu profilu povrchu [27].

Tímto přístrojem byly měřeny pouze dva vzorky s největším rozdílem hodnot průměrné aritmetické úchytky a to vzorek s označením 1.1 a 3.3. Vzorky byly na pracovní ploše měřicího přístroje upnuty do svěráku (obr. 5.3). Následně byla textura povrchu řezu prostorově zobrazena s barevnou charakteristikou výšek nerovností povrchu. Na těchto výsledcích byl následně zkoumán vliv vodního paprsku na povrch řezu po svazkovém řezání.



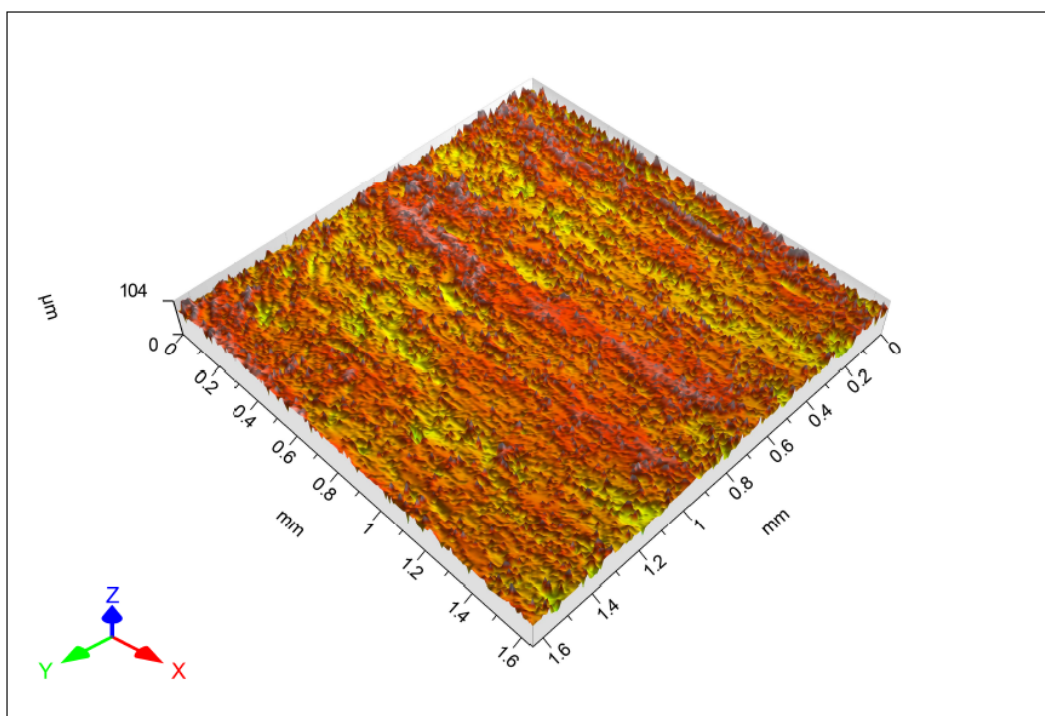
Obr. 5.3 Objektiv Mirau 10x.

Pro měření byl využit objektiv se zvětšením 10x. Volba mezní vlnové délky profilového filtru λ_c a vyhodnocovaná délka měřené oblasti l_n byla zvolena podle ČSN ISO 4287. Podle této normy byla zvolena hodnota $\lambda_c = 2,5 \text{ mm}$ a vyhodnocovaná délka odpovídající $l_n = 15 \text{ mm}$. V nasnímané ploše byl tedy veden řez o celkové délce 15 mm.

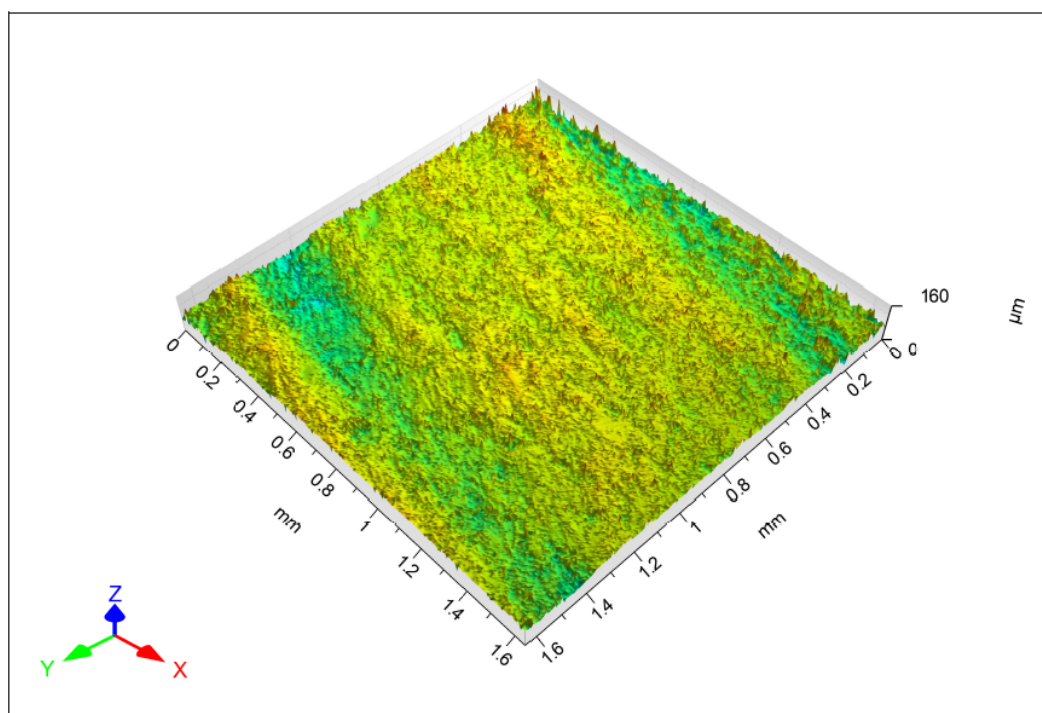
Tab. 5.3 Naměřené hodnoty Ra.

Vzorek	1.1	3.3
Ra [μm]	4,933	6,607
Rz [μm]	48,481	67,016
Rq [μm]	6,497	8,665

Na zobrazení povrchu vzorku s barevnou charakteristikou výšek nerovností povrchu (obr. 5.5) lze pozorovat rýhování typické pro řezání vodním paprskem. Toto rýhování má značný vliv na změřenou hodnotu $R_a = 6,607 \mu\text{m}$, která nesplňuje předepsaný požadavek $R_a = 6,3 \mu\text{m}$.



Obr. 5.4 Nasnímaná textura povrchu vzorku č. 1.1.



Obr. 5.5 Nasnímaná textura povrchu vzorku č. 3.3.

5.2.1 Vliv výšky řezu

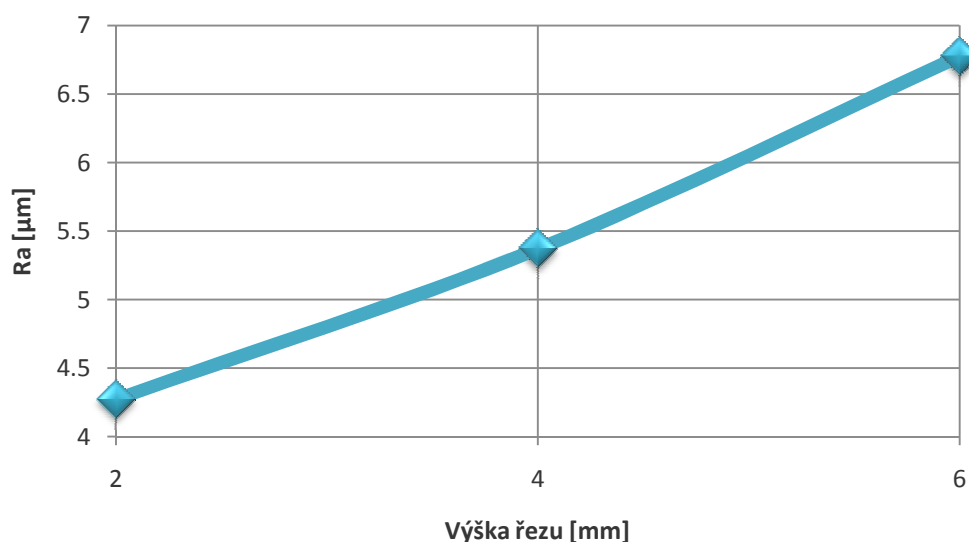
Výška řezaného svazku měla vliv na průměrnou hodnotu střední aritmetické odchylky profilu R_a (tab. 5.4), která se s postupným řezáním více vrstev materiálu měnila následovně:

- při řezání jednoho polotovaru o tloušťce 2 mm byla naměřena hodnota $R_a = 4,271 \mu\text{m}$,
- řezáním svazku dvou polotovarů o celkové tloušťce 4 mm se hodnota průměrné střední aritmetické odchylky R_a v porovnání řezáním jedné vrstvy zvýšila o $1,1 \mu\text{m}$,
- řezáním svazku tří polotovarů o celkové výšce 6 mm se hodnota průměrné střední aritmetické odchylky R_a v porovnání řezáním jedné vrstvy zvýšila o $2,503 \mu\text{m}$.

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty R_a pro různé výšky řezu.

Výška řezu [mm]	2	4	6
R_a [μm]	4,271	5,371	6,774

S výškou řezu tedy nelineárně narůstá průměrná hodnota střední aritmetické odchylky R_a (obr. 5.6). Tento jev lze zdůvodnit rozložením zóny řezného opotřebení a zónou deformačního opotřebování materiálu mezi jednotlivými vrstvami řezaného polotovaru.



Obr. 5.6 Vliv výšky řezu na hodnotu R_a .

6 DISKUZE

Hlavním úkolem této práce bylo zhodnotit možnost řezání materiálu ve více vrstvách vodním paprskem. Výhodou řezání vodním paprskem je tzv. studený řez, při kterém nedochází k tepelnému ovlivnění řezaného materiálu. Použitím jiné formy řezání, jako je například laser nebo plazma, by mohlo dojít k tavení vrstev naskládaného materiálu vlivem tepla, které je přenášeno během procesu řezání.

Výroba vzorků byla prováděna v podmínkách malé strojírenské firmy s nově zakoupeným zařízením pro řezání vodním paprskem. Požadavek firmy byl vyhodnotit výrobní náklady a vliv vodního paprsku na texturu povrchu při řezání třech vrstev stejného materiálu vodním paprskem.

U řezání svazků je nutné zvolit bezpečné upnutí materiálu, aby při jeho řezání nedošlo k posunutí jednotlivých vrstev, přičemž by došlo k znehodnocení řezaného obrysu. Bezpečné upnutí však může vyžadovat zvláštní úpravu a nastavení materiálu. Tento čas investovaný do zajištění materiálu však zvyšuje výrobní náklady. Při vysokých manipulačních časech může ztrácet smysl.

Vhodným upnutím na sebe musí vrstvy materiálu pevně doléhat, aby mezi nimi nevznikaly vzduchové mezery, do kterých se může dostat voda a abrazivum. Tím by docházelo ke snižování síly paprsku a další vrstvy by byly řezány hruběji. Nevýhodou stohování materiálu je kvalita řezaného povrchu, která začíná klesat s tloušťkou svazku. Řešením je zpomalení paprsku s cílem zajistit u spodních vrstev přijatelnou kvalitu povrchu. V důsledku toho se může celková doba řezacího procesu zvýšit až do bodu, kdy řezání svazků nebude výhodné.

Řezání svazků je nevhodné pro součásti, které mají mnoho rohů, protože vodní paprsek musí v rozích zpomalovat. Zvyšováním tloušťky svazku dochází k většímu zpomalování paprsku. Na ostrých hranách se paprsek téměř zastavuje, proto je výhodné rohy zaoblit s co největším možným poloměrem.

Přidáním vrstev materiálu se musí počítat se zhoršenou kvalitou spodních vrstev. Pro zvýšení produktivity výroby se nabízí možnost zakoupení dalších řezacích hlav a jejich současného využívání. Tato možnost je však vhodná pro velké série výroby.

Na vyrobených vzorcích není viditelný úkos, jehož vznik byl eliminován využitím moderní technologie Dynamic WaterJet. Při řezání třech vrstev materiálu, vzniklo na obrobeném povrchu spodní vrstvy malé rýhování, které je pro paprskové technologie typické. Na ostatních vzorcích není toto rýhování viditelné. Vznik rýhování je závislý na posuvové rychlosti vodního paprsku a tloušťce řezaného materiálu.

Pro měření nerovnosti obrobeného povrchu u těchto vyrobených vzorků v podmínkách malé firmy dostatečně postačí kontaktní metoda měření. V této práci je využita i možnost metody nekontaktního měření pro zobrazení 3D profilu. Měření nekontaktní metodou je ovšem časově náročné a náklady na pořízení toho měřicího přístroje jsou vysoké.

Při měření průměrné aritmetické úchylny profilu s viditelným rýhováním byla pomocí nekontaktní metody naměřena nejvyšší hodnota $R_a = 6,607 \mu\text{m}$, která přesahuje předepsanou hodnotu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Toto rýhování se nachází pouze na

velmi malé oblasti povrchu řezu a nemá vliv na funkčnost součásti a součást lze plně využívat. Z tohoto hlediska se nabízí možnost snížení výrobní ceny změnou předepsané hodnoty $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ na vyšší hodnotu, pro kterou by se mohla zvolit vyšší posuvová rychlost vodního paprsku, která by zvýšila rychlost řezného procesu a měla vliv na snížení ceny řezného procesu.

ZÁVĚR

Výsledky bakalářské práce potvrzují, že za určitých podmínek má řezání svazku korozi-vzdorné oceli abrazivním vodním paprskem vliv na snížení výrobních nákladů.

Podle požadované průměrné aritmetické úchytky profilu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$ a rozměrové přesnosti řezu $\pm 0,02 \text{ mm}$ byla zvolena kvalita řezu označována stupněm Q3. Zvolení kvality řezu ovlivňovalo posuvovou rychlost vodního paprsku. Posuvová rychlost byla dále ovlivněna rostoucí výškou řezu, při které rychlost posuvu klesala.

Metoda řezání svazku materiálu není vhodná pro tvarově složité součásti, které mají mnoho rohů. Před každým rohem se snižuje posuvová rychlost vodního paprsku a to má za následek prodloužení času řezání.

Řezání třech vrstev materiálu mělo v porovnání s řezáním jedné vrstvy materiálu za následek snížení výrobní ceny jednoho vzorku o 10,1 Kč. Při této metodě řezání je nutné brát ohled na zvýšení manipulačních časů.

Na základě měření hodnoty průměrné aritmetické úchytky profilu u všech vyrobených vzorků, bylo zjištěno, že tato hodnota nelineárně narůstá s rostoucí výškou řezu. V porovnání výšky řezu 2 mm a 6 mm se hodnota průměrné aritmetické úchytky zvýšila o 2,503 μm . Zvyšováním výšky řezaného svazku se kvalita obrobeného povrchu u níže položených vrstev materiálu zhoršovala.

Měřením struktury povrchu kontaktní metodou bylo zjištěno, že nejhorší kvalitu obrobeného povrchu měl vzorek ze spodní vrstvy, který byl řezaný ze třech vrstev materiálu. U tohoto vzorku byla naměřená hodnota průměrné aritmetické úchytky profilu $R_a = 6,774 \mu\text{m}$, která přesahovala předepsanou hodnotu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Ostatní vzorky předepsaný požadavek na průměrnou aritmetickou úchytku profilu splnily.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. *Technologie I - Technologie obrábění - 3. část*. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2003. [online]. [vid. 2014-12-15]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
2. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie (Advanced methods of material removal)*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. 276 s. ISBN 80-7099-430-4.
3. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. 1. vyd. Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
4. AB JET, spol. s r. o. *Řezání materiálu vysokotlakým vodním paprskem*. [online]. [vid. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.abjet.cz/serv01.htm>
5. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vyd. Ostrava: Ámos, 2008, 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
6. OMAX. *What is Waterjet Cutting*. [online]. [vid. 2015-01-05]. Dostupné z: <https://www.omax.com/learn/how-does-waterjet-work>
7. BARCÍK, Štefan. *Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem*. 1. vyd. Praha: Powerprint, 2012, 240 s. ISBN 978-80-87415-60-3.
8. SOUTHERN METHODIST UNIVERSITY. *Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting*. [online]. [vid. 2015-02-15]. Dostupné z: <https://lyle.smu.edu/rcam/images/Removal17.jpg>
9. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
10. JANÍČKOVÁ, Petra. *Učíme v prostoru - vzdělávací 3D encyklopedie: Nekonvenční způsoby obrábění*. [online]. [vid. 2015-02-15]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2573
11. WARD Jet. *Waterjet University*. [online]. [vid. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.wardjet.com/>
12. FLOW INTERNATIONAL CORPORATION. *Technologie vodního paprsku*. [online]. [vid. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.flowwaterjet.com>
13. CHPS s.r.o. *Vodní paprsek – Technologie*. [online]. [vid. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/technologie>
14. WASHINA engineering, spol. s r. o. *Výukové materiály k softwaru FlowMaster, Flow*. 2003.

15. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ*. [online]. [vid. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvencni-technologie-awj.html>
16. MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Soustružení abrazivním kapalinovým paprskem*. [online]. [vid. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soustruzeni-abrazivnim-kapalinovym-paprskem-zvysuje-trvanlivost.html>
17. HYDROMAR LTD. *Design guide - drawing for waterjet profiling*. [online]. [vid. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.hydromar.co.uk/Waterjet-Drawing-Guide.aspx>
18. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
19. KULEKCI, Mustafa Kemal. *Process and apparatus developments in industrial waterjet applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002. vol 42, no 12, p. 1297-1306. ISSN 0890-6955
20. ŠŮŇ, Roman a Emil SPIŠÁK. *Prehľad najčastejšie používaného abrazivního materiálu v procese rezanie hydroabrazívnym lúčom*. [online]. [vid. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.it-strojar.sk/articles/00031.pdf>
21. OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění (vzdělávací a tréninkový modul)*. Brno 2012. Vysoké učení technické v Brně – Fakulta strojního inženýrství. [online]. [vid. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
22. N.F.I. Metall, spol. s.r.o. *Řezání vodním paprskem*. [online]. [vid. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.nfi.cz/rezani-vodnim-paprskem.html>
23. INOX, spol. s r.o. *Nerezové hutní materiály*. [online]. [vid. 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
24. PIW CORP. *Waterjet Edge Quality and Process*. [online]. [vid. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://piwcorp.com/portfolio/2011/11/14/waterjet-edge-quality-process/>
25. WASHINA engineering, spol. s.r.o. [online]. [vid. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.washina.cz/>
26. ČSN EN ISO 4287.
27. MICRO – TOP. *3D Optical Profiler Talysurf CCI MP*. [online]. [vid. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.microtop.ro/en/product/3d-optical-profiler-talysurf-cci-mp.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
Al ₂ O ₃	[-]	Oxid hlinitý
AWJ	[-]	Abrazivní vodní paprsek
AWJM	[-]	Obrábění abrazivním vodním paprskem
DJW	[-]	Řezání vodním paprsek s aktivním řízením tolerance
WJM	[-]	Obrábění čistým vodním paprskem
2D	[-]	Dvojozměrný
3D	[-]	Trojrozměrný

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
c	[Kč]	Cena řezu
d _o	[mm]	Průměr trysky
d _s	[mm]	Průměr směšovací trubky
f	[m.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
h	[mm]	Výška řezu
i	[-]	Počet řezaných vzorků
l _n	[mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti
l _s	[mm]	Délka směšovací trubky
L	[mm]	Délka řezné dráhy
m _a	[kg.min ⁻¹]	Hmotnostní průtok abraziva
n	[Kč]	Výrobní náklady
n _L	[Kč.mm ⁻¹]	Náklady na řeznou dráhu
p _v	[MPa]	Tlak vody
Q1	[-]	Stupeň kvality pro dělicí řez
Q2	[-]	Stupeň kvality pro hrubý řez
Q3	[-]	Stupeň kvality pro střední řez
Q4	[-]	Stupeň kvality pro kvalitní řez
Q5	[-]	Stupeň kvality pro nejkvalitnější řez

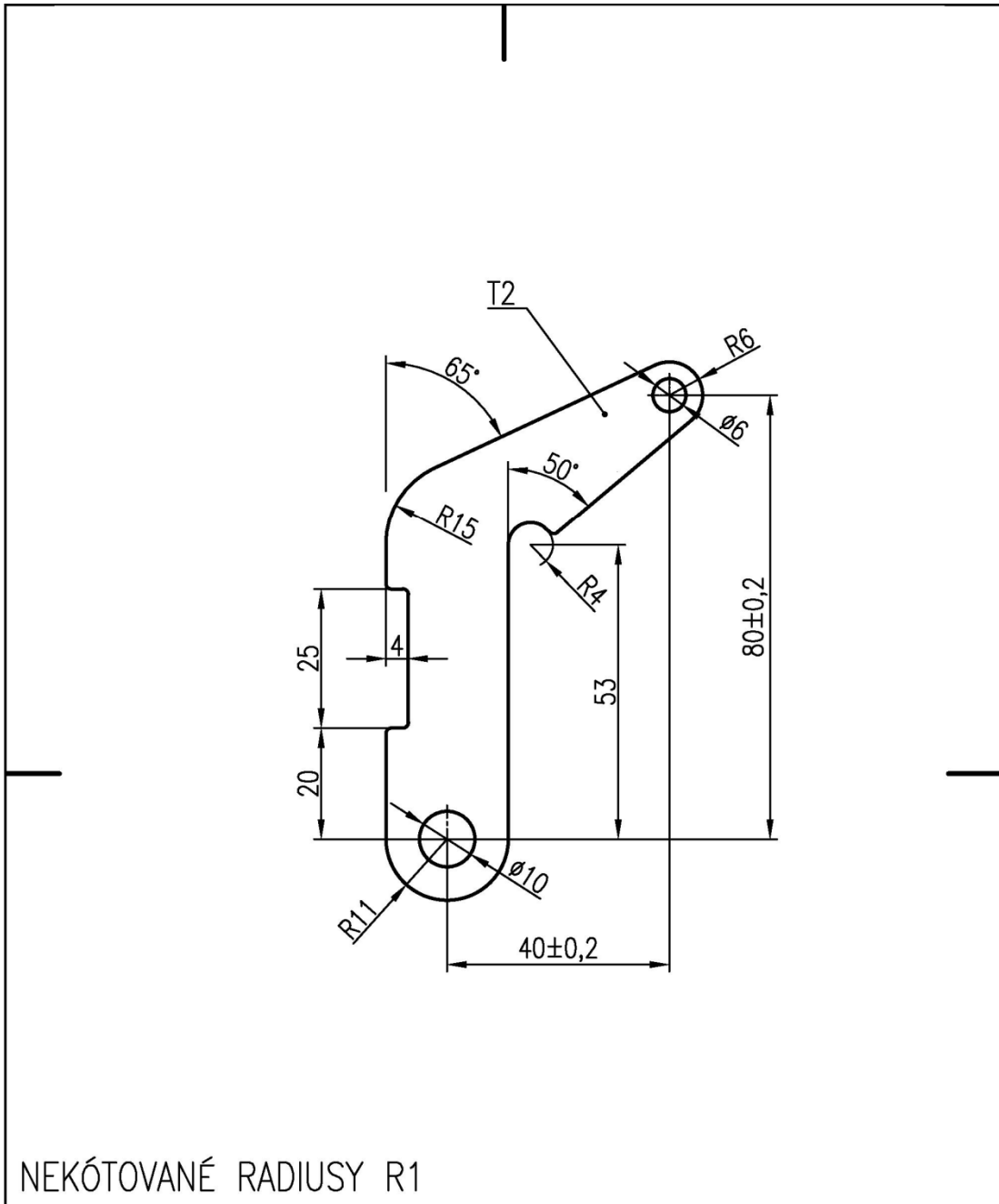
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_q	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
R_z	[μm]	Největší výška profilu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
t_d	[min]	Čas děrování
t_f	[min]	Čas řezání
λ_c	[mm]	Mezní vlnová délka profilového filtru

SEZNAM PŘÍLOH


Příloha 1 Výkres součásti – páka

PŘÍLOHA 1

Výkres součásti – páka



NEKÓTOVANÉ RADIUSY R1

Struktura povrchu: $\sqrt{Ra\ 6,3}$ (✓)		Hrany: $\begin{matrix} \swarrow -0,3 \\ \searrow +0,3 \end{matrix}$		Měřítko 1:1		Přesnost ISO 2768-mK	
						Tolerování ISO 8015	
						Promítání $\left[\begin{matrix} \square \\ \oplus \end{matrix} \right]$	
Materiál 1.4301		Polotovár		Hmotnost 0,03 kg		CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016	
		Druh dokumentu VÝKRES SOUČÁSTI		Název PÁKA			
		Kreslil ADAM MASAŘÍK					
		Schválil		Číslo dokumentu BP-A4-01.00			
		Datum vydání 10.4 2015		List /			