



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VODNÍ PAPERSEK VE STROJÍRENSTVÍ

A WATER JET IN ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. František Kadlček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Osička, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. František Kadlček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Karel Osička, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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 diplomové práce:

Vodní paprsek ve strojírenství

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nasazení technologie řezání abrazivním vodním paprskem v podmínkách střední firmy pružně reagující na požadavky odběratelů.

Cíle diplomové práce:

Princip technologie abrazivního vodního paprsku.
Stávající technologické a kapacitní možnosti firmy.
Rozbor potenciální součástkové základny.
Návrh technologie na vzorovou součástku.
Ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

BARCAL, Jaroslav. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vydanie. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-709-430-4.

HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. Delenie kovových materiálov okružnou pílou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom, 1. vydání. Jiří Pustina: Ostrava – Poruba, 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.

KRAJNÝ, Zdenko. Vodný lúč v praxi WJM. 1.vydanie, Bratislava: Ing. Michal Mračko, 1998. 214 s. ISBN 80-8057-091-4.

ČSN ISO 3207. Statistická interpretace údajů. Stanovení statistického tolerančního intervalu. Praha:
Český normalizační institut, 1993. 30 s.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o principu abrazivního paprsku a popisuje zařízení potřebná pro jeho vytvoření. V práci je uveden rozbor technologických parametrů a jejich vliv na kvalitu řezu. Následně se tato práce zabývá experimentem, který spočívá v návrhu technologie na vzorovou součástku, navazujícím vyhodnocením kvality povrchu a na závěr ekonomickým zhodnocením.

Klíčová slova

abrazivní vodní paprsek, technologické parametry, kvalita řezného povrchu, úkosy, ekonomické zhodnocení

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the principle of the abrasive jet and describes the devices needed to create it. The thesis presents an analysis of technological parameters and their impact on the quality of the cut. Subsequently, this thesis deals with an experiment, which consists in the design of technology for a sample component, followed by evaluation of surface quality and the economic evaluation.

Key words

abrasive waterjet, technological parameters, cutting surface quality, tapers, economic evaluation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLČEK, František. *Vodní paprsek ve strojírenství* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132317>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Karel Osíčka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vodní paprsek ve strojírenství** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21.05.2021

Datum

Bc. František Kadlček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval zejména Ing. Karlu Osičkovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Jaroslavu Mašovi a firmě AWAC, spol. s.r.o. za rady a možnost řešit diplomovou práci právě v této firmě.

Na závěr bych chtěl poděkovat rodině a přítelkyni za velkou podporu během celého studia na vysoké škole.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM.....	10
1.1 Historie.....	10
1.2 Princip technologie abrazivního vodního paprsku.....	11
1.3 Charakteristické úseky řezné plochy	14
1.4 Výsledný povrch řezané součásti.....	15
1.4.1 Kvalita povrchu obrobené plochy.....	15
1.4.2 Profil řezu	18
1.5 Zařízení	20
1.5.1 Vysokotlaké čerpadlo	20
1.5.2 Zpětný ventil.....	24
1.5.3 Zásobník abraziva.....	24
1.5.4 Řezací hlava.....	25
1.5.5 Software.....	27
1.5.6 Lapač zbytkové energie paprsku	28
1.6 Abrazivní materiál	28
1.6.1 Tvrdost.....	28
1.6.2 Hustota.....	29
1.6.3 Tvar a velikost	29
1.6.4 Hmotnostní průtok.....	29
1.6.5 Druhy abraziva	30
1.7 Technologické parametry AWJC ovlivňující kvalitu procesu.....	31
1.7.1 Hydraulické parametry	32
1.7.2 Parametry směšování.....	34
1.7.3 Parametry řezání	35
1.8 Rozdělení AWJ obráběcích technologií.....	42
1.8.1 Vrtání.....	43
1.8.2 Frézování	43
1.8.3 Gravírování.....	44
1.8.4 Soustružení	45
1.8.5 Tvorba závitů.....	45
1.9 Výhody a nevýhody technologie WJC /AWJC	46
1.9.1 Výhody technologie WJC /AWJC.....	46
1.9.2 Nevýhody technologie WJC /AWJC.....	46
1.10 Průmyslové odvětví využívající technologii WJC /AWJC.....	46

2	TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPSREM V PODMÍNKÁCH STŘEDNÍ FIRMY	48
2.1	Stávající technologické možnosti a kapacity firmy.....	48
2.1.1	Flow Mach 4 4020c	48
2.2	Výroba vzorové součásti	50
2.2.1	Postup výroby součásti a nastavení stroje.....	50
2.3	Měření součásti.....	54
2.3.1	Postup měření součásti.....	55
2.4	Ekonomické zhodnocení	64
2.4.1	Náklady na hodinu provozu stroje	65
2.4.2	Náklady na metr přímého řezu.....	67
	Seznam použité literatury.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	75

ÚVOD

Téma zvolené pro zpracování diplomové práce je vodní paprsek ve strojírenství. Tato technologie řezání mne zaujala díky svým mnohým výhodám a podružným nevýhodám – od spektra řezaných materiálů přes inertnost vůči obráběnému dílu až k variabilitě tvaru řezané součásti. Vzhledem k minimální produkci tepla v místě řezu je použití vodního paprsku pro řezání materiálů náchylných na působení tepla bezkonkurenční. Dokonce extrémně měkké materiály jako pěna nebo kůže či naopak extrémně tvrdé jako sklo nebo kámen lze vodním paprskem dělit poměrně snadno. Ve spojitosti s touto technologií je také potřeba zmínit možnost řezání i velmi tlustých materiálů. Technologie vodního paprsku vzhledem k vyjmenovaným a mnoha dalším výhodám nachází v oboru strojírenství široké uplatnění.

Cílem této práce je objasnění principu technologie abrazivního vodního paprsku, popis zařízení, pomocí kterého je abrazivní vodní paprsek možné vytvořit, a rozbor technologických parametrů ovlivňujících kvalitu povrchu řezané součásti. Mezi další cíle patří nastínění současného stavu technologických možností a kapacit firmy, návrh technologie na vzorovou součástku, její následné zhodnocení podle vybraných kritérií kvality povrchu načež navazuje ekonomické zhodnocení, které je vztaženo k výsledkům z experimentálního měření a ke stroji použitému pro zhotovení vzorové součásti.

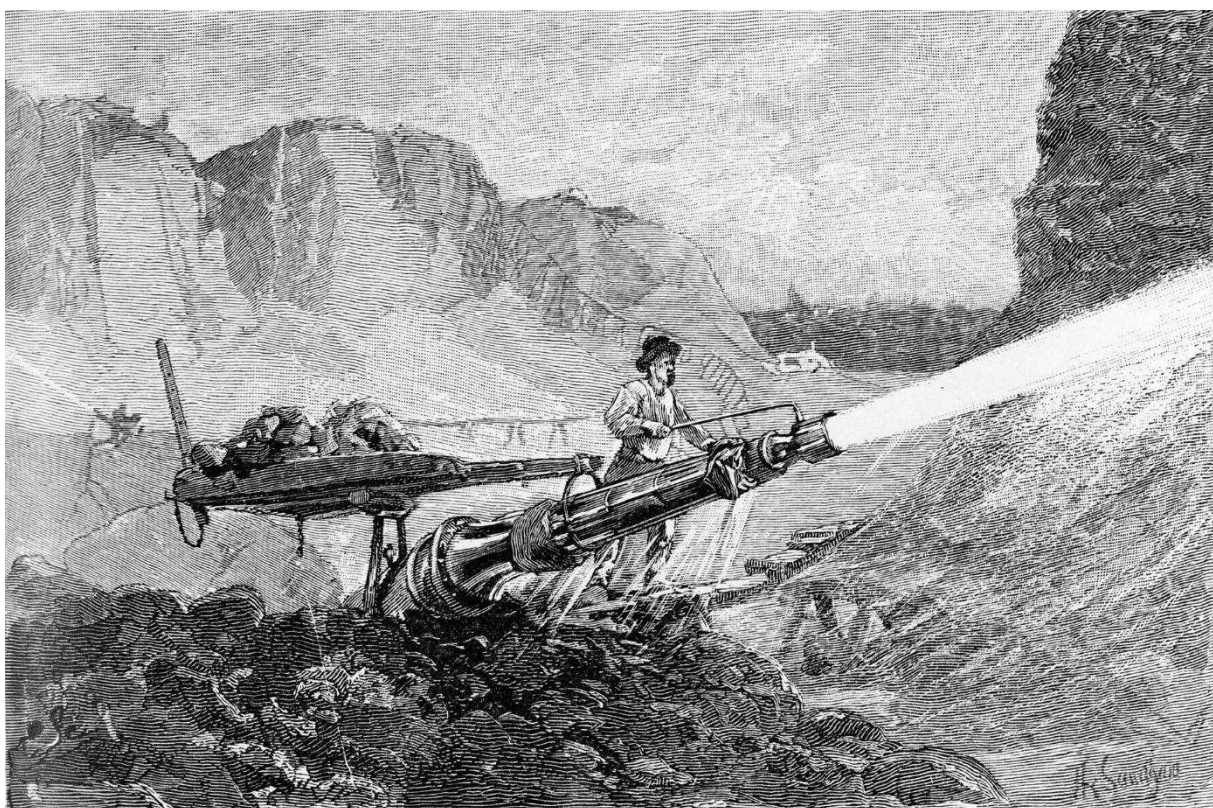
1 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPSREM

1.1 Historie

Počátek technologie vodního paprsku probíhal v třicátých letech 19. století, kdy se používal vodní paprsek o vysokém průměru k těžbě nezpevněné směsi písčitého štěrku se zlatem a následnému opláchnutí zlata. V druhé polovině devatenáctého století byla tato technologie používána a rozvíjena v Kalifornii. Tohoto času byl používaný tlak velmi nízký, dosahující maximálně 1,2 MPa [1].

Začátkem druhé poloviny 20. století inženýři z nasbíraných zkušeností usoudili, že by použití vyššího tlaku a rychlosti vodního paprsku vedlo k lepšímu rozdělování tvrdších horninových materiálů a zvýšení těžební účinnosti. Národní vědecká nadace (NSF, National Scientific Organization) podpořila tento velký výzkum, což zákonitě vedlo k rapidnímu vývoji technologie vodního paprsku. Tato technologie se následně začala využívat nejen v těžebním průmyslu (znázorněno na obr. 1), ale také k řezání kovů a jiných tvrdých materiálů ve strojírenství a v mnoha dalších průmyslech [1].

Během posledních desetiletí technologie vodního paprsku opět prošla prudkým vývojem, díky kterému je nyní možné pomocí této technologie řezat a opracovávat téměř jakýkoliv materiál jako například kámen, sklo, keramiku, plasty, kompozitní materiály, pryž i potraviny. Pokročilá technologie vodního paprsku s sebou přináší velké množství výhod oproti jiným konvenčním i nekonvenčním výrobním postupům, přičemž i nadále dochází k jejímu neustálému vývoji [2].

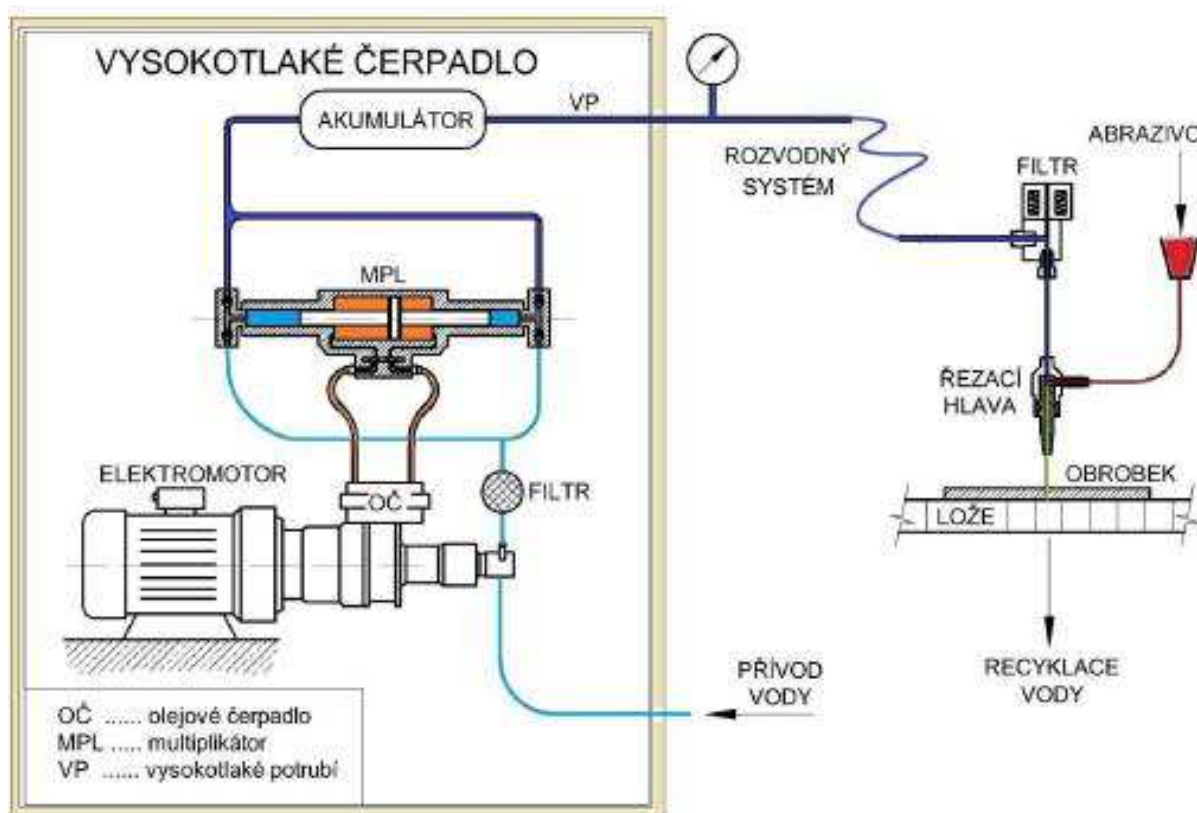


Obr. 1 Těžba horniny vodním paprskem [50].

1.2 Princip technologie abrazivního vodního paprsku

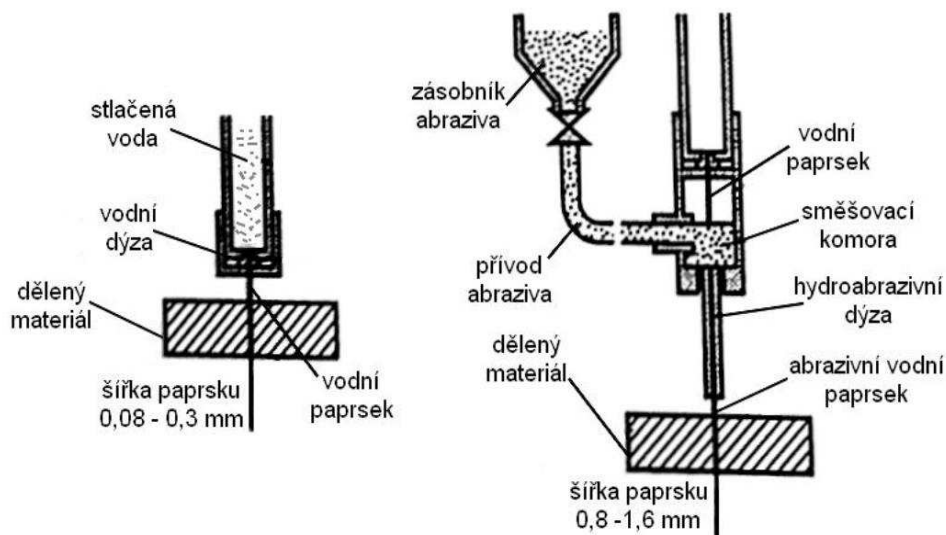
Podstata technologie řezání vodním paprskem (WJC, Water Jet Cutting) spočívá v abrazivní vlastnosti proudu vody o vysoké kinetické energii, který je soustředěn na velmi malou jednotku plochy obráběné součásti, což zapříčiní úběr materiálu. Abrazivní účinek lze navýšit přidáním abraziva do čistého vodního paprsku. Tím se zvýší účinnost mechanického procesu, čehož se využívá zejména pro obrábění kovových materiálů a keramiky [3]. Rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním vodním paprskem je znázorněn na obr. 3.

Vodní paprsek je generovaný prouděním vody o vysokém tlaku skrze otvor dýzy o velmi malém průměru. Toto zúžení průřezu vytékajícího paprsku vede k rapidnímu nárůstu jeho rychlosti, čímž nabude vlastností potřebných k uskutečnění procesu řezání. Systém zařízení pro technologii řezání abrazivním vodním paprskem (AWJC, Abrasive Water Jet Cutting) je schematicky znázorněn na obr. 2.



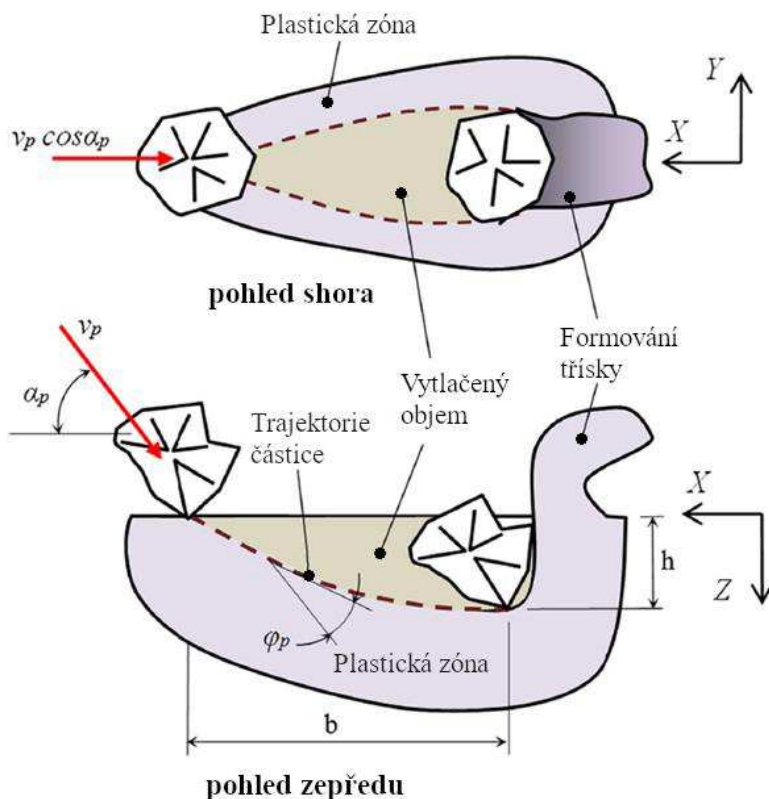
Obr. 2 Schéma principu vodního paprsku [51].

Paprsek, dosahující dvou až čtyřnásobné rychlosti zvuku, je vzhledem k jeho působení na obrobek možné považovat za pevné těleso. Průběh řezání se uskutečňuje ve dvou fázích. V první fázi se vlivem tlaku kapaliny vytvoří prohlubeň, která se následně změní na otvor. V druhé fázi dochází k dalšímu prohlubování ve směru posuvu a k vytvoření řezné štěrbině [4].

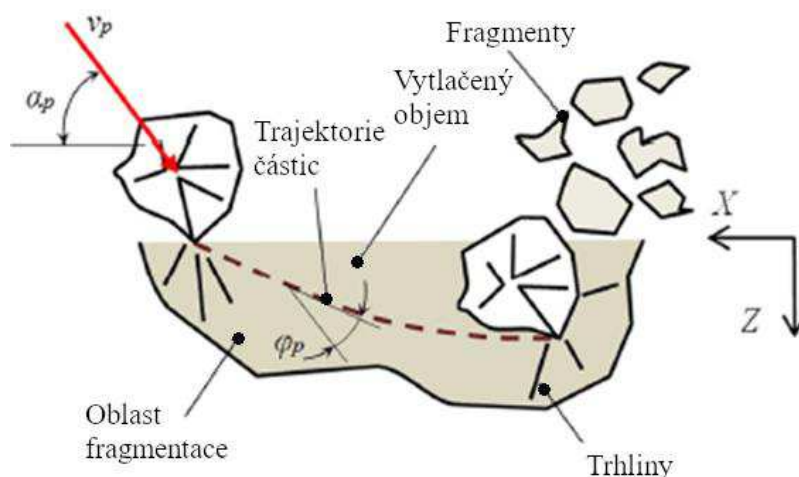


Obr. 3 Zjednodušené schéma řezání čistým a abrazivním vodním paprskem [3].

Při kontaktu vodního paprsku s obrobkem dochází ke ztrátě jeho kinetické energie a současně k prudkému nárůstu tlaku na malé ploše obráběné součásti. To má za následek vznik rázových trhlin a rychlejší porušování materiálu součásti na hranicích zrn a v mikrotrhlinách. Dynamické namáhání proudem vody urychluje šíření mikrotrhlin, čímž dochází ke kritickému narušení struktury a následnému úběru materiálu. Na porušování materiálu má také vliv turbulentní proudění kapaliny v řezné štěrbině s působením kavitačních bublin. V případě, že obráběný materiál je kov či keramika, do paprsku se přidává již zmíněný abrazivní materiál [4; 3]. Úběr tvárného materiálu viz obr. 4 a křehkého materiálu viz obr. 5.

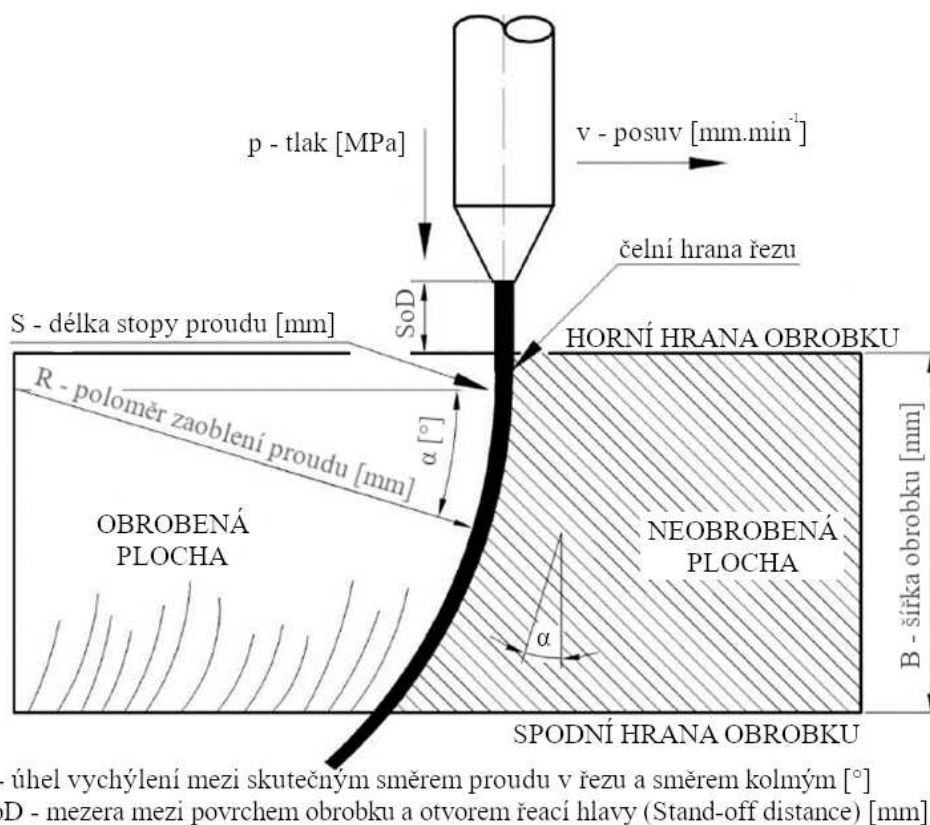


Obr. 4 Úběr tvárného materiálu abrazivní částicí [52].



Obr. 4 Úběr křehkého materiálu abrazivní částicí podle [52].

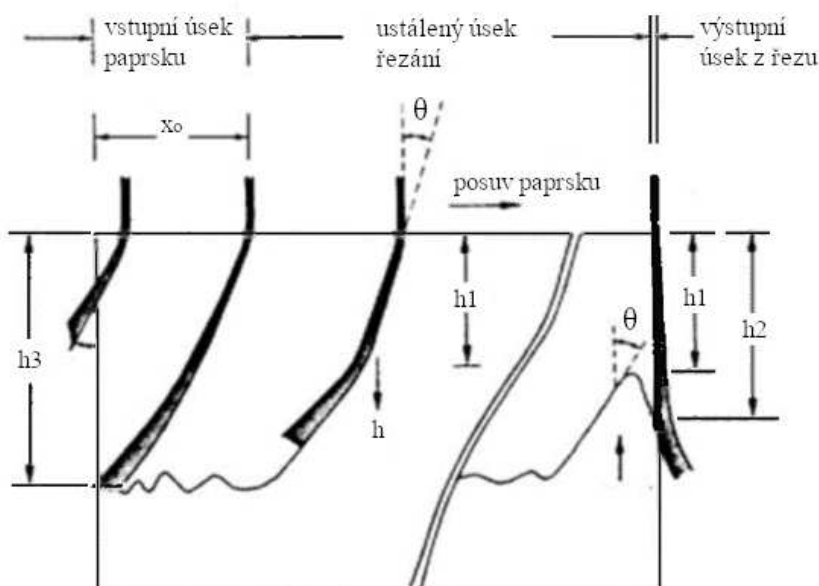
Vodní paprsek pronikající do materiálu vlivem tření ztrácí svou kinetickou energii a současně dochází i k jeho vychýlení z původního směru, což má za následek zhoršování kvality povrchu stěn řezné drážky s rostoucí vzdáleností od místa vstupu paprsku do řezu. Průběh dráhy a samotné vychýlení paprsku je znázorněno na obr. 6. Dráha vodního paprsku je postupně vychylována a v každém bodě je její pohyb realizován po zaoblené křivce, jejíž rádius se odvíjí od délky předchozího oblouku [3]. Příčinu zbrzdění a vychylování paprsku vody Wilkins a Graham [5] připisují vlivům tření mezi povrchem vodního paprsku a povrchem materiálu obrobku.



Obr. 3 Schéma vychýlení dráhy vodního paprsku podle [3].

1.3 Charakteristické úseky řezné plochy

Abrazivním vodním paprskem je vytvořena řezná plocha s charakteristickými úseky znázorněnými na obr. 7.



Obr. 5 Charakteristické úseky řezání abrazivním vodním paprskem [3].

První (tzv. vstupní) úsek je úsek vzniku řezné drážky (znázorněn kótou x_0) a je charakterizován vzdáleností, dokud hloubka řezné drážky nedosahuje maximální hodnoty h_3 [3]. Hashish [6] uvádí, že se v tomto úseku nachází různé mechanismy porušování materiálu.

Další charakteristickou částí je ustálený úsek řezání, kde dochází k řezání s cyklickým řezným procesem. Tento úsek je realizován až do koncového bodu materiálu, přičemž se dosahuje maximální hloubky řezné drážky h_3 [3].

Řezný proces je zakončen výstupním úsekem. Zde dochází ke vzniku oblasti, ve které není materiál obroben do plné hloubky h_3 a má charakteristický trojúhelníkový tvar. Tento jev je způsoben velkým odchýlením paprsku od svého původního směru a ztrátou kinetické energie paprsku. Z těchto důvodů dochází k porušení materiálu ve výstupním úseku pouze do hloubky h_1 až h_2 , což vytváří zmiňovaný trojúhelníkový útvar [4; 3].

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, vlivem tření mezi paprskem a obráběným materiálem dochází ke snížení kinetické energie a vychýlení paprsku z původního směru. To zapříčiní pokles kvality řezné plochy a následně lze výsledný povrch materiálu rozdělit na dvě kvalitativně odlišné zóny [2].

První zóna se nazývá zóna řezného opotřebení a dosahuje hloubky h_1 v horní části řezu. Porušení materiálu je zde realizováno vysokorychlostním erozivním procesem abrazivního paprsku pod velmi malým úhlem řezání θ . Vlastnosti paprsku v této oblasti jsou: vysoká kinetická energie a velká osová síla řezání. Tyto parametry určují stupeň opracování materiálu a materiál je tedy řezaný [2; 4; 7].

Druhá zóna se označuje jako zóna deformačního opotřebení a nachází se pod hranicí h_1 . Dochází zde ke snížení osové síly abrazivního paprsku a k řezání pod velkým řezným úhlem. Tento jev je často nazýván jako „váznutí paprsku“. Důsledkem toho dochází k přerušovanému

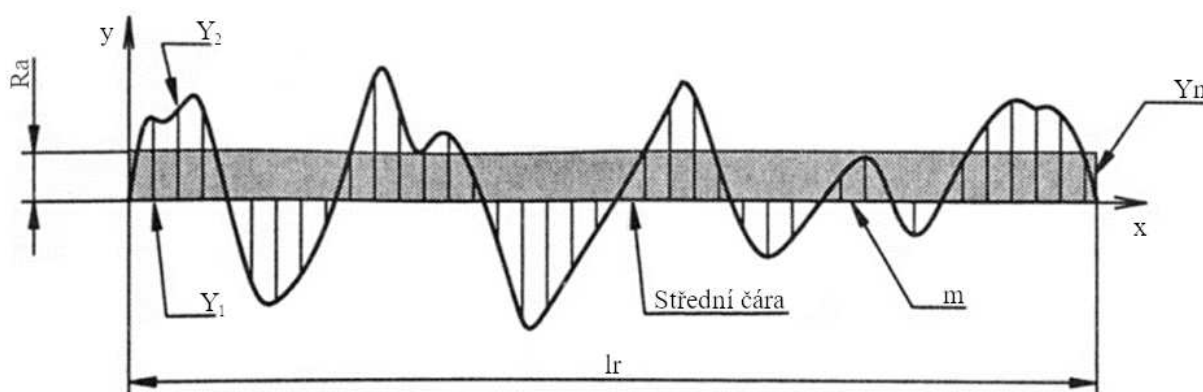
úběru materiálu a výsledný povrch je charakteristický viditelným rýhováním (vlnitostí plochy). Tato zóna je také označována jako oblast striací [2; 4]. Vážnutí paprsku může být částečně potlačeno pomocí tzv. oscilačního řezání nebo vícečetným průchodem paprsku. Při oscilačním řezání je využíváno pozitivních vlastností nepravidelné rychlosti posuvu paprsku, kdy se jeho hodnota pravidelně s určitou frekvencí mění [7].

Nastavením technologických parametrů, při kterých neojde k úplnému prořezání materiálu, dojde ke vzniku třetí zóny, ve které je řezná hloubka nepravidelná. Tato nepravidelnost je způsobena již velkým vychýlením paprsku a jeho vysokou nestabilitou v této oblasti. Lze ji částečně kontrolovat pomocí technologických parametrů jako např. rychlost posuvu, úhel řezání a vzdálenost mezi povrchem obrobku a řeznou hlavou [8].

1.4 Výsledný povrch řezané součásti

1.4.1 Kvalita povrchu obrobené plochy

Kvalitu povrchu obrobené plochy lze určit pomocí základních parametrů jako jsou např. průměrná aritmetická úchylka profilu **Ra** (viz obr.8), průměrná kvadratická úchylka profilu **Rq** (viz obr.9) a jiné.



Obr.8 Průměrná aritmetická úchylka profilu na základní délce l_r [9].

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu **Ra** je aritmetický průměr absolutních hodnot úchylek profilu Y_i v rozsahu základní délky [9]:

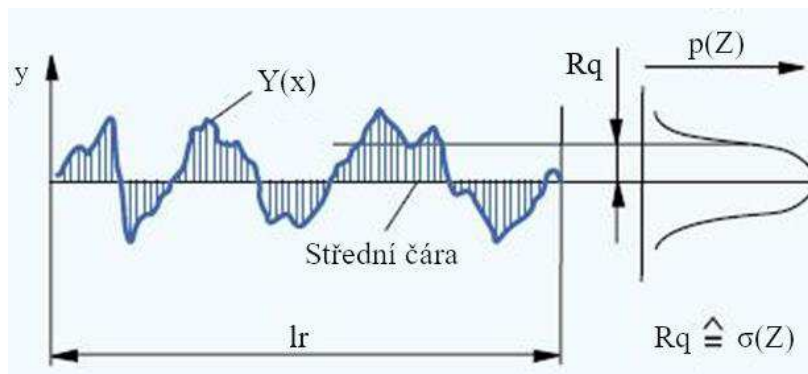
$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad [\mu m] \quad (1)$$

Integrální metoda určení:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Y(x)| dx \quad [\mu m] \quad (2)$$

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu **Rq** se využívá při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť **Rq** současně odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic. Průměrná kvadratická odchylka profilu je dána vztahem [10]:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Y^2(x) dx} \quad (3)$$



Obr. 9 Průměrná kvadratická úchylka profilu na základní délce l_r [53].

Při posuzování drsnosti povrchu lze opět řeznou plochu rozdělit na hladkou zónu vytvořenou řezným opotřebením a zónu rýhovanou (neboli zónu striací), která vznikla deformačním opotřebením.

Autoři Chao, Zhou, Leu a Geskin [11] charakterizují hladkou zónu jako homogenní, s náhodným profilem a s mírně izotropní strukturou. Jejich pozorování (viz obr. 10) vedlo k závěru, že v hladké zóně (**Ra1** a **Rq1**) nejsou parametry **Ra** a **Rq** výrazně ovlivňovány hloubkou řezu (tloušťka řezaného materiálu) ani rychlostmi posuvu řezací hlavy. Na druhou stranu při zkoumání v oblasti striací (**Ra3** a **Rq3**) hodnoty úchylek profilů vykazovaly prudký nárůst s rostoucí hloubkou řezu a řeznými rychlostmi. Hodnoty **Ra2** a **Rq2** značí měření ve střední (přechodné) oblasti. Společné řezné podmínky pro grafy na obr. 10 jsou:

- tlak $p = 317,4$ MPa,
- posuvová rychlost $v_f = 20,3$ mm·min⁻¹,
- průměr vodní (sařirové) dýzy $d_n = 0,2286$ mm,
- průměr karbidové směšovací dýzy $d_a = 0,8322$ mm,
- abrazivo granát,
- MESH 80,
- hmotnostní průtok abraziva $\dot{m}_a = 199,5$ g·min⁻¹,
- SoD (Stand-off Distance, viz obr. 6) $h_{SoD} = 1,5$ mm.

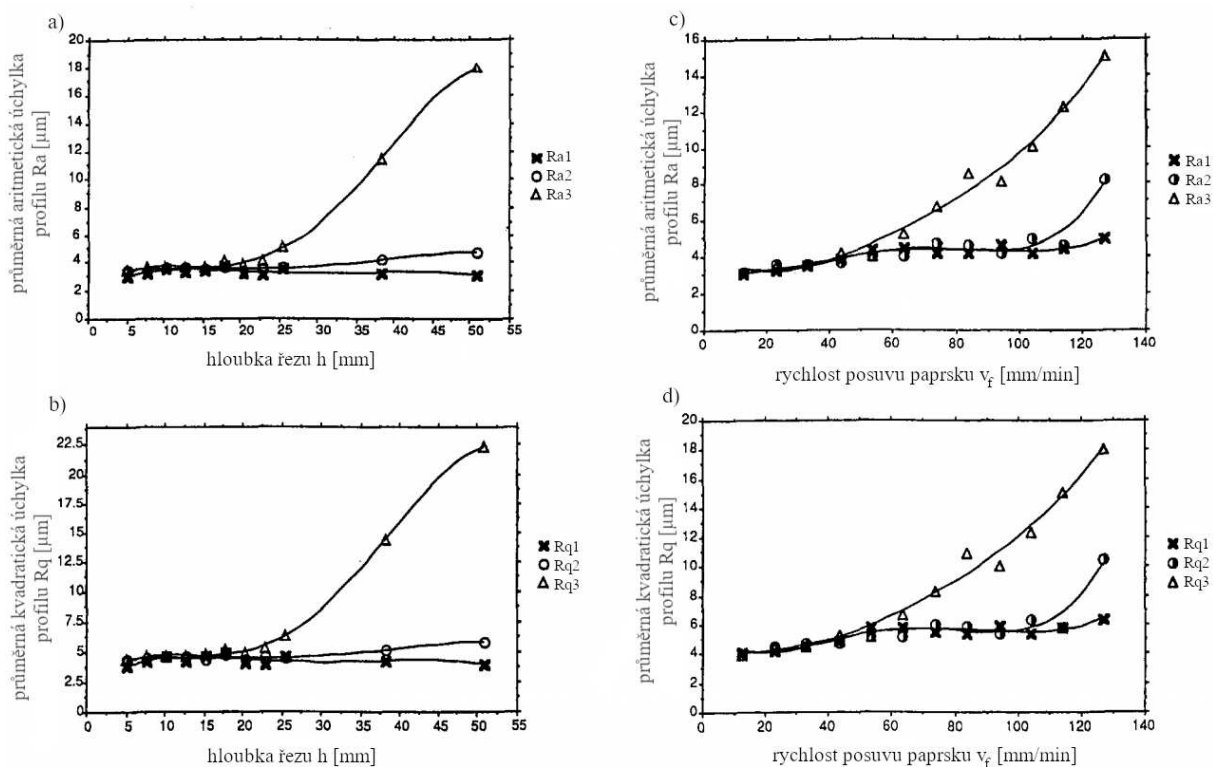
Řezné podmínky specifické pro grafy a) a b) na obr. 10 jsou:

- posuvová rychlost $v_f = 20,3$ mm·min⁻¹.

Řezné podmínky specifické pro grafy c) a d) na obr. 10 jsou:

- tloušťka materiálu $s = 12,7$ mm.

Z obr. 10 vyplývá, že jasně viditelné rozdělení obrobenej plochy na plochu hladkou a rýhovanou je způsobeno prudkým nárůstem hodnot drsností profilu v závislosti na rostoucí hloubce řezu h a na rostoucí rychlosti posuvu paprsku v_f .



Obr. 10 Závislosti parametrů struktury povrchu na posuvové rychlosti a dosahované hloubce řezu [11]:

- a) závislost průměrné aritmetické úchylky profilu Ra na hloubce řezu h ,
- b) závislost průměrné kvadratické úchylky profilu Rq na hloubce řezu h ,
- c) závislost průměrné aritmetické úchylky profilu Ra na posuvové rychlosti paprsku v_f ,
- d) závislost průměrné kvadratické úchylky profilu Rq na posuvové rychlosti paprsku v_f .

Kvalitativní stupně povrchu

Posuzovaný povrch součástky po procesu AWJM lze zařadit podle jakosti do jednoho z pěti kvalitativních stupňů. Jednotlivé stupně jakosti povrchu na reálných součástech jsou znázorněny na obr. 11. Tyto stupně jsou následně charakterizovány v tab. 1.



Obr. 11 Jednotlivé stupně jakosti povrchu [12].

Tab. 1 Kvalitativní stupně povrchu [12].

Kvalitativní stupeň	Charakteristika	Ra v horní kontuře [μm]	Ra v dolní kontuře [μm]	Přesnost v horní kontuře [mm]	Přesnost v dolní kontuře [mm]	Úkos
Q5	Nejlepší řez	Pod 3,2	Cca 3,2	± 0,1	± 0,1	Většinou mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	Cca 3,2	Cca 6,2	± 0,1	± 0,1	Většinou minimální
Q3	Střední řez	Cca 4,0	Cca 12,5	± 0,15	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q2	Hrubý řez	Cca 4,0	Do 25	± 0,2	Dle typu a síly materiálu	Dle typu a síly materiálu
Q1	Dělicí řez	4,0–6,3	Do 40	± 0,2	Dle typu a síly materiálu	Výrazný úkos tvaru V

1.4.2 Profil řezu

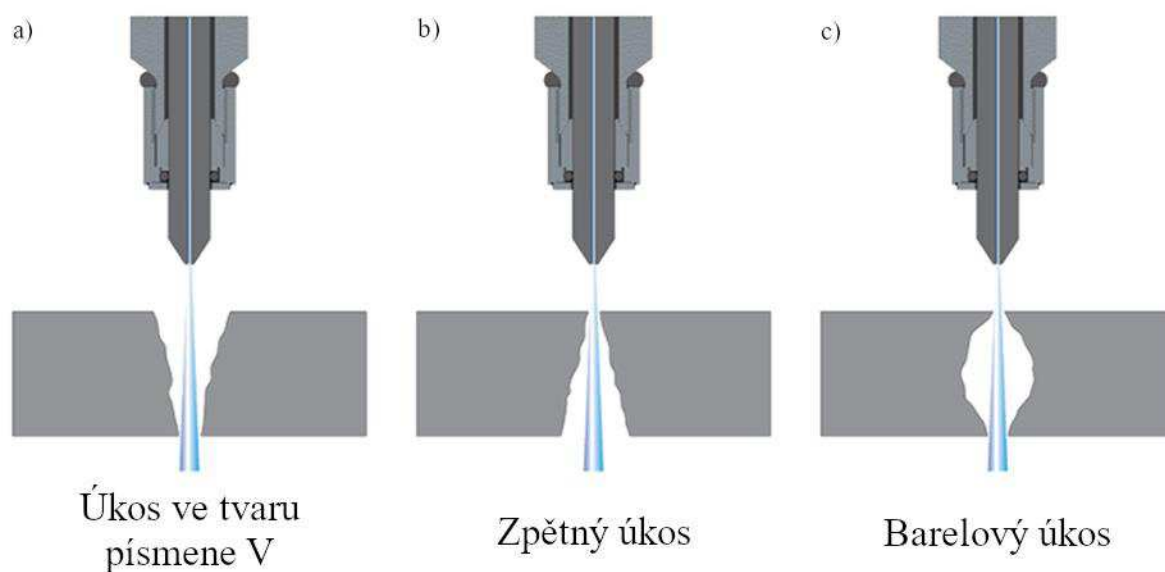
Typy úkosů tvořené procesem AWJC

Při obrábění vodním paprskem vzniká pro tuto metodu charakteristický úkos (často nazývaný jako „kužel“). Tento kužel je popisován jako rozdíl mezi šířkou drážky v horní části řezu a šířkou drážky ve spodní části řezu. Obvykle se při řezání vytváří mírný kužel ve tvaru písmene V (viz obr. 12a), což je nejobvyklejší typ úkosu. U tohoto úkosu je úběr materiálu v horní části řezu významnější než v části spodní, kde paprsek z místa řezu vychází. Úkos ve tvaru V vzniká vlivem vyšších hodnot parametru SoD (viz obr. 6), při kterých dochází k rozpadu abrazivního paprsku. Tím je myšlena taková úroveň provzdušnění paprsku, při které dochází ke vzniku vodní mlhy a proces obrábění je následně realizován jak vodním paprskem, tak vodní mlhou společně. Kapky tvořící vodní mlhu oddělením od kompaktního abrazivního paprsku postupně ztrácí svoji soudružnost, což se projevuje snížením jejich kinetické energie. Důsledkem tohoto jevu je rozdíl v efektivitě porušování materiálu, kde s rostoucí vzdáleností oddělených kapek od jádra paprsku dochází k poklesu zmíněné efektivitě. Další příčinou vzniku úkosu ve tvaru V jsou vysoké hodnoty posuvu řezací hlavy. Obecně platí, že se zvětšováním rychlosti posuvu se zvětšuje i velikost úkosu. Dalším často vyskytujícím se typem je zpětný úkos (často nazývaný jako „reverzní úkos“, znázorněn na obr. 12b). Vzniká při použití nízkých posuvových rychlostí a při nastavení s velmi krátkou vzdáleností dýzy od materiálu (SoD), přičemž následně dochází ke kuželovitému rozšiřování řezné mezery vlivem radiálního porušování materiálu. Při použití tohoto nastavení má paprsek nejvyšší kinetickou energii

a nedochází k rozpadu paprsku, pouze k jeho rozšíření. U reverzního úkosu je významnější úběr materiálu ve spodní části řezu a šířka drážky je zde větší než v části horní. Reverzní úkos velmi často vzniká taktéž při obrábění materiálů s velmi nízkou tvrdostí. Dalším typem úkosů je tzv. barelový úkos (viz obr. 12c), kde je šířka drážky největší uprostřed řezné hloubky. Barelový úkos vzniká při řezání materiálů o velmi velké tloušťce [4; 13].

Nastavením optimálních hodnot pro posuv řezací hlavy a vzdálenost řezací hlavy od obrobku dochází ke stabilizaci paprsku a ke vzniku úkosů téměř nedochází.

Existují i další typy úkosů, které je možné při řezání metodou AWJ zaznamenat. Vznik těchto úkosů již ale není způsoben přirozenými (rozuměj fyzikálními) vlastnostmi vody, ale špatnou kalibrací nebo chybami v nastavení [13].



Obr. 12 Charakteristické úkosy [13]: a) úkos ve tvaru písmene V, b) zpětný úkos, c) barelový úkos.

Závažnost úkosů

Ve většině případů řezání metodou AWJ na přítomnosti úkosů nezáleží, dokonce je v některých případech možné využít ku prospěchu. Na druhou stranu při řezání součástí o velké tloušťce nebo při požadavku na velmi přesný řez je nutné úkosy eliminovat. Snížením rychlosti posuvu paprsku lze například do jisté míry redukovat úkos ve tvaru V, ačkoliv ve většině případů je zapotřebí dalších úprav pro zajištění požadované tolerance. Výrazné snížení rychlosti pro korekci úkosů není optimální také z důvodů velmi vysokých obráběcích časů, které následně zvyšují náklady na celkový proces řezání [13].

Eliminace úkosu změnou úhlu dopadu paprsku

Přirozeně vyskytující se úkosy lze kompenzovat nakloněním abrazivního paprsku ve směru kolmém ke směru řezu pomocí kloubové řezné hlavy. Nakloněním se dosáhne kolmého řezu na obráběné součásti, přičemž se tato kompenzace projeví na odpadové části materiálu. Pomocí naklápěcí řezné hlavy a prediktivního softwaru lze tedy eliminovat úkos bez nutnosti regulace rychlosti posuvu paprsku. Tento prediktivní software využívá pokročilý model řezání, který je následně schopný provádět korekce úkosů (naklápěním řezné hlavy) v přítomném čase během

samotného procesu řezání. Informace o typu materiálu, jeho tloušťce a požadovaná kvalita řezné hrany jsou hlavními vstupy pro softwarový výpočet [13].

Eliminace úkosu jinými metodami

Potlačení vzniku kuželovitosti optimální volbou rychlosti posuvu paprsku zejména vzhledem k typu obráběného materiálu a výsledné tvarové složitosti. Jedná se o dynamickou změnu rychlosti posuvu vzhledem k aktuálně řezanému tvarovému prvku. Vzhledem k jednotlivým typům kuželů lze dosáhnout redukce kužele ve tvaru písmene V snížením posuvové rychlosti a redukce kužele reverzním zvýšením posuvové rychlosti [2; 13].

Mezi další metody k eliminaci úkosů lze využít snížení vzdálenosti dýzy od obráběného materiálu (SoD, viz kapitola 1.7.3). Při nízkých vzdálenostech dochází k menšímu rozšíření abrazivního paprsku, což vede k menším úkosům. Při řezání materiálů malých tlouštěk lze k eliminaci úkosu využít stohování. U materiálů o tloušťce menší než 3 mm dochází k nejvýraznější tvorbě úkosů. Pozitivní vliv na tvorbu úkosů má použití vysoce kvalitního abraziva. Abrazivo nižší kvality často obsahuje částice, jejichž velikosti se více liší. Větší rozdíly v rozměrech částic zvětšují úkosy [2; 13].

Odstranění kuželovitosti lze taktéž dosáhnout obohacením paprsku polymerními aditivami nebo použitím oscilačního typu řezání, jehož princip byl zmíněn v předešlých kapitolách [2].

1.5 Zařízení

Pro vznik kvalitního vodního či abrazivního paprsku je zapotřebí řada různých zařízení, jejichž funkci je pro hlubší porozumění technologie AWJC nutné znát. Mezi hlavní prvky těchto zařízení patří hydraulická jednotka s čerpadlem a násobičem tlaku (multiplikátor nebo triplexový plunžr), akumulátor, filtry, ventily, potrubí pro rozvod vody, zásobník abraziva, řezací hlavice, zařízení pro zajištění pohybu řezací hlavice, opěrný rošt pro ustavení obrobku, záchytná nádrž (lapač), systém pro úpravu a recyklaci vody a řídicí CNC systém [3; 7].

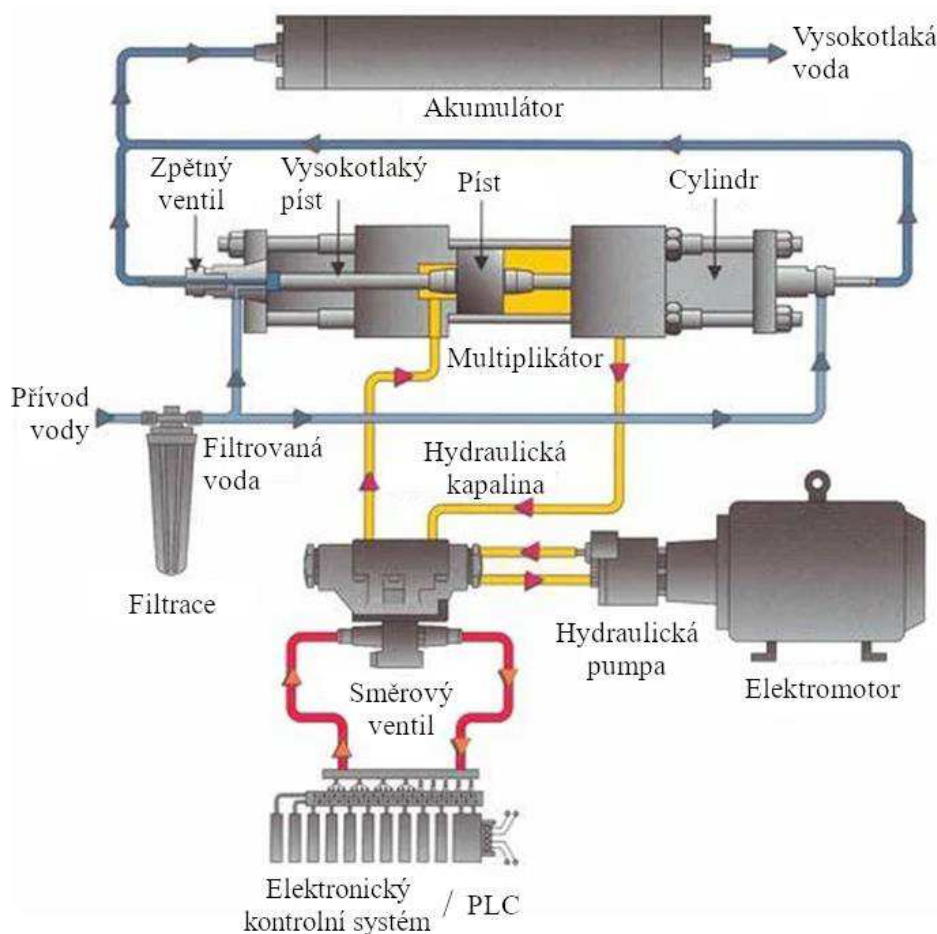
1.5.1 Vysokotlaké čerpadlo

Vysokotlaké čerpadlo sestává z několika zařízení, jejichž cílem je mnohonásobné navýšení tlaku pracovního média (vody), které kontinuálně proudí do řezné hlavy a mění se ve vodní paprsek. Používají se dva rozdílné druhy čerpadel, které pracují na odlišném principu navyšování tlaku kapaliny. Jedná se o čerpadla s multiplikátorem a čerpadla s přímým pohonem (triplexový plunžr). Každé z těchto zařízení má jisté výhody a nevýhody. Volba čerpadla se zpravidla odvíjí od požadovaných vlastností čistého či abrazivního paprsku. Podle firmy FLOW [14] je ve většině společností (~80 %), které využívají technologii WJC/AWJC, využíváno čerpadel s multiplikátory. Jednotlivá zařízení, které vysokotlaká čerpadla obsahují, jsou schematicky znázorněna a popsána v následujících podkapitolách.

Čerpadlo s multiplikátorem

Multiplikátor jako část hydraulické jednotky (viz obr. 13) zvyšuje tlak pracovní kapaliny na hodnoty, které se pohybují od 275 MPa až po 650 MPa. Jedná se o původní, ale zároveň nejčastěji používanou technologii pro aplikaci v AWJC i v současné době. Vysokých hodnot

tlaků se dosahuje pomocí multiplikačního efektu a přesná hodnota závisí na poměru pracovních ploch dvou pístů, které jsou navzájem pevně spojeny [3; 14].



Obr. 13 Schéma čerpadla s multiplikátorem [54].

Multiplikační efekt se uskutečňuje tlakem hydraulického oleje na plochu pístu, jehož hodnota je například dvacetinásobně vyšší než plocha vysokotlakého pístu, která stlačuje pracovní médium. Tlak vody je tímto efektem stlačen na dvacetinásobek. Olej o tlaku 20 MPa při tomto poměru ploch pístů 20:1 stlačuje vodu na hodnoty okolo 400 MPa [14].

Tento děj dokazují následující rovnice, které vychází z Pascalova zákona. První z nich platí pro jednočinný multiplikátor [4]. Tlak p_1 působící na plochu pístu S_1 vyvolá tolika násobně vyšší tlak p_2 , kolikrát je plocha S_2 menší vzhledem k ploše S_1 :

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \quad (4)$$

Nejčastěji se využívá multiplikátorů dvojčinných z důvodů zajištění kontinuálního dodávání kapaliny, pro které platí:

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \quad (5)$$

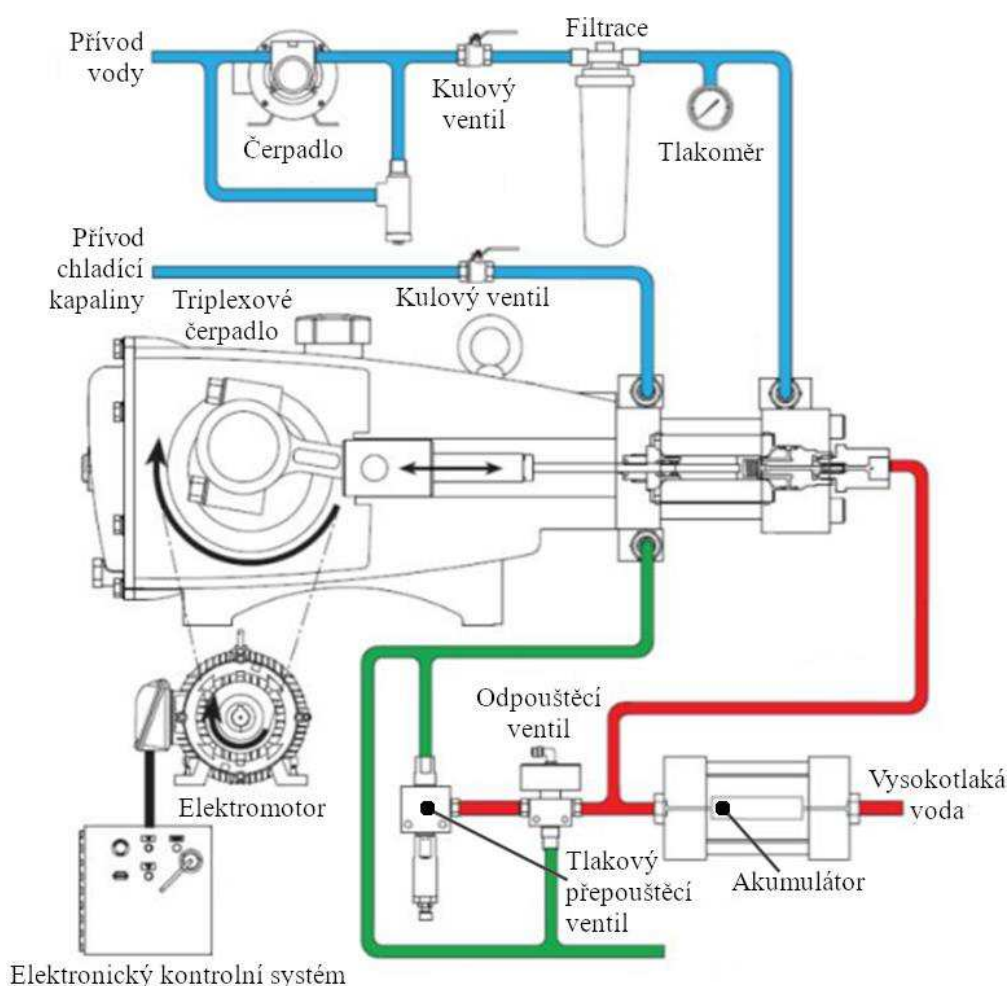
Důležité je zahrnout ztráty hydraulické a ztráty třením, které se v reálném provozu nachází. Mechanická účinnost vzhledem k těmto ztrátám se pohybuje okolo hodnoty $\mu_m = 0,95$. Dosazením μ_m do rovnice (5) vzniká rovnice finální:

$$p_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot p_1 \cdot \mu_m \quad (6)$$

Čerpadla s multiplikátory schopné navýšení tlaku na hodnoty přesahující 600 MPa jsou nákladné, ale zároveň jsou schopné významně zvýšit produktivitu a snížit provozní náklady. Díky vysokým tlakům lze navýšit řeznou rychlost a snížit spotřebu vody, energie a abraziva, což má za následek pokles provozních nákladů až o 40 % [15].

Čerpadlo s přímým pohonem

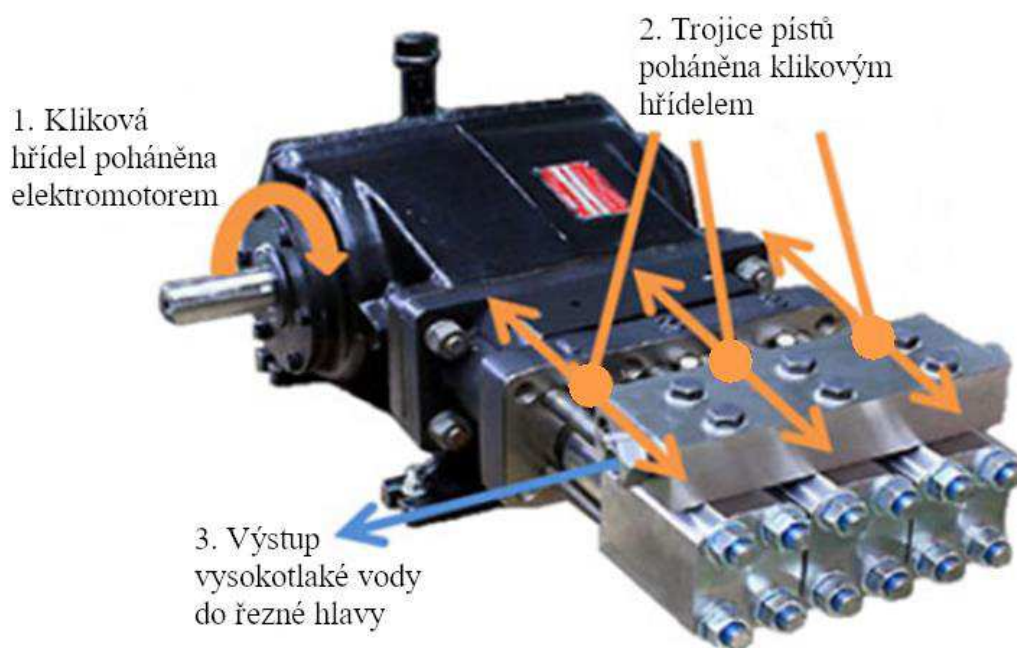
Čerpadla s přímým pohonem (často nazývají jako triplexová čerpadla nebo triplexový plunžr) se vyskytují v porovnání s multiplikátory v mnohem menší míře (~20 %). U tohoto typu čerpadel je k pohonu trojice pístů používána kliková hřídel hnaná elektromotorem. Trojice pístů generuje velmi vysoké tlaky pracovního média (princip viz obr. 14), které dosahují hodnot až 415 MPa. Jelikož jsou písty poháněny tzv. napřímo a není zde žádný hydraulický okruh,



Obr. 14 Schéma čerpadla s přímým pohonem [54].

triplexová čerpadla dosahují výborného poměru mezi příkonem a výkonem [14; 15]. Reálné zařízení je prezentováno na obr. 15.

Triplexová čerpadla jsou mnohem levnější v porovnání s multiplikátory, ale nejsou schopné vyvinout stejně velké úrovně tlaku. Další nevýhodou je jejich potřeba velmi časté údržby. Dají se považovat za velmi vhodnou alternativu pro podniky, které hledají systém vstupní úrovně [15].



Obr. 15 Čerpadlo s přímým pohonem [55].

Akumulátor tlaku

Pracovní kapalina stlačená vysokotlakým čerpadlem následně proudí do akumulátoru tlaku (viz obr. 16). Stlačením vody vznikají pulzace paprsku, které následně vedou ke vzniku rázů. Akumulátor tlaku má za úkol tyto rázy eliminovat a udržovat tlak a rychlost proudící kapaliny na stálých hodnotách [3].



Obr. 16 Akumulátor tlaku [56].

Vysokotlaké potrubí

Doprava vody je při řezání vodním paprskem bezpečně dopravena do řezací hlavy pomocí vysokotlakého potrubí, které se skládá z různých druhů armatur a spojovacích elementů. Tyto součásti jsou nejčastěji vyrobeny z nerezové oceli [14; 16]. Vysokotlaké potrubí musí disponovat schopností flexibilně se adaptovat pohyb řezné hlavy. Tyto jednotlivé komponenty jsou již v dnešní době normalizované a standardizované [3].



Obr. 17 Vysokotlaké potrubí [57].

Systém pro úpravu vody

Důležitou součástí je úprava vody, která se dělí na několik částí. Jedna z částí je mechanická filtrace, která zajišťuje odstranění pevných částic různých velikostí z vody a dochází k eliminaci možného poškození otvoru v dýze právě těmito cizími částicemi. V některých případech, kdy je požadováno opakované využití vody (voda pracuje v uzavřeném cyklu), jsou nároky na mechanickou filtraci vody velmi vysoké [3; 4].

Další velmi častou úpravou je změkčování vody, kde samotné změkčování je doporučeno pouze jako předcházející proces úpravy vody pro následnou deionizaci či zpětnou osmózu [4]. Rozsáhlý popis jednotlivých metod úpravy vody popisuje Krajný [4] ve svém díle.

Úprava vody přidáním aditiv vykazuje pozitivní účinky na tvorbu celistvého vodního paprsku. Aditiva obsažená ve vodě jsou polymery a jedná se o typ PEO (polyetyloxid) nebo PAA (polyakrylamid). Jde o polymerní aditivum s lineárními molekulami. Roztok vody s obsaženými aditivami usnadňuje vytvoření vysoce účinného paprsku s kompaktním jádrem. V polymery obohaceném vodním paprsku je potlačen nadměrný vznik turbulencí, díky čemu je paprsek koncentrovanější a nedochází k jeho roztržení při styku s obráběným materiálem [3; 7].

1.5.2 Zpětný ventil

Součástí čerpadel jsou bezesporu zpětné ventily, které propouštějí vodu pouze jedním směrem, přičemž blokuje průtok ve směru opačném. Např. voda je do systému přivedena pomocí nízkotlaké hadice, kde se pomocí čerpadla tlak vody mnohonásobně zvýší. Kdyby se v tomto momentu natlakovaná voda vrátila zpět do nízkotlaké hadice, došlo by k jejímu roztržení. Proto se zde používá zpětný ventil, který blokuje průtok natlakované vody zpět do nízkotlaké hadice. Natlakovaná voda je pomocí druhého ventilu směřována do vysokotlakého potrubí vedoucího až do řezné hlavy [14].

1.5.3 Zásobník abraziva

Zásobník abraziva (viz obr. 18) slouží k úschově abrazivního materiálu. Ze zásobníku je abrazivo nasáváno do směšovací komory řezací hlavy.



Obr. 18 Zásobník abraziva [58].

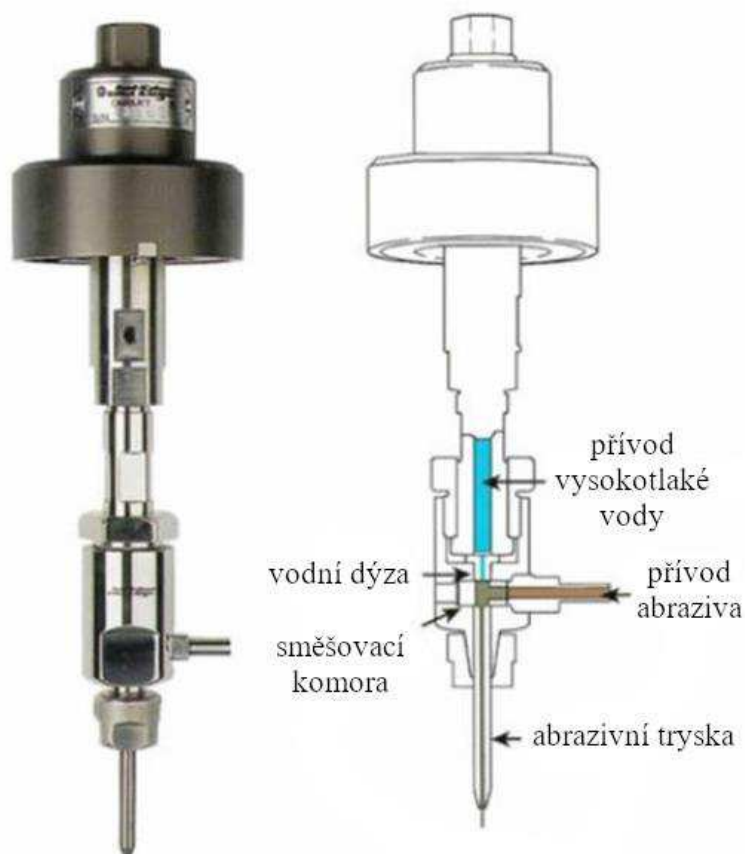
1.5.4 Řezací hlava

Řezací hlava se dělí na dva základní typy podle aplikace řezání vodním paprskem. Prvním typem je řezací hlava pro řezání čistým vodním paprskem a typem druhým je řezací hlava uzpůsobená pro řezání abrazivním vodním paprskem. V technologii řezání čistým vodním paprskem je řezná hlava zakončena vodní dýzou z drahého kamene, která vytváří finální vodní paprsek, který následně vstupuje do místa řezu. Pro aplikaci v technologii abrazivního paprsku je řezná hlava komplexnější (viz obr. 19). Kromě vodní dýzy, která se nachází v horní části řezací hlavy, obsahuje i směšovací komoru, ve které dochází k promísení abraziva s vodním paprskem. V poslední části řezací hlavy se nachází sekundární (abrazivní) dýza formující směs vody a abraziva do abrazivního paprsku, který následně vstupuje do místa řezu [3; 17; 18].

Součástí řezací hlavy je tzv. vypínací ventil, který je umístěn těsně nad dýzou. Tento ventil obsahuje určitý typ jehly a sedla. Pomocí tohoto ventilu je operátorovi nebo řídicímu systému stroje umožněno libovolné spuštění a zastavení vodního paprsku [14].

Vodní dýza

Za nejdůležitější část zařízení je považována vodní dýza. Kvalita vodní dýzy významně ovlivňuje kvalitu vodního paprsku a následně i kvalitu samotného řezu. Dýza tvořená ze safíru, rubínu či diamantu má výtokový otvor o rozměru pohybujícím se v intervalu 0,07–0,50 mm, přičemž je 0,35 mm nejběžnější velikost. Při používání kvalitní vody se životnost rubínových a safírových trysek pohybuje v rozmezí 40 až 200 hodin. Diamant je nejčastěji používaný



Obr. 19 Řezací hlava pro řezání abrazivním vodním paprskem podle [59].

materiál, disponující 8 až 10 násobně vyšší životností v porovnání s dýzami ze safíru a rubínu, přičemž je její cena vyšší taktéž 8 až 10 násobně. Dlouhá životnost diamantové dýzy má kladný dopad taktéž z hlediska údržby, jelikož prodlužuje čas mezi jednotlivými údržbami [3; 14]. Safírová vodní dýza je na obr. 20.

Pro vytvoření koherentního vodního proudu je zapotřebí, aby výstupní okraj vodní dýzy měl velmi ostrou hranu. Při používání opotřebené vodní dýzy s drsnou či zaoblenou hranou bude docházet k nežádoucímu rozptýlení vodního paprsku, či dokonce k jeho vychýlení od původního směru [14].

K postupné degradaci vodní dýzy dochází jen zřídka. Dýza je ve většině případů schopna vykonávat svoji funkci, dokud nedojde k náhlému poškození. Poškození trysky nastává ze dvou



Obr. 20 Safírová vodní dýza [60].

hlavních příčin. V prvním případě dojde k okamžitému selhání vodní dýzy při uvolnění vzniklého vodního kamene. V případě druhém dojde k opotřebení nebo odštípnutí hrany otvoru vlivem narážejících částic vody [14].

Směšovací komora

V případě technologie vodního paprsku s abrazivem je nezbytnou součástí řezné hlavy směšovací komora, kde dochází k prvotnímu pomísení vody s abrazivem. Do řezné hlavy je vysokotlakým potrubím přivedena natlakovaná pracovní kapalina, která následně prochází otvorem dýzy do směšovací komory. Při tomto průchodu do rozšiřujícího se prostoru mění vodní paprsek laminární proudění na turbulentní, což je doprovázeno vznikem podtlaku. Vlivem podtlaku ve směšovací komoře je ze zásobníku abraziva nasáván abrazivní materiál. Abrazivo strháváno do vodního paprsku pojme část jeho kinetické energie a je následně spolu s ním unášeno do místa řezu [4].

Abrazivní dýza

V abrazivní dýze dochází k dalšímu promísení abraziva s vodním paprskem. Abrazivní vodní paprsek je dýzou následně fokusován do místa řezu. Abrazivní dýza disponuje vnitřním průměrem pohybujícím se v intervalu 0,4–1,8 mm a je 22–150 mm dlouhá. Nejpoužívanější rozměry jsou 1 mm pro vnitřní průměr a 100 mm pro její délku. Materiál, kterým je tvořena, bývá velmi vysoké kvality (např. kompozitní karbid s nano částicovou strukturou obsahující minimální množství pojiva, který zajišťuje maximální odolnost proti otěru). V procesu obrábění přirozeně dochází k opotřebení abrazivní dýzy. Toto opotřebení se projevuje symetrickým rozšiřováním jejího vnitřního průměru. Hodnoty rozšíření se při uvažování standardního způsobu řezání pohybují okolo 0,025 mm za 6 až 8 hodin [14].

1.5.5 Software

Programovací software

Programovací software, označovaný jako CAM (počítačová podpora výroby), bývá nejčastěji instalován na osobní počítač, kde probíhá samotné programování. Méně časté, sloužící spíše pro drobné úpravy, je programování přímo na obráběcím stroji. Do softwaru je programátorem naimportován soubor ve formátu .dxf, .dwg apod., který byl vytvořen v CAD (počítačová podpora kreslení) programu. Obsluha CAM softwaru následně určí počáteční a koncové body řezání, požadovaný směr trasy, kompenzaci řezu, posuvovou rychlost řezné hlavy atd. Zhotovený soubor je následně odeslán do řídicího systému, aby podle něj proběhl obráběcí proces vodním paprskem [14].

Řídicí systém

Vytvořený výrobní program zhotovený v CAM softwaru je přemístěn do řídicího systému, kde jednotlivé pokyny vytvořené programátorem jsou následně převedeny na instrukce pro elektrický systém stroje. Po otevření souboru v řídicím systému je operátorem stroje umístěna řezací hlava do výchozí polohy nad obráběný materiál a následně spuštěn program, čímž se zahájí výrobní proces. V průběhu obrábění jsou elektrické signály tvořené řídicím systémem (na

základě CAM souboru) přijímány strojními motory. Další signály řídicího systému jsou pak vysílány ke spuštění a zastavení proudu abrazivního paprsku [14].

Systém zpětné vazby

Řídicí systém je pomocí zpětné vazby informován o pozici řezné hlavy a eventuálně poskytuje informace i o její rychlosti. Systém zpětné vazby je nejčastěji tvořen enkodéry, které převádějí přesnou polohu na elektrický signál, dále lineárními měřítky nebo jinými prostředky [14].

1.5.6 Lapač zbytkové energie paprsku

Lapač zbytkové energie paprsku je zařízení pro zachycení abrazivního (nebo čistého) vodního paprsku, který vystupuje z místa řezu. V lapači dochází k absorpci zbytkové kinetické energie paprsku, zachycení opotřebovaného abraziva a vzniklých třísek z řezaného obrobku. Lapač taktéž zastává funkci tlumiče hluku, protože se při řezání abrazivním paprskem dosahuje hodnot hluku vysokých až 95 dB [17; 18; 19].

Konstrukce lapače zbytkové energie se nejčastěji rozlišuje na dvě odlišná provedení. V obou případech se jedná o nádobu (vyplněnou materiálem) o určité hloubce, která musí být dostačující pro absorpci zbytkové energie paprsku a aby tak nedošlo k proniknutí paprsku až ke dnu nádoby. První provedení se používá při dostatečně velkém prostoru (běžná výška nádoby je 300–600 mm), kdy je nádoba naplněna vodou. Druhé provedení je využíváno, pokud pro umístění nádrže s vodou není dostatek místa. V tomto případě je implementována nádrž nižší, naplněná kovovými kuličkami [17; 18].

1.6 Abrazivní materiál

Kvalita abraziva má výrazný vliv na jakost vzniklého povrchu a účinnost abrazivního paprsku. Bývá nejčastěji používáno v jeho přírodní formě (olivín, granát) a nabývá vlastností úzce vázaných na lokalitu jeho výskytu. Zvyšování kvality pomocí složitých technologických postupů není z hlediska ekonomické náročnosti vhodné. Abrazivo v jeho přírodní formě podstoupí pouze sérii operací, díky kterým je abrazivo očištěno a podle velikosti roztríděno. Množství defektů a vnitřních napětí obsažených v abrazivu určuje míru jeho následného poškození při vzniku abrazivního paprsku a jeho interakci s obrobkem. Kvalita povrchu a výkon AWJ je mírou tohoto poškození ovlivňován [20].

1.6.1 Tvrdost

Typ abraziva je přímo spojován s přesností obrábění a mírou úběru materiálu. Tvrdost je hlavní parametr při výběru typu abraziva. Platí, že s rostoucí tvrdostí obráběného materiálu se zvyšuje i tvrdost použitého abraziva. Použitím abraziva s vyšší tvrdostí lze dosáhnout lepší drsnosti povrchu, a také nižších výrobních časů vlivem větší míry úběru materiálu [21].

Negativní vlastností použití vyšších tvrdostí abraziva je snížení životnosti abrazivní dýzy kvůli rychlejšímu opotřeбенí. Z tohoto důvodu bylo zjištěno optimální rozmezí pro poměr tvrdosti abrazivního materiálu ku tvrdosti obráběného materiálu, které bylo stanoveno na 0,8–1,5 [22].

1.6.2 Hustota

Míra konzistence vytvořeného proudu vody je ovlivňována hustotou abrazivních částic. Pro následující porovnání je stanoven předpoklad stejného hmotnostního toku. Při použití abrazivního materiálu o vyšší hustotě, jako je například granát nebo ocelové piliny, dosahuje abrazivní vodní paprsek vyšší konzistence než při použití abraziva o hustotě nižší (křemičitý písek, měděné piliny). Důvodem je větší prostorová objemnost lehkých částic v úzkém proudu vody, která zabraňuje přístupu potřebného vzduchu během jejich transportu. Pomocí hustoty lze také regulovat hybnost částic, kde se při použití abrazivního materiálu s vyšší hustotou dosahuje vyšší hybnosti [4].

1.6.3 Tvar a velikost

V technologii abrazivního vodního paprsku hraje důležitou roli také velikost zrna abrazivního materiálu. Tímto parametrem je ovlivňován zejména transport částic abraziva do vodního paprsku a kinetická energie potřebná k řezání materiálu [4; 21].

Tvar abrazivní částice může být popsán pomocí její kruhovitosti a kulatosti. Kruhovitost je definována jako největší naměřená vzdálenost skutečné kružnice od obalené kružnice. Definice kulatosti je popsána analogicky jako největší vzdálenost naměřená mezi skutečnou a obalovou koulí. Nejvhodnější kombinace pro proces obrábění je při vysoké kulatosti abrazivního zrna a malé kruhovitosti [23].

Střední velikost zrna je určována pomocí tzv. MESH systému, který byl vytvořen v zahraničí, a proto je definován pomocí imperiální jednotky jako počet otvorů síta na délce jednoho palce [24]. Velikost abrazivní částice se tedy určí metodou prosívání přes síta, které mají přesně dané rozměry jednotlivých ok podle konkrétní hodnoty MESH (např. MESH 60). Pokud částice tímto sítem propadne, její velikost je dána stejnou hodnotou, tedy MESH 60. Tvar otvorů síta může být kruhovitý nebo také šestihranný. V technologii AWJ je nejvyšší přípustná hodnota MESH 220, protože při použití abraziva jemnějšího než tato hodnota dochází k tzv. fluidizaci abraziva, což znamená, že abrazivo získává vlastnosti kapaliny [4].

Volba parametru velikosti abrazivního zrna je úzce spojena s volbou hmotnostního toku abraziva a s volbou vnitřních průměrů kapalinové a abrazivní dýzy. Při zvolení ideální kombinace rozměrů dýz existuje pro určitou hodnotu velikosti abraziva optimální hmotnostní průtok abraziva, při kterém dosahuje energie abrazivního paprsku nejefektivnějšího využití [20].

1.6.4 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok abrazivního materiálu je dalším parametrem, který přímo ovlivňuje konečné výsledky obrábění. Jeho navyšováním se dosahuje lepší kvality povrchů nebo také větších hloubek řezu vlivem zvýšení efektivity úběru materiálu [21]. S rostoucím hmotnostním tokem abraziva se zvyšuje i kinetická energie paprsku [4] daná vztahem:

$$E_a = \frac{1}{2} \dot{m}_a \cdot v_a^2 \quad [J \cdot s^{-1}]. \quad (7)$$

Experimentem na různých kovových materiálech byla nalezena kritická hodnota hmotnostního průtoku. Při překročení této hodnoty již nedocházelo k dalšímu navyšování

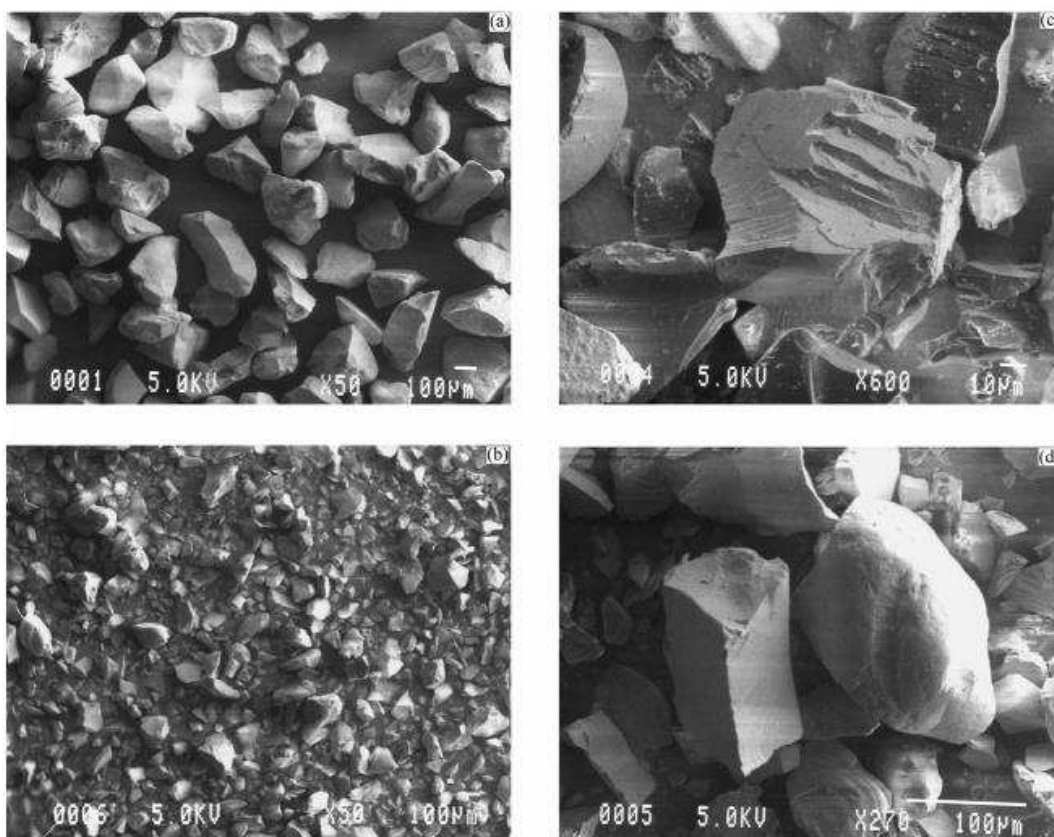
hloubky řezu, ale naopak k jejímu poklesu [25]. Překročením dochází k vyčerpání volného prostoru v průměru vodního paprsku, kterým jsou částice unášeny, a nastává jejich vzájemná interference. Toto vzájemné střetávání částic mezi sebou spotřebovává energii, což má za následek snížení energie kinetické, a tak dochází ke zmiňovanému poklesu efektivity řezání [4].

Velikostí hmotnostního průtoku taktéž ovlivňujeme i výslednou drsnost řezné plochy. Vyšší průtoky abraziva mají za následek dosažení lepší kvality této výsledné plochy. Efekt abrazivního toku na kvalitu povrchu závisí rovněž na hloubce řezu, kdy ve větších řezných hloubkách dosahujeme lepších výsledků dokonce s výraznějšími rozdíly [26]. Tento jev je odůvodněn tím, že hmotnostní tok zatím nenabyl své kritické hodnoty. Tím pádem hodnota kinetické energie spolu s průtokem rostla a drsnost povrchu řezné plochy byla nízká i ve větších hloubkách řezu [4].

Při aplikaci parametru hmotnostního průtoku v praxi se většinou používá jeho konstantní hodnota a ovlivňování procesu řezání je založeno na regulaci ostatních parametrů. V případě potřeby by ovšem řízení tohoto parametru i za chodu stroje bylo možné, a to díky zařízením, která jsou schopna tento parametr s dostačující přesností a plynulostí regulovat [20].

1.6.5 Druhy abraziva

Druhů abraziv, které lze pro vytvoření abrazivního paprsku vytvořit, je poměrně velké množství. Mezi nejběžnější druhy patří granát, olivín, oxid hlinitý či ocelové nebo měděné piliny [7]. Z uvedeného výčtu abraziv je bezkonkurenčně nejvíce používán granát, který se vyznačuje příznivou cenou, dobrými řeznými schopnostmi a homogenitou a v neposlední řadě



Obr. 21 Granátové abrazivo [61]: a) granátové abrazivo před procesem AWJC, b–d) roztržité granátové abrazivo po procesu AWJC.

nižším vlivem na opotřebenání řezací hlavy [14]. Granátové abrazivo před procesem a po procesu řezání je znázorněno na obr. 21. Tento snímek byl pořízen pomocí rastrovacího (skenovacího) elektronového mikroskopu (SEM, scanning electron microscope).

1.7 Technologické parametry AWJC ovlivňující kvalitu procesu

Technologie vodního paprsku je vysoce komplexní hydrodynamický proces. Využití jeho maximálního potenciálu a zajištění vysoké efektivity řezání je neodmyslitelně spjata s volbou parametrů a veličin, jejichž vhodná kombinace je rovněž podmínkou pro úspěšnou aplikaci v praxi [20].

Vyjma parametrů popisující čistý vodní paprsek je nutné zahrnout i další, popisující vliv abraziva na kvalitu procesu. Proto bude následující popis technologických parametrů zaměřen na abrazivní vodní paprsek (AWJC), neboť zahrnuje všechny potřebné specifikace ovlivňující proces řezání. Technologické parametry AWJC můžeme rozdělit do dvou skupin podle skutečnosti, zda mají vliv na samotný rezný proces, na parametry nezávislé a parametry závislé [4].

Skupina technologických parametrů nezávislých se dále dělí na dvě podskupiny. První z podskupin se vztahuje k nositeli energie, tedy k vodnímu paprsku, které Krajný [4] přiřazuje následující parametry:

Hydraulické parametry

- tlak kapaliny
- průměr vodní dýzy

Parametry abraziva

- materiál
- rozměr a tvar
- hmotnostní tok

Parametry směšování

- metoda směšování
- stav abraziva
- rozměr a tvar směšovací komory
- rozměr a tvar abrazivní směšovací dýzy

Druhá podskupina obsahuje technologické parametry, které popisují vlastnosti přímo spojené se samotným procesem obrábění materiálu:

Parametry řezání

- rychlost pohybu stopy paprsku
- vzdálenost dýzy od materiálu
- počet průchodů vodního paprsku jednou reznou drážkou

- úhel dopadu paprsku na materiál
- materiál obráběné součásti

Závislé parametry, tvořící druhou hlavní skupinu, se skládají z výsledků řezného procesu, které vystihují dopad mechanických účinků abrazivního vodního paprsku na materiál. Patří sem:

Výsledky řezání

- hloubka řezu
- šířka řezné drážky
- kvalita obrobené plochy

Procesy provázející obrábění abrazivním paprskem lze jednoznačně určit až při stanovení konkrétních hodnot všech technologických parametrů [20].

1.7.1 Hydraulické parametry

Tlak pracovní kapaliny

Tlak pracovní kapaliny má v procesu řezání nejvyšší význam mezi ostatními technologickými parametry, zejména z důvodu výrazného ovlivňování vlastností kapalinového paprsku. Při požadavku udržení ostatních technických parametrů na konstantních hodnotách nebo při jejich omezení je parametr tlaku sám o sobě dostačující ke korigování procesu pro dosažení požadované jakosti povrchu či výrobní kvantity [20; 27].

Možnost přesného řízení tlaku je dosažena díky moderním snímacím přístrojům dnešní doby, které se vykazují vysokou přesností a regulováním stavových veličin čerpadel pomocí akčních členů. Díky zmíněným přístrojům lze tlak udržovat na konstantních hodnotách, a dokonce lze i docílit plynulé změny v průběhu samotného obrábění [20].

Chování hydrodynamických veličin, a tedy i tlaku je popsáno v teorii hydrodynamiky kapalin. Odtud pomocí Bernoulliho rovnice pro ideální kapaliny víme, že tlak je přímo úměrný čtverci rychlosti kapaliny [3]:

$$v^2 = \frac{2p}{\rho}. \quad (8)$$

Kinetická energie je definována čtvercem rychlosti a hmotnosti m [kg] částice kapaliny:

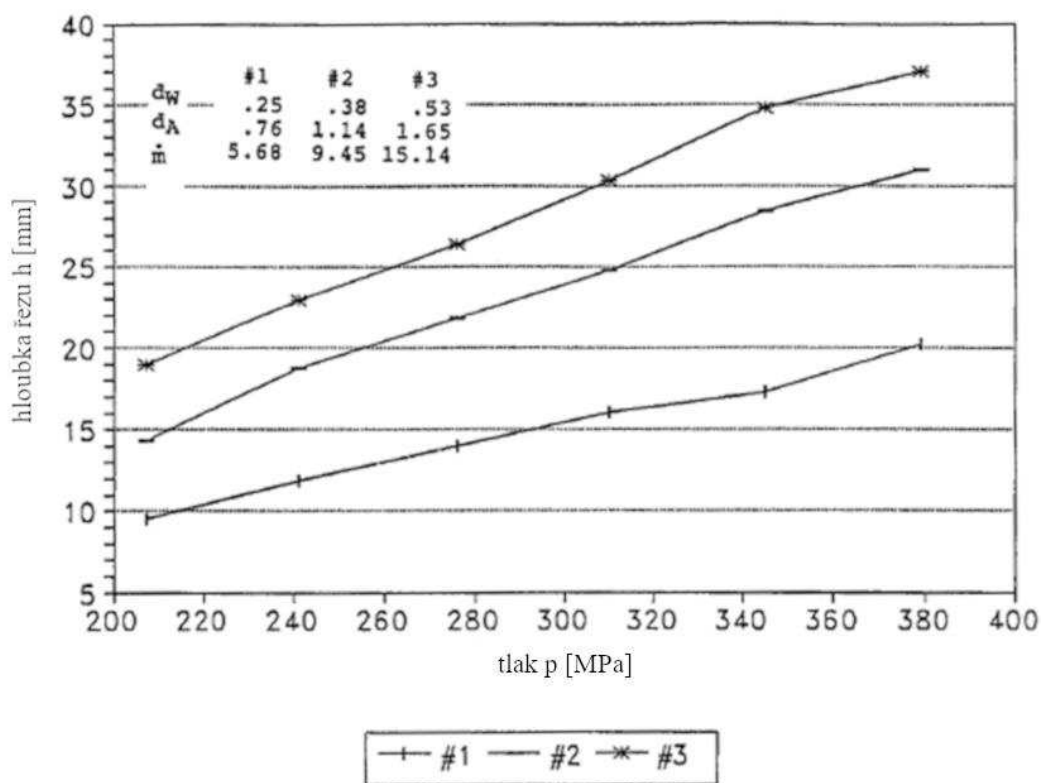
$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 [J]. \quad (9)$$

Tlak pracovní kapaliny tedy přímo ovlivňuje její kinetickou energii, která při vyšších hodnotách snáze porušuje strukturu materiálu na molekulární úrovni. Dosahované rychlosti se podle výrobců pohybují v násobcích zvuku (běžně používaná rychlost v praxi dosahuje kolem trojnásobné rychlosti zvuku) [3].

Provedením experimentálních zkoušek na různých materiálech bylo potvrzeno, že s rostoucí hodnotou tlaku se zvyšuje také hloubka řezu (viz obr. 22). Z toho vyplývá, že při zachování

konstantní hloubky řezu je možné navyšováním tlaku úměrně zvyšovat řeznou rychlost nebo redukovat množství abraziva v paprsku [27].

Tlak kapaliny má také vliv na výslednou drsnost řezné plochy. Při použití vyšších tlaků bylo při testování dosaženo nižších hodnot aritmetické odchylky profilu. Zvýšením pracovního tlaku dochází k rozpadu abrazivních částic na částice menších rozměrů při průchodu přes abrazivní dýzu. Tato fragmentace částic má za následek lepší jakost povrchu. Dalším důvodem horší jakosti povrchu při použití nižších tlaků je, že kinetická energie abrazivních částic obsažená ve vodním paprsku není dostatečně vysoká [4; 28].



Obr. 22 Závislost hloubky řezu h na tlaku p při konstantním poměru dodávaného abraziva vůči průtoku vody [25].

Průměr otvoru vodní dýzy

Regulace průtoku kapaliny může být zajištěna dvěma způsoby, a to změnou vnitřního průměru vodní dýzy nebo změnou pracovního tlaku. Průtokové množství kapaliny je definováno:

$$q_v = S \cdot v_v \quad [m^3 \cdot s^{-1}]. \quad (10)$$

Krajný [4] přidává do rovnice pro výtakovou rychlost kapaliny (8) výtakový součinitel μ_v :

$$v_v = \mu_v \cdot \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}]. \quad (11)$$

Výtokový součinitel v rovnici zahrnuje disipaci energie v dýze a je nejčastěji určován experimentálně.

Dosažením rovnice (11) do rovnice (10) dostáváme výslednou rovnici pro průtok kapaliny:

$$q_v = S \cdot \mu_v \cdot \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad [m^3 \cdot s^{-1}]. \quad (12)$$

Z uvedeného vztahu (12) lze odvodit, že změnou průměru dýzy dosahujeme výrazné změny průtoku kapaliny ($q_v \approx d_n^2$). Vliv změnou tlaku je v porovnání podstatně nižší ($q_v \approx \sqrt{p}$). Zvětšováním průměru dýzy dosahujeme vyšších průtoků. Tím narůstá i kinetická energie vodního paprsku potřebná k porušování materiálu, která následně zvyšuje dosahovanou hloubku řezu [4].

Provedením experimentálních zkoušek s různými průměry vodních dýz a následným vyhodnocením výsledků bylo dosaženo závěru, že existuje kritický průměr dýzy d_{nc} pro daný soubor technologických parametrů. Při použití dýzy s hodnotou kritického průměru či nižší nedochází k výraznému porušení materiálu, což vede k nízkým až nulovým hloubkám řezu [4].

Aplikováním vyšších průměrů pro zvýšení hloubky řezu bylo při zkouškách dosaženo limitu, při kterém další zvětšování průměru dýzy již nebylo neefektivní. Bylo zjištěno negativní ovlivnění rychlosti abrazivních částic, jejich fragmentace, snížení koncentrace částic vlivem rozšíření paprsku, vyšší opotřebením abrazivní směšovací dýzy a nárůst tlakových ztrát v příváděcím systému. Limitní hodnoty vnitřního průměru vodní dýzy se nachází v intervalu mezi dvojnásobkem až trojnásobkem kritického průměru vodní dýzy d_{nc} a hodnoty ležící v tomto intervalu jsou považovány za optimální [4].

1.7.2 Parametry směšování

Rozměry a vnitřní tvar (hydraulický profil) směšovací komory a abrazivní dýzy jsou z výčtu parametrů směšování nejdůležitější. Kombinace tvaru směšovací komory a pracovního tlaku určují množství abraziva, které bude dodáno do vodního paprsku [4].

Kapalina po průchodu vodní dýzou změny typ proudění z laminárního na turbulentní, což má za následek vznik podtlaku ve směšovací komoře. Vyvolaný podtlak slouží jako impulz pro nasávání abraziva ze zásobníku a v komoře následně dochází k počátečnímu promíslení s vodním paprskem. Navýšením podtlaku ve směšovací komoře se úměrně zvýší i množství nasávaného abraziva [4].

Další faktory, které ovlivňují hmotnostní tok jsou:

- vlhkost abraziva,
- míra napěchování abraziva v zásobníku,
- průměr a délka hadice spojující řezací hlavici se zásobníkem.

Rozměr a tvar abrazivní směšovací dýzy

Primárním úkolem abrazivní dýzy je bezpečné promísení abraziva s kapalinou a následná transformace na vysokorychlostní paprsek [29].

Rozměry abrazivní dýzy mají vliv na účinnost řezání a drsnost obrobené plochy. Změnou jejího průměru se mění hustota energie paprsku, tj. kinetická energie paprsku podělená plochou vnitřního průměru dýzy. Ke zvýšení účinnosti řezání a zlepšení jakosti povrchu plochy dojde při vyšších hustotách energie, čehož dosáhneme pomocí redukce průměru abrazivní dýzy [4].

Při používání menších průměrů abrazivní dýzy je důležité dodržet velmi přesnou souosost s vodní dýzou, aby nedocházelo k nežádoucím účinkům. Při nedodržení tohoto požadavku bude docházet k vysokému opotřebení abrazivní dýzy, což povede k její krátké životnosti a v procesu směšování dojde k poklesu účinnosti, tím pádem k poklesu kvality výsledků řezání [4].

Délka dýzy

Míra odebraného materiálu a výsledná geometrie řezu je ovlivňována zvolenou délkou abrazivní dýzy. Příčinou tohoto ovlivňování je, že délka dýzy určuje soudružnost a výstupní rychlost abrazivního paprsku. Délka abrazivní dýzy ovlivňuje i jiné aspekty řezání jako například šířku řezné drážky nebo hloubku řezu. Oba tyto aspekty vykazují podobnou závislost, tj. pokles jejich hodnot při zvětšování délky dýzy. Z experimentu se zjistilo, že hodnota šířky řezné drážky klesá až po hodnotu délky dýzy rovnající se padesáti až sedmdesáti násobku jejího průměru. Další zvětšování délky dýzy již na šířku drážky nemělo vliv [4].

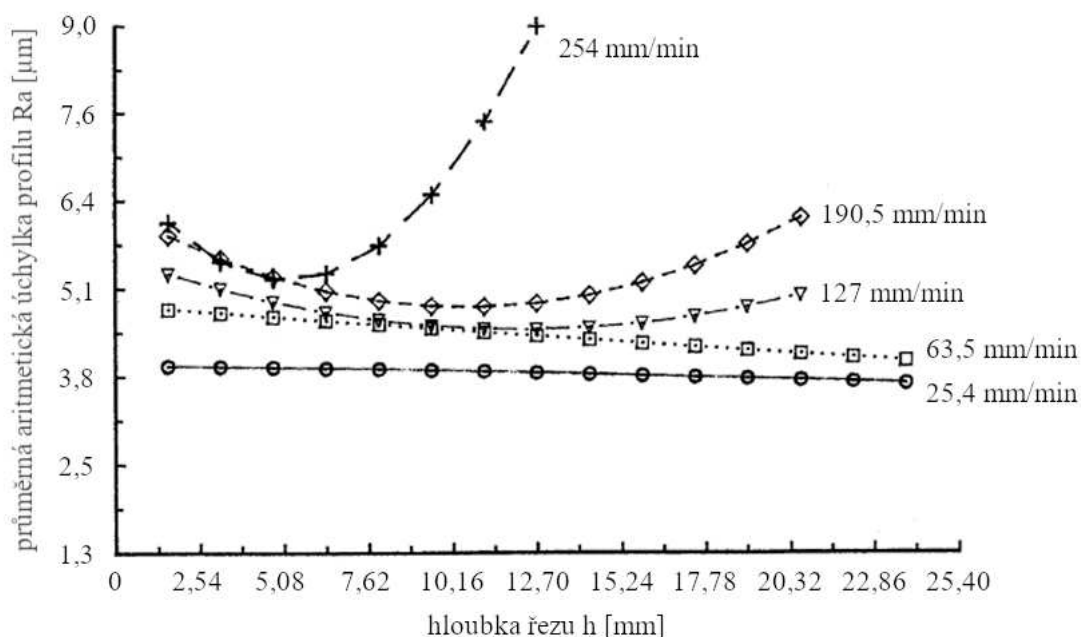
1.7.3 Parametry řezání

Rychlost pohybu stopy paprsku

Rychlost řezné hlavy po obráběném materiálu (s dodržení vzdálenosti dýzy od materiálu) má významný dopad na kvalitu výsledného povrchu a kvantitu porušení materiálu [20]. Na obr. 23 je znázornění závislosti rychlosti pohybu stopy paprsku na dosahovaných hodnotách drsnosti obrobené plochy **R_a** s postupně rostoucí hloubkou řezu **h**.

Z obr. (23) lze vyčíst, že pro dosažení nízké drsnosti povrchu nebo vysoké hloubky řezu je zapotřebí snížit řeznou rychlost.

Jak tomu je i u tlaku, řeznou rychlost lze plynule regulovat a snímat její hodnoty v reálném čase. Tato regulace pohybu řezné trysky, resp. pohybu obráběného materiálu, nám dovoluje dosahovat různých hloubek (případně drsností R_a) v různých úsecích průběhu řezání podle technologických potřeb. Pro dodržení stálé hloubky řezu lze parametr rychlosti posuvu také udržovat na konstantní hodnotě [20].



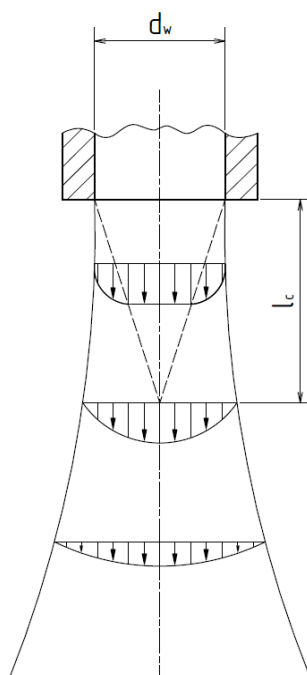
Obr. 23 Závislost posuvových rychlostí na dosahovaných hodnotách průměrné aritmetické úchytky profilu obrobene plochy Ra s postupně rostoucí hloubkou řezu h podle [14].

Vzdálenost dýzy od materiálu

Vzdálenost dýzy od materiálu (SoD), která je znázorněna na obr.6, je jedním z dalších významných parametrů v procesu AWJ řezání. Tato vzdálenost je definována jako mezera mezi povrchem obrobku a výstupním otvorem řezné hlavy. Při vyšších vzdálenostech abrazivní vodní paprsek dostává příležitost k expanzi před samotným dopadem na povrch obráběné součásti a dochází ke zvětšování jeho průměru. Spolu se zvětšováním průměru se vlivem interakce s okolním prostředím snižuje i kinetická energie paprsku, čímž se snižuje i efektivita procesu řezání s dopadem na výslednou kvalitu součásti. Nižší hodnoty tohoto parametru pozitivně ovlivňují drsnost výsledné plochy řezu a také udržují vyšší kinetickou energii paprsku, která zlepšuje efektivitu obráběcího procesu [21].

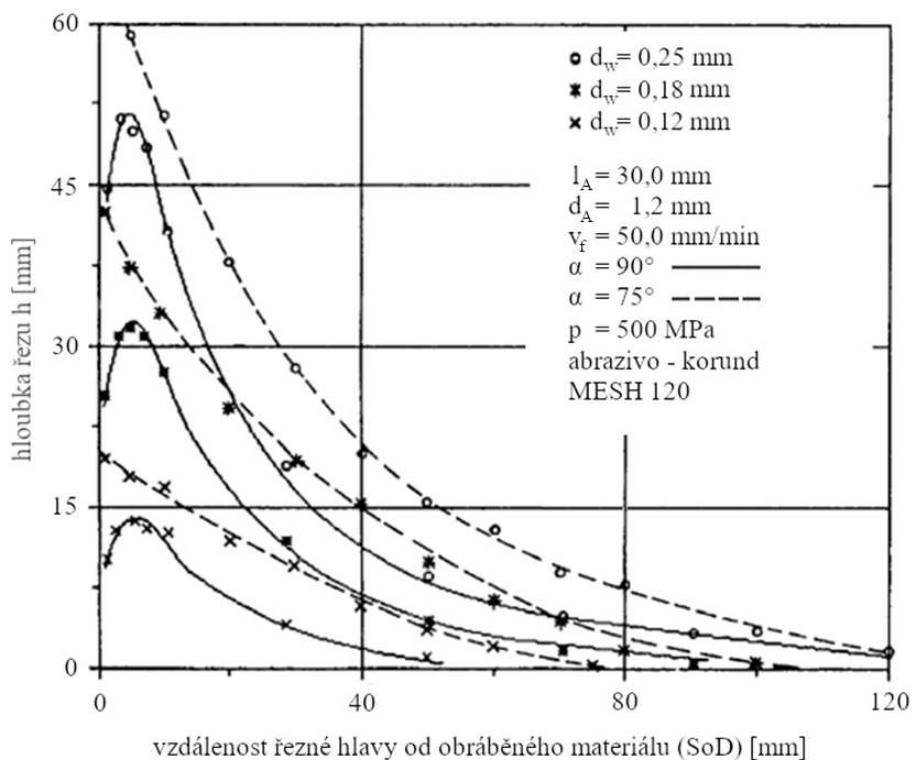
Po opuštění směšovací dýzy je povrch abrazivního paprsku deformován ve formě povrchových vln. Jejich vznik je zapříčiněn turbulentní pulzací uvnitř paprsku a třením povrchu paprsku s okolním vzduchem. Paprsek vzdalující se od dýzy nabývá na objemu hmoty vlivem interakce s okolním prostředím, což způsobuje tvorbu strukturálních trhlin v paprsku a jeho současné rozšiřování. Paprsek je postupně s rostoucí vzdáleností nasycován okolním vzduchem od jeho povrchu směrem do středu paprsku. Tímto provzdušňováním dochází ke snižování jeho rychlosti, přičemž si zachovává tzv. jádro, kde je rychlost paprsku stálá, rovnající se výstupní rychlosti z dýzy. Toto jádro se ale s narůstající vzdáleností od dýzy zmenšuje až k úplnému zániku. Tato část paprsku, ve které existuje stálé jádro, se nazývá pracovní (viz obr. 24). Rychlost a tlak za touto oblastí postupně klesají [4].

V návaznosti na řezné podmínky lze určit optimální hodnotu vzdálenosti dýzy od materiálu [30]. Tato optimální hodnota představuje takovou vzdálenost, při které se dosahuje nejvyšší hloubky řezu. V případě řezání materiálu, jehož tloušťka je menší než maximální dosahovaná hodnota řezu, lze adekvátně navýšit rychlost posuvu řezné hlavy, což vede ke kratším obráběcím časům, a tudíž ke snížení nákladů na obrábění [31].



Obr. 24 Rozšiřování vodního paprsku podle [4]
(d_w – vnitřní průměr vodní dýzy, l_c – pracovní vzdálenost).

Závislost řezné hloubky na SoD a úhlu dopadu vodního paprsku na materiál je znázorněn na obr. 25. Graf lze rozdělit na dvě části, podle dějů, které v daných oblastech probíhají. V první oblasti, která se nachází vlevo od optimálních hodnot (nejvyšší hloubka řezu), není odtok vody dostatečně rychlý. Dochází k akumulaci v abrazivní směšovací dýze, která se začne chovat jako

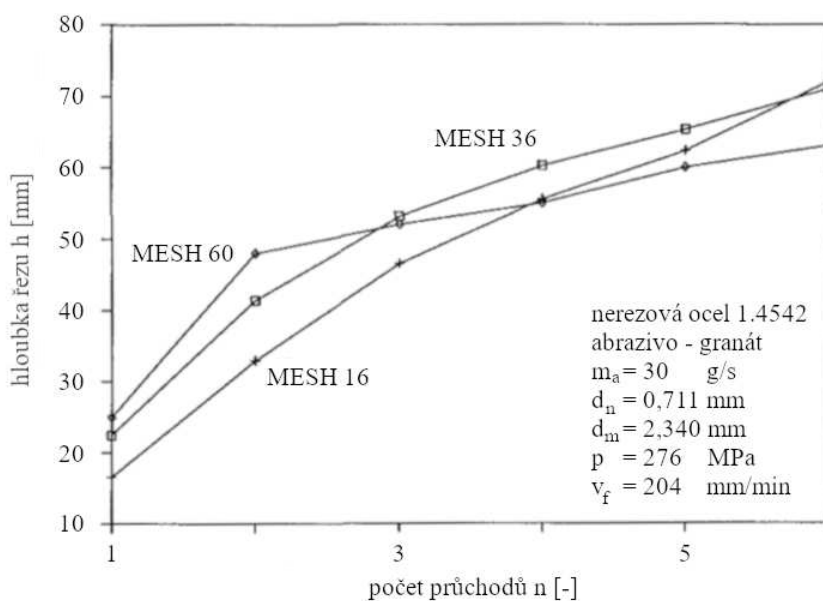


Obr. 25 Závislost hloubky řezu na parametru SoD a úhlu dopadu paprsku na materiál podle [31] (d_w – vnitřní průměr vodní dýzy, l_A – délka abrazivní dýzy, d_A – vnitřní průměr abrazivní dýzy, v_f – posuvová rychlost paprsku, α – úhel dopadu paprsku na materiál, p – tlak).

tlumič rázů. Může dojít i k extrémnímu případu, kdy voda tryská zpět do směšovací dýzy a způsobí zde tzv. zaklínění abrazivních částic. Druhá oblast grafu znázorňuje exponenciální pokles v dosahované hloubce řezu, což je zapříčiněno již zmiňovaným třením paprsku s okolním vzduchem. Parametr SoD výrazně ovlivňuje i šířku řezné drážky, která se při navyšování hodnoty SoD zvětšuje [31].

Počet průchodů vodního paprsku jednou řeznou drážkou

Navyšování počtu průchodů po stejné řezné dráze se využívá pro dosažení vyšších hloubek řezu při zachování ostatních technologických parametrů. To umožňuje použití vyšších řezných rychlostí nebo nižšího tlaku, přičemž se dosahované hloubky dosáhne navýšením počtu průchodů (viz obr. 27) [4].



Obr. 27 Závislost dosahované řezné hloubky h na počtu průchodů paprsku při použití různých velikostí abrazivních částic [6].

Z obrázku lze vyčíst, že závislost počtu průchodů na řezné hloubce není lineární. To znamená, že s každým dalším průchodem vodního paprsku se již nedosahuje stejného přírůstku hloubky řezu jako při průchodu prvním.

Tento pokles je zapříčiněn odporem stěn řezné drážky, protože zabraňuje efektivnímu odvodu již použité směsi vody, abraziva a vytvořené třísky z místa řezu. Tato směs, která v daném čase nebyla schopna opustit oblast řezu, nyní klade odpor nově vnikajícímu abrazivnímu paprsku do místa řezu a vytváří tzv. vodní bariéru. Při řezání ve větších hloubkách musí vnikající paprsek překonávat větší množství odtékající vody, což spotřebuje část jeho kinetické energie a zapříčiní pokles efektivity řezání. S narůstajícím počtem průchodů (proces řezání probíhá stále ve větší hloubce materiálu) dochází ke snížení množství odebraného materiálu s každým dalším průchodem [4].

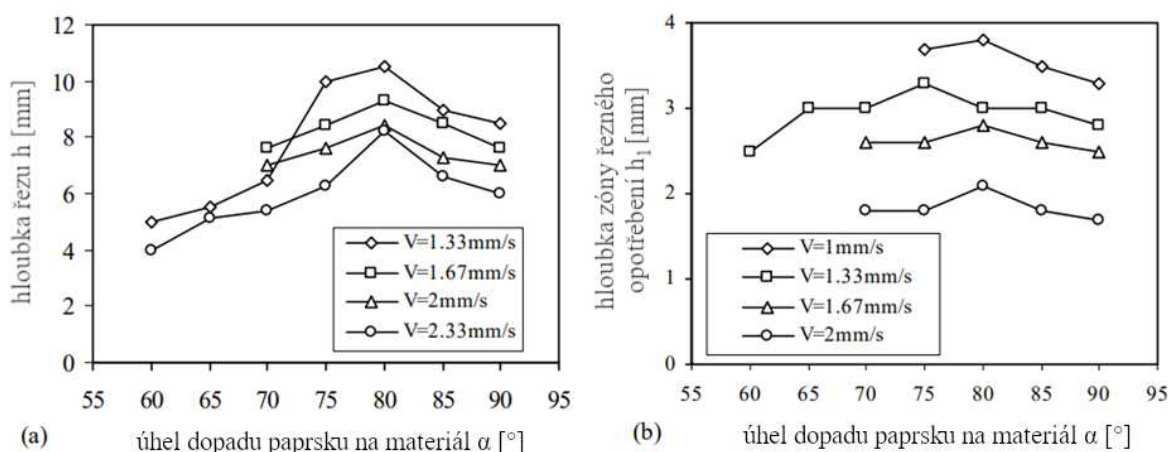
Úhel dopadu paprsku na materiál

Sklon vznikající drážky je určen úhlem dopadu paprsku na materiál. Tento úhel sklopení řezné hlavy je definován vzhledem k normále povrchu obráběného materiálu. Má vliv na výslednou řeznou hloubku a kvalitu vzniklých povrchů. Úpravou jeho hodnoty lze také korigovat kolmosti stěn drážky. Korekce kolmosti se využívá nejčastěji na úsecích dráhy se zakřivenou geometrií, kde dochází k působení odstředivých sil na částice abrazivního paprsku [20].

Úhel dopadu paprsku na materiál lze jednoduše řídit i v průběhu samotného procesu. Technický problém ale nastává při požadavku na vytvoření přesně definovaného sklonu stěn drážky. Hlavními důvody jsou postupné ztráty soudružnosti paprsku v procesu řezání a obtížně předvídatelné změny trajektorie paprsku vlivem interakcí s nehomogenitami obrobku. Použitím vhodných vztahů, které popisují závislost sklonu stěn na obráběcích trajektoriích a jiných technických parametrech v procesu obrábění, lze do určité míry sklon stěn řezné drážky korigovat [20].

Provedením experimentů na hliníkové součásti byly zjištěny optimální hodnoty úhlů dopadu paprsku na materiál pro dosažení nejvyšší hloubky řezu, a také pro dosažení nejvyšší možné hloubky řezu ve které nedochází k tvorbě striací na stěnách řezné drážky. Obr. 28 ukazuje tuto závislost při použití různých řezných rychlostí a úhlů dopadu v intervalu 60° až 90° s inkrementálním přírůstkem 5° , kde úhel 90° představuje ortogonální nastavení, kdy je tryska kolmá na povrch obrobku [32]. Řezné podmínky pro grafy na obr. 28 jsou:

- tlak $p = 350$ MPa,
- hmotnostní průtok abraziva $\dot{m}_a = 11,67$ g·s⁻¹,
- SoD $h_{SoD} = 5$ mm.



Obr. 28 Závislost dosahovaných hloubek řezu na úhlu dopadu paprsku na materiál (V – posuvová rychlost paprsku) podle [62]: a) závislost úhlu dopadu paprsku na materiál α na celkovou dosahovanou hloubku řezu h , b) závislost úhlu dopadu paprsku na materiál α na dosahovanou hloubku zóny řezného opotřebení h_1 .

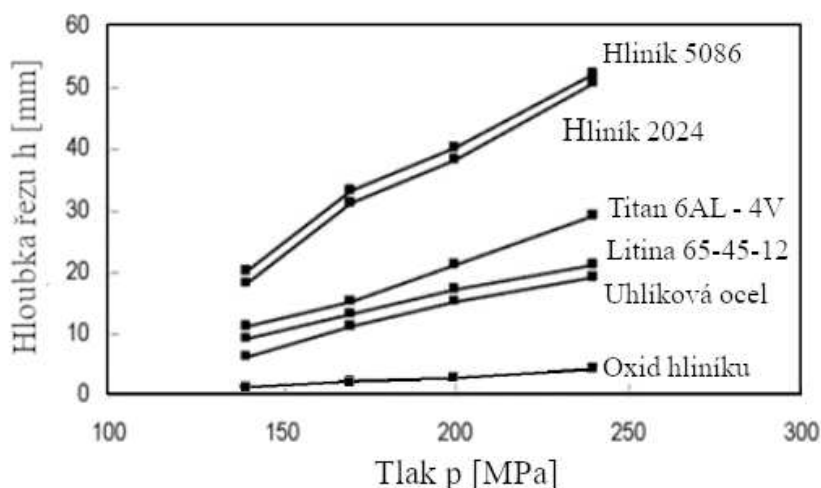
Zvětšování dosahovaných hloubek řezu při narůstajícím úhlu je připisováno distribuci energie částic paprsku. Předpokládá se, že úhel dopadu paprsku kompenzuje úhel vychýlení paprsku ve spodní části obrobku, čímž u částic dochází ke zvýšení jejich tangenciální složky energie [32].

Z obr. 28 plyne, že nastavení úhlu dopadu paprsku nemá výrazný vliv na hloubku řezu bez vzniku striací (zóna řezného opotřebení), kde vhodným nastavením úhlu na 80° bylo dosaženo zlepšení $\sim 15\%$ v porovnání s výsledky při nastavení na 90° . Na druhou stranu mělo nastavení úhlu výrazný dopad na celkovou řeznou hloubku. Pro oba tyto parametry může být hodnota 80° považována za optimální úhel dopadu paprsku na daný materiál [32].

Materiál obráběné součásti

Volba všech zmíněných technologických parametrů do určité míry ovlivňuje kvalitu konečného povrchu obráběné součásti. Je ale nutné poznamenat, že jejich volba se odvíjí také od konkrétního materiálu a jeho specifických vlastností.

Velmi důležitou mechanickou vlastností materiálů je jejich tvrdost. Porovnání různých materiálů, které uvedl Hashish [32], lze vidět na obr. 29, kde jsou patrné významné rozdíly v dosahovaných hloubkách řezu mezi relativně měkkým hliníkem a velmi tvrdým oxidem hliníku. Navzdory těmto zdánlivě velkým rozdílům v dosažených výsledcích způsobených zejména tvrdostí materiálu je vhodné podotknout, že proces řezání AWJ v porovnání s řezným nástrojem s definovanou geometrií je na tvrdost materiálu méně citlivý [3].

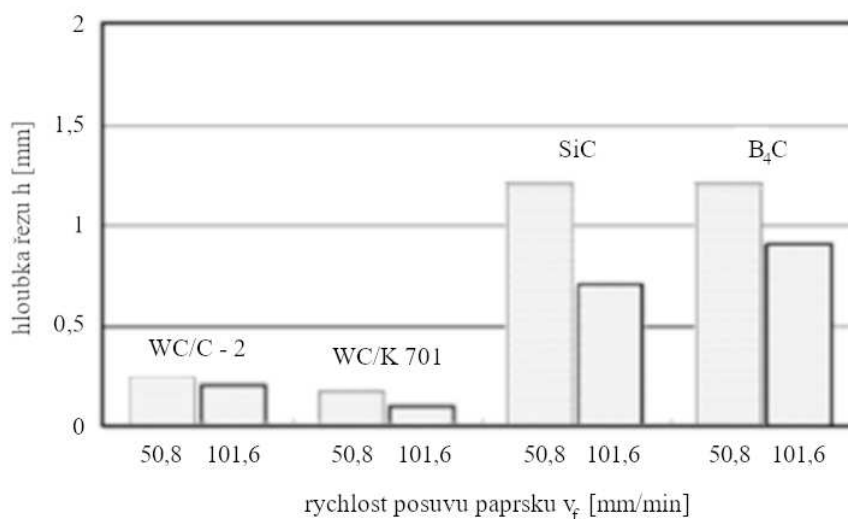


Obr. 29 Závislost dosahované hloubky řezu na požitém tlaku u různých materiálech [32]
 (průměr vodní dýzy $d_W = 0,508$ mm, průměr abrazivní dýzy $d_A = 1,52$ mm,
 posuv paprsku $v_f = 152,4$ mm·min⁻¹, abrazivo granát, MESH 60).

Vybrané pevnostní charakteristiky použitých materiálů v grafu na obr. 29:

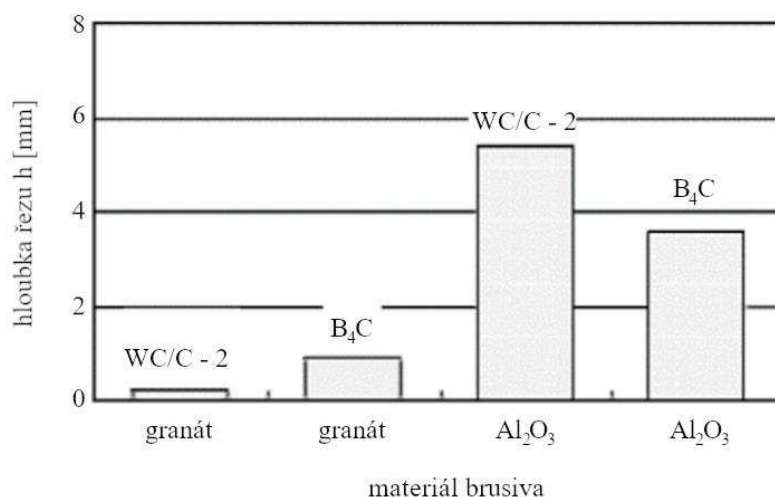
- hliník ($R_m = 331\text{--}386$ MPa, $E = 71\text{--}73$ GPa),
- uhlíková ocel ($R_m = 441$ MPa),
- titan ($R_m = 1035$ MPa, $E = 113$ GPa),
- litina ($R_m = 448$ MPa, $E = 165$ GPa).

Další mechanickou vlastností ovlivňující hloubku řezu je houževnatost materiálu. Dokazuje to provedený experiment, jehož výsledky jsou znázorněny v grafu na obr. 30, ve kterém byly použity materiály s vysokou tvrdostí, ale odlišnou houževnatostí. Při dodržení řezných podmínek je dosažená hloubka řezu u houževnatého karbidu wolframu (WC) až 4krát menší v porovnání s materiály SiC a B₄C, jejichž tvrdost je přibližně stejná, ale houževnatost nižší [3].



Obr. 30 Závislost dosahované hloubky řezu na posuvové rychlosti paprsku u různých materiálů podle [32] (průměr vodní dýzy $d_w = 0,457$ mm, průměr abrazivní dýzy $d_A = 1,14$ mm, délka abrazivní dýzy $l_A = 50$ mm, tlak $p = 311$ MPa, hmotnostní průtok abraziva $m_a = 12,7$ g·s⁻¹, abrazivo granát, MESH 60).

Pro ucelený pohled je zapotřebí se vrátit k parametru tvrdosti brusiva, protože kromě tvrdosti a houževnatosti obráběného materiálu má na hloubku řezu vliv i poměr tvrdosti obrobku vůči tvrdosti použitého brusiva. Na obr. 31 bylo použitím různých tvrdostí brusiva dosaženo zajímavých výsledků. Při použití relativně měkkého granátu se dosáhlo stéjných výsledků jako na obr. 30. Zvýšením tvrdosti abraziva (tj. použitím oxidu hliníku) dosažená hloubka řezné spáry u WC dokonce převýšila hodnoty karbidu bóru (B₄C) přibližně o 1/3. Z toho vyplývá, že překročení určitého poměru mezi tvrdostí abraziva a obrobku výrazně ovlivňuje intenzitu úběru materiálu [3].

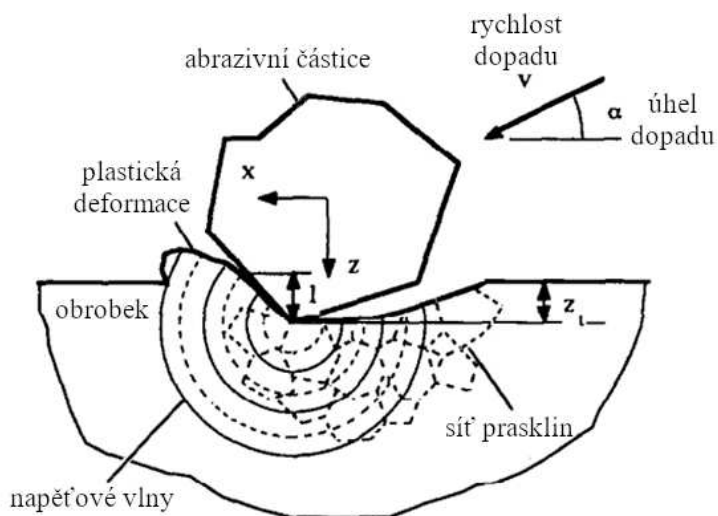


Obr. 31 Závislost dosahované hloubky řezu na použitém materiálu abraziva u různých materiálů podle [32] (průměr vodní dýzy $d_w = 0,457$ mm, průměr abrazivní dýzy $d_A = 1,14$ mm, délka abrazivní dýzy $l_A = 50$ mm, posuvová rychlost paprsku $v_f = 101,6$ mm·min⁻¹, hmotnostní průtok abraziva $m_a = 12,7$ g·s⁻¹, abrazivo granát, MESH 60).

Při obrábění technologií AWJC existuje několik odlišných skupin materiálů, které vykazují odlišné mechanismy narušování jejich struktury. Tyto skupiny jsou:

- Křehké materiály

U křehkých materiálů při pohlcení kinetické energie paprsku přesahující kritickou hodnotu vznikají strukturální trhliny. Paprsek při kontaktu s povrchem materiálu vyvolává velké radiální kladné vlny, které zapříčiní vznik trhlin ještě před deformací nebo současně s ní. Trhliny vznikají zejména v místech povrchových vad materiálu, které se stanou iniciátory napětí. Vznik trhlin může být zapříčiněn i samotnými napěťovými vlnami, pokud jejich amplituda překročí dynamickou mez soudružnosti obráběného materiálu. Tento mechanismus je znázorněn na obr. 32 [4; 33].



Obr. 32 Úběr křehkého materiálu abrazivní částicí podle [33].

- Kovy

Narušení struktury povrchu kovových materiálů vzniká na hranicích zrn, které kladou odpor vůči abrazivnímu paprsku. Narušením povrchu se vytvoří mikrotrhliny, které se stanou koncentrátoři napětí. Napětí v těchto místech roste, dojde k jejich šíření a následnému oddělení části materiálu. V porovnání s křehkými materiály vliv deformací u kovů nepůsobí v tak velké míře [4].

- Plasty

U plastů je působením abrazivního paprsku na povrch plastové součásti docíleno narušení materiálu nadzdvihnutím jednotlivých částic a jejich následným oddělením. Narušení materiálu vzniká koncentrací napětí v místě řezání. Působící napětí může mít více forem: mechanické, tepelné, chemické a absorpční. Skutečné podmínky řezání abrazivním paprskem jsou zejména únavové a deformační, ale přítomnost jejich kombinací s ostatními formami není vyloučena [4].

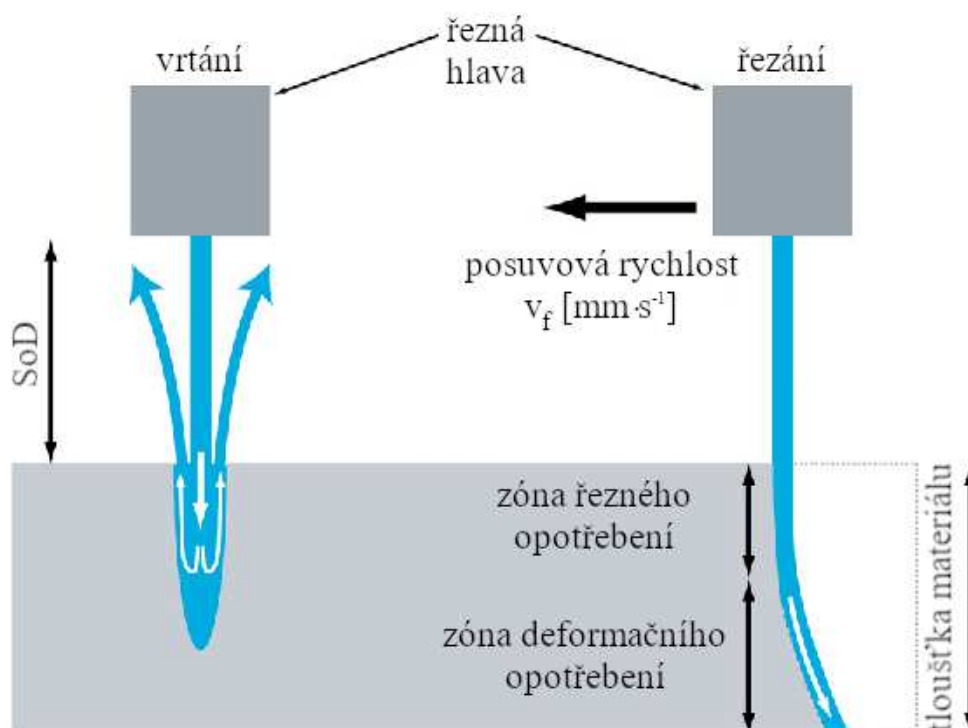
1.8 Rozdělení AWJ obráběcích technologií

V oblasti obrábění je technologie abrazivního vodního paprsku značně využívána. Do těchto oblastí patří například řezání, vrtání, frézování, gravírování, soustružení, tvoření závitů apod.

1.8.1 Vrtání

Technologie AWJ je využívána pro vrtání zejména u materiálů, které jsou obtížně obrobitelné jako např. sklo, keramika či slitiny s vysokým podílem niklu apod. Vodní paprsek je zde aplikován především z důvodů vyskytujících se komplikací a vysoké náročnosti při vrtání do těžkoobrobitelných materiálů pomocí konvenčních technologií. Použití laseru pro tvorbu hlubokých děr má v porovnání s metodou AWJ jisté nevýhody. Laserem vytvořená díra má nežádoucí kvalitu povrchu, teplem ovlivněnou oblast a je nutné zařazení doplňkových operací pro dokončení díry [34].

Rozdíl mezi technologií AWJ vrtání a AWJ řezání je zejména v dosahované hloubce řezu. Při vrtání neprůchozích děr nedochází k řezu skrze celou tloušťku materiálu, ale pouze do určité hodnoty hloubky řezu (viz obr. 33). S tím souvisí největší překážka u technologie vrtání vodním paprskem, což je snímání hloubky řezu u neprůhledných materiálů. Pro dosažení efektivní tvorby neprůchozích děr byly vyvinuty následující postupy pro snímání hloubky řezu. Semiempirický model pro predikci výsledné hloubky byl vytvořen autory Raju a Ramulu [35]. Jiný přístup ke zjišťování hloubky byl vytvořen autory Kwak et al. [36]. V tomto výzkumu představili efektivní metodu měření pomocí akustického signálu, který byl schopný snímat aktuální hloubku v reálném čase během samotného procesu řezání. Akustická metoda v tomto výzkumu sloužila taktéž k získání hodnotných informací ohledně probíhajících mechanismů úběru materiálu během procesu AWJ vrtání [34].



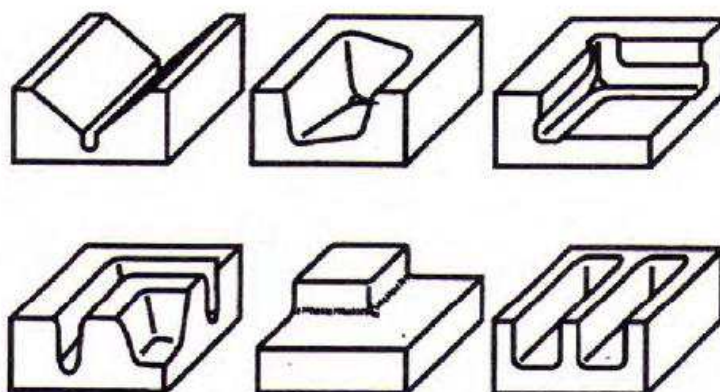
Obr. 33 Schéma vrtání a řezání abrazivním vodním paprskem [63].

1.8.2 Frézování

Abrazivní vodní paprsek je využíván taktéž v oblasti frézování. U AWJ frézování (podobně jako u vrtání) je zapotřebí kontrolovat hloubku řezu, aby nedocházelo k prořezání celé tloušťky materiálu, ale aby byla dosahovaná hloubka přesně kontrolována. Zařízení pro AWJ frézování

by obsahovalo totožné komponenty (stejná abrazivní i vodní tryska, stejné abrazivo atd.) jako při AWJ řezání. Rozdíl mezi AWJ frézováním a konvenčním AWJ řezáním spočívá v odlišných hodnotách řezných posuvů. Při AWJ frézování jsou rychlosti posuvu mnohem vyšší, aby nedocházelo ke zmiňovanému řezání paprskem skrze celou tloušťku součásti, přičemž je odebírané množství materiálu přesně kontrolováno [37].

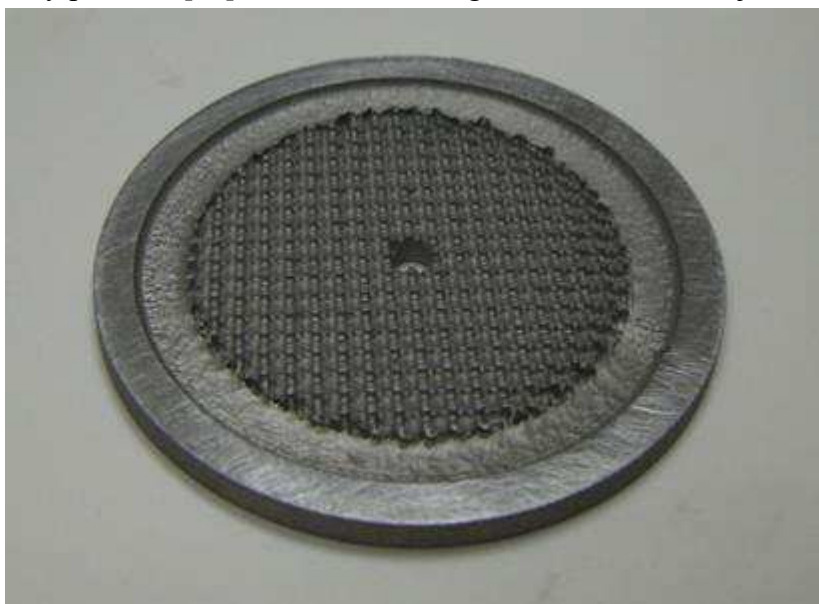
Frézování abrazivním vodním paprskem nachází využití při obrábění těžkoobrobitelných materiálů zejména v leteckém průmyslu (Inconel, titan aj.) nebo při vytváření kapes s problematickou geometrií jako např. kapsy s tenkými stěnami či ostrými rohy, které jsou obtížně zhotovitelné konvenčními metodami frézování [37].



Obr. 34 Příkladů geometrických tvarů zhotovených AWJ frézováním podle [3].

1.8.3 Gravírování

Gravírování pomocí abrazivního nebo čistého vodního paprsku je principiálně stejná jako technologie frézování vodním paprskem. Nedochází zde k prořezání celého obrobku, pouze k odstranění materiálu do požadované hloubky, přičemž je dosažením této hloubky vytvořen finální produkt nebo jsou zařazeny doplňující konvenční operace, které zajistí dosažení požadované kvality povrchu [38]. Názorná ukázka gravírované součásti je na obr. 35.

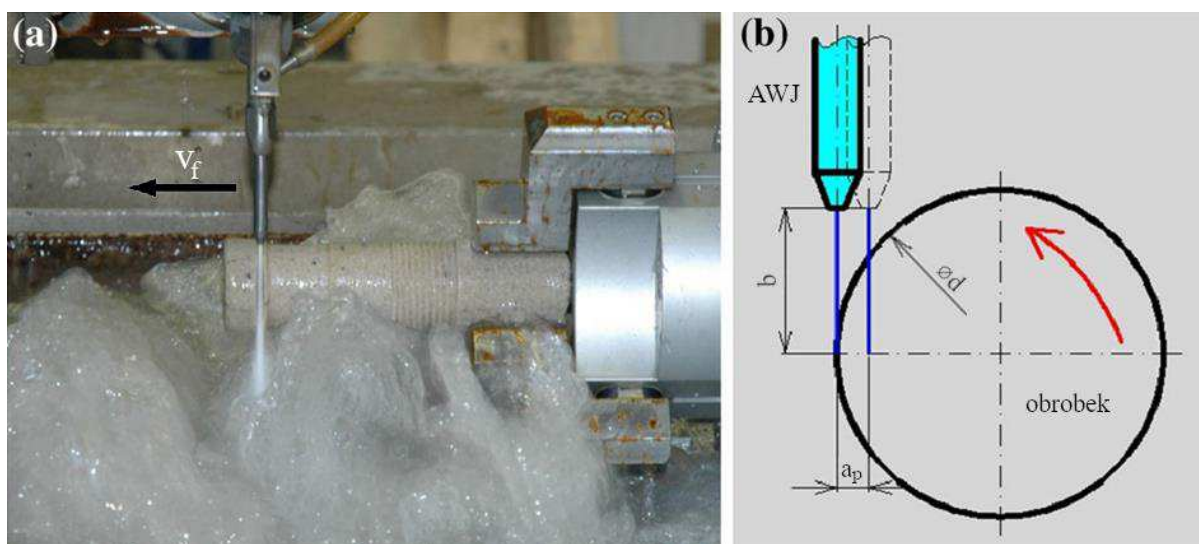


Obr. 35 Gravírovaná součást [64].

AWJ gravírování nachází uplatnění především u materiálů, u kterých nelze gravírování provést jinými běžnými metodami, jako je např. nekonvenční laserové gravírování či konvenční mechanické gravírování. V porovnání s laserem je pomocí AWJ gravírování možné opracovávat sklo, keramiku, nebo materiály citlivé na teplo, u kterých při styku s laserovým paprskem dochází ke vznícení nebo k produkci karcinogenních či jedovatých látek. Na druhou stranu je u gravírování nevýhodou nevyhnutelný styk obrobku s vodou, což vylučuje opracovávání materiálů citlivých na kontakt s vodou z jakýchkoliv důvodů (vysoká nasákavost materiálu, lehce korodující materiály apod.). Tvarové omezení u AWJ gravírování je dáno pouze průměrem vodního paprsku [38].

1.8.4 Soustružení

Soustružení vodním paprskem (viz obr. 36) je opět využíváno zejména u materiálů, jako je keramika, kompozity, sklo atd., které jsou obtížně obrobitelné běžnými konvenčními metodami. Kinematika procesu spočívá v rotačním pohybu obrobku, přičemž vodní paprsek vykonává radiální a axiální posuv pro vytvoření požadovaného tvaru součásti. V porovnání s konvenčními metodami je soustružení vodním paprskem méně závislé na původním tvaru soustružené součásti (polotovaru) a méně citlivé na poměr délky a průměru, díky čemu je možné vytvářet součásti velkých délek a malých průměrů s dobrou rozměrovou přesností [34].



Obr. 36 AWJ soustružení podle [65]: a) experimentální AWJ soustružení pískovce, b) technické schéma experimentu.

1.8.5 Tvorba závitů

Jedná se o metodu AWJ soustružení se specifickou kinematikou procesu vytvářející na součásti požadovaný tvar závitu. Tato metoda je rychlá a taktéž spolehlivá, neboť je závitový profil vytvořen s dobrou kvalitou. Analýzy potvrzují dobrou pevnost spoje tvořeného závitem, který byl zhotoven technologií AWJ a zkoušky mikrostruktury odhalily pouze minimální poškození struktury závitu [34].

1.9 Výhody a nevýhody technologie WJC/AWJC

Abrazivní vodní paprsek se vyznačuje mnohými přednostmi v porovnání s ostatními nekonvenčními i konvenčními metodami. Nelze ale opomenout, že tato technologie má i svá úskalí. Jednotlivé klady a zápory této technologie jsou vyjmenovány v následujících podkapitolách.

1.9.1 Výhody technologie WJC/AWJC

Mezi výhody této technologie zejména patří:

- vyšší rychlosti řezání oproti klasickým způsobům obrábění,
- dobrá kvalita povrchu (až Ra 1,6),
- vysoká rozměrová přesnost obrobku (produkce dílu s odchylkou až 0,025 mm, přičemž se běžná odchylka pohybuje okolo 0,1 mm u tlouštěk materiálů do 25 mm),
- studený řez (pouze minimální tepelné ovlivnění povrchu, vhodné pro materiály citlivé na teplo),
- elektricky nevodivý řez,
- vznik minimálních deformačních napětí v povrchu,
- řezem není porušena případná povrchová úprava (leštění, broušení atd.)
- schopnost rezat širokou škálu materiálů (kovy, přírodní materiály, kompozity, plasty, gumy, aj.) vyznačující se nízkou i vysokou tvrdostí,
- schopnost provedení řezu v libovolných směrech bez ztráty účinnosti paprsku,
- počítačově řízené dráhy paprsku,
- univerzální použití AWJ pro jiné technologie obrábění (soustružení, vrtání, frézování, řezání závitů, aj.),
- možnost nahrazení souboru operací (řezání, vrtání atd.) jediným technologickým procesem
- absence konvenčního řezného nástroje,
- šetrné k životnímu prostředí (nedochází ke vzniku prachových částic ani ke tvorbě toxických produktů či jiných druhů znečištění),
- nízké provozní náklady [3; 14; 39; 40; 41].

1.9.2 Nevýhody technologie WJC/AWJC

Mezi nevýhody této technologie patří:

- vysoké pořizovací náklady,
- obtížné řezání materiálů velkých tlouštěk,
- nemožné obrábění materiálu degradujícího při kontaktu s vodou,
- možná změna barvy u některých materiálů vlivem kontaktu s vodou,
- nízké hodnoty odebíraného objemu [41; 42].

1.10 Průmyslové odvětví využívající technologii WJC/AWJC

Technologie vodního paprsku se zrodila v těžebním průmyslu v průběhu 19. století. Od této doby prošla významným vývojem a začala se využívat ve strojírenském průmyslu a v mnoha

dalších průmyslových odvětvích. Mezi průmysly, ve kterých se tato technologie uplatnila, například patří:

- automobilní průmysl (řezání izolací, interiérových koberců, čalounění stropu apod.),
- letecký průmysl (produkce lopatek do turbín, spalovacích skříní apod.),
- obranný průmysl (řezání kevlarových kompozitů, neprůstřelných skel apod.),
- zdravotnický průmysl (řezání kostí a endoprotéz, řezání dentálních materiálů, resekce měkkých tkání, odstraňování tetování, odstraňování odumřelé kůže aj.),
- textilní průmysl (řezání vláken, tkanin, koberců, podložek, pěn, dlaždic, laminátů apod.),
- potravinářský průmysl (řezání všech druhů potravin),
- chemický průmysl (řezání výbušných látek, těžkoobrobitelných materiálů, plastických hmot; čištění filtrů, výměníků tepla, trubek apod.),
- elektrotechnický a elektronický průmysl (řezání elektroizolačních materiálů, plošných spojů, keramiky, skla, kaptonových pásek apod.),
- stavební průmysl (odstranění poškozených betonových desek; demontáž nýtu; řezání ocelových nosníků, betonových profilů apod.),
- sklářský průmysl (řezání skel všeho druhu přibližně do tloušťky 200 mm),
- metalurgický průmysl (apretace a čištění odlitků, řezání teplých až žhavých materiálů aj.),
- univerzity, vysoké školy a výzkumná pracoviště (využití technologie vodního paprsku ke studiu hydrodynamiky a aerodynamiky pro konstrukci podvodních plavidel, trupů raket a projektilů; studium plastických jevů materiálu na součásti po řezání metodou AWJM) [4; 43; 44; 45; 46; 47].

2 TECHNOLOGIE ŘEZÁNÍ ABRAZIVNÍM VODNÍM PAPRSKEM V PODMÍNKÁCH STŘEDNÍ FIRMY

Praktická část diplomové práce je řešena ve spolupráci s firmou AWAC, spol. s.r.o. (dále jen AWAC), přesněji s její brněnskou pobočkou. V České Republice se nachází celkem tři zakázková pracoviště, která se nachází v Praze, Ostravě a v Brně. Z hlediska počtu vlastněných zařízení pro řezání vodním paprskem se firma AWAC zařazuje mezi největší komerční společnosti v ČR pracující v této oblasti. Firma AWAC se v oblasti řezání vodním paprskem zaměřuje na používání nejnovějších dostupných technologií. Na každé ze jmenovaných provozoven je možné řezat materiály v tloušťkách od 0,1 mm do 250 mm a polotovary může nabývat maximálního rozměru 3 000 mm × 6 000 mm.

2.1 Stávající technologické možnosti a kapacity firmy

Firma AWAC v Brně disponuje pěti stroji pro řezání vodním paprskem. Hlavním zařízením společnosti AWAC je Mach 4c (600 MPa) od společnosti FLOW, které patří mezi nejvyspělejší zařízení v oblasti řezání vodním paprskem, umožňující mimo jiné řez ve 3D prostoru. Zbylé čtyři stroje jsou od firmy Microstep (400 MPa) umožňující řez vodním paprskem ve 2D prostoru. Pro zvýšení produkce je možná instalace více řezacích hlav na jednom stroji. Firma AWAC tento přístup využila například na stroji AquaCut 3001.40WW, kde k řezání používá 2 řezací hlavy.

2.1.1 Flow Mach 4 4020c

Pro zhotovení vzorové součásti bude použito zařízení Flow Mach 4c (viz obr. 37). Toto zařízení patří mezi technologicky nejpokrokovější v oblasti řezání vodním paprskem. Součástí stroje je vysokotlaké čerpadlo HyperJet produkující až 6 500 barů. Na stroj může být umístěna řezací hlava pro čtyři různé technologické použití mezi které patří:

- řezání čistým vodním paprskem,
- standardní řezání abrazivním vodním paprskem,
- Dynamic Waterjet,
- Dynamic Waterjet XD.

Tab. 2 Specifikace stroje Mach 4 4020c od firmy Flow [14].

Lineární přesnost polohování	[mm·m ⁻¹]	0,025
Přesnost opakovaného najetí	[mm]	0,025
Maximální rychlost	[m·min ⁻¹]	36
Zdvih v ose z	[mm]	305
Výkon	[kW]	75
Rozměry	[mm]	6000 × 4000
Rok výroby	[-]	2013



Obr. 37 Flow Mach 4 4020c [14].

Vysokotlaké čerpadlo HyperJet

Jedná se o nejvyspělejší vysokotlaké čerpadlo na trhu disponující jmenovitým tlakem 6 500 bar a pracovním tlakem 6 000 bar. Elektronicky řízené čerpadlo HyperJet vytváří vodní paprsek dosahující vyšších rychlostí v porovnání s čerpadly produkující nižší pracovní tlaky. Vyšší rychlosti proudění vodního paprsku umožňují navýšení posuvových rychlostí paprsku, což má za následek snížení výrobních časů a zvýšení produkce. Vysoká rychlost vodního paprsku taktéž umožňuje výrazné snížení přiváděného množství abraziva, což je z ekonomického hlediska největší položka na provoz abrazivního vodního paprsku. Speciální součásti a vlastnosti tohoto čerpadla jsou:

- keramické plunžry zajišťující minimální opotřebení součástí,
- vysokotlaké těsnění s patentovanou konstrukcí umožňující vysoký výkon a snadnou údržbu,
- inteligentní diagnostika zahrnující snímání tlaků, teploty pomocí teplotních čidel na zpětných ventilech, počtu zdvihů multiplikátoru aj.,
- možnost přepínání mezi dvěma výstupními tlaky [14].



Obr. 38 Vysokotlaké čerpadlo HyperJet [14].

Dynamic Waterjet a Dynamic Waterjet XD

Dynamic Waterjet (označováno také jako „DW“) a Dynamic Waterjet XD jsou technologie patentované firmou Flow. Mají za úkol redukovat vznik úkosů a striací ve spodní části řezu. K tomu Dynamic Waterjet využívá pokročilých matematických modelů technologie SmartStream™, které zde určují náklon kloubového mechanismu. Součásti řezané pomocí této technologie dosahují vyšší rozměrové přesnosti, přičemž jsou použity vyšší rychlosti posuvů. Dynamic Waterjet XD je technologie používaná pro řezání v 3D prostoru, integrující metody Dynamic Waterjet. Umožňuje řezání plochého materiálu v rozsahu $\pm 60^\circ$ [14].

2.2 Výroba vzorové součásti

Vzorová součástka byla zvolena se záměrem k následnému posouzení vlivu rychlosti řezné na výslednou kvalitu obrobenej plochy. Hlavní myšlenkou bylo vytvoření součásti, která bude reprezentovat pět základních stupňů jakosti povrchu Q1–Q5 a jejich závislost na časovou náročnost samotného procesu řezání a s tím spojené ekonomické náklady. K hlavní myšlence patří poukázání na možnost volby různých řezných rychlostí na jediné součásti a tím pádem k významným ekonomickým úsporám, při zvolení vyšších řezných rychlostí v místech, kde není vysoká kvalita povrchu požadována. Dalším objektem zkoumání je vliv technologie Dynamic Waterjet na redukci úkosů ve spodní části obrobku.

Pro dosažení pěti odlišných stupňů jakosti bylo využito schopnosti, kterou tento stroj disponuje, a to dynamické změny rychlostí posuvu v samotném průběhu řezání bez nutnosti přerušování řezu. Pro přibližné dosažení kvalitativních stupňů Q1–Q5 bylo využito pěti posuvových rychlostí odvíjejících se od maximální možné rychlosti, která je schopná materiál o dané tloušťce proříznout, reprezentovaná jako 100 % maximální rychlosti posuvu. Nejhorší kvalita řezu Q1 bude teoreticky dosažena právě při 100 %. Pro dosažení zbývajících stupňů kvality jsou použity procentuální části tohoto maximálního posuvu, které jsou konkrétně stanoveny jako 80 %, 60 %, 40 % a 20 % z maximální rychlosti posuvu. Tímto způsobem byla zhotovena i součást druhá s jediným rozdílem, kterým je použití technologie Dynamic Waterjet, pomocí které teoreticky dosáhneme snížení výrobního času součásti se současnou redukcí úkosů.

Pro tyto dvě součásti, které budou objektem měření, byl zvolen materiál 1.4301 (vybrané vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 3). Tento materiál byl zvolen zejména z důvodu, že se jedná o jeden z nejběžněji používaných materiálů firmou AWAC pro řezání vodním paprskem.

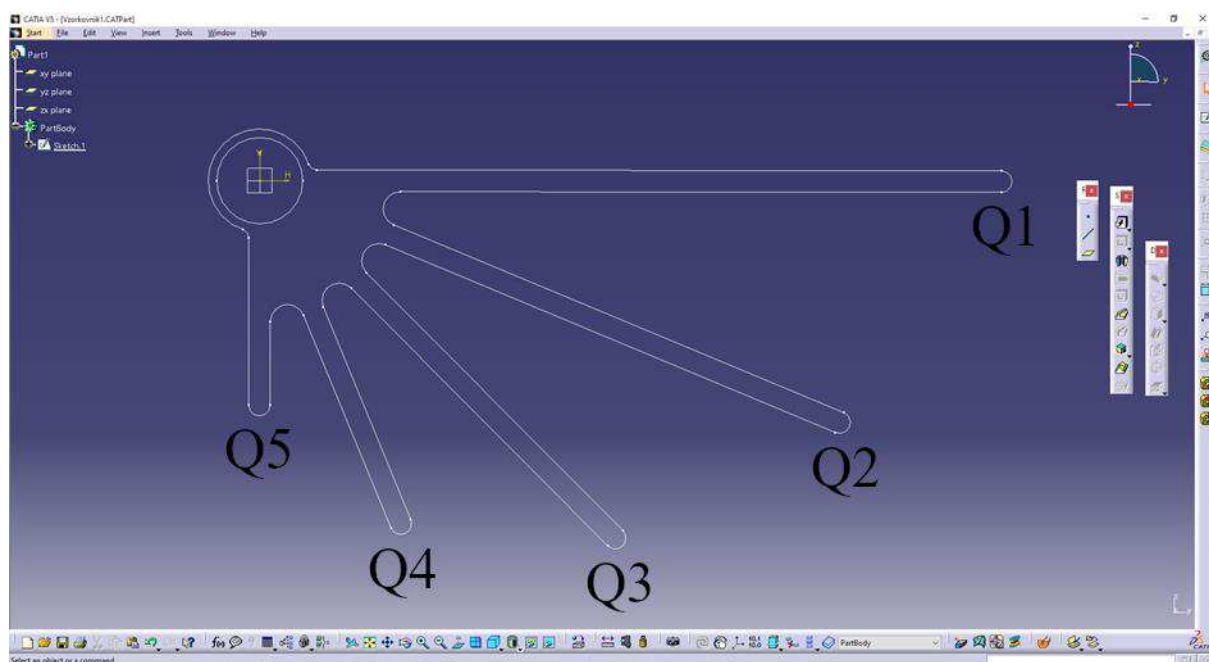
2.2.1 Postup výroby součásti a nastavení stroje

Nejprve byl zhotoven 2D model součásti pomocí CAD softwaru CATIA V5. Model součásti je zobrazen na obr. 39 se znázorněním stupňů kvality povrchu Q1–Q5, které jsou u jednotlivých částí obrobku (dále označována také jako výběžek) po procesu řezání očekávány. Zhotovený model byl následně exportován ve formátu .dxf pro navazující práci v softwaru FlowPath. FlowPath je program od firmy Flow umožňující práci s 2D modely ve standardním formátu jako jsou DXF, DWG, IGS aj. V tomto programu byla prvně zkontrolována geometrie (při importu souborů může dojít ke ztratě dat). Následně byla podle geometrie automaticky vygenerována řezná dráha včetně nájezdů, výjezdů a drah přejezdů pomocí integrované technologie řezných modelů SmartStream™. Byly zde také vytvořeny můstky a zadány rychlosti posuvu řezné

hlavy, které tento systém umožňuje zadávat na jednotlivé části geometrie v 5 různých nastaveních, tj. 100 %, 80 %, 60 %, 40 % a 20 % maximální rychlosti posuvu paprsku.

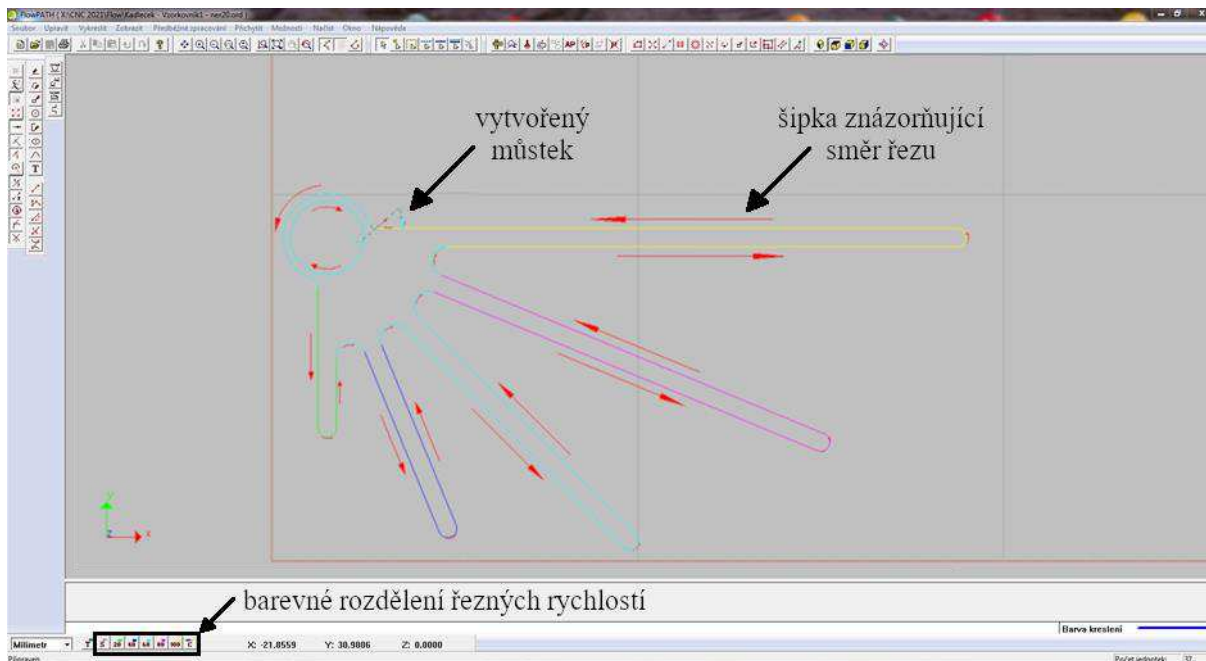
Tab. 3 Vybrané vlastnosti z materiálového listu podle [48].

Cr-Ni austenitická korozivzdorná ocel							
Číselné označení: 1.4301				Značka: X5CrNi18-10			
Chemické složení [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,45	max 0,015	17,5-19,5	8,00- 10,5	max 0,11
Mechanické vlastnosti							
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]		Nárazová práce KV [J]			
		podél min	příčně min	podél min	příčně min		
210	520–720	–	45	100	60		
Fyzikální vlastnosti							
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztlačnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Elektrický odpor [Ω ·mm ² ·m ⁻¹]			
7900	500	18,0·10 ⁻⁶	15	0,73			
Teplné zpracování	Rozpouštěcí žihání 1000–1100 °C (ochlazovat ve vodě nebo rychle na vzduchu)						
Použití	Pro obecné použití v korozním prostředí.						



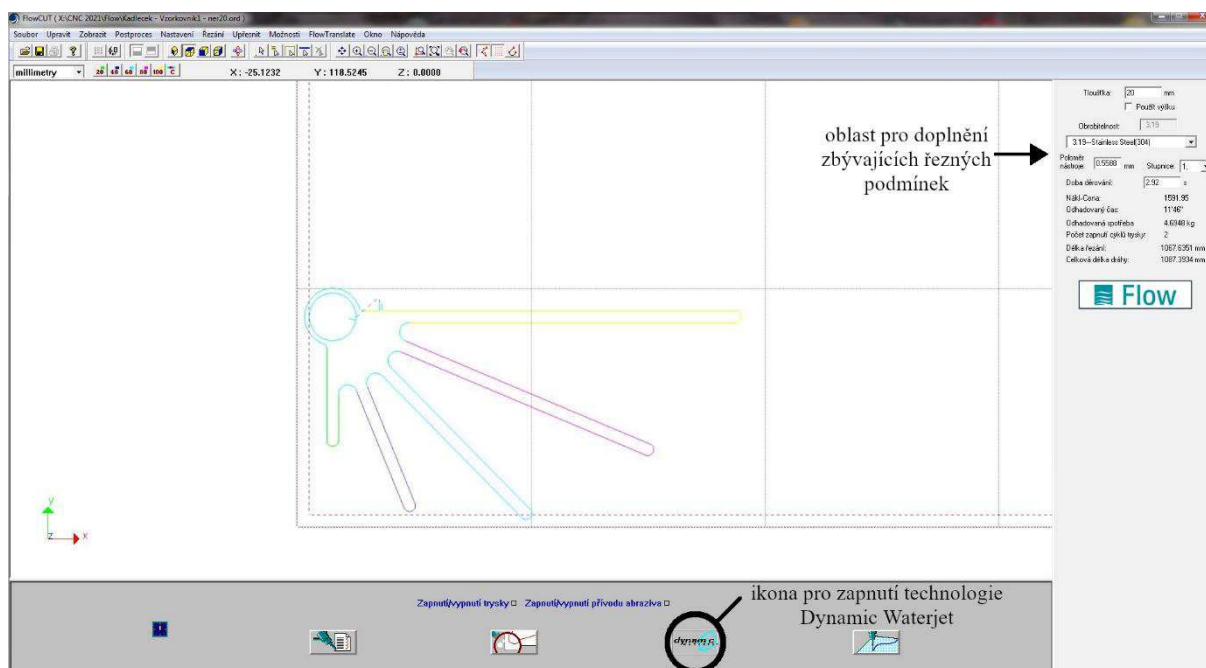
Obr. 39 2D model součásti v softwaru CATIA V5 se znázorněním očekávaných stupňů kvality povrchu.

Tyto rychlosti jsou od sebe barevně odlišeny. Soubor je následně exportován ve formátu .ord a přemístěn do operačního systému stroje FlowCut, kde jsou nastaveny zbývající hodnoty. Prostedí softwaru FlowPath je znázorněno na obr. 40.



Obr. 40 Software FlowPath.

Po importu ORD souboru do řídicího systému FlowCut (viz obr. 41) jsou doplněny zbývající řezné podmínky, mezi které patří tloušťka materiálu, materiál obráběné součásti, korekce abrazivní dýzy či doba děrování (prvotní průnik paprsku do plného materiálu viz obr. 42). Následuje automatické dopočítání zbývajících parametrů pomocí matematických algoritmů SmartStream™ (odhadovaný čas procesu, odhadovaná spotřeba abraziva, počet zapnutí cyklu trysky aj.).



Obr. 41 Řídicí systém FlowCut.



Obr. 42 Vznik mlhového oparu vlivem vnikání paprsku do plného materiálu.

Tab. 4 Nastavené hodnoty parametrů pro operaci řezání abrazivním vodním paprskem.

Symbol	Hodnota	Jednotka	Popis
s	20	[mm]	tloušťka materiálu
d_a	1,1176	[mm]	korekce průměru abrazivní dýzy
d_n	0,5	[mm]	průměr vodní dýzy
h_{SoD}	2,5	[mm]	vzdálenost trysky od materiálu
p	600	[MPa]	tlak kapaliny
t_d	2,92	[s]	doba děrování
m_a	0,4	[kg · min ⁻¹]	hmotnostní průtok abraziva
	MESH 80		velikost abraziva
	granát		druh abraziva

Po dosažení všech potřebných hodnot do softwaru byl polotovár upnut na rošt stolu (viz obr. 43) a ručně nastaven nulový bod obrobku. Následně proběhla kontrola konstantní vzdálenosti abrazivní trysky od povrchu materiálu (SoD) a případné podložení obrobku v kritických místech. Po provedení kontroly následovalo zahájení obráběcího procesu.



Obr. 43 Upnutí polotovaru na roštu stolu.

2.3 Měření součásti

Na vzorové součásti byla provedena měření drsností povrchů a tloušťek, které byly předmětem následného vyhodnocování vzniklé kvality povrchu a předmětem zkoumání vlivu technologie Dynamic Waterjet na redukcí úkosů. Měření bylo provedeno na pěti rovinných částech obrobku, kde byly použity odlišné rychlosti posuvů paprsku. Měření drsnosti bylo provedeno na součásti řezané s použitím technologie Dynamic Waterjet. Měření tloušťky bylo provedeno na obou součástech pro jejich následné porovnání.

Samotné měření drsnosti bylo provedeno v Ústavu strojírenské technologie pomocí drsnoměru Surtronic S-100 od firmy Taylor Hobson (viz obr. 44). Surtronic S-100 je přenosné



Obr. 44 Drsnoměr Surtronic S-100 od firmy Taylor Hobson.

zařízení pro rychlé ale přesné měření drsnosti povrchu. Provozní podmínky, které musí být pro zaručení přesného měření splněny, jsou:

- teplota okolního prostředí v rozsahu 5–40 °C,
- nekondenzovaná vlhkost okolního prostředí v rozsahu 0–80 % [49].

Maximální rozsah měřených hodnot byl stanoven na 100 μm z důvodů pokrytí měření i v místech s nejvyššími hodnotami drsností povrchu. Při takto zvoleném rozsahu je udáváno měřicí rozlišení 20 nm a hladina hluku 150 nm, přičemž je opakovatelnost měření výrobcem zaručena s tolerancí: 1 % měřené hodnoty + hodnota hladiny hluku [49].

2.3.1 Postup měření součásti

Před zahájením samotného měření proběhla kalibrace zařízení pomocí etalonu, jehož kvalita povrchu odpovídá drsnosti Ra 3,3. Po provedení kalibrace pomocí kalibračního procesu implementovaného do zařízení proběhlo kontrolní měření etalonu, které bylo posouzeno za vyhovující, jelikož naměřená hodnota odpovídala Ra 3,29 (viz obr. 45). Kontrolní měření etalonu bylo opakováno po každém devátém měření drsnosti povrchu, kdy bylo současně prováděno natočení měřené součásti a opětovné upnutí pro zajištění vodorovné polohy navazující měřené plochy se stylusem měřícího zařízení, na kterém je umístěn měřicí hrot.



Obr. 45 Kontrolní měření drsnosti etalonu po procesu kalibrace zařízení.

Po kalibraci zařízení bylo provedeno upnutí měřené součásti pro následné měření, čímž byla zajištěna již zmiňovaná vzájemná vodorovná poloha výběžku se stylusem. Upnutí součásti bylo provedeno pomocí pákové svěrky. Upnutí pro měření nejkratšího výběžku součásti je znázorněno na obr. 46.

Následně bylo zařízení položeno na podstavec, měřicí hrot byl položen na měřenou plochu a byla provedena kontrola polohy stylusu vůči měřené ploše pomocí indikátoru na displeji zařízení. Pokud indikátor neležel v přípustné oblasti, byla výška stylusu na zařízení upravena pomocí ližiny, po které bylo možné stylus posouvat. Pokud se indikátor nacházel již v přípustné oblasti následovalo zahájení měření stiskem modrého tlačítka umístěného vlevo od displeje. Naměřené hodnoty byly ukládány na USB flash disk.



Obr. 46 Upnutí měřené součásti pomocí pákové svěrky.

Měření bylo provedeno ve třech hloubkách, a to v oblasti řzného opotřebení (hloubka měření 2 mm), v oblasti přechodné (hloubka měření 10 mm) a v oblasti deformačního opotřebení (hloubka měření 18 mm). Z hlediska statistiky bylo měření v každé hloubce opakováno 3krát. Takto nastavený proces měření se opakoval u všech 5ti měřených paprsků zkoumané součásti. Na obr. 47 je znázorněno měření výběžku „Q1“ v hloubce 2 mm.



Obr. 47 Měření výběžku „Q1“ v hloubce 2 mm.

V následující části jsou v tabulkách uvedeny hodnoty získané měření drsností povrchů. Číslo měření 1–3 odpovídá opakovanému měření na jednom výběžku součásti, který byl řezán konstantní rychlostí posuvu vodního paprsku. Příklad zápisu dat v textovém souboru (generován zařízením Surtronic S-100) třech po sobě jdoucích měření je znázorněn na obr. 48.

Parameter	Měření 00001	Měření 00002	Měření 00003
Název dávky	Q5 00001	Q5 00002	Q5 00003
Lc	0.80mm	0.80mm	0.80mm
Ln	4.00mm	4.00mm	4.00mm
Filtr	2CR	2CR	2CR
Rozsah	100µm	100µm	100µm
Ra	3.10µm	4.88µm	4.48µm
Rt	24.30µm	28.70µm	33.60µm
Rv	10.70µm	12.70µm	14.20µm
Rp	9.00µm	11.30µm	11.60µm
Rz	19.70µm	24.10µm	25.80µm
Rc	5.70µm	7.10µm	8.30µm
Rz1max	22.00µm	28.40µm	28.20µm
RSm	82µm	129µm	124µm
Rq	3.90µm	6.00µm	5.90µm
Rdq	17.8°	17.6°	18.3°
Rku	2.354	2.240	3.255
Rmr	49.7%	50.2%	50.0%
Rpc	20/cm	18/cm	18/cm

Obr. 48 Zápis dat v textovém souboru z měření drsnosti povrchu.

Ze souboru tří měření je stanoven odhad střední hodnoty, který slouží pro následnou konstrukci grafů. Vytvořené grafy zobrazují závislost posuvové rychlosti paprsku na vybraných parametrech struktury povrchu, kterými jsou:

- průměrná aritmetická úchylnka profilu Ra,
- největší výška profilu Rz.

Hodnoty Ra1 a Rq1 značí měření v oblasti řezného opotřebení, hodnoty Ra2 a Rq2 ve střední (přechodné) oblasti a hodnoty Ra3 a Rq3 v oblasti deformačního opotřebení. Odhady středních hodnot jsou počítány dle vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Názorný příklad výpočtu odhadu střední hodnoty pro konkrétní hodnoty (Ra1, $v_f = 44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$\bar{x}_{Ra1,44} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{3} (2,11 + 2,28 + 2,41) = 2,27 \mu\text{m} \quad (14)$$

Tab. 5 Reálné hodnoty rychlosti posuvů odpovídající stanoveným procentuálním podílům maximální rychlosti posuvu

Procentuální hodnota maximální rychlosti posuvu [%]	20	40	60	80	100
Reálná hodnota rychlosti posuvu [mm·min ⁻¹]	44	89	137	185	228

Měření průměrné aritmetické úchytky profilu Ra

 Tab. 6 Hodnoty Ra odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti řezného opotřebení

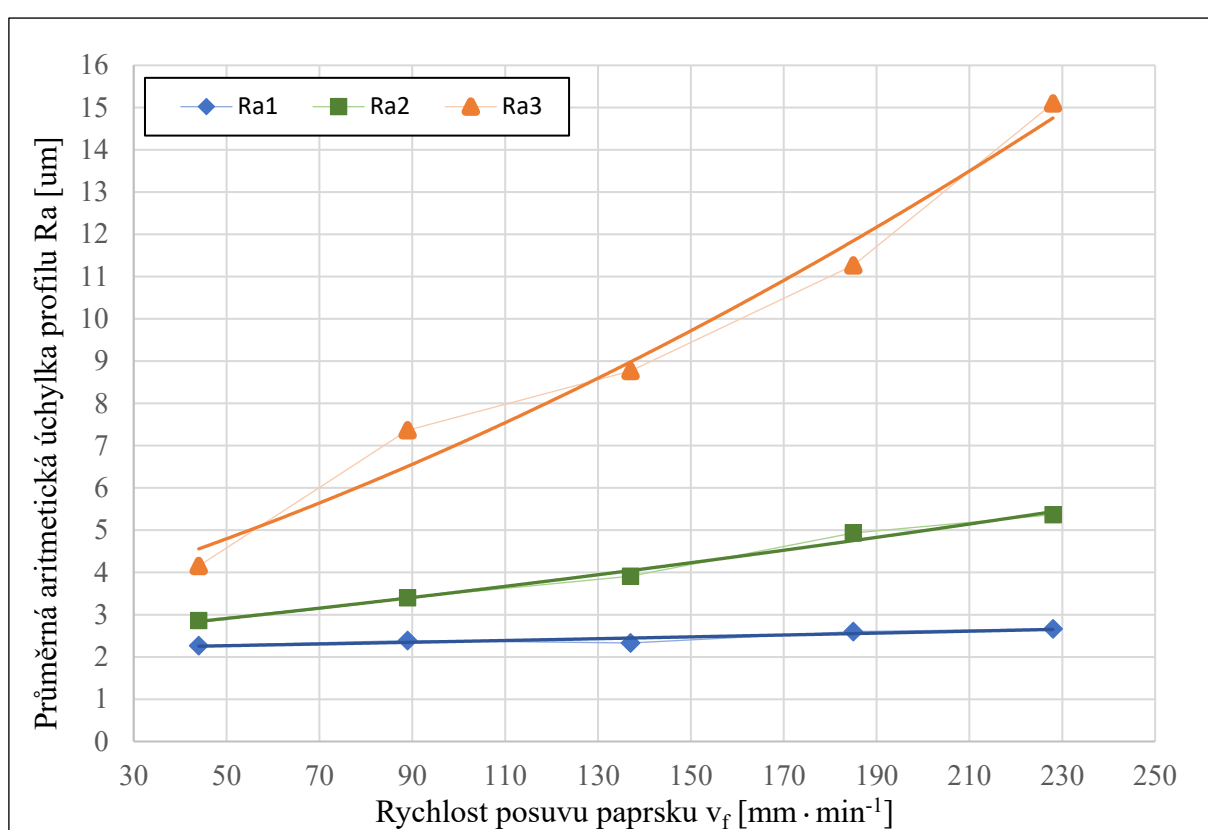
Naměřené hodnoty Ra1 [μm]		Posuvová rychlost v_f [mm·min ⁻¹]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	2,11	2,5	2,3	2,2	2,1
	2	2,28	2,2	2,2	2,1	3,3
	3	2,41	2,47	2,5	3,5	2,6
Odhad střední hodnoty \bar{x}_{Ra1} [μm]		2,27	2,39	2,33	2,60	2,67

 Tab. 7 Hodnoty Ra odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti přechodné

Naměřené hodnoty Ra2 [μm]		Posuvová rychlost v_f [mm·min ⁻¹]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	2,87	3,29	3,88	4,30	4,80
	2	2,66	3,69	4,25	5,30	5,50
	3	3,06	3,18	3,60	5,20	5,80
Odhad střední hodnoty \bar{x}_{Ra2} [μm]		2,86	3,39	3,91	4,93	5,37

 Tab. 8 Hodnoty Ra odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti deformačního opotřebení

Naměřené hodnoty Ra3 [μm]		Posuvová rychlost v_f [mm·min ⁻¹]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	3,10	9,90	8,40	9,00	11,30
	2	4,88	7,10	9,50	14,40	12,80
	3	4,48	5,10	8,40	10,40	21,20
Odhad střední hodnoty \bar{x}_{Ra3} [μm]		4,15	7,37	8,77	11,27	15,10



Obr. 49 Závislost průměrné aritmetické úchytky profilu Rz na rychlosti posuvu paprsku v_f (podmínky řezání viz tab. 4)

Měření průměrné aritmetické úchytky profilu Ra

Tab. 9 Hodnoty Rz odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti řezného opotřebení

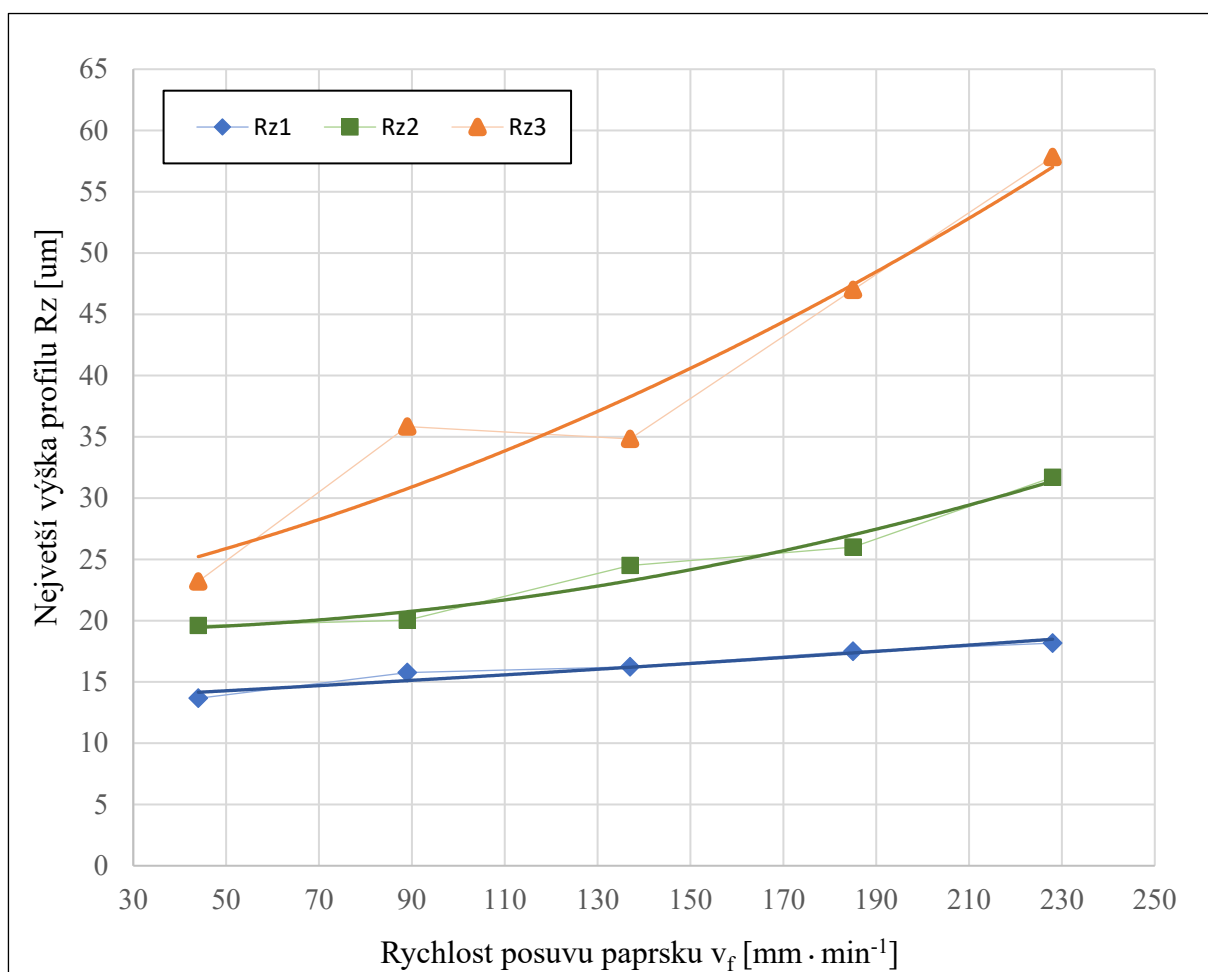
Naměřené hodnoty Rz1 [μm]		Posuvová rychlost v_f [mm · min ⁻¹]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	13,00	15,00	15,80	14,00	17,00
	2	14,50	16,00	15,30	15,00	20,50
	3	13,50	16,30	17,60	23,50	17,00
odhad střední hodnoty \bar{x}_{Rz1} [μm]		13,67	15,77	16,23	17,50	18,17

Tab. 10 Hodnoty Rz odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti přechodné

Naměřené hodnoty Rz2 [μm]		Posuvová rychlost v_f [mm · min ⁻¹]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	23,2	18,5	25	23	25
	2	17,3	20,3	22	28	33
	3	18,3	21,3	26,5	27	37
Odhad střední hodnoty \bar{x}_{Rz2} [μm]		19,60	20,03	24,50	26,00	31,67

Tab. 11 Hodnoty Rz odpovídající rychlosti posuvu v_f v oblasti deformačního opotřebení

Naměřené hodnoty Rz3 [μm]		Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]				
		44	89	137	185	228
Číslo měření i [-]	1	19,7	45	34	38	45,5
	2	24,1	38	37	60	49,5
	3	25,8	24,5	33,5	43	78,5
Odhad střední hodnoty \bar{x}_{Rz3} [μm]		23,20	35,83	34,83	47,00	57,83


 Obr. 50 Závislost největší výšky profilu Rz na rychlosti posuvu paprsku v_f (podmínky řezání viz tab. 4)

Z naměřených hodnot a vytvořených grafů lze vyvodit, že praktické měření odpovídá teoretickým předpokladům. Tendence obou grafů jasně ukazují zhoršování kvality řezaného povrchu při zvyšování posuvových rychlostí. Dle parametrů Ra1 a Rz1 je patrné, že je kvalita povrchu v řezné oblasti méně citlivá na zvyšující se rychlost posuvu a parametry zde vykazují spíše lineární průběh s pozvolným růstem. Parametry Ra3 a Rz3 popisující drsnost povrchu v oblasti deformačního opotřebení již vykazují náznaky exponenciálního růstu hodnot v závislosti na zvětšující se rychlosti posuvu paprsku.

Při porovnání naměřených hodnot s očekávanými hodnotami jednotlivých kvalitativních stupňů Q1–Q5 (viz tab. 1 v kap. 1.4.1) dospějeme k zajímavému zjištění. Hodnoty drsností v horní kontuře Ra1 jsou vůči očekávání mimořádně nízké. Zejména u dělicího řezu Q1 kde byly použity nejvyšší hodnoty posuvů, je dosahovaná hodnota průměrné aritmetické úchylky 2,67 μm , což je v porovnání s předpokládanou hodnotou 4,0–6,3 μm překvapující výsledek. Vyjma nejlepšího řezu Q5 kdy při použití nejnižších posuvových rychlostí byla hodnota 4,15 μm vyšší než hodnota očekávaná 3,2 μm , vykazují drsnosti Ra3 v dolní kontuře lepší výsledky, než bylo podle tab. 1 očekáváno. Podle výsledků měření lze prohlásit, že jednotlivé výstupky součásti splňují požadavky pro zařazení do kvalitativních stupňů Q1–Q5.

Měření tloušťky stěn a výpočet rozměrové úchylky

V následující části jsou v tabulkách uvedeny hodnoty získané měřením tlouštěk stěn jednotlivých výběžků součásti. Číslo měření 1–3 odpovídá opakovanému měření na jednom výběžku součásti, jak tomu bylo i u měření drsnosti povrchu. Ze souboru tří měření je stanoven odhad střední hodnoty, který slouží pro následný výpočet rozměrové úchylky. Odhad střední hodnoty je proveden analogicky podle vztahu (13). Názorný výpočet odhadu střední hodnoty \bar{s}_{st} pro konkrétní hodnoty (Konvenční řez (0), horní kontura (HK), $v_f = 44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$\bar{s}_{st,0,HK,44} = \frac{1}{n} \sum_i^n u_i = \frac{1}{3} (5,068 + 5,131 + 5,114) = 5,104 \text{ mm} \quad (15)$$

Výpočet rozměrové úchylky se odvíjí od stanovené tloušťky stěny s_{st} (5 mm) a vzhledem k oboustrannému provedení řezu je naměřená hodnota úchylky dvojnásobná. Výpočet je pak proveden následovně:

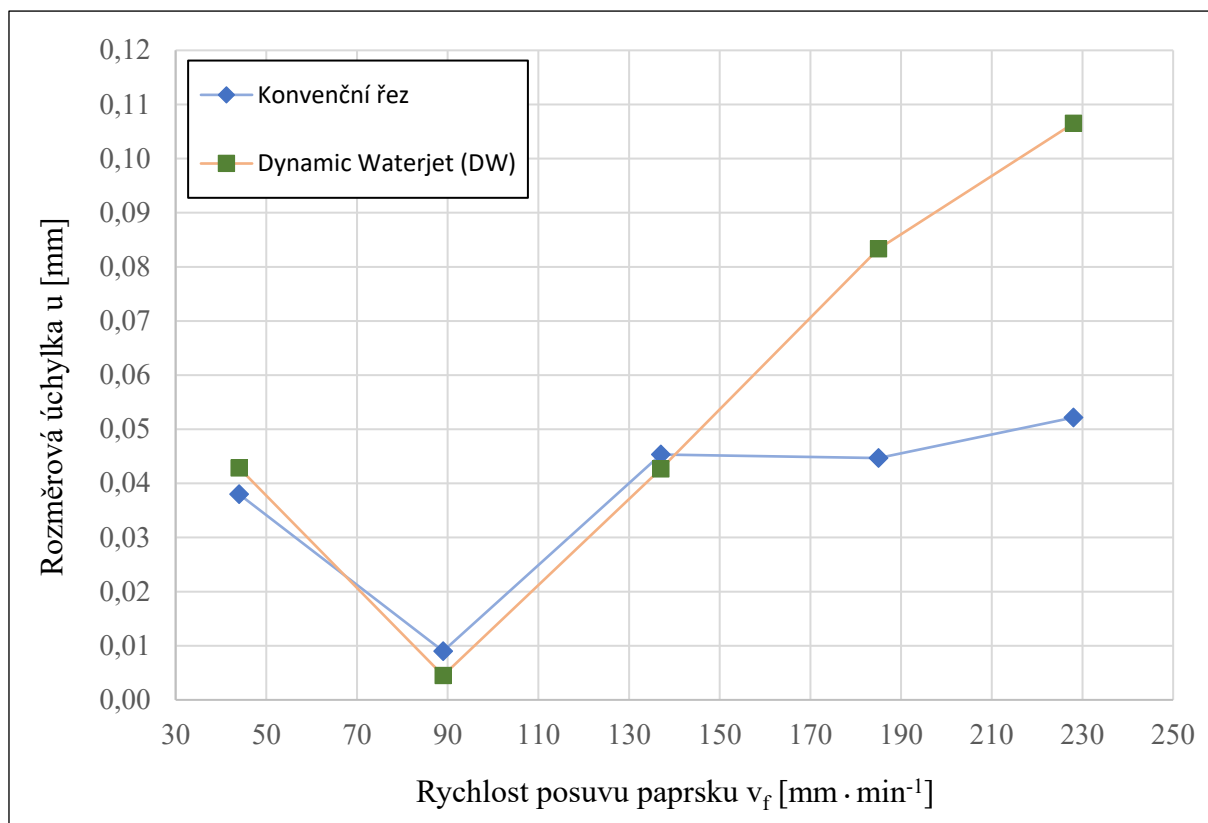
$$u = \frac{1}{2} \cdot |\bar{s}_{st,0} - s_{st}| \quad (16)$$

Názorný výpočet rozměrové úchylky pro konkrétní hodnoty (Dynamic Waterjet (DW), horní kontura (HK), $v_f = 44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$u_{DW,HK,44} = \frac{1}{2} \cdot |4,914 - 5| = 0,043 \text{ mm} \quad (17)$$

Tab. 12 Hodnoty tlouštěk stěn odpovídající rychlosti posuvu v_f v horní kontuře (oblast řezného opotřebení)

Naměřené hodnoty tlouštěk v horní kontuře [mm]		Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]									
		44		89		137		185		228	
		konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW
Číslo měření i [-]	1	4,914	4,911	5,016	4,989	5,084	5,076	5,087	5,159	5,068	5,162
	2	4,932	4,938	5,009	4,993	5,092	5,091	5,103	5,172	5,131	5,254
	3	4,926	4,894	5,029	4,991	5,096	5,089	5,078	5,169	5,114	5,223
Odhad střední hodnoty $\bar{s}_{st,0}$ [mm]		4,924	4,914	5,018	4,991	5,091	5,085	5,089	5,167	5,104	5,213
Rozměrová úchylka u [mm]		0,038	0,043	0,009	0,005	0,045	0,043	0,045	0,083	0,052	0,107

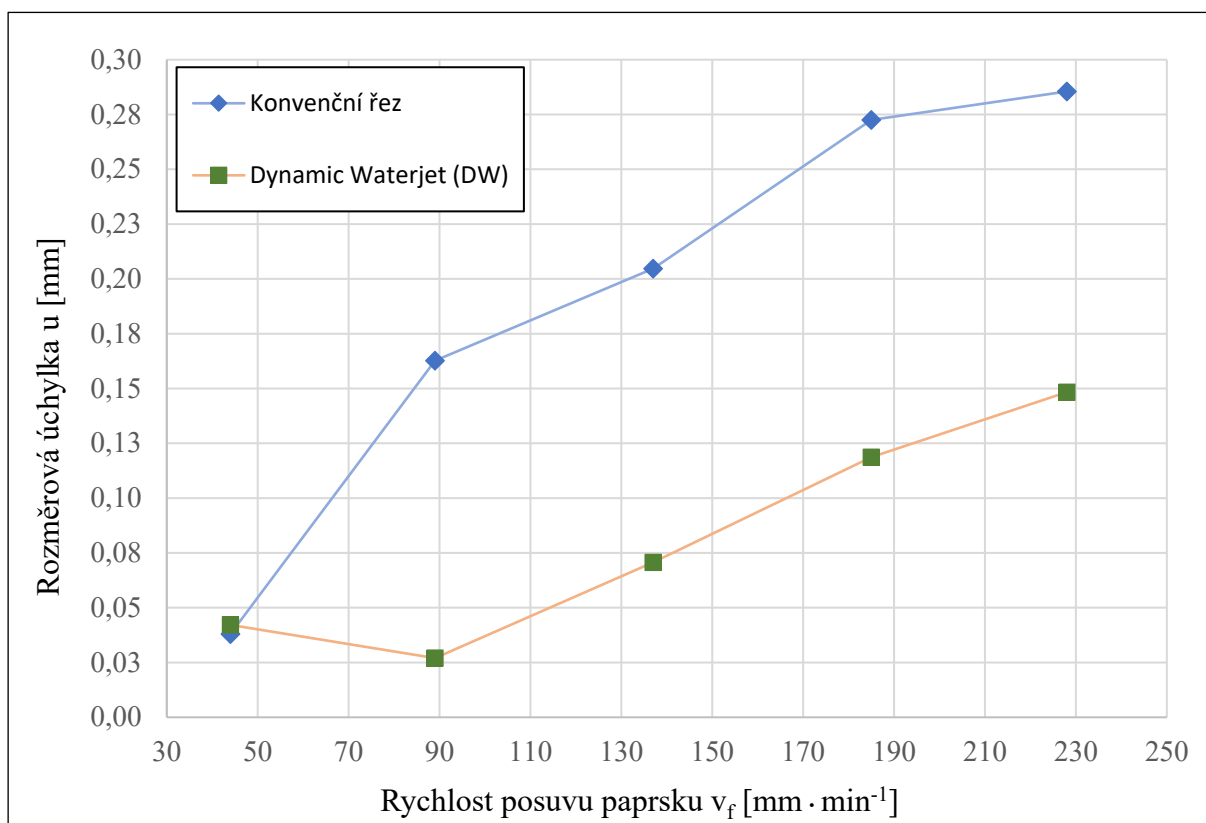


Obr. 51 Závislost rozměrové úchyly u na rychlosti posuvu paprsku v_f v horní kontuře

Zajímavostí plynoucí z grafu na obr. 51 je, že se nejnižší hodnota rozměrové úchyly nevyskytuje při nejnižší rychlosti posuvu paprsku. Ať už při konvenčním řezání vodním paprskem nebo s použitím technologie Dynamic Waterjet je nejnižší úchyly dosaženo při rychlostech posuvu $89 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zdá se překvapující, že hodnoty úchyly jsou spolu s dalším navyšováním rychlostí posuvů větší až dvojnásobné při použití technologie DW. Nicméně se vliv této technologie na redukci úkosů projeví až při posuzování úchyly horní a dolní kontury jako celku.

Tab. 13 Hodnoty tlouštěk stěn odpovídající rychlosti posuvu v_f v dolní kontuře (oblast deformačního opotřebení)

Naměřené hodnoty tlouštěk v dolní kontuře [mm]		Posuvová rychlost v_f [mm · min ⁻¹]									
		44		89		137		185		228	
		konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW	konv.	DW
Číslo měření i [-]	1	5,080	4,936	5,269	5,014	5,277	5,107	5,361	5,222	5,542	5,209
	2	5,083	4,896	5,352	5,075	5,426	5,144	5,591	5,237	5,57	5,335
	3	5,065	4,915	5,355	5,073	5,525	5,173	5,683	5,253	5,601	5,346
Odhad střední hodnoty $\bar{s}_{st,0}$ [mm]		5,076	4,916	5,325	5,054	5,409	5,141	5,545	5,237	5,571	5,297
Rozměrová úchyly u [mm]		0,038	0,042	0,163	0,027	0,205	0,071	0,273	0,119	0,286	0,148



Obr. 52 Závislost rozměrové úchyly u na rychlosti posuvu paprsku v_f v dolní kontuře

Z grafu na obr. 52 lze vyčíst, že rozměrová přesnost vycházející z naměřených úchylek je při použití nejnižší rychlosti posuvu ($44 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) srovnatelná až téměř identická u obou metod řezání. Z čehož vyplývá, že vliv technologie Dynamic Waterjet na rozměrovou přesnost je při použití velmi malých posuvových rychlostí paprsku téměř zanedbatelná. Na druhou stranu při posuzování této technologie vzhledem k redukci úkosů dojde k odhalení jejího potenciálu. Z grafu lze taktéž vyčíst, že hodnoty úchylek v dolní kontuře jsou při použití technologie DW zřetelně nižší v porovnání s konvenčním řezem.

Při zkoumání vývinu úchylek v horní a dolní kontuře současně lze zpozorovat dopad DW na redukci úkosů. Naznačují tomu intervaly hodnot ve kterém se rozměrové úchylyk nachází. V horní kontuře je to interval $\langle 0,005; 0,107 \rangle$ a v dolní kontuře $\langle 0,027; 0,148 \rangle$ přičemž největší rozdíl mezi úchylykami (značící největší úkos) je $0,041 \text{ mm}$ (zkosení $\alpha = 0,117^\circ$) při rychlosti posuvu $v_f = 228 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Intervaly hodnot ve kterém se nachází úchylyky u konvenčního řezu jsou následující. V horní kontuře je to interval $\langle 0,009; 0,052 \rangle$ a v dolní kontuře $\langle 0,038; 0,286 \rangle$ přičemž největší rozdíl mezi úchylykami je $0,228 \text{ mm}$ (zkosení $\alpha = 0,653^\circ$) při rychlosti posuvu $v_f = 185 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jednotlivé úkosy v závislosti na rychlosti posuvu jsou shrnuty v tab. 14 a tab. 15. Výpočet rozdílu úchylek a je prováděn následovně:

$$a = u_{DK} - u_{HK} \quad (18)$$

Poté je vypočten úhel zkosení pomocí tloušťky materiálu ($s = 20 \text{ mm}$) a goniometrické funkce tangens:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{s} \right) \quad (19)$$

Názorný výpočet úhlu zkosení pro konkrétní hodnoty (Dynamic Waterjet, $v_f = 89 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$\alpha_{DW,89} = \tan^{-1} \left(\frac{0,032}{20} \right) = 0,092^\circ \quad (20)$$

Tab. 14 Velikost úhlu zkosení v závislosti na řezné rychlosti při použití technologie DW

	Dynamic Waterjet				
	Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]				
	44	89	137	185	228
a [mm]	0,001	0,032	0,028	0,036	0,041
α [°]	0,003	0,092	0,080	0,103	0,117

Tab. 15 Velikost úhlu zkosení v závislosti na řezné rychlosti při konvenčním řezu

	Konvenční řez				
	Posuvová rychlost v_f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]				
	44	89	137	185	228
a [mm]	0,076	0,154	0,16	0,228	0,179
α [°]	0,218	0,441	0,458	0,653	0,513

Při porovnání vypočtených výsledků z tab. 14 a tab. 15 lze zjistit procentuální snížení úkosů u jednotlivých posuvových rychlostí vlivem použití technologie Dynamic Waterjet, které jsou následující:

- při $v_f = 44$ bylo použitím technologie DW dosaženo snížení úkosu na 1,4 %
- při $v_f = 89$ bylo použitím technologie DW dosaženo snížení úkosu na 20,9 %
- při $v_f = 137$ bylo použitím technologie DW dosaženo snížení úkosu na 17,5 %
- při $v_f = 185$ bylo použitím technologie DW dosaženo snížení úkosu na 15,8 %
- při $v_f = 228$ bylo použitím technologie DW dosaženo snížení úkosu na 22,8 %

2.4 Ekonomické zhodnocení

Výstupem této studie je hodnocení ekonomických nákladů na dělení materiálu metodou AWJ při dosažení různých jakostí povrchu. Jakosti povrchu jsou kategorizovány do pěti skupin podle použité posuvové rychlosti. U technologie řezání vodním paprskem je vhodné tyto náklady vztahovat k určitému délkovému úseku. Nejčastěji jsou náklady vztahovány na jeden

metr řezu. Před výpočtem nákladů na jeden metr řezu je nutné zhotovit výpočet nákladů na hodinu provozu stroje, ze kterého se pak vychází. Výpočty jsou vztahovány ke stroji Mach 4 od společnosti Flow, na kterém bylo provedeno řezání.

2.4.1 Náklady na hodinu provozu stroje

Při výpočtu nákladů na hodinu provozu stroje jsou náklady na spotřebu abraziva, vody, elektrické energie či spotřebního materiálu jedny z největších položek. Spotřební materiál je souhrn funkčních částí stroje, které mají určitou životnost. Součásti při překročení životnosti ztrácí svoji funkčnost a je nutná jejich výměna. Výčet nejběžnějšího spotřebního materiálu je v tab.16, kde je taktéž proveden přepočet jednotlivých součástí na náklady na hodinu provozu. Podle informací poskytnutých firmou AWAC jsou jednotlivé součásti naceněny na jeden kus, přičemž je uvedena i jejich průměrná životnost, nebo jsou uvedeny výdaje na danou součást na jeden měsíc. Podstatnou informací od které se bude výpočet následně odvíjet, je průměrná měsíční cena na všechny spotřební materiál, která činí 65 000 Kč. Výčet spotřebního materiálu je tedy spíše orientační a obsahuje jen nejběžnější součásti, přičemž je zbytek nejmenovaného spotřebního materiálu zahrnut v položce „ostatní“.

Při dohledané ceně za kus C_{ks} a známé životnosti T byl proveden přepočet na náklady spotřebního materiálu na hodinu provozu následovně:

$$N_{h,sm} = \frac{C_{ks}}{T} \quad (21)$$

Pokud byly zjištěny celkové výdaje na položku na měsíc $N_{m\acute{e}s}$ a jelikož víme že se jedná o dvousměnný provoz, lze určit počet hodin v měsíci součinem počtu pracovních dní v měsíci (20 dní) a počtu hodin v pracovním dnu při dvousměnném provozu (16 h). Tím se dostáváme s hodnotou počtu hodin v měsíci $n_{h,m\acute{e}s}$ na 320 hodin. Náklady na hodinu provozu byly pak vypočteny následovně:

$$N_{h,sm} = \frac{N_{m\acute{e}s}}{n_{h,m\acute{e}s}} = \frac{N_{m\acute{e}s}}{320} \quad (22)$$

Tab. 16 Náklady spotřebního materiálu na hodinu provozu stroje

Název spotřebního materiálu	Cena za kus C_s [Kč]	Životnost T [h]	Náklady na hodinu provozu $N_{h,sm}$ [Kč·h ⁻¹]
Tryska vodní (diamantová)	11000	600	18,3
Tryska abrazivní	6500	80	81,25
Vysokotlaký válec multiplikátoru	19000	2000	9,5
Vysokotlaké těsnění	10000	400	25
Název spotřebního materiálu	Výdaje za měsíc $N_{mēs}$ [Kč]	Náklady na hodinu provozu $N_{h,sm}$ [Kč·h ⁻¹]	
Rošt	8000	25	
Vodní filtr	2000	6,25	
Ostatní	12000	37,7	
Celkové náklady na spotřební materiál $N_{h,sm,celk}$	65000	203	

Do položky „ostatní“ jsou zařazeny součásti, které jsou například prodávány v sadách aj. V této položce je zahrnuta např.: sada dílů pro multiplikátor (zpětné ventily, vysokotlaké písty apod.), nízkotlaké těsnění, olejové filtry aj.

Náklady jednotlivých spotřeb na jednu hodinu provozu byly vypočteny ze známé ceny za jednotku C_j a spotřeby za hodinu s_h následovně:

$$N_{h,sp} = C_j \cdot s_h \quad (23)$$

Tab. 17 Náklady spotřeby el. energie, vody a abraziva na hodinu provozu stroje

Název spotřeby	Cena za jednotku C_j	Spotřeba za hodinu s_h	Cena na hodinu provozu $N_{h,sp}$ [Kč·h ⁻¹]
El. energie	4,61 Kč · kWh ⁻¹	18 kWh	83
Voda	85 Kč · m ⁻³	0,228 m ³	19,5
Abrazivo	13 Kč · kg ⁻¹	24 kg	312
Celkové náklady na provoz stroje $N_{h,sp,celk}$			414,5

Spotřeby energii, vody, abraziva a všech položek spotřebního materiálu jsou jednotlivými členy spadající do fixní hodinové sazby S_f . Do fixní hodinové sazby se mimo zmiňované taktéž započítává mzda obsluhy. Nejvíce aktuální informace ohledně průměrné mzdy v ČR je

ke 4. čtvrtletí 2020 která činí 38525 Kč. Z toho vyplývá, že průměrná hodinová mzda M_h činí 241 Kč · h⁻¹. Výpočet fixní hodinové sazby je pak proveden následovně:

$$S_f = N_{h,sm,celk} + N_{h,sp,celk} + M_h \quad (24)$$

Všechny parametry potřebné pro výpočet nákladů na hodinu provozu stroje jsou zahrnuty v tab. 18.

Tab. 18 Parametry vstupující do výpočtu nákladů na hodinu provozu stroje

Symbol	Popis	Hodnota	Jednotka
C_s	Požizovací cena stroje	8000000	[Kč]
N_i	Náklady na instalaci	200000	[Kč]
N_d	Náklady na demontáž po skončení životnosti	50000	[Kč]
L_i	Likvidační hodnota po skončení životnosti	10000	[Kč]
Z	Doba životnosti	10	[r]
E_{ef}	Efektivní časový fond stroje za rok	3780	[h]
S_f	Fixní hodinová sazba	858,5	[Kč]

Náklady na hodinu provozu stroje byly stanoveny následovně:

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L_i}{Z \cdot E_{ef}} \quad (25)$$

Po dosazení:

$$N_{hs} = 858,5 + \frac{8000000 + 200000 + 50000 - 10000}{10 \cdot 3780} = 1076,5 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1} \quad (26)$$

Závěrem této části ekonomického rozboru je zjištění nákladů na hodinu provozu stroje, která činí 1076,5 Kč · h⁻¹.

2.4.2 Náklady na metr přímého řezu

Z vypočtených provozních nákladů je nyní možné určit náklady na metr přímého řezu abrazivním vodním paprskem při dosažení pěti různých jakostí povrchu podle použitých posuvových rychlostí. Výpočet nákladů na metr řezu byl zvolen především vzhledem k její významné vypovídající hodnotě.

Náklady na jeden metr přímého řezu $N_{L(1m)}$ je možné vypočítat pomocí jednotkového strojního času t_{AS} , za který vodní paprsek urazí dráhu L právě jeden metr, při podmínkách jedné

z pěti variant řezného posuvu. Tím získáme provozní náklady na jeden metr řezu s výslednou kvalitou povrchu, odpovídající použité rychlosti posuvu. Jednotkový strojní čas t_{AS} je vypočten následovně:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad (27)$$

Poté jsou náklady na jeden metr přímého řezu $N_{L(1m)}$ dány vztahem:

$$N_{L(1m)} = \frac{N_{hs} \cdot t_{AS}}{60} \quad (28)$$

V tab.19 jsou shrnuty jednotkové časy a náklady na jeden metr řezu v závislosti na všech pěti posuvových rychlostí, které byly v experimentu použity.

Tab. 19 Hodnoty jednotkových časů a nákladů na jeden metr řezu v závislosti na posuvové rychlosti

	Posuvová rychlost v_f [mm·min ⁻¹]				
	44	89	137	185	228
t_{AS} [min]	22,73	11,24	7,30	5,41	4,39
$N_{L(1m)}$ [Kč·m ⁻¹]	407,8	201,6	131,0	97,0	78,7

ZÁVĚR

Obsah diplomové práce objasňuje principy technologie abrazivního vodního paprsku, popisuje zařízení potřebné pro provoz této technologie a detailněji popisuje abrazivní materiál, neboť se jedná o jeden z nejdůležitějších aspektů při provozování této technologie. Větší pozornost je věnována technologickým parametrům a jejich vlivům na kvalitu výsledné plochy. Jakost výsledné plochy je kategorizována do pěti skupin podle dosahované kvality povrchu. Toto rozdělení bylo námětem na praktickou část práce, ve které byla navržena technologie na výrobu vzorové součásti s pěti výběžky reprezentující pět zmiňovaných kvalitativních stupňů.

Experimentální měření hodnot drsností povrchu na součástech vytvořených na stroji Mach4 ve firmě AWAC, spol. s.r.o. potvrdilo teoretické předpoklady, ve kterých se při zvětšující rychlosti posuvu paprsku zvětšuje i drsnost povrchu obrobene plochy. Navazujícím měřením tlouštěk zkoumaných výběžků byla pozorována technologie Dynamic Waterjet, která slouží přednostně pro redukci úkosů. Z výsledků měření a navazujících výpočtů úchylek bylo zjištěno, že při použití nízkých posuvových rychlostí paprsku je vliv této technologie na rozměrovou přesnost téměř zanedbatelný, neboť rozměrové úchytky jsou zde minimální i při konvenčním řezání abrazivním vodním paprskem (bez použití technologie Dynamic Waterjet). Na druhou stranu byla potvrzena vysoká účinnost technologie Dynamic Waterjet na eliminaci úkosů. Dokazují to výsledky, při kterých je použitím této technologie dosaženo redukce úkosu na menší než 25% hodnotu ve všech pěti případech odlišujících se rychlostí posuvu.

V návaznosti na experimentální měření bylo zpracováno ekonomické zhodnocení. Výpočty byly vztaženy ke stroji Mach4, na kterém probíhal samotný experiment řezání. V ekonomickém zhodnocení byly za pomoci výpočtů zjištěny náklady na hodinu provozu stroje, které se staly vstupními hodnotami pro navazující výpočet nákladů na jeden metr přímého řezu. Právě náklady na jeden metr přímého řezu jsou hlavním výstupem ekonomického zhodnocení, neboť se vztahují k naměřeným hodnotám a dosaženým výsledkům z experimentálního měření.

Další výzkum v návaznosti na tuto práci by bylo možné soustředit na zkoumání závislosti posuvových rychlostí paprsku na výsledné drsnosti povrchu, rozměrové přesnosti a úchytkách v oblastech různorodých tvarových prvků. Výstupem by pak byl ekonomický rozbor nákladů na jeden metr s daným zakřivením profilu, neboť právě u změny trajektorie dráhy paprsku dochází k dynamickým změnám posuvové rychlosti, aby byla dodržena stanovená kvalita povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUANG, Zhongwei, Gensheng LI, Shouceng TIAN, Xianzhi SONG a Mao SHENG. *Abrasive Water Jet Perforation and Multi-Stage Fracturing*. 1st ed. Gulf Professional Publishing, 2017. ISBN 9780128128077.
- [2] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Technologie WJM/AWJ pro řezání pevných materiálů vodním paprskem II. *Glassrevue* [online]. 2008 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=6709&cid=6.html>
- [3] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.
- [4] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. 1.vyd. Bratislava, 1998, 214 s. ISBN 80-8057-091-4.
- [5] WILKINS, R. J. a E. E. GRAHAM. An Erosion Model for Waterjet Cutting. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1993, **115**(1), 57-61 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0022-0817. Dostupné z: doi:10.1115/1.2901639
- [6] HASHISH, M. Optimization Factors in Abrasive-Waterjet Machining. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1991, **113**(1), 29-37 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0022-0817. Dostupné z: doi:10.1115/1.2899619
- [7] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění 3.: skripta VUT v Brně*. Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2005.
- [8] HASHISH, M. The Effect of Beam Angle in Abrasive-Waterjet Machining. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1993, **115**(1), 51-56 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0022-0817. Dostupné z: doi:10.1115/1.2901638
- [9] PETR, Šňupárek a Martin MAREK. *TECHNICKÁ DOKUMENTACE: Drsnost povrchu* [online]. In: . Ostrava, s. 15 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf
- [10] ČSN EN ISO 12085 (014447): *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Parametry metody motif*. Praha: ČNI, 1999.
- [11] CHAO, J., G. ZHOU, M. C. LEU a E. GESKIN. Characteristics of Abrasive Waterjet Generated Surfaces and Effects of Cutting Parameters and Structure Vibration. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1995, **117**(4), 516-525 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0022-0817. Dostupné z: doi:10.1115/1.2803529
- [12] OSIČKA, Karel a Milan KALIVODA. *Nekonvenční technologie obrábění* [online]. In: . Brno, 2012, s. 96 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz/dokumenty/moduly/Osicka.pdf>
- [13] Controlling Taper. *OMAX* [online]. 2016 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.omax.com/news/blog/controlling-taper>
- [14] *Flow: shape technologies group* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.flowwaterjet.cz/>
- [15] LAUSENG, Nancy. The Right Pump To Make The Cut. *MPT* [online]. 2013 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://modernpumpingtoday.com/the-right-pump-to-make-the-cut/>
- [16] MCGEOUGH, J.A. *Advanced Methods of Machining*. 1st ed. Springer Netherlands, 1988, 250 s. ISBN 978-0-412-31970-9.

-
- [17] SUMMERS, D.A. *Waterjetting Technology*. London: E & FN Spon, 1995. ISBN 0-419-19660-9.
- [18] LABUS, T.J. *Fluid Jet Technology*. St. Louis: WJTA, 1995. ISBN 1-880342-01-4.
- [19] How loud is it?. *WaterjetAPW* [online]. 2016 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://blog.waterjetapw.com/faqs/how-loud-is-it>
- [20] HLAVÁČ, Libor. *Makroskopický fyzikální popis interakce kapalinového paprsku vysoké energie s materiálem: Macroscopic physical description of high-energy liquid jet interaction with material* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2006 [cit. 2021-05-14]. ISBN 80-010-3465-8.
- [21] JAGADISH a Kapil GUPTA. *Abrasive Water Jet Machining of Engineering Materials* [online]. 1st ed. 2020, 73 s. [cit. 2021-05-14]. ISBN 978-3-030-36001-6. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-36001-6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36001-6)
- [22] VAŠEK, J. a J. FOLDYNA. *Abrasive waterjet cutting of hard rocks: Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology*. 10th ed. Amsterdam, 1990. ISBN 1-851666-31-1.
- [23] HAVLÍK, B. *Kvantifikácia technologických parametrov pre obrábanie vodným lúčom – WJM*. Bratislava: Ds. KVT Sjf STU, 1995, 69 s.
- [24] MESH AND MICRON SIZES. *ISM* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.industrialspec.com/resources/mesh-and-micron-sizes>
- [25] LABUS, Thomas J., ed. *Proceedings of the 6th American Water Jet Conference*. Houston (Texas): Water Jet Technology Association, 1991. ISBN 1-880342-00-6.
- [26] BEGIC-HAJDAREVIC, Derzija, Ahmet CEKIC, Muhamed MEHMEDOVIC a Almina DJELMIC. *Experimental Study on Surface Roughness in Abrasive Water Jet Cutting* [online]. 2015, (100), 394-399 s. [cit. 2021-05-14]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: [doi:10.1016/j.proeng.2015.01.383](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.383)
- [27] ZAJČENKO, I.Z. *Primenenije vysokonapornoj struji židkosti dl'a rezanija materialov: Stanki i instrument*. Nr. 4. 1988, s. 25-27.
- [28] SPADLO, S. a D. KRAJCARZ. *Influence of water pressure on surface roughness parameters in abrasive waterjet cutting on AM60 magnesium alloy* [online]. *Svratka*, 2018, , 805-808 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [doi:10.21495/91-8-805](https://doi.org/10.21495/91-8-805)
- [29] LOUIS, H., F. PUDE, Chr. VON RAD a R. VERSEMANN. *ABRASIVE WATER SUSPENSION JET TECHNOLOGY: FUNDAMENTALS, APPLICATION AND DEVELOPMENTS* [online]. Hannover [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://www.china-weldnet.com/English/information/I-E-363-03.htm>
- [30] RAKOWSKI, Zikmund. *Geomechanics 93 - Strata Mechanics/ Numerical Methods/Water Jet Cutting*. 1st ed. London: Routledge, 1994, 476 s. ISBN 9789054103547.
- [31] JURISEVIC, Bostjan, Daniel BRISSAUD a Mihael JUNKAR. Monitoring of abrasive water jet (AWJ) cutting using sound detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2004, **24**(9-10), 733-737 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-003-1752-5](https://doi.org/10.1007/s00170-003-1752-5)
- [32] HASHISH, M. Material Properties in Abrasive-Waterjet Machining. *Journal of Engineering for Industry* [online]. 1995, **117**(4), 578-583 [cit. 2021-05-14]. ISSN 0022-0817. Dostupné z: [doi:10.1115/1.2803536](https://doi.org/10.1115/1.2803536)
- [33] ZENG, Jiyue a Thomas J KIM. An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. *Wear* [online]. 1996, **193**(2), 207-217 [cit. 2021-05-14]. ISSN 00431648. Dostupné z: [doi:10.1016/0043-1648\(95\)06721-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)06721-3)
-

-
- [34] KOVACEVIC, R., M. HASHISH, R. MOHAN, M RAMULU, T.J. KIM a E.S. GESKIN. State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* [online]. **119**(4), 776-785 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: doi:10.1115/1.2836824
- [35] RAJU, S.P. a M. RAMULU. *A Transient Model for Material Removal in the Abrasive Waterjet Machining Process*. Seattle: Proc. of 7th American Waterjet Conference, 1993, 141-145 s.
- [36] KWAK, H., R. KOVACEVIC a R. MOHAN. *Monitoring of AWJ Drilling of Ceramics Using AE Sensing Technique*. Sardinia: 13th International Conference on Jetting Technology, 1996.
- [37] ZELINSKI, Peter. Milling With Waterjet. *Modern Machine Shop* [online]. 1999 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.mmonline.com/articles/milling-with-waterjet>
- [38] DVOŘÁKOVÁ, Jana a Jaromír DVOŘÁK. Frézování a gravírování nekonvenční technologií AWJ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Brno, 2007 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovani-a-gravirovani-nekonvenčni-technologie-awj>
- [39] What Materials Can a Waterjet Cut?. *OMAX* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.omax.com/learn/what-materials-can-waterjet-cut>
- [40] Tajemství vodního paprsku aneb Když je řezání frajeřina. *Tech Edu* [online]. c2015–2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://techedu.cz/clanky/97/tajemstvi-vodniho-paprsku-aneb-kdyz-je-rezani-frajerina>
- [41] Water Jet and Abrasive Water Jet Machining : Principle, Working, Equipment's, Application, Advantages and Disadvantages. *Mech4study* [online]. 2017 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/2017/04/water-jet-and-abrasive-water-jet-machining-principle-working-equipment-application-advantages-and-disadvantages.html>
- [42] Profesionální řezání: Jaké jsou rozdíly mezi laserem a vodním paprskem?. *Bystronic Czech Republic s.r.o.* [online]. 2020 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.bystronic.cz/cs/blog/2020/Profesion-ln-ez-n-Jak-jsou-rozd-ly-mezi-laserem-a-vodn-m-paprskem.php>
- [43] WATER JET CUTTING INDUSTRY APPLICATIONS. *WATER JET SWEDEN* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.waterjetsweden.co.uk/industries-water-jet-cutting-machines>
- [44] KOZAK, Dražan, Sergej HLOCH, Dagmar MAGUROVÁ, Jan VALÍČEK, Dražan HREHA, Marta HARNIČÁROVÁ a Marko RAKIN. WATER JET TECHNOLOGY USED IN MEDICINE. *Tehnicki Vjesnik* [online]. **17**, 237-240 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1330-365.
- [45] TEXTILE WATERJET CUTTING. *Atlantis Waterjet* [online]. 2018 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://atlantiswaterjet.com/textile.html>
- [46] *High pressure water jetting in the chemical industry* [online]. In: . s. 20 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://s3.kaercher-media.com/asset/12989/1453665573/brochurewomachemie.pdf>
- [47] BANDYOPADHYAY, Amit a Michael GERAGHTY. *A STUDY ON USE OF WATERJET IN CONSTRUCTION* [online]. New York [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://tiij.org/issues/issues/winter98/civil/waterjet.html>
- [48] *Materiálový list: 1.4301* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6Bz
-

- Y5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnzl00RA9x7p75N8MGgz73w
- [49] Surtronic® S-100 series. *Taylor Hobson* [online]. 2018 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/product-downloads/hand-held-surtronic/surtronic-s-100-surface-finish-tester-en.pdf?la=en&revision=67d2d461-ad60-4bb2-9327-5cffdaf19857>
- [50] The Monitor. In: *Loc* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/cph.3c00735>
- [51] PRAX, O. *Nekonvenční metoda obrábění vodním paprskem*. Brno., 2011, 88 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
- [52] NGUYEN, T., J. WANG a W. LI. Process models for controlled-depth abrasive waterjet milling of amorphous glasses. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2015, 7(5-8), 1177-1189 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-6514-z
- [53] Parametry drsnosti: Výběr cut-offu (filtru profilu) podle ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998. *Jenoptik* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [54] WRIGHT, Ian. An Engineer's Guide to Waterjet Cutting: Overview of how waterjets work, what they can cut and the advantages of waterjet cutting. *Engineering* [online]. 2016 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/an-engineers-guide-to-waterjet-cutting>
- [55] Direct drive pump. In: *Wardjet* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/nozzle-orifice>
- [56] Shock Attenuator. In: *Hairanwaterjet* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.hairanwaterjet.com/cs/product/cnc-5-axis-60000-psi-abrasive-high-pressure-waterjet-cutting-machine-intensifier-pump-spare-parts-accumulator-attenuator/>
- [57] High pressure tubes. In: *Hpt-tubing* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.hpt-tubing.com/high-pressure-tubes-applications/>
- [58] ABRASIVE TRANSFER SYSTEM. In: *BFT* [online]. 2019 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://bft-gig.com/bft-product/abrasive-twinjet/>
- [59] ABDEL-RAHMAN, Adel Ahmed. A Closed-form Expression for an abrasive waterjet cutting model for ceramic materials. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences* [online]. 2011, 5(4), 722-729 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279650004_A_Closed-form_Expression_for_an_abrasive_waterjet_cutting_model_for_ceramic_materials
- [60] TYPE 94 SAPPHIRE ORIFICE - ALLFI WATERJET SUPERIOR WATERJET PARTS. In: *Allfi Waterjet* [online]. 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://allfiwaterjet.com/collections/consumable-parts-for-waterjet-cutting/products/type-94-sapphire-orifice-allfi-waterjet-superior-waterjet-parts>
- [61] XIAOCHU, Liu, Liang ZHONGWEI, Wen GUILIN a Yuan XUEFENG. Waterjet machining and research developments: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. Springer London, 2019, 102, 1257–1335 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-3094-3
- [62] WANG, Jun. The Effects of the Jet Impact Angle on the Cutting Performance in AWJ Machining of Alumina Ceramics. *Key Engineering Materials* [online]. 2003, 238-239,

117-124 [cit. 2021-05-14]. ISSN 1662-9795. Dostupné z:
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.238-239.117

- [63] DUNNEN, Steven, Gert KRAAIJ, Christian BISKUP, Gino KERKHOFFS a Gabriëlle TUIJTHOF. Pure Waterjet Drilling of Articular Bone: An in vitro Feasibility Study. *Journal of Mechanical Engineering - Strojnicki vestnik* [online]. 2013, **59**, 425-432 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: doi:10.5545/sv-jme.2012.928
- [64] OLSEN, John H. A 3-D image made with an abrasive waterjet. In: *The fabricator* [online]. 2013 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z:
<https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/waterjetcutting/etching-3-d-images-with-an-abrasive-waterjet>
- [65] HLAVÁČEK, P., J. CÁRACH a S. HLOCH. Sandstone Turning by Abrasive Waterjet. *Rock Mech Rock Eng* [online]. 2015, **48**, 2489–2493 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z:
doi:10.1007/s00603-015-0719-9

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
AWJ	Abrazivní vodní paprsek
AWJC	Řezání abrazivním vodním paprskem
B ₄ C	Karbid boru
C	Uhlík
CAD	Počítačová podpora modelování
CAM	Počítačová podpora výroby
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače
Cr	Chrom
DW	Dynamic Waterjet
Mn	Mangan
N	Dusík
Ni	Nikl
NSF	Národní vědecká nadace
P	Fosfor
PAA	Polyakrylamid
PEO	Polyetyloxid
S	Síra
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
Si	Křemík
SiC	Karbid křemíku
SoD	Vzdálenost trysky od povrchu obráběného materiálu
WC	Karbid wolframu
WJC	Řezání vodním paprskem

Symbol	Jednotka	Popis
C _j	[Kč·kWh ⁻¹], [Kč·m ⁻³], [Kč·kg ⁻¹]	Cena za jednotku
C _{ks}	[Kč]	Cena za kus
C _s	[Kč]	Pořizovací cena stroje
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E_a	[J·s ⁻¹]	Kinetická energie abrazivních částic
E_{ef}	[h]	Efektivní časový fond stroje za rok
E_k	[J]	Kinetická energie částice kapaliny
L	[mm]	Dráha
L_i	[Kč]	Likvidační hodnota po skončení životnosti
M_h	[Kč·h ⁻¹]	Průměrná hodinová mzda
$N_{L(1m)}$	[Kč·m ⁻¹]	Náklady na jeden metr přímého řezu
N_d	[Kč]	Náklady na demontáž po skončení životnosti
$N_{h,sm}$	[Kč·h ⁻¹]	Náklady na hodinu provozu
$N_{h,sp}$	[Kč·h ⁻¹]	Cena na hodinu provozu
N_{hs}	[Kč·h ⁻¹]	Náklady na hodinu provozu stroje
N_i	[Kč]	Náklady na instalaci
$N_{mēs}$	[Kč]	Výdaje za měsíc
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_a	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μm]	Střední kvadratická hodnota drsnosti
S	[mm ²]	Plocha otvoru dýzy
S_f	[Kč]	Fixní hodinová sazba
S_1	[mm ²]	Plocha pístu
S_2	[mm ²]	Plocha vysokotlakého pístu
T	[h]	Životnost
$Y(x)$	[μm]	Hodnota pořadnice – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x
Z	[r]	Doba životnosti
Y_i	[μm]	Úchylka profilu
a	[mm]	Rozdíl úchylek
d_n	[mm]	Průměr vodní dýzy
d_{nc}	[mm]	Kritický průměr vodní dýzy
h	[mm]	Hloubka řezu
h_{SoD}	[mm]	Vzdálenost abrazivní trysky od povrchu řezaného materiálu
l_r	[μm]	Základní délka
m	[kg]	Hmotnost kapaliny

\dot{m}_a	[kg·s ⁻¹]	Hmotnostní tok abraziva
n	[-]	Počet naměřených hodnot
$n_{h,měs}$	[h]	Počet hodin v měsíci
p	[MPa]	Tlak kapaliny
p_1	[MPa]	Tlak působící na plochu pístu S_1
p_2	[MPa]	Tlak působící na plochu pístu S_2
q_v	[m ³ ·s ⁻¹]	Průtok kapaliny
\bar{s}_{st}	[mm]	Odhad střední hodnoty tloušťky stěny
s_h	[kWh], [m ³], [kg]	Spotřeba za hodinu
s_{st}	[mm]	Stanovená tloušťka stěny
t_{AS}	[min]	Jednotkový strojní čas
t_d	[s]	Doba děrování
u	[mm]	Rozměrová úchylka
u_{DK}	[mm]	Úchylka v dolní kontuře
u_{HK}	[mm]	Úchylka v horní kontuře
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění kapaliny
v_a	[m·s ⁻¹]	Rychlost abraziva vycházejícího z hlavice
v_f	[mm·min ⁻¹]	Rychlost posuvu paprsku
v_v	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudění kapaliny
\bar{x}	[mm]	Odhad střední hodnoty
x_i	[mm]	i-tá hodnota
s	[mm]	Tloušťka materiálu
α	[°]	Úhel zkosení
μ_m	[-]	Mechanická účinnost
μ_v	[-]	Výtokový součinitel
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota kapaliny