

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Řezání materiálu vodním paprskem

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Diplomant

Bc. Levon Vahanyan

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Levon Vahanyan

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Řezání materiálu vodním paprskem

Název anglicky

Water jet cutting of material

Cíle práce

- shromáždit informace o metodách používaných pro dělení kovových materiálů,
- na základě výsledků provedeného experimentu hodnotit proces dělení vodou vybraných kovových materiálů, včetně technicko-ekonomického zhodnocení.

Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- cíl práce a metody jejího zpracování,
- výsledky experimentů a jejich diskuse,
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

Klíčová slova

dělení materiálu; řezání vodou; granát; abrazivo; technicko-ekonomické zhodnocení

Doporučené zdroje informací

- AWAC, spol. s r. o., systémy dělení materiálu [online]. Dostupné z www: <http://www.awac.cz/>
BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. In.: 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia. 2017. 16, 75-81. Available online: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2017/Papers/N014.pdf>
JIRKA, M., BROŽEK, M., CHMELÍK, V.: Řezání laserem. Strojírenská výroba. 1995. 43(5-6), 28-30.
KŘENEK, J.: Dělení materiálů kapalinovým paprskem. Bakalářská práce. Praha, ČVUT FS 2010.
MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Praha, ČVUT 1993.
VALÍČEK, J. et al.: Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2007. 47(11), 1786-1790.
VALÍČEK, J., HLOCH, S., KOZAK, D.: Surface geometric parameters proposal for the advanced control of abrasive waterjet technology. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. 41(4), 323-328.
VLASTNÍK, J.: Dělení materiálů paprskem kapaliny. Kandidátská disertační práce. Praha, ČVUT FS 1983.
WaterJets.org ... the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z www: <http://waterjets.org/>
WEISS M.: Řezání vodním paprskem šetří náklady. MM Průmyslové spektrum. 2013. 17(12), 80-81.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2018

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Řezání materiálu vodním paprskem vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom/a že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc., za jeho cenné rady, odborné vedení a vstřícnost při vypracování práce.

Abstract

Diplomová práce se zabývá technologií metod dělení kovových materiálů vodním paprskem. Zaměřuje se na jeho charakteristiku, popisem principu systému vodního paprsku včetně výhod a nevýhod. Dále popisuje oblasti, kde se obrábění vodním paprskem využívá. Experimentální část se zabývá hodnocením řezu na vybraných vzorcích o tloušťkách 10 a 20 mm v závislosti na rychlosti posuvu řezné hlavy, kde je zkoumána šířka a řezný úhel spáry. Bylo provedeno měření rozměrů drážek na zkušebních vzorcích, měření šířky spáry lící a rubní straně a nakonec byla vypočtena velikost úhlu úkosu. Dále bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení. V závěru jsou shrnuty a vyhodnoceny poznatky z obou částí.

Klíčová slova:

Dělení materiálu, řezání vodou, granát, abrazivo, technicko-ekonomické zhodnocení

Abstract

The diploma thesis deals with the technology of water jet cutting of metal materials. It focuses on its characteristics, description of the principle of water jet system, including advantages and disadvantages. It also describes areas where water jet machining is used. The experimental part deals with the evaluation of the cut on selected samples with thicknesses of 10 and 20 mm, depending on the feed rate of the cutting head, where the width and cutting angle of the joint is examined. Measurements of the groove dimensions on the test specimens are estimated, as well as the width measurement of the face and the back side are measured and the taper angle is calculated.

Keywords:

Cutting material, water jet, garnet, abrasives, technical and economic evaluation

Obsah

1. Uvod	8
2. Cíl práce	9
3. Historie a vývoj vodního paprsku	10
4. Proces a princip řezání	11
5. Rozdělení technologií kapalinového paprsku	12
6. Řezání čistým vodním paprskem	13
7. Řezání abrazivním vodním paprskem	15
7.1. Vlastnosti a druhy abraziva	17
7.1.1. Recyklace abraziva	19
7.1.2. Stabilizátor proudění	20
8. Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem	21
9. Konstrukce a mechanismy zařízení	23
9.1. Rotační čerpadlo s přímým pohonem	24
9.2. Multiplikátor (zesilovač tlaku)	24
9.3. Řezací hlava	25
9.4. Vodní tryska	26
9.5. Čistící filtry	27
9.6. Zaostřovací trubice	28
9.7. Akumulátor	28
9.8. Zásobník abrazivního materiálu	29
9.9. Vysokotlaké potrubí	29
9.10. Operační systém	29
9.11. Venturiho efektu	30
10. Kvalita povrchu řezu	31
10.1. Řezná rychlost	33
10.2. Problematika kvality povrchu v místě řezu	34
10.2.1. Dynamic Waterjet	35
10.2.2. ProgressJet	37
10.3. Bezpečnostní požadavky na proces řezání vodním paprskem	38
11. Metodika práce	39
12. Praktická část práce	41
12.1. Charakteristika vzorků	41

12.2.	Použité zařízení	43
12.3.	Postup výpočtu velikosti úhlu úkosu řezné spáry	44
13.	Výsledky.....	45
13.1.	Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka řezné spáry	45
13.1.1.	Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, velikost úhlu úkosu	46
13.2.	Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka řezné spáry	47
13.2.1.	Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, velikost úhlu úkosu	47
13.3.	Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka řezné spáry.....	48
13.3.1.	Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, velikost úhlu úkosu	50
13.4.	Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka řezné spáry	50
13.4.1.	Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, velikost úhlu úkosu.....	51
13.5.	Zinková slitina ČSN EN 1774 - 10 mm, šířka řezné spáry.....	52
13.6.	Zinková slitina ČSN EN 1774 - 20 mm, šířka řezné spáry.....	52
14.	Diskuze	54
15.	Technicko-ekonomické zhodnocení	55
15.1.	Náklad na odpis (amortizace).....	55
15.2.	Náklady na spotřebu vody:.....	55
15.3.	Náklady na abrazivo MESH 80.....	56
15.4.	Náklady na spotřebu elektrické energie:	56
15.5.	Náklady na nejběžněji používané díly:	57
15.6.	Celkové hodinové náklady na provoz stroje:	57
16.	Závěr.....	59
17.	Použitá literatura.....	60
18.	Seznam obrázků	62
19.	Seznam tabulek	63
20.	Přílohy	64

1. Uvod

Technologie vodního paprsku, kdy se využívalo kapalinového media jako nástroje obrábění, je známa již od minulého století. Velký rozmach této technologie nastal v období, kdy některé firmy viděly v tomto způsobu obrábění budoucnost a zkoumaly jeho možné průmyslové využití. První pokusy o použití tlakové vody v průmyslu pro zpracování pevných materiálů byly prováděny ve třicátých letech minulého století. Američtí a sovětské inženýři těžili kámen, rudu a uhlí. Velkým skokem ve využití vysokotlaké vody byl začátek 70. let. Američtí inženýři ve vesmírném a vojenském programu řešili problematiku dělení kompozitních a sendvičových materiálů, potřebných na stavbu raketoplánu. Vyvinuli tedy technologii neovlivňující teplotně dělený materiál, využívající usměrněného vysokotlakého paprsku s abrazivem v kombinaci s číslicově řízeným stolem CNC.

Vzhledem k technologickému progresu, ve kterém se stále zdokonalují vysokopevnostní těžkoobrobitelné materiály a zároveň stále více rostou nároky na kvalitu a ekologičnost procesu se do popředí díky svým pozitivním vlastnostem stále častěji dostává technologie vodních paprsků. Technologie vodních paprsků se řadí mezi tzv. nekonvenční technologie obrábění. Obecně se nekonvenční metody obrábění používají tam, kde z nějakého důvodu nelze použít metody konvenční. Podle typu, vlastnosti a tloušťky děleného materiálu se používají dvě nejpoužívanější a nejrozšířenější metody obrábění, a to jsou čistý vodní paprsek (WJ – Water Jet) a abrazivní (AWJ – Abrasive Water Jet), který obsahuje abrazivo pro zesílení obráběcích schopností. To umožňuje řezat prakticky všechny nekovové i kovové materiály. Vysoká rychlost vytékajícího proudu vody s příměsí abraziva umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a přitom ekologicky. Dnes se tato technologie celosvětově rozšiřuje do všech oblastí průmyslu, kde získává stále vyšší postavení z pohledu možností využitelnosti a efektivity.

2. Cíl práce

Tato diplomová práce se zabývá shromážděním informací z literárních a internetových zdrojů o možných způsobech dělení kovových materiálů. Konkrétně zde je uveden rozbor metod(technologii) řezání vodním paprskem s podrobnějším popisem nejdůležitějších komponentů v systému vodních paprsků. Dále následuje rozdělení technologií kapalinového paprsku vysvětlení principu a metod činnosti vysokorychlostních vodních paprsků a rozbor možných výhod a nevýhod této technologie. Experimentální část je zaměřena na zkoumání naměřených hodnot ze vzorků kovového materiálu. Cílem bylo experimentálně prokázat, jak rozdílná posuvná rychlost abrazivního vodního paprsku ovlivňuje šířku spáry obrobene plochy a zároveň závislost hodnoty šířky řezné spáry na tloušťku a typ materiálu. Zabývá se výpočtem velikosti celkového úhlu úkosu řezné spáry závislé na řezných parametrech a tloušťce materiálů. Nedílnou součástí práce je vyhodnocení naměřených hodnot a zpracování technicko-ekonomického zhodnocení.

3. Historie a vývoj vodního paprsku

První pokusy o použití tlakové vody v průmyslu pro zpracování pevných materiálů byly prováděny ve třicátých letech minulého století. Američtí a sovětsí inženýři těžili kámen, rudu a uhlí. V roce 1935 Vladimír Muchnik, absolvent Dnepropetrovského důlního institutu, vynalezl metodu likvidace uhelných spojů vodním paprskem, v roce 1936 byl tetovan první tryskový stroj v jednom z dolu Donbas a od roku 1939 začaly se objevovat průmyslové hydroliny. V roce 1947, poprvé na světě, vydal Sovětský svaz autorské osvědčení o použití energie řízeného vodního paprsku pro řezání tvrdých materiálů. Základním principem této metody bylo vytvoření toku vody, jehož síla bude vyšší než síla spojovací molekuly v tuhém materiálu navzájem. Zpočátku se připravuje krájení masa v průmyslovém měřítku, i když se předpokládalo, že existují vyhlídky na řezání dalších tvrdých materiálů. V té době byla tato technologie velmi drahá a bylo technicky obtížné dosáhnout tak vysokého tlaku vodního paprsku, takže myšlenka zůstala nápadem. V padesátých letech těžaři zlata v Kalifornii vyprali horninu z jám pomocí hadic, a nemuseli dělat těžkou práci ručně. Zároveň americký vědec Franz Norman studoval možnosti vodního kladívka a jeho použití v dřevozpracujícím průmyslu. Podařilo se mu získat velmi silný proud vody, pomocí něhož bylo možné řezat dřevo. Vodní paprsek, doslova "vystřelující" z otvoru, byl dost silný, ale bohužel krátkodobý a nikdo neviděl vyhlídky v tomto způsobu zpracování dřeva. V roce 1973 známá společnost Flow Industries začala vyrábět brusky. Vyvinuli je Mohamed Hasheesh, který je v současné době vedoucím společnosti. V roce 1979 navrhl přidání granátu (abrazivního) písku do proudu vody, díky čemuž se výrazně zlepšily řezné vlastnosti. Typicky se tento písek používá k výrobě brusného papíru. První prototyp stroje na řezání vodním paprskem se objevil v roce 1980 a v roce 1983 společnost Flow zahájila svou sériovou výrobu spolu s příslušenstvím pro řezání vodním paprskem. Nejdůležitějším impulsem pro vývoj technologií tryskového řezání bylo jeho využití v leteckém a kosmickém průmyslu. Technologie hydroabrazivního řezání tedy existuje již více než 40 let a stále se vyvíjí, existují velké podniky pro vývoj a výrobu hydroabrazivních strojů. [1]

4. Proces a princip řezání

Fyzikální podstata řezání materiálů paprskem kapaliny vychází z úvahy, že paprsek kapaliny pohybující se dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku lze považovat z hlediska jeho účinků za pevné těleso. Proces řezání probíhá ve dvou etapách. V první etapě vzniká působením tlaku kapaliny prohlubeň, která se mění v otvor. V druhé etapě dochází k prohlubování a k vytváření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, čímž dochází v řezaném materiálu k rázovým vlnám, rychlé destrukci materiálu obrobku na hranici zrn a ke vzniku mikrotrhlin. Mikrotrhliny se v důsledku dynamického zatížení rychle šíří a tím dochází k rozrušování obráběného materiálu. K destrukci při řezání dochází také díky turbulentnímu proudění kapaliny ve spáře s účinkem kavitačních bublin. Pro řezání kovů, keramiky aj. se do paprsku kapaliny přidávají brousící zrna, což k popsáným účinkům vodního paprsku ještě významně přispívá. Jako kapalina se používá většinou upravená voda. K vytvoření potřebné rychlosti proudění se uplatňuje tlak 200 Mpa až 650 Mpa. [2]

Technologie obrábění materiálu pomocí vysokoenergetického kapalinového paprsku, často označovaná též jako hydroabrazivní obrábění si vzhledem ke svým mimořádným vlastnostem našla velmi rychle uplatnění v leteckém i kosmickém průmyslu a v důsledku značné univerzálnosti i v celé řadě dalších průmyslových oborů. Uvedená metoda se dnes využívá nejčastěji ve dvou základních provedeních : řezání čistým vodním paprskem (WJM – Water Jet Machining) a řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí (AWJ – Abrasive Water Jet Machining). [2]

5. Rozdělení technologií kapalinového paprsku

Dle technologické specifikace výroby a dle druhu obráběného materiálu je volena procesní kapalina o různých rozsazích tlaku a vzniklý paprsek dále upravován tak, aby bylo dosaženo požadavků, které jsou kladeny na vyráběnou součást. Obecné dělení kapalinových paprsků je zobrazeno na následujícím obr. 2. Vyznačená linie znázorňuje technologii, jež byla použita k nařezání vzorků pro experimentální část této studie

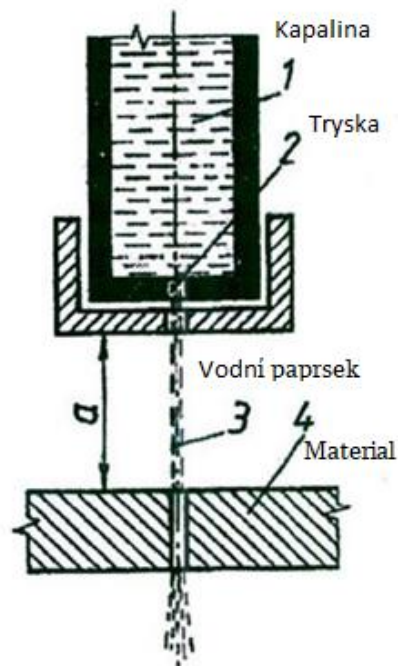
Obr. 1 Rozdělení kapalinových paprsků [3]



6. Řezání čistým vodním paprskem

Řezání čistým vodním paprskem dochází k samotnému řezání pouze působením vodního paprsku o vysoké rychlosti. Pracovní tlak vody se pohybuje v rozsahu od 200 do 650 Mpa. Když proud dopadá na povrch obrobku, erozivní síla vody řeže materiál. Voda v tomto případě působí jako pila a řeže úzkou drážku v materiálu obrobku. Tlak kapaliny je možno plynule regulovat podle potřeb a druhu řezaného materiálu. Zařízení pro řezání čistým vodním paprskem se dnes používá pro řezání měkkých nekovových materiálů jako jsou plast, papír azbestocement, grafitové kompozity, sklotextil, izolace, součásti interiéru automobilů, koberce, potraviny, těsnění, pěna, lamináty, kevlar. [2]

Obr. 2 Technologie WJM [4]



Řezací hlava pro WJM se používá pro obrábění měkkých a málo houževnatých materiálů. Skládá se z tlakové kapaliny a trysky obr. 3. Typická aplikace technologie řezání čistým vodním paprskem uvedena v tab. 2.

Tab. 1 Typická aplikace technologie řezání čistým vodním paprskem

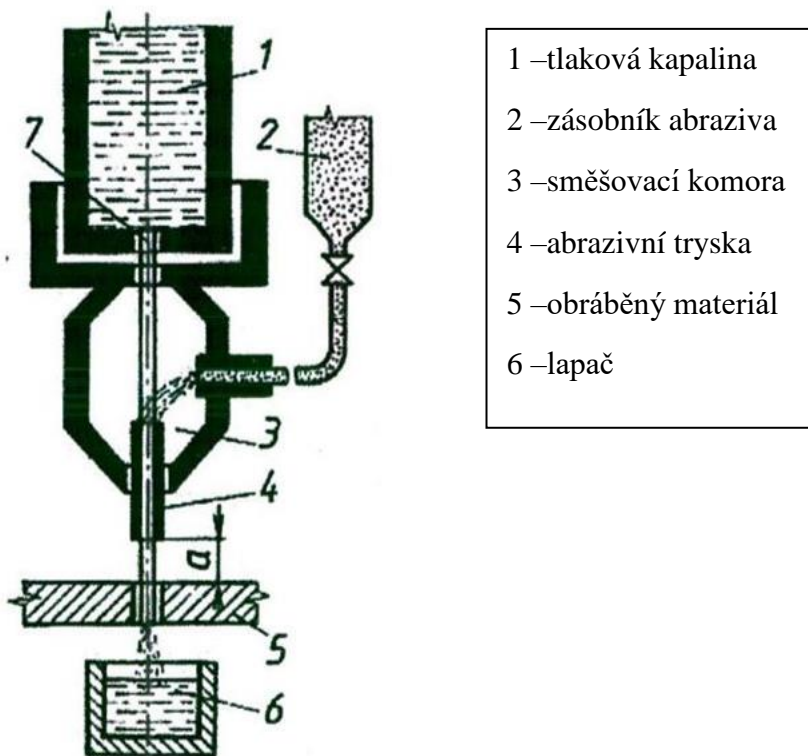
PRŮMYSL	Řezání čistým vodním paprskem
Textilní	Kůže, obuv
Automobilové	Dělení 3D součástek nárazníky, karosérie, přístrojové desky, opěrky, kompozity, polyuretáty, koberce, keramické materiály, pryžové výrobky
Elektrotechnický	Dělení plošných spojů, elektroizolačních materiálů, skla a keramiky.
Letecký průmysl	Dělení keramiky, kompozitů, titanu, interiérových panelů, slitiny hliníku titanu
Potravinářský	Mražené potraviny, husté potraviny, čokoláda, pečivo atd.
Papírenský	Řezání papíru, buničiny, novinového papíru, lepenka

Zdroj: Vlastní zpracování

7. Řezání abrazivním vodním paprskem

Při této variantě se zvyšuje účinnost paprsku přimísením abrazivních zrn do proudu vody. Po vytvoření čistého vodního paprsku je do řezací hlavy prostřednictvím venturiho efektu přidáno abrazivo, které je smícháno s vodou a výsledkem je abrazivní vodní paprsek, který dokáže řezat tvrdé materiály, jako je kov, keramika, kámen, sklo nebo kompozitní materiály. Používají se jako syntetické, tak i přírodní abrazivní materiály jako jsou křemičitý písek používaný při výrobě skla, korundová nebo SiC zrna používaná k výrobě brusných nástrojů, granát, olivín a jiné o zrnitosti (0,2 - 0,5) mm.

Obr. 3 Technologie AWJ [4]



Výstupní abrazivní tryska musí odolávat vysokým abrazivním účinkům a je vyráběna z slinutého karbidu. Při použití běžných parametrů životnost abrazivní trysky může být 100 hodin. Rychlost řezání se obvykle stanovuje optimalizační zkouškou. Vzdálenost výstupní trysky od materiálu se volí co nejmenší z důvodů minimální šířky spáry a tím i lepší dosahované přesnosti. [2]

Řezací hlava pro AWJ (abrazivní vodní paprsek) se používá pro obrábění tvrdých a houževnatých materiálů. Skládá se podobně jako u WJ ale řezací hlava pro AWJ obsahuje navíc směšovací komoru a zaostřovací trubici obr. Voda je vedena tlustostěnným potrubím ze zásobníku. Přes filtry do vysokotlakého čerpadla s výkonem (19 kW až 150 kW) a průtokem (0,16 l/min až 12,7 l/min). Tlak se generuje přes multiplikátor což je zařízení používané na zvýšení tlaku vody. Obvykle na tlak 200 MPa až 450 MPa (v případě potřeby lze dosáhnout tlaku až 700 MPa). Poté prochází voda přes akumulátor, který tlumí pulzy vzniklé při stlačování vody multiplikátorem. Po vyrovnání pulzů, tlaku a rychlosti postupuje stlačená voda přes dopravní systém, který se skládá z vysokotlakých, tlustostěnných trubek, do řezací hlavy. Voda v řezací hlavě prochází primární (vodní) tryskou, ve které se vytváří paprsek o průměru 0,2 mm až 0,4 mm. Průměr vodního paprsku je odvozen od průměru použité trysky. Proud vody vstupuje do směšovací komůrky, kde se obaluje abrazivem. Abrazivo je nasáváno do směšovací komůrky vodou vytvářející podtlak, které se do řezací hlavy dopravuje přes dávkovač z zásobníku. Paprsek vody obalený abrazivem prochází sekundární (abrazivní) tryskou a vzniká řezací „nástroj“. S tímto paprskem lze řezat všechny běžné materiály o tloušťce až do 200 mm. V extrémních případech je možné řezat materiály až o tloušťce 800 mm (dle materiálu). Použité abrazivo je možno recyklovat pro další použití pro řezání vodním paprskem, případně otryskávání apod. Jedná se o absolutně inertní materiál, který lze použít pro různé stavební výplně apod. V současné době také probíhají zkoušky s přidáváním tohoto abraziva např. do betonu, asfaltových směsí atd. [5]. Typická aplikace technologie řezání vodním paprskem s příměsí abraziva uvedena v tab. 3.

Tab. 2 Typická aplikace technologie řezání vodním paprskem s příměsí abraziva

	Řezání vodním paprskem s příměsí abraziva
Strojírenský průmysl	řezání titanu, wolframu, tantalu, uranu, velmi tvrdých a těžkoobrobitelných materiálů (slnuté karbidy, superslitiny na bázi Ni nebo Co), kompozitů, plechy z oceli, kovů
Stavební	Beton, železobeton, sádrové bloky, tvrdé dlažby, kámen, žula, mramor
Sklářský	Sklo, obrněné sklo, keramika
Jaderná energetika	dekontaminace a odstraňování ochranných železobetonových vrstev v zařízeních pro jaderné elektrárny
Chemický	Obrábění výbušných látek, plastických hmot, těžkoobrobitelných materiálů

Zdroj: Vlastní zpracování

7.1. Vlastnosti a druhy abraziva

Granátové abrazivo se používá u 90 % všech vodních řezacích strojů díky svým řezacím schopnostem, homogenitě, ceně, menšímu opotřebení řezací hlavy a ekologické a zdravotní nezávadnosti. Velikost částic se při řezání vodním paprskem obvykle pohybuje v rozmezí 0,07 až 0,3 mm, nejběžnější hodnota je 0,18 mm. Běžně se zrnitost abraziva udává v jednotkách MESH což označuje počet ok síta na délku jednoho palce (např. udávaná velikost zrna MESH 80 odpovídá velikosti zrna cca 0,180 mm). Čím vyšší hodnota mesh, tím jemnější jsou zrna abraziva. Zrnitost mesh 320 jsou částice podobné prachu. [6]

Výběr správného abraziva je velmi důležitý, protože náklady na abrazivo představují téměř největší položku při řezání abrazivním vodním paprskem – AWJ. Při výběru vhodného abraziva většinou volíme kompromis mezi následujícími faktory:

- tvrdost abraziva – tvrdší abrazivo má vyšší účinnost při řezání, přičemž dochází k rychlejšímu opotřebení abrazivní trysky,
- velikost abrazivních zrn – řezáním menšími částicemi se dosahuje nižší drsnost povrchu, ale úměrně se prodlužuje čas potřebný k prořezání materiálu. Jemná zrnitost 100 a 150, střední zrnitost 60 a 80, a nebo hrubá zrnitost 16 a 36.
- tvar abrazivních zrn – vyznačuje se kruhovitostí, použitím kulatějších zrn docílíme menší drsnost povrchu na úkor dosažené maximální hloubky řezu,
- hmotnostní tok abraziva – se zvyšujícím se hmotnostním tokem se zvyšuje hloubka řezu, protože se zvyšuje kinetická energie paprsku, při překročení kritického hmotnostního toku abraziva maximální dosahovaná hloubka řezu klesá (uvádí se např. v g/min),
- ekologické vlastnosti abraziva – ne všechny technicky a ekonomicky vhodné abraziva splňují bezpečnostní požadavky a požadavky na zdravotní nezávadnost,
- cena abraziva – levnější abraziva mají menší účinnost, ale ta není v lineárním vztahu k charakteristice produktivity. [7]

Tab. 3 Vlastnosti abrazivních materiálů [8]

abrazivní materiál	velikost částic (MESH)	materiálové vlastnosti				
		kruhovitost	kulatost	tvrdost podle KNOOPA	relativní tvrdost	Hustota
granát					1	

	16–250	0,48	0,78	1350	(základní)	3,8
křemičitý písek	16–120	0,57	0,78	700	0,7	2,5
karbit křemíku	80–200	0,31	0,75	2500	50	3,2
ocelové piliny	16–100	0,55	0,82	400–800	2	7,5
měděné piliny	16–100	0,5	0,78	1050	0,4	1,5
sklo	16–100	1	1	400–600	0,5	2,5

7.1.1. Recyklace abraziva

Již při výběru granátu, by se mělo dbát na jeho možnou budoucí recyklaci. Pro potřeby recyklace se používají tzv. recyklační jednotky. Vzhledem k tomu, že při řezném procesu se efektivně využívá přibližně 30 % až 50 % abraziva, je recyklace smysluplná. Recyklační jednotky fungují tak, že z lapače vody se pomocí membránového čerpadla odsaje směs abraziva a vody. Tato směs prochází přes síta vibračního separátoru, kde dochází k prvotní separaci. Abrazivo, které projde sítem, se dále nepoužívá a putuje do odpadní nádrže, zbylé abrazivo zachycené sítem je přepravováno do sušičky, kde se suší. Již usušené abrazivo prochází třídičkou, která rozděluje jemná a hrubá zrna. Roztříděné abrazivo pomocí vzduchového dopravníku putuje do zásobníku, připravené k opětovnému použití.

Recyklační jednotky jsou velmi nákladné, proto se používají v případě velké spotřeby abraziva, která se pohybuje kolem 30 a více tun abraziva za měsíc. Podniky nevlastnící recyklační jednotku použité abrazivo odvázejí na skládky nebo jej nechávají recyklovat u firem specializující se na problematiku abraziv. [6] [9]

7.1.2. Stabilizátor proudění

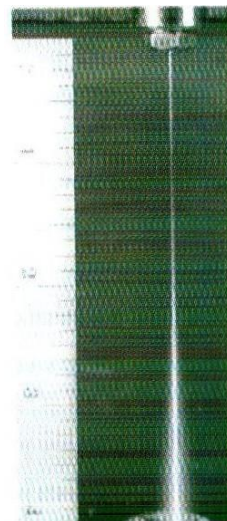
Stabilizátor proudění (aditivum do vody) - jsou to přísady různých polymerů s lineárními molekulami. Roztok vody s polymery typu PAA (polyakrylamid) nebo PEO (polyetyloxyd) vytváří souvislý koherentní paprsek ještě ve velké vzdálenosti od trysky viz. obr. 5, 6.

Paprsek je pak při řezání účinnější, energie koncentrovanější a paprsek si zachovává kompaktní jádro (polymery zabraňují nadměrné turbulenci proudění). Úprava vody polymery se vyžaduje např. při vytváření ostrých hran na dělených dílcích. [6]

Obr. 5 Proudění bez stabilizátoru [7]



Obr. 4 Proudění s stabilizátorem [7]



8. Výhody a nevýhody řezání vodním paprskem

Velkou výhodou řezání vysokotlakým vodním paprskem je fakt, že celý řezný proces probíhá bez tepelného ovlivnění řezaného materiálu; jde o takzvaný studený řez. Obráběný díl nevykazuje fyzikální, chemické ani mechanické změny a je následně snadno obrobitelný. Při využití této technologie navíc nevznikají v řezaném materiálu žádné mikrotrhliny, neboť silové působení paprsku je minimální (nedochází ani k nadměrnému prořezu material, často lze využít i společné řezy). Nesporným benefitem je dále fakt, že tato metoda je šetrná vůči životnímu prostředí, během procesu nedochází ke vzniku žádných ekologicky nežádoucích zplodin. Spotřeba vody při řezání je malá, záleží v podstatě na tlaku a velikosti použité řezací trysky. Odpadní voda se pomocí sedimentace vyčistí. Abrazivní materiály jsou netoxické a po recyklaci se dají znovu použít, případně bez problémů uložit na skládku odpadních materiálů. Vodní paprsek dokáže řezat i skleněné tabule či lepené bezpečnostní sklo, Jediným problémem je řezání tvrzeného skla, které tímto způsobem řezat nelze. Při průstřelu vodním paprskem totiž dochází k jeho roztržení (jde v podstatě o stejný efekt, jako když odlétající kamínek rozbije přední sklo automobilu). Pokud bychom na závěr shrnuli výhody a nevýhody této technologie, došli bychom k následnému přehledu:

Výhody:

- řezání vodním paprskem probíhá bez dotyku nástroje a materiálu
- nedochází k tepelnému namáhání materiálu a ke vzniku vnitřního pnutí
- řezy je možné provádět v těsné blízkosti hran a minimalizovat tak odpad
- nedochází ke vzniku mikrotrhlin v okolí řezu
- řezání vodním paprskem nezpůsobuje vznik poléťavého prachu z děleného materiálu
- vodním paprskem lze řezat i materiály měkké a lepivé, nebo drolící se a křehké
- je také možné provádět kvalitní řezy vrstvených materiálů s různými fyzikálně- chemickými vlastnostmi
- nedochází k chemickému ovlivnění řezaného materiálu
- nevznikají žádné škodlivé plyny ani výpary
- výsledkem je kvalitní řez bez otřepů
- řezná hrana často nevyžaduje žádné další opracování

- je dosahována vysoká přesnost řezu
- díky využití společných řezů dochází k výrazné úspoře materiálu i při řezání materialu větší tloušťky
- nedochází k porušení povrchové úpravy materiálu (leštění, broušení...)

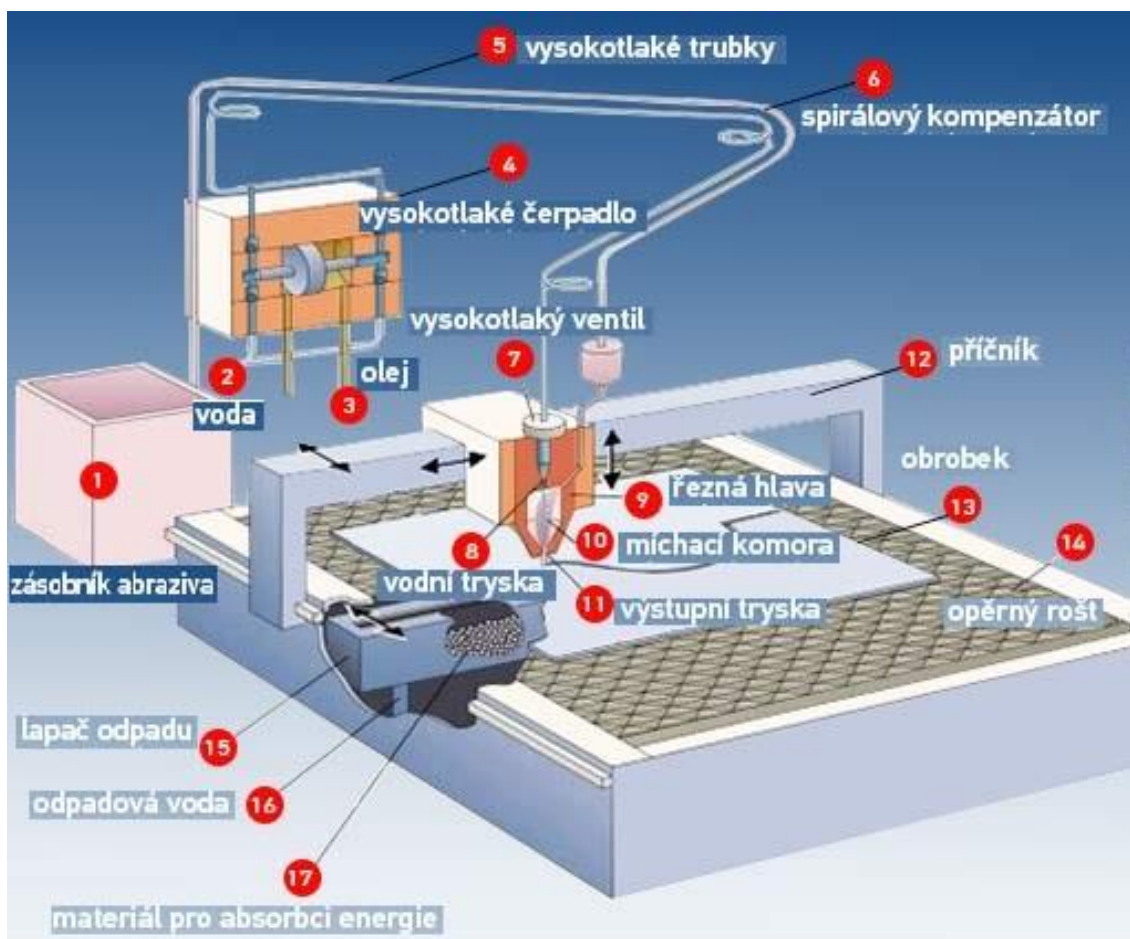
Nevýhody:

- nevyhnutelný kontakt řezaného materiálu s vodou
- některé, zejména kovové materiály je nutné po řezání vhodně ošetřit
- delší vysoušení u nasákavých materiálů
- možnost změny barvy či znečištění některých materiálů [5]

9. Konstrukce a mechanismy zařízení

Mezi hlavní komponenty zařízení pro řezání vodním paprskem patří vysokotlaké vodní čerpadlo, multiplikátor, vysokotlaký systém trubek, akumulátor tlaku, filtry, dvoucestný přepouštěcí ventil, řezací hlavice, posuvy v jednotlivých osách, nádoba na zachytávání vody a nečistot, opěrný rošt, úprava vody viz. 7.

Obr. 6 Schéma zařízení vodního paprsku



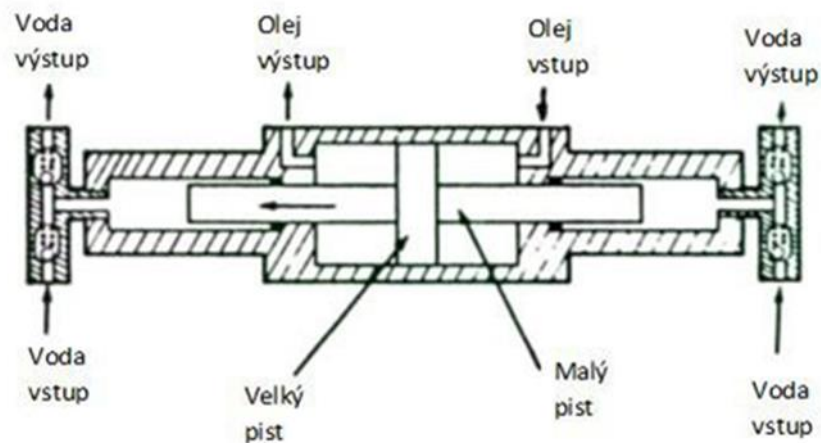
9.1. Rotační čerpadlo s přímým pohonem

Rotační čerpadla s přímým pohonem lze najít ve více než 20 % systémů s vodním paprskem ve světě. Tato čerpadla na rozdíl od multiplikátorů nemají hydraulický okruh. Někdy se označují jako triplexová čerpadla (v případě tří pístů), kde elektromotor otáčí klikovou hřídeli se třemi písty a ty generují po stlačení vody ve válcích velmi vysoký tlak. Běžný pracovní tlak čerpadel s přímým pohonem jsou na úrovni do 320 MPa při hydraulickém výkonu až 180 kW. Současné světové maximum tlaku z hlediska těchto vysokotlakých zařízení je 380 MPa [10]

9.2. Multiplikátor (zesilovač tlaku)

Tato čerpadla tlačí vodu pomocí tzv. multiplikačního efektu. Pomocí multiplikátoru získává zařízení na řezání vodním paprskem vysoké tlaky vody. Elektromotor pohání hydrostatický olejový generátor, který dodává hydraulickou kapalinu (olej) do primárního nízkotlakého hydraulického obvodu. Rozvaděč vede střídavě kapalinu do obou nízkotlakých sekcí multiplikátoru. Při pohybu pístu multiplikátoru vpravo je nasávána kapalina do levého prostoru vysokotlaké části multiplikátoru. Kapalina je před vstupem do multiplikátoru vedena přes filtr. Při pohybu pístu multiplikátoru vlevo se uzavře sací ventil a otevře se výtlačný ventil, kterým je nyní vedena vysokotlaká kapalina do akumulátoru a potom do trysky (řezací trysky). Úkolem akumulátoru v obvodu je vyrovnávat tlakové pulsace vznikající při změně orientace pohybu pístu i stlačitelnost vody. Při pohybu pístu vlevo je kapalina nasávána do pravého prostoru vysokotlaké části multiplikátoru a cyklus se takto opakuje obr. Multiplikátor zvyšuje tlak primárního okruhu hydraulického oleje poměrem pístů 20:1. Například olej o tlaku 20 MPa natlakuje při poměru ploch pístů 20:1 vodu na tlak 410 MPa. [9]

Obr. 7 Schéma multiplikátoru tlaku



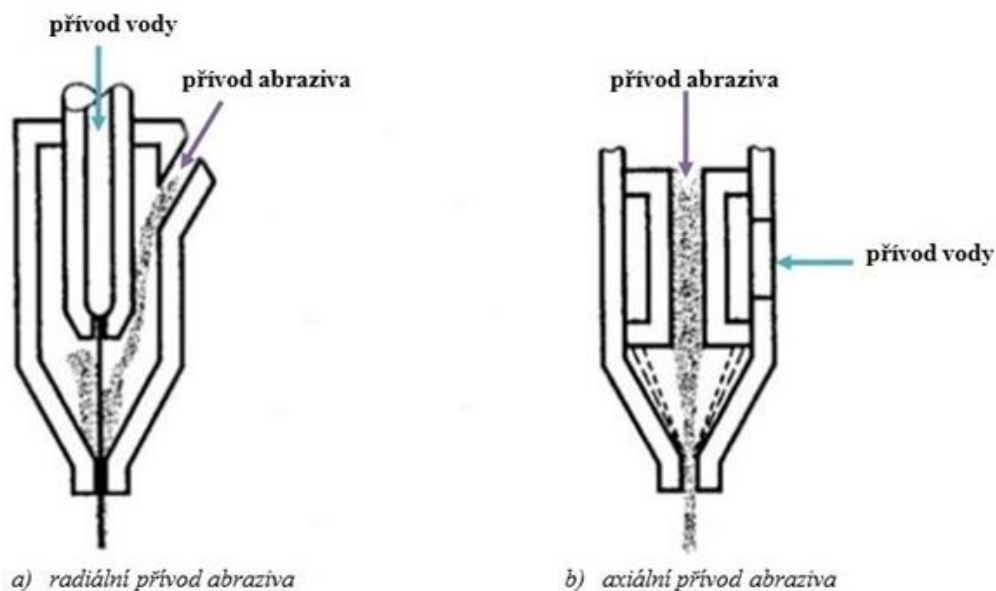
9.3. Řezací hlava

Řezací hlava vodního paprsku je místem, kde je vysoký tlak vody převeden na vysokou rychlost proudu při průchodu tryskou z polodrahokamu. Při řezání standardním vysokorychlostním vodním či abrazivním paprskem je proud udržován ve správné pozici vůči řezanému materiálu, což je umožněno vhodným nasměrováním řezné hlavy. Potom vysokorychlostní vodní proud, dosahující nadzvukových rychlostí, urychluje abrazivní částice a eroduje materiál. Dokáže pak řezat tvrdé materiály, jako jsou kovy, sklo, kámen a kompozity [10]. Při řezání abrazivním vodním paprskem je součástí hlavy také směšovací komora a zaostřovací trubice. Někdy se ve spojení s řeznou hlavou hovoří také o on-off ventilu. Tento ventil je v místě těsně nad tryskou a využívá jistý typ jehly a sedla a umožňuje operátorovi nebo řídicímu systému stroje vodní paprsek spustit a zastavit [10].

U řezacích hlav pro abrazivní vodní paprsky rozlišujeme řezací hlavy pro čistý vodní paprsek a řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsek s radiálním nebo axiálním přívodem abraziva. [4] Na obr. 10.2 můžeme vidět dva typy přívodů abraziva, přičemž obr. 9 a) představuje konstrukčně jednodušší typ, který je v dnešní době mnohem rozšířenější a využívá se u technologie AWJM. Dokonce jej lze použít i pro čistý vodní paprsek. Tryska na obr. 9 b) byla zkoumána na Cranfield University ve Velké Británii, jednalo se však pouze o zkušební trysku, která nebyla komerčně ve větší míře využita. Avšak axiální typ přívodu abraziva má jistou výhodou v lepším promíchání

abraziva s pracovním médiem, což vede k lepším řezným vlastnostem a menšímu opotřebení obvodu trysky. [11]

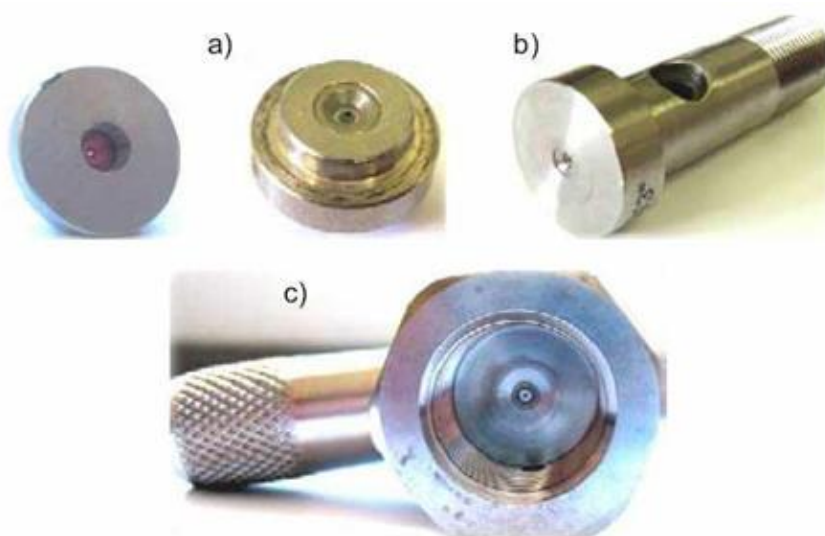
Obr. 8 Řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsky [31]



9.4. Vodní tryska

Nástroj pro řezání vodním paprskem se nazývá tryska viz. obr. 10. Na trysce je závislá kvalita řezu, je to tedy velmi důležitá část stroje. Trysky jsou jiné pro řezání čistým vodním paprskem a pro řezání vodním paprskem s přídavkem abraziva. Kapalina o vysokém tlaku není přiváděna přímo do trysky, ale do řezné hlavy. Vodní trysky jsou vyráběny ze safíru, slinutého karbidu, rubínu nebo diamantu.. Životnost trysek při nadzvukové rychlosti výtoku kapaliny (1000 m/s) je přímo úměrná množství minerálů obsažených ve vodě a je v rozmezí 50 - 500 hodin. Diamantová tryska má několikanásobně delší životnost, její výhodou je, že po zanesení trysky nečistotami se může vyčistit a používat znovu. Safírová tryska má životnost přibližně 200 hodin a má asi desetinovou cenu než diamantová. [4]

Obr. 10 a) safírová a diamantová vodní tryska v montážním lůžku, b) diamantová tryska ve vyměnitelné vložce, c) diamantová tryska vetknutá v těle řezací hlavy



9.5. Čistící filtry

Filtrace vody je jedna z hlavních procesů této technologie. V kapalině jsou přítomny pevné částice, které urychlují opotřebení zařízení. Jedná se hlavně o stěny válců a trubek. Dále ucpávají ventily nebo v kontaktu s těsněním omezují jeho správnou funkci. Je možné i zanesení trysky právě rozpuštěnými pevnými částicemi a tím způsobí ztrátu její funkčnosti. [4] Hlavní funkcí je odstraňovat nečistoty z přiváděné pracovní kapaliny a současně přivádět kapalinu do vysokotlakého čerpadla. Filtry můžeme dělit na dva druhy. Nízkotlaké a vysokotlaké. Nízkotlaká filtrace se využívá u vstupu nízkotlaké vody do multiplikátoru. Filtry jsou vyrobeny na bázi syntetických vláken nebo bavlny. Vysokotlaký filtr se nachází před řezací hlavou. Tlak vody je zde již velmi vysoký, z toho důvodu se jako materiál volí kovové filtry na bázi slinutého karbidu či mikrosítek.

Těsnění udržuje celkovou stabilitu tlaku v systému, takže jsou na ně kladeny vysoké nároky, současně je to také nejvíce opotřebovaná část celého systému. U konstrukce technologie vodních paprsků se těsnění využívá pro utěsnění vysokotlaké komory multiplikátoru, kde se tlak pohybuje v hodnotách 200 MPa až 500 MPa, je tedy nutné vybrat těsnění s nízkým průsakem, minimálním třením a co nejvyšší životností. Dále se využívá těsnění s mezikroužky, které funguje na principu částečné deformace mezikroužku a následném utěsňování povrchů válce a pístu. [4] [9]

9.6. Zaostřovací trubice

Zaostřovací trubice je umístěna na samém konci řezné hlavy. Používá se při řezání abrazivním vodním paprskem. Když voda prochází tryskou, tlak vody se mění na rychlost proudu. Vodní paprsek dosahující nadzvukové rychlosti pak vstupuje do směšovací komory, kam je pomocí Venturiho efektu přisáváno abrazivo. Obě látky procházejí zaostřovací trubicí a opouštějí hlavu jako směs vody, abraziva a malého množství vzduchu [7]

Zaostřovací trubice má vnitřní průměr 0,4–1,8 mm a je 22–150 mm dlouhá. Je vybavena vnitřním vstupním kuželem. Trubice má nejčastěji vnitřní průměr 1 mm, je cca 100 mm dlouhá. Obvykle se do ní používá granátový písek o zrnitosti Mesh 80. Při obvyklém způsobu řezání se u trubice vyrobené z vysoce kvalitního materiálu, opotřebením rozšíří trubice přibližně o 0,025 mm za 6 až 8 hodin, a toto opotřebení je symetrické [10]

9.7. Akumulátor

V okamžiku, kdy v multiplikátoru dochází ke zpětnému pohybu pístu, současně dojde ke změně tlaku ve válci. Tlak rapidně klesá, až k nule. V zápětí zase rychle stoupá na maximum. Při tomto poklesu tlaku, který celý probíhá v desetinách sekundy, nastává krátký časový interval, po který je přerušen souvislý tok řezné kapaliny a tím také vlastní proces řezání. Na eliminování tohoto nežádoucího jevu se do systému zařízení pro obrábění vodním paprskem přidává akumulátor. Akumulátor představuje dutý silnostěnný válec určitého objemu, v kterém je stlačena kapalina na pracovní tlak, který využívá stroj. V okamžiku zpětného pohybu pístu, při náhlém poklesu tlaku, expandující kapalina a část z ní proudí do řezací hlavice z důvodu vyrovnání poklesu tlaku. Tím je zabezpečeno nepřetržitost toku kapaliny. [12]

9.8. Zásobník abrazivního materiálu

Většinou se jedná o nádobu, která pojme, až 400 kg brusiva. Je opatřen seřiditelným výstupním dávkovačem. Z tohoto prostoru jsou jednotlivá zrna nasávána na principu ejektoru do směšovací komory pracovní řezací hlavy [13]

9.9. Vysokotlaké potrubí

Přivádí tlakovou pracovní kapalinu k pracovní řezací hlavě. Nejčastěji se využívá vinutých a pancéřových hadic. Vlastní konstrukci potrubního zařízení předchází stanovení připojovacích rozměrů součástí potrubí a určení výpočtových hodnot. Některé části návrhu potrubí jsou vázány na předpisy a normy. Jiné jsou ponechány na vůli konstruktéra. Materiál pro výrobu potrubí se volí podle požadavků pevnostních a provozních. Výpočty pevností jednotlivých částí potrubí je aplikací výpočtu tlakových nádob a některých strojních součástí [14]

9.10. Operační systém

Software je velmi důležitým komponentem pro provoz zařízení vodního paprsku. Většina jeho výrobců nabízí softwarové balíčky, které automaticky upravují řezné parametry v závislosti na typu materiálu, řezné rychlosti a tlaku vody. V moderních systémech musí obsluha zadat pouze základní parametry: typ materiálu, tloušťku a řeznou rychlost. Pro zajištění správné kvality řezu program změni provozní parametry. Mezi často využívaný řídicí systém v technologii vysokotlakého vodního paprsku patří iMSNC firmy Microstep. Řídicí systém iMSNC je jedním z nejdokonalejších ovládacích systémů pro CNC řezací zařízení viz obr. 11. Systém je snadno ovladatelný, přístupný pro uživatele a spolehlivý pro činnost CNC řezacích strojů prostřednictvím moderních rozhraní uživatele: nezávislá konzole obsluhy s TFT dotykovou obrazovkou a s jedním nebo dvěma ovládacími panely s LCD displeji na stranách portálu. Pro dosažení maximálního využití a flexibility provozu stroje, nabízí nezávislá konzole obsluhy možnost připravovat a editovat řezací plány současně s procesem řezání. [15]

Obr. 9 Řídicí systém iMSNC



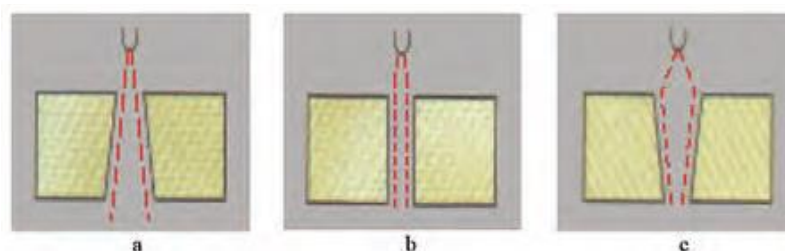
9.11. Venturiho efektu

Jedná se o efekt, kdy při vysoké rychlosti proudící kapaliny nebo jiného média vzniká při přechodu ze širší do užší části trubice podtlak. Při abrazivním řezání vodním paprskem dochází průchodem proudu čisté vody přes širší směšovací komoru do úzké zaostřovací trubice k Venturiho efektu. [7] Abraziva jsou následně vlivem Venturiho efektu vtažena do směšovací komory, urychlena a vystřelena ze zaostřovací trubice jako kulka z pušky, čímž vzniká abrazivní vodní paprsek. [10]

10. Kvalita povrchu řezu

Kvalita opracovaného povrchu závisí na několika faktorech. Rychlost řezného procesu ovlivňuje hlavně tlak vody, průměr trysky (0,003 mm až 0,4 mm) a rychlost proudění. Vzdálenost trysky od povrchu je dalším z faktorů ovlivňujících kvalitu opracovaného povrchu. Pokud je tryska příliš blízko povrchu, může hrozit uražení trysky v případě, že se řezá vlnitý materiál a nepoužívá se výškový senzor. Pokud je tryska příliš daleko od povrchu, dochází k rozptylu vodního paprsku s abrazivem a tím ke znehodnocení povrchu hran řezaných částí. Vzdálenost trysky a obrobku při řezání WJM se pohybuje v rozmezí 2–70 mm. Při řezání AWJ se tato vzdálenost pohybuje v rozmezí 2–11 mm. ($\pm 0,1$ mm). Při řezání vodním paprskem vzniká většinou řezná mezera s úkosem 1–1,5°. Tvary řezné mezery jsou na obrázku 12. Při velmi pomalém řezu nebo při řezu v měkkém materiálu stihne paprsek „probrousit“ svou přirozenou kuželovitou stopu, viz obr. 12 a. Při optimální rovnováze mezi rychlostí řezu, odolností a tlouškou materiálu je paprsek udržen po celou dobu průchodu materiálem ve válcovitém tvaru a úkos nevzniká, viz obr. 12 b. Při velmi rychlém řezu nebo řezu v odolnějším materiálu nestihne paprsek „probrousit“ materiál ani ve svém vstupním průměru a řez se směrem dolů uzavírá, viz obr. 12 c. [16]

Obr. 10 Tvar řezné mezery [17]



Pronikající paprsek do obrobku při vzájemném tření ztrácí svoji energii a vychyluje se z původního směru. Čím vyšší bude rychlost posuvu, tím bude i drsnost povrchu vyšší. Naopak při nižší posuvové rychlosti lze dosahovat kvalitnějšího povrchu. Stupeň kvality řezných ploch a jejich charakter je uveden v obr. 13 a v tabulce 5. Kvalitu povrchu lze hodnotit podle kvalitativních stupňů kvality řezu obr. 11.2. Nepříznivým faktorem při dosahování nižší drsnosti je vzrůstání výrobních nákladů. Technologie využívající vysokotlakého vodního paprsku standardně pracuje s přesností $\pm 0,1$ mm a opakovatelnou přesností $\pm 0,05$ mm. Z důvodu potřeby snížení výrobních nákladů při

dosahování požadované kvality, výrobci CNC řezacích strojů pro řezání vodním paprskem přišli s inovačními technologiemi, které požadované kritéria nejenže splňují, ale v mnoha oblastech přinášejí i nové možnosti využití vodního paprsku. Firma Flow nabízí technologii *Dynamic Waterjet* a firma PTV nabízí *ProgressJet*. Pomocí těchto moderních technologií, jak uvádějí výrobci, lze dosahovat tvarové přesnosti $\pm 0,04$ mm. Běžně dosahované drsnosti jsou kolem Ra 6,4 μm , obtížněji dosahované jsou kolem Ra 3,2 μm a ve specifických případech i nižší drsnosti. [12]

Tab. 4 . Stupeň kvality řezných ploch [18]

Kvalitativní stupeň	Základní charakteristika	Drsnost Ra* v horní kontuře	Drsnost Ra* ve spodní kontuře	Tvarová přesnost mm* v horní kontuře	Tvarová přesnost mm* ve spodní kontuře	Úkos
Q5	Nejlepší řez	pod 3,2	cca 3,2	+/-0,1	+/-0,1	Většinou mírný podřez
Q4	Kvalitní řez	cca 3,2	cca 6,3	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	Většinou minimální
Q3	Střední řez	cca 4,0	do 12,5	$\pm 0,15$	le typu a tl. mat.	Dle typu a tl. mat.
Q2	Hrubý řez	cca 4,0	do 25	$\pm 0,2$	le typu a tl. mat.	Dle typu a tl. mat.
Q1	Dělicí řez	cca 4,0-6,3	do 40	$\pm 0,2$	výrazně nepřesné	Výrazný úkos do +
(*) Hodnoty jsou pouze orientační a podle typu materiálu se mohou lišit						

Obr. 11 Kvalitativní stupně řezu



Drsnost povrchu je závislá na materiálu obrobku, velikosti zrna, a typu brusiva. Materiál s vysokou rychlostí odstraňování vytváří velkou drsnost povrchu. Snížení drsnosti povrchu při menší velikosti zrna souvisí s menší hloubkou řezu a nedeformovaným průřezem třísky [3]

10.1. Řezná rychlost

Aby hrany řezaného materiálu měly hladké linie a minimální žebrování, je důležité správně nastavit rychlost řezání vodním paprskem, která spočívá v udržování hlavy stroje nad povrchem. Tento parametr se nastavuje na základě typu a struktury výrobku, jeho tloušťky a použitého brusiva. Hlavním vizuálním indikátorem bude drážka s úhlem 90 stupňů na každé straně.

pracovního tlaku na dosaženou hloubku řezu a výslednou kvalitu povrchu u různých materiálů. Zároveň ověřit závislost výšky trojúhelníkového útvaru „nosu“, vznikajícího při vycházení paprsku z řezu, na posuvové rychlosti. Na zkušebním vzorku bylo provedeno celkem 12 řezů, čímž se získaly jednotlivé hranoly. Na nich byla nejprve měřena hodnota výšky trojúhelníkového útvaru „nosu“ vzniklého nedořezáním. Při zkouškách byl plynule zvyšován tlak od hodnoty 100 MPa až do hodnot 400 MPa a rychlost posuvu 500 až 750 mm. Výsledky experimentu potvrdili hypotézu, že hydroabrazivní paprsek se chová jako nástroj s tvarovou pamětí a při vycházení z řezu má charakteristické překmitnutí, způsobující sledovaný útvar „nos“. Potvrdilo se také, že posuvová rychlost řezného paprsku s abrazivem má vliv na výšku tohoto nosu. Jedná se o závislost přibližně lineární s rostoucí tendencí. Na základě experimentů byl ověřen přibližně lineární vztah mezi pracovním tlakem a řeznou hloubkou v určitém rozsahu tlaků a závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezného paprsku. Velká rychlost posuvu se projevila také kuželovitostí.

Nové systémy vyřezávání tvarů odstraňují však i tyto nedostatky a posouvají tak technologii WJM a AWJ o další krok dopředu. Mezi tuto systémy patří především systém vyřezávání tvarů Dynamic Waterjet firmy FLOW a systém ProgressJet firmy PTV.

10.2.1. Dynamic Waterjet

Problematiku kvality povrchu v místě řezu řeší systém vyřezávání tvarů Dynamic Waterjet obr. 15. DWJ je patentovaná technologie firmy Flow, která zvyšuje rychlost řezání 2 až 4x a současně snižuje toleranci rozměrů u hotových obrobků. Vodní paprsek při řezání vysokou rychlostí způsobuje dvě chyby: zpoždění paprsku a úkos. Zpoždění paprsku je situace, kdy paprsek řezaný obrobek opouští v jiném bodě, než ve kterém do něj vstupuje. Úkos je klínovitý tvar řezu. Zpoždění i úkos lze minimalizovat zpomalením paprsku (obvykle na 15 až 20 % maximální řezné rychlosti), ale nelze je zcela eliminovat. Tento systém se skládá z nově vyvinutého pohybového systému a z nových matematických modelů řezání. Aplikace, u kterých byla dosavadní konvenční technika příliš nepřesná, příliš pomalá nebo příliš drahá, se se systémem DWJ stávají pro řezání paprskem vody zajímavé. Tento nový revoluční postup řezání otevírá nové trhy jako je výroba nástrojů a forem, zhotovování velmi přesných součástí pro letecký průmysl, Zde se v minulosti používal většinou

laser, elektroerozivní drátová metoda nebo vysekávání. Systém DWJ s aktivní kontrolou tolerance vyrábí přesnější součásti při výrazně vyšších rychlostech řezání, než při klasickém dvourozměrném řezání. I u tlustých materiálů se za odpovídajících podmínek dosahují tolerance $\pm 0,04$ mm. V přímém porovnání s drátovým řezacím systémem dosahuje DWJ, podle geometrie dílů a materiálu, až o 50 % nižší výrobní náklady. Rychlost řezání u DWJ může být o 8 až 10 % vyšší. Protože při řezání vodním paprskem lze řezat pružně a jednoduše i malé poloměry a komplexní kontury, má rychlejší systém DWJ podstatné přednosti i ve srovnání s frézováním. Systém Dynamic Waterjet zajišťuje vysokou rychlost řezání tím, že automaticky naklání řezací hlavu na stranu, takže veškerý úkos je na straně odřezku, a také mírně také dopředu, čímž se kompenzuje zpoždění paprsku. Tato kompenzace probíhá automaticky na pozadí provozu stroje. Operátor nebo programátor nemusí náklonové úhly programovat, o to se stará řídicí systém. Náklon je průběžně upravován podle rychlosti řezání – např. u rohů a oblouků s přesnými rozměry hlava zpomalí. [10]

10.2.1.1. Princip

Software, který používá Dynamic Waterjet identifikuje řeznou plochu a určí jí příslušný počet stupňů. Je-li úkos plochy menší nebo roven přiřazenému úhlu plochy, bude nastavena rychlost zjištěná v akceleračních polích rozvinutého modelu dialogu. Je-li úkos plochy větší, rychlost se stanoví na základě matematického vztahu (rovnice). Tento vztah nastaví rychlost řezání na hodnotu mezi hodnotou nalezenou na základě rozvinutého modelu dialogu a rychlostí v procentech přiřazenou objektu, který plochu obsahuje. Systém DWJ tedy určí orientaci obráběcí hlavy s ohledem na vyloučení zkosení a tím zaručí zvýšení přesnosti obrobku. [10]

Obr. 13 Dynamic Waterjet firmy Flow



Zdroj: <https://www.flowwaterjet.cz>

10.2.2. ProgressJet

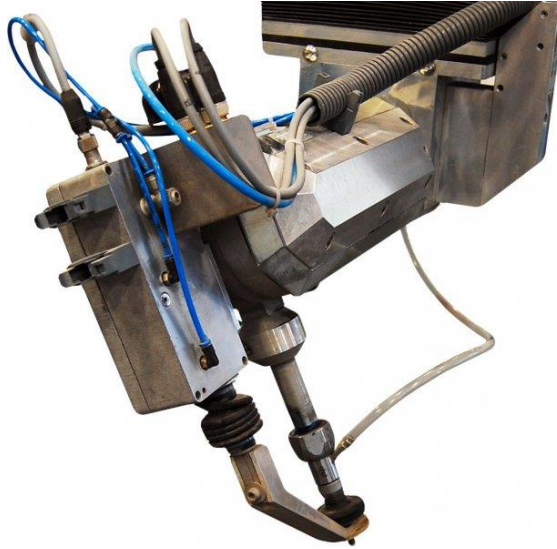
Podobný systém řešící problematiku kvality povrchu v místě řezu je systém ProgressJet (obr. 3.3), který dodává firma PTV. Tento systém kompenzuje úkos řezné spáry způsobený úbytkem energie hydroabrazivního paprsku. Toho je dosaženo vykloněním řezacího paprsku do směru řezu a také do strany, kdy při vysoké dynamice řezání je zaručen stejný efekt jako při nižší rychlosti. Výrobek je přesný a následná chyba, která je nevyhnutelná, se projeví až v odpadové části.

Systém řeší i další nepřesnosti, které mohou vznikat při změně směru pohybu, jako jsou rohy a rádiusy, kdy spodní hrana řezu zaostává za horní hranou. Eliminace je možná dvěma způsoby. Jednak zpomalením rychlosti nebo zakloněním paprsku v místech změn řezu a následným pohybem v zakloněném stavu. [20]

System se skládá ze dvou částí

- Mechanika systému umožňuje naklápění řezací hlavy ve dvou rotačních směrech a v součinnosti s lineárními osami X, Y, Z realizuje všechny potřebné pohyby.
- Řídící systém řídí pohyb všech 5ti os a na základě technologických informací zadaných obsluhou vyhodnocuje optimální pohyb.

Obr. 14 ProgressJet firmy PTV



Zroj: <http://www.ptv.cz>

10.3. Bezpečnostní požadavky na proces řezání vodním paprskem

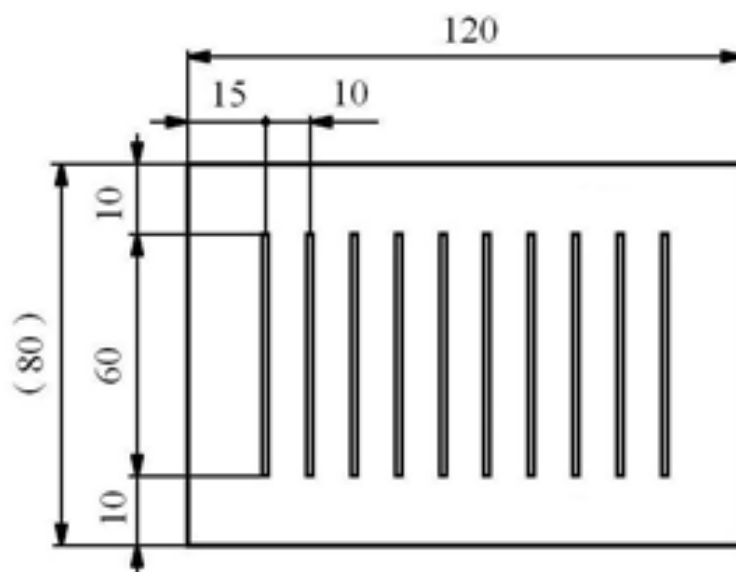
Proces řezání vodním paprskem je doprovázen hlukem, stříkáním vody a abraziva ve vzduchu a na pracovišti, zvýšenou vlhkostí vzduchu. Mezi hlavní výrobní faktory patří vliv elektrického proudu, vodní paprsek, sprej vodního paprsku, emise částic řezaného materiálu, pohyblivé části stroje. Pro zajištění zdravých a bezpečných pracovních podmínek pro servisní personál musí být splněny následující požadavky:

- musí být zajištěna samostatná izolovaná místnost pro instalaci
- oblast musí být vybavena odsávací ventilací;
- komponenty řídicího modulu, instalace musí být uzemněna
- Je nutné používat osobní ochranné prostředky proti prachu (speciální oděv a respirátor) a proti hluku (sluchátka).

11. Metodika práce

Pro zkoumání byly připraveny šest vzorků o čtyřech druzích materiálu. Vše 6 experimentálně vyrobené drážky měly stejné rozměry 80 x 120 mm. a byly poskytnuty vedoucím práce. Tvar a rozměry zkušebních vzorku jsou uvedeny na obr. 1. Na každém ze zkušebních vzorků bylo provedeno do deseti řezů při různých řezných rychlostech viz. tab. 1. Na každém zkušebním vzorku bylo vyhotoveno 10 řezů. Později byly použity pouze ty parametry, kdy byl materiál řezán v celém průřezu. Měřená oblast vzorku se nacházela přibližně v prostřední části řezu a to 10 mm od začátku (průstřelu) a konce spáry. Důvodem posunutí začátku a konce měření bylo eliminování náběhu a doběhu posuvu stroje, nežli řezná hlava dosáhne požadované hodnoty řezné rychlosti

Obr. 15 Tvar a rozměry zkušebního vzorku [21]



Tab. 5 Posuvová rychlost [21]

Material a jeho tloušťka	Posuvová rychlost v (mm· min-1)							
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈
Dural 10mm	50	100	150	200	250	300	350	400
Dural 20mm	60	90	120	150	180	210	240	
Ocel 10mm	20	40	60	80	100	120	140	160
Měď 10mm	25	50	75	100	125	150	175	200
Zinková slitina 10mm	100	150	200	250	300	350	400	450
Zinková slitina 20mm	25	50	75	100	125	150	175	200

12. Praktická část práce

Experiment byl zaměřen na zhodnocení vlivu řezné rychlosti, a tloušťky materiálu na šířku spáry řezu. Pro vytvoření vzorků pro experimentální část byla použita technologie AWJ.

- řezná rychlost (25 až 500 mm · min⁻¹);
- množství abraziva (217.8 g · min⁻¹);
- tloušťka materiálu (10 mm – 20 mm)

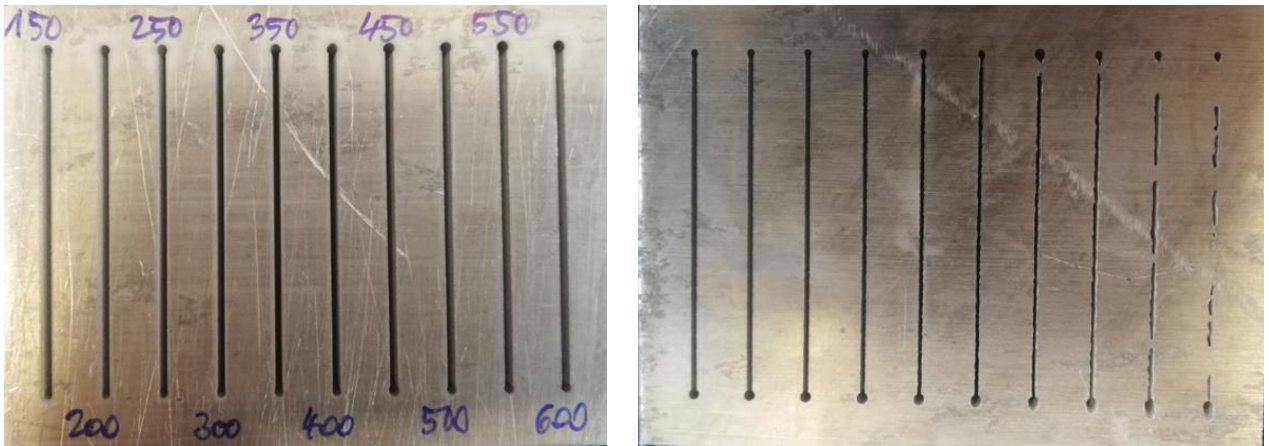
12.1. Charakteristika vzorků

Pro zkoumání změny tvaru řezné spáry byly vybrány následující zkušební materiály:

- Dural ČSN 42 4254 –10, 20 mm
- Zinová slitina ČSN EN 1774– tloušťka 10, 20 mm
- Měď ČSN 42 3001 – tloušťka 10 mm
- Ocel ČSN 11 375 –10 mm

Obr. 16 Pohled shora na zkušební vzorky

a) vstup vodního paprsku(Dural 10mm) b) výstup vodního paprsku(Dural 10mm)



Dural ČSN 42 4254

Jedná se o slitinu hliníku, mědi, olova a hořčíku (AlCu4PbMg), vhodnou ke zpracování na automatech pro krátkou třísku. Materiál je nevhodný ke svařování a eloxování (elektrolytická oxidace hliníku). Má střední pevnost, v nevytvrzeném stavu je pevnost v tahu 220 MPa a tvrdost 70 HB, ve vytvrzeném stavu je pevnost v tahu 370 MPa a tvrdost 90 HB. [22]

Zinková slitina ČSN EN 1774

Zinková slitina – těžký neželezný kov, korozivzdorný v prostředí slabě kyselém i zásaditém, snadno obrobitelný, lešitelný, charakterem podobný šedé litině. Tvrdost - cca 100 HB. [22]

Měď ČSN 42 3001

Je elektrovodná měď hodící se k použití v elektrotechnice. Vykazuje dobré vodivé vlastnosti a je odolná vůči korozi. Pevnost v tahu je standardně 195-295 MPa a tvrdost max. 70 HB. [22]

Ocel ČSN 11 375

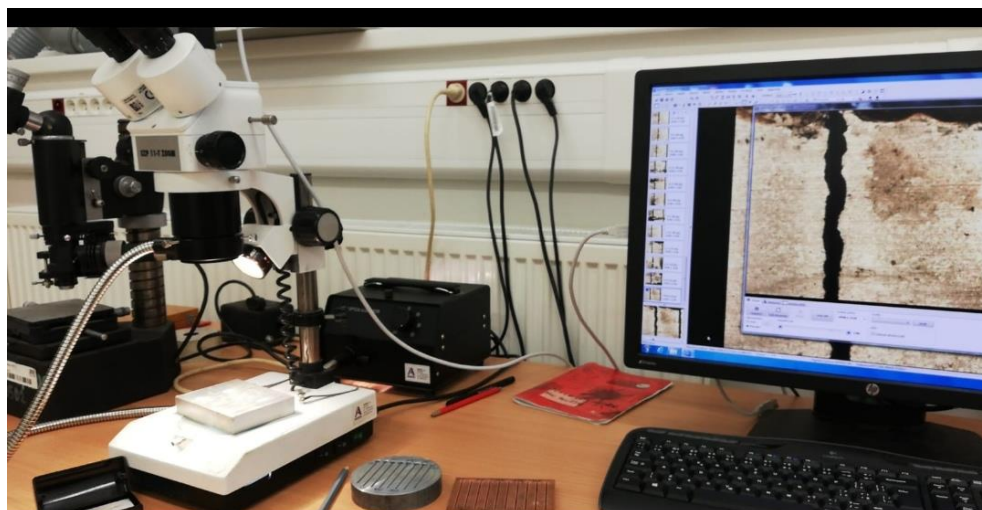
Nelegovaná jakostní konstrukční ocel vhodná ke svařování. Pevnost v tahu je min. 370 MPa a tvrdost max. 225 HB. Používá se zejména pro součásti konstrukcí a strojů namáhané staticky i mírně dynamicky. [22]

Parametry a podmínky experimentu byly stanoveny vedoucím diplomové práce v rámci systematického zkoumání parametrů řezání hydroabrazivním vodním paprskem.

12.2. Použité zařízení

Řezání zkušebních vzorků bylo prováděno pomocí CNC řezacího stroje s technologií vodního paprsku AW-CT 0806 TKX dodaného firmou AWAC, řezací systémy, Česká republika. Rozměry pracovní plochy stolu jsou 800 x 600 mm. Stůl je spojen s lapačem zbývající energie vodního paprsku. Řídícím systémem je AW-CT 1515 TKX. Vstup vysokotlakého čerpadla AccuStream A-6030 je 22 kW, pracovní tlak je 50 až 380 MPa, maximálně 414 MPa. Stroj má jednu řeznou hlavu A2 pro obrábění vodním paprskem a pro obrábění abrazivních vodních paprsků. Dávkovač umožňuje dávkování abraziva od 0 do 500 g · min⁻¹. Brusivo je dopravováno tlakem z násypky na řeznou hlavu. Zásobník může obsahovat 400 kg brusiva. Součástí zařízení je kompresor KAESER Aircenter SM9 a čerpadlo stlačeného vzduchu Versa Matic. Pro vyhodnocení zkušebních vzorků byl použit stereoskopický mikroskop SZP 11-T ZOOM s digitální kamerou CMOS připojenou k PC vybavenou programem Quick Photo Industrial viz. obr. Tato sada umožňuje snadné a relativně rychlé měření délek a úhlů.

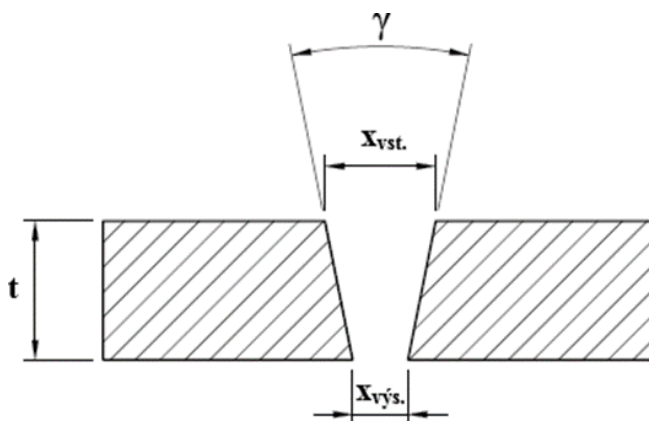
Obr. 17 Stereoskopický mikroskop SPZ 11-T ZOOM, stolní počítač



12.3. Postup výpočtu velikosti úhlu úkosu řezné spáry

Vlivem pronikání paprsku do nitra obrobku dochází k největším ztrátám kinetické energie třením média s abrazivními částicemi o dělený povrch součásti. Ztráta schopnosti dělit materiál v jednotlivých hloubkách obrobku se projevuje změnou šířky řezné spáry a tím i úkosu, který je součástí druhé části experimentu. Při výpočtu velikosti úhlu úkosu řezné spáry není již nijak manipulováno se vzorky jako takovými, však se využívají naměřené hodnoty z předešlého měření (šířka řezné spáry na vstupu a výstupu). Pro výpočet bylo potřeba požit vzorec (1), obsahující goniometrickou funkci a vzorec (2) pro výpočet celkové velikosti úhlu. Vzorcí se postupně vypočetly všechny potřebné hodnoty. Obdobně jako v předchozím případě byly všechny údaje zaneseny do tabulek a ze zpracovaných hodnot (uhlů) byly vyneseny grafy. [23]

Obr. 18 Úkos řezné spáry [23]



$$\frac{\gamma}{2} = \tan^{-1} \cdot \frac{X_{vst} - X_{výs}}{2 \cdot t} \quad \text{Vz. 1}$$

$$\gamma = \frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} \quad \text{Vz. 2}$$

X_{vst} - vstupní šířka spáry [mm]

$x_{výs}$ - výstupní šířka spáry [mm]

t - tloušťka materiálu [mm]

13. Výsledky

U vyhodnocených výsledku se dá očekávat, že lepší řez může být dosažen použitím nižší řezné rychlosti a nižší tloušťky materiálu a naopak při vysoké řezné rychlosti, se bude kinetická energie paprsku snižovat a bude docházet ke zúžení šířky řezné spáry. Na lícové straně paprsku se tvrzení bude projevovat méně než na rubní straně, kde rozdíly budou patrnější.

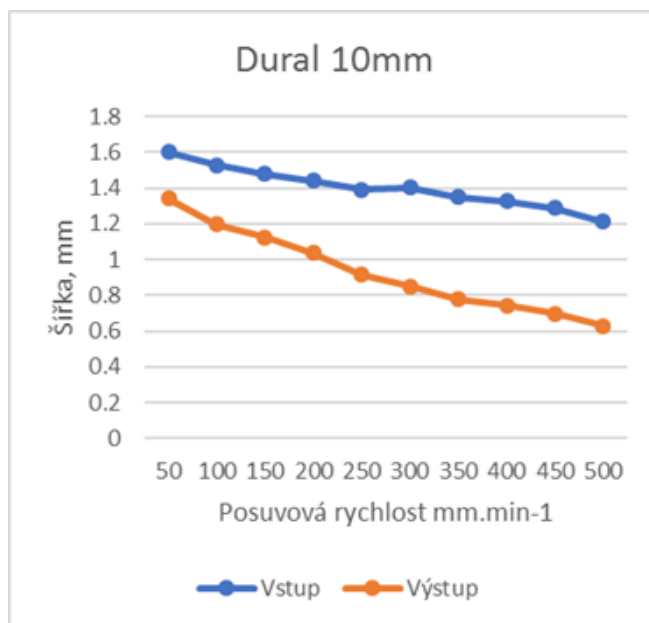
13.1. Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka řezné spáry

Dural oproti jiným vzorkům např. oceli nebo nerezové oceli nedosahuje tak vysokých hodnot fyzikálně-mechanických vlastnosti. Proto je zřejmé, že se bude jevit jako jeden z nejsnadněji dělitelných materiálů z uvedených vzorků.

Na horním povrchu zkušebními vzorků (vstup vodního paprsku) jsou zářezy a nehledě na řeznou rychlost zcela podobné a na první pohled není viditelný podstatný rozdíl (obr. 17 a). Na spodním povrchu (výstup vodního paprsku) jsou však rozdíly významné (obr. 17 b). Šířka řezu při dané tloušťce materiálu závisí především na řezné rychlosti, méně na použitém množství abraziva.

Na obr. 20 jsou uvedeny výsledky měření šířky řezu na lící straně (vstup vodního paprsku) a rubní straně (výstup vodního paprsku) pro dural o tloušťce 10 mm., při nejvyšší řezné rychlosti 500 mm · min⁻¹ a nejnižší 50 mm · min⁻¹. Všechny ostatní parametry byly konstantní (tlak 400 MPa, vzdálenost mezi řeznou hlavou a materiálem 1,5 mm, spotřeba abraziva 217.8 gr / min. Je zřejmé, že šířka zářezu na vstupu vodního paprsku se mění se zvyšující se řeznou rychlostí. Šířka řezné spáry na výstupu vodního paprsku se mění s rostoucí rychlostí řezu a má klesající tendenci. Průměrný poměr šířky zářezu vzorků při nejnižší a nejvyšší řezné rychlosti na vstupní je přibližně 0.389mm na výstupu 0.714mm.

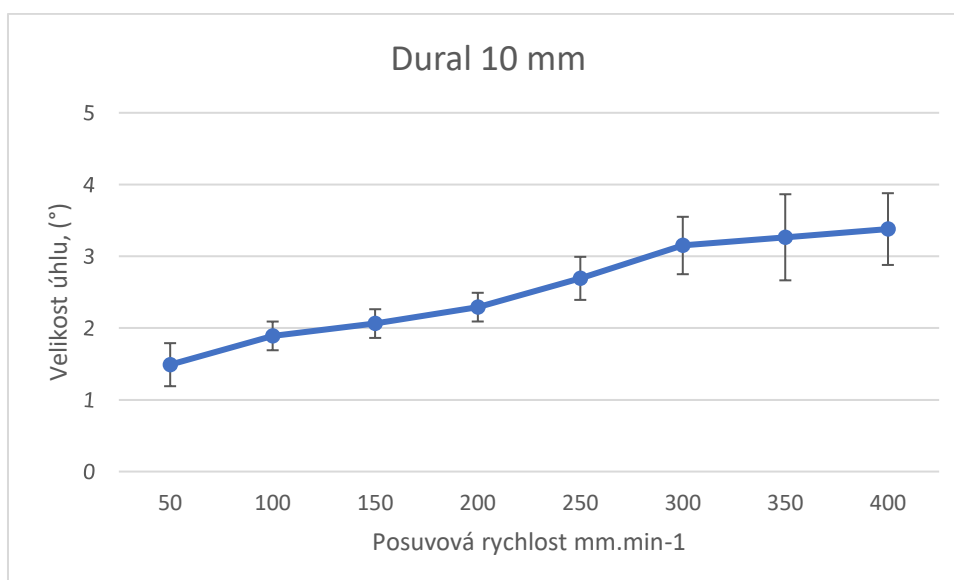
Obr. 19 Vstupní a výstupní strana, Dural - 10 mm



13.1.1. Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Při pohledu na obr. 21 je zřejmé, že velikost úhlu γ se zvyšující se řeznou rychlostí a má stoupající tendenci. Maximalní hodnota úhlu γ je dosažena při řezné rychlosti 400 mm·min⁻¹.

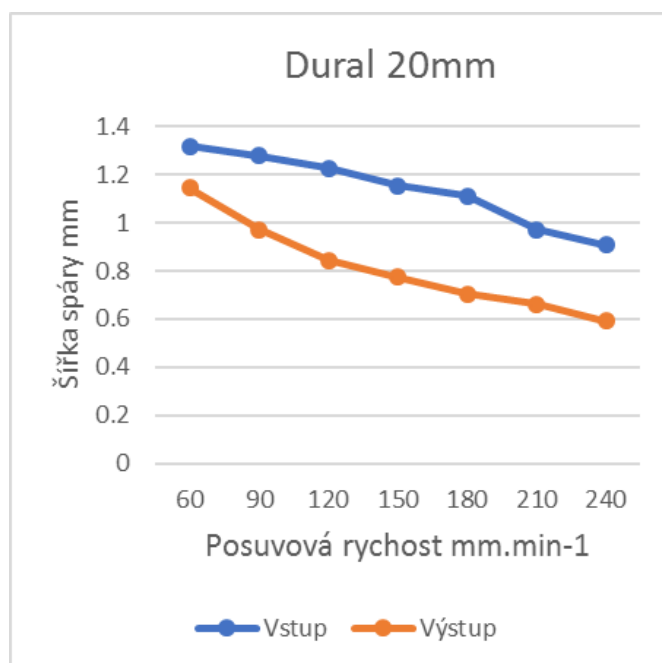
Obr. 20 Velikost úhlu γ , Dural 10 mm



13.2. Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka řezné spáry

Na obr. 22 jsou uvedeny výsledky měření šířky řezu na lící straně (vstup vodního paprsku) a reverzní (výstup vodního paprsku) pro dural o tloušťce 20 mm., při nejvyšší řezné rychlosti 240 mm · min-1 a nejnižší 60 mm · min-1. Výsledky jsou na první pohled jiné než ty předchozí. Šířka zářezu na výstupu vodního paprsku se s rostoucí rychlostí řezání zmenšuje, a to v rozsahu nejnižších testovaných řezných rychlostí. Ale při nižších testovaných řezných rychlostech výsledky téměř stejné jako výsledky vzorků o tloušťce 10 mm. Rozdíl mezi šířkou řezu vzorků při nejnižší a nejvyšší řezné rychlosti na vstupu je přibližně 0,411 mm na výstupu 0,553 mm

Obr. 21 Vstupní a výstupní strana, Dural - 20 mm

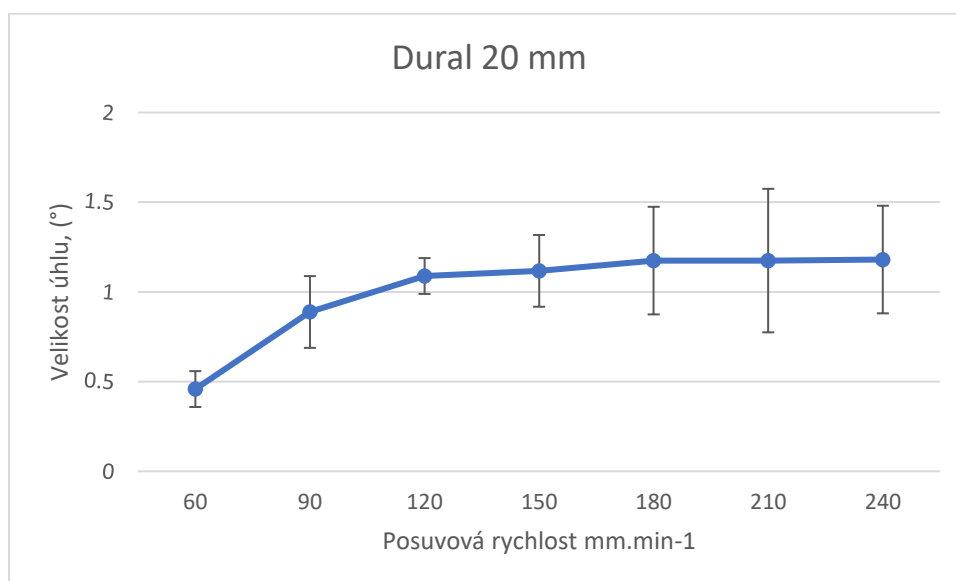


Zdroj: Vlastní zpracování

13.2.1. Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, velikost úhlu úkosu

Z vypočtených hodnot velikosti úhlu γ zanesených do grafu viz obr. 23 lze konstatovat, že pro první řeznou rychlost je hodnota velikosti úhlu nejmenší 0,45'. Patrná odchylka od růstu úhlu nastala při řezné rychlosti 210 mm·min-1

Obr. 22 Velikost úhlu γ , Dural 20 mm



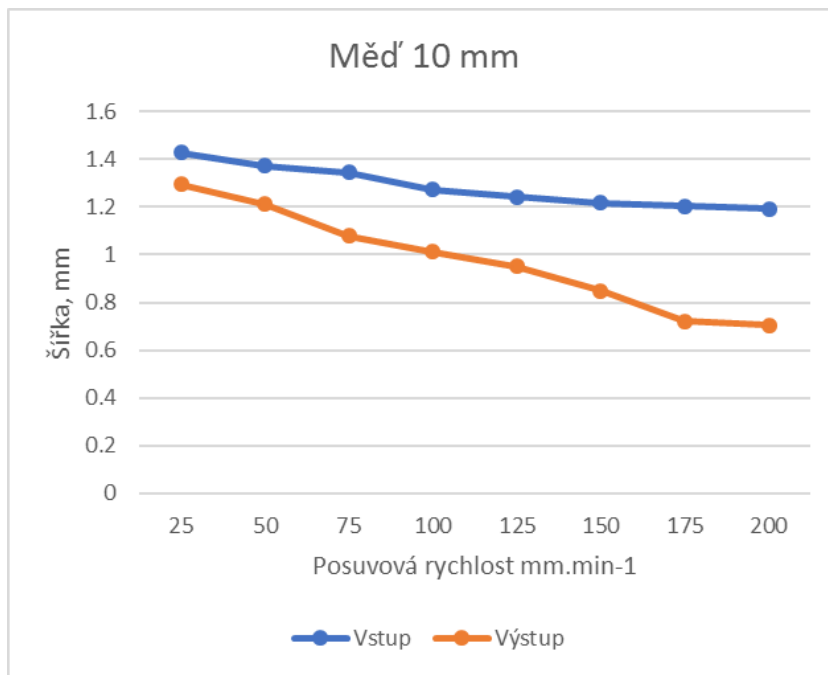
13.3. Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka řezné spáry

Na obr. 24 jsou znázorněny výsledky měření při řezání mědi o tloušťce 10 mm.

Je zřejmé, že i zde šířka spáry na vstupu paprsku se mění se zvyšující se řeznou rychlostí. Na vstupu spára zmenšuje jen velmi málo rozdíl mezi začátkem a končím řezání asi 0,237 mm, přičemž na výstupu se spára poměrně zmenšuje, rozdíl mezi začátkem a končím řezání asi 0,591 mm.

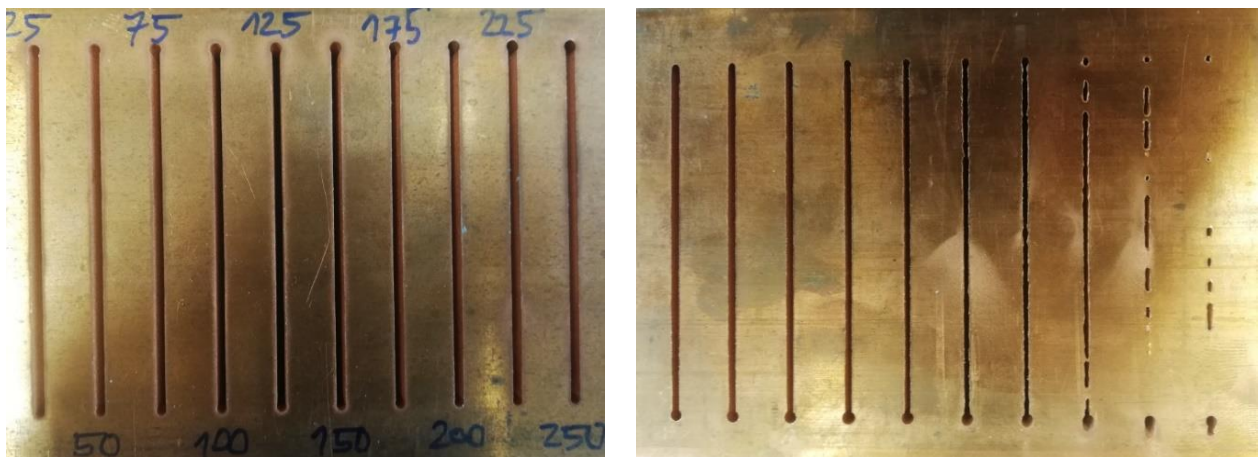
Na horním povrchu zkušebníchi vzorků obr. 25 a) jsou zářezy a nehledě na řeznou rychlost zcela podobné a na první pohled ale na spodním povrchu obr. 25 b) jsou rozdíly významné.

Obr. 23 Vstupní a výstupní strana, Měď - 10 mm



Zdroj: Vlastní zpracování

Obr. 24 a) vstup vodního paprsku (Měď 10 mm) b) výstup vodního paprsku (Měď 10 mm)

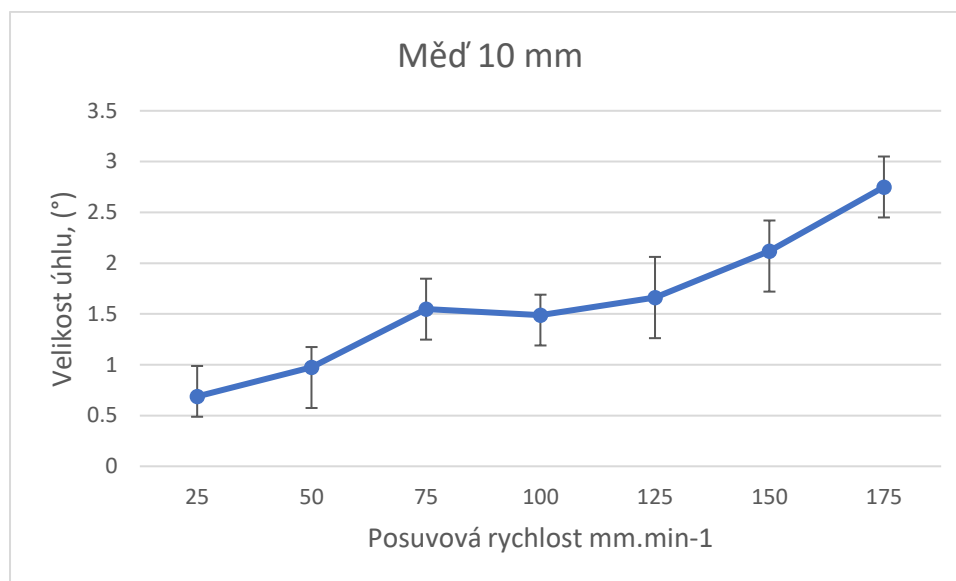


Zdroj: Vlastní zpracování

13.3.1. Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Obr. 26 jsou uvedeny výsledky velikosti úhlu γ . Křivka stoupá se zvyšující se řezným posuvem. Od řezné rychlosti 100 mm·min⁻¹ se začala odchylka zvětšovat až na konečnou hodnotu kolem 2°74' při 175 mm·min⁻¹.

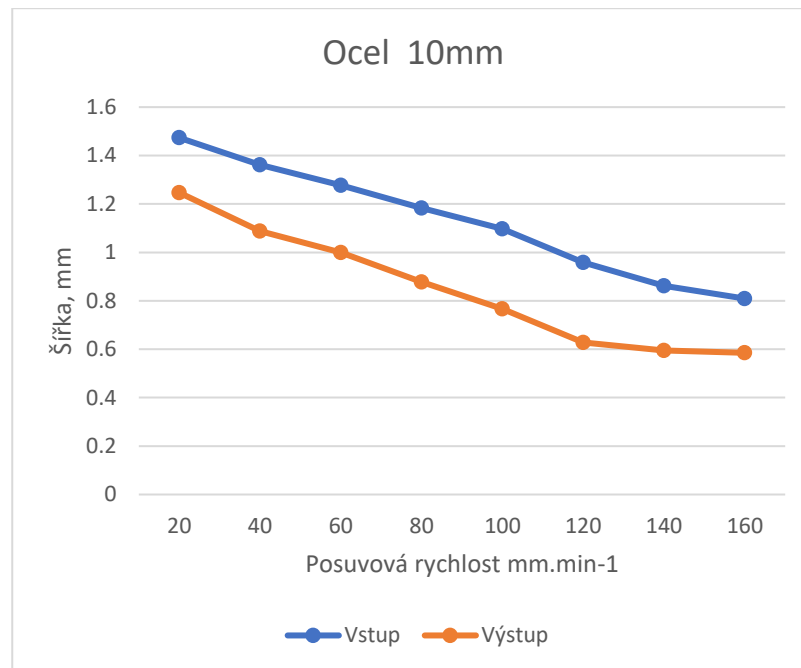
Obr. 25 Velikost úhlu γ , Měď 20 mm



13.4. Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka řezné spáry

V řezání oceli obr. 27 je patrné, že šířka spáry klesá se stoupající rychlostí přibližně přímo úměrně a to v případě vstupu a výstupu. Rozdíl mezi šířkou řezu při nejnižší a nejvyšší řezné rychlosti na vstupu je 0,664 mm na výstupu 0,661 mm

Obr. 26 Vstupní a výstupní strana, Ocel - 10 mm

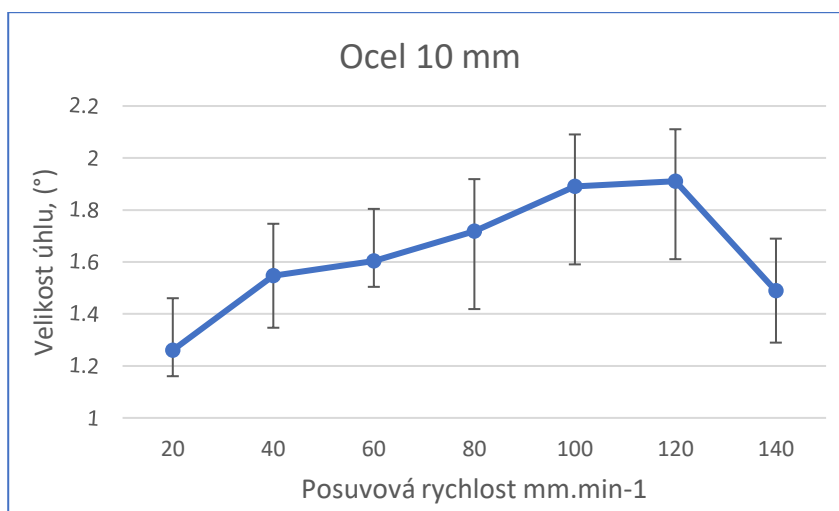


Zdroj: Vlastní zpracování

13.4.1. Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Na obr. 28, zaznamenání odchyly řezné spáry od kolmosti. Lze vidět očekávaný narůst velikosti úhlů s rostoucí řeznou rychlostí. Je zde patrné, že velikost odchyly pro řeznou rychlost 140 mm·min⁻¹ rapidně klesla. Úhel u této anomálie dosahuje hodnoty 1°48'.

Obr. 27 Velikost úhlu γ , Ocel – 10 mm



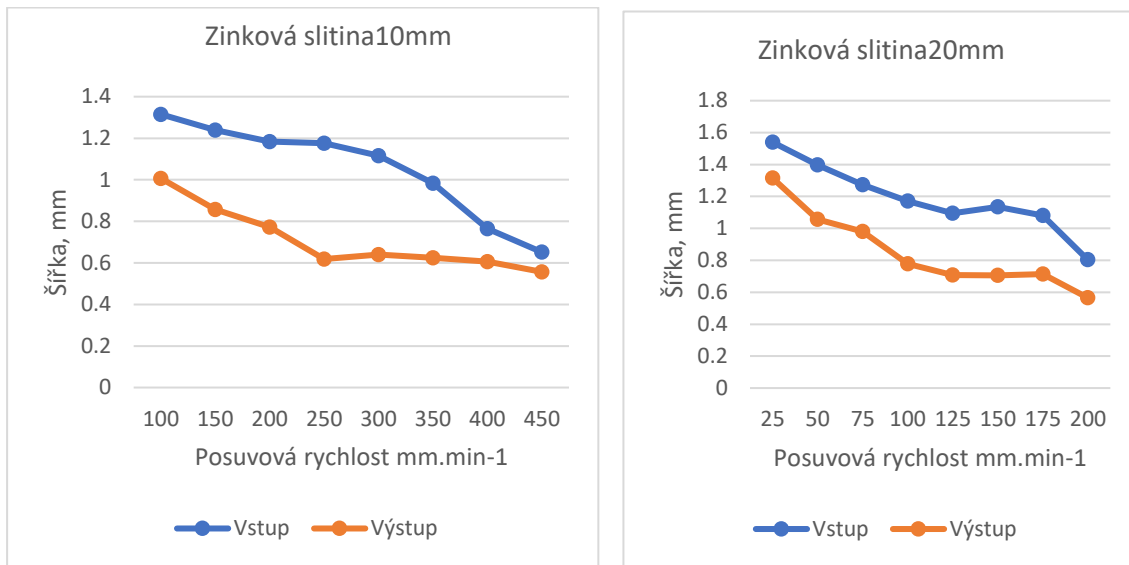
13.5. Zinková slitina ČSN EN 1774 - 10 mm, šířka řezné spáry

Dalším materiálem u něhož byla ověřována závislost šířky spáry na rychlost byla zinková slitina, v šířce profilu 10 mm a 20 mm. Na obr. 29 a 30 jsou uvedeny výsledky měření šířky řezu na lící straně (vstup vodního paprsku) a na rubní straně (výstup vodního paprsku) pro zinkovou slitinu. Na výstupu při šířce mezi 0,771 mm a 0,619 mm prudce klesla šířka spáry a z rychlosti 250 mm/min byla až dokonce řezu téměř konstantní. Poměr šířky zářezu vzorků nejvyšší řezné rychlosti 450 mm/min a nejnižší 100 mm / min. a nejvyšší řezné rychlosti na vstupní je 0,663 mm na výstupu 0,45 mm.

13.6. Zinková slitina ČSN EN 1774 - 20 mm, šířka řezné spáry

Na obr. 13.5 jsou uvedeny výsledky měření šířky řezu na lící straně (vstup vodního paprsku) a na rubní straně (výstup vodního paprsku) pro zinkovou slitinu o tloušťce 20 mm., Rozdíl mezi šířkou řezu při nejvyšší řezné rychlosti 200 mm/min a nejnižší 25 mm / min na vstupu je 0,737 mm na výstupu 0,75 mm.

Obr. 28 Vstupní a výstupní strana, Zinková slitina -10mm Obr. 30 Vstupní a výstupní strana, Zinková slitina - 20 mm



Lícni a rubová spára u všech grafů šířek řezné spáry povolna klesá a nevykazuje, žádné velké anomálie vůči předpokladu.

14. Diskuze

Celkově z naměřených dat je možné konstatovat, že až na menší odchylky existuje závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy. Rovněž lze tvrdit, že zpomalením rychlosti posuvu má abrazivní vodní paprsek delší čas odebírat dělený materiál ve spodní části obrobku, kde dochází k vyrovnávání šířky řezné spáry v jednotlivých hloubkách řezu. Z pohledu pro volbu nejúčinnější řezné rychlosti aby se samotný tvar řezné spáry blížil požadovanému tvaru, který by v ideálním případě představoval tvar ideálního řezu (šířka vstupní a výstupní spáry stejná), je nutné vzít v úvahu typ a mechanické vlastnosti materiálu, tloušťku a hodnotu pracovního tlaku. V našem případě se vždy jednalo o tvar písmene „V“. Z výsledku provedených měření dále vyplývá, že druh materiálu také ovlivňuje konečnou šířku spáry, to je proto, že při kontaktu abraziva s tvrdším materiálem (ocel) přechází veškerá kinetická energie zrna do separace částic materiálu. Když je obilí vystaveno materiálu s nízkou tvrdostí (zinek, měď, dural), část energie se spotřebuje na deformaci, protože tyto materiály nemají výraznou krystalovou strukturu.

15. Technicko-ekonomické zhodnocení

Další část této diplomové práce, se zabývá ekonomickou náročností vyhotovení experimentu z hlediska pořizovacích nákladů, nákladů na spotřební materiál a dalších nezbytných provozních činností, které s tímto strojem souvisí. V každém případě takové zařízení nemůže být levné. Například ve společnosti české firmy PTV cena pohybuje od 2,5 do 8 milionů korun. Zástupci společnosti říkají, že při normálním zatížení systému (v průměru 2000-3000 pracovních hodin ročně), návratnosti investic (doba návratnosti) bude rok nebo dva.

15.1. Náklad na odpis (amortizace)

Pro výpočet modelového příkladu byla stanovena cena stroje na 3 000 000 Kč včetně dopravy, stavebních úprav, instalace atd. Standardní doba odpisu je 12 let.

$$N_a = \frac{C_p \times P_{ps}}{T_o \times P_{sr}} = \frac{3000000 \times 1}{12 \times 2000} = 125 \text{ Kč}$$

C_p ...pořizovací cena stroje	[Kč]
T_o ...doba odpisu	[rok]
P_{sr} ...počet hodin v 1 směně za rok	[hod]
P_{ps} ...počet pracovních směn	

15.2. Náklady na spotřebu vody:

Náklady na spotřebu vodu se odvíjí od spotřebovaného množství a ceně, která je pro každý region jiná podle dodavatele. Průměrná cena vody 2019 je 88,35 Kč · m⁻³. Spotřeba vody stroje, resp. trysky je 1,9 l · min⁻¹ plus voda na oplach vzorku.

$$jN_{vx} = C_v \times \frac{T_s \times s_v}{1000} = 88.35 \times \frac{2.3 * 60}{1000} = 12,192 \text{ Kč}$$

S_v ...spotřeba vody stroje	$[l \cdot \text{min}^{-1}]$
T_s ...doba provozu stroje	$[\text{min}]$
C_v ...cena vody	$[\text{Kč} \cdot \text{m}^{-3}]$

15.3. Náklady na abrazivo MESH 80

Náklady jsou stanoveny na aktuální spotřebu množství přidávaného abraziva použitého při experimentu a délky provozu stroje činící 60 minut.

$$jN_{ab} = \frac{M_{ab}}{1000} \times T_p \times C_{abr} = \frac{217}{1000} \times 60 \times 13,4 = 174,46$$

M_{abr} ...množství přiváděného abraziva	$[\text{g} \cdot \text{min}^{-1}]$
T_p ... doba provozu stroje	$[\text{min}]$
C_{abr} ...cena abraziva	$[\text{Kč} \cdot \text{kg}^{-1}]$

15.4. Náklady na spotřebu elektrické energie:

Vzhledem k tomu, že se stroj skládá z mnoha elektrických zařízení (kompresor, čerpadlo atd.) je jeho celková spotřeba stanovená na 1 hodinu je 22 kW. Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny je 4,28. Za hodinu provozu náklady na spotřebu elektrické energie: 94,16 Kč.

15.5. Náklady na nejběžněji používané díly:

Pro zjištění některých finančních položek náhradních dílů byla kontaktována firma PTV, spol. s r.o. Nejběžněji používané díly podle firmy jsou uvedeny v následující tabulce 6.

Tab. 6 Nejběžněji používané díly

Název dílu	Průměrná životnost (h)	Cena (Kč)	Náklady na 1 hodinu [Kč·hod ⁻¹]
Diamantová vodní tryska	500	13 500	27,00
Abrazivní tryska	100	2750	27,50
Vysokotlaký válec	2500	17 255	6,90
Nízkotlaký válec	10 000	4500	0,45
Vysokotlaké těsnění	500	3700	7,40
Nízkotlaké těsnění	1000	1450	1,45
Vodní filtry	400	1200	3,0
Ostatní díly	900	2220	2,50
Celková suma			81,85

15.6. Celkové hodinové náklady na provoz stroje:

Po sečtení všech výše vypočtených nákladů cena práce stroje za hodinu, bude ve výši 475,47 Kč. Další částí nákladů jsou mzdy zaměstnanců, čistá mzda pro obsluhu stroje činí 400 Kč. za hodinu. Celková cena práce řezacího stroje s obsluhou je zaokrouhlená na **875 Kč·hod⁻¹** (14,5 Kč·min⁻¹).

Náklady na využití vodního paprsku způsobeny především vysokou spotřebou a cenou abraziva, která může tvořit až skoro 40 % veškerých výdajů. Výsledkem toho je v dnešní době za určitých podmínek značně výhodnější použít abrazivo recyklovat a tím jej upravit a připravit na opětovné využití. Vlivem

toho se dostává firmám do rukou značná výhoda, způsobená trvalým snížením výrobních nákladů. Svůj podíl na provozní náklady mají ale také vysoká cena vodních trysek a hydroabrazivních trubic a nízká životnost které se provozem opotřebovávají, stejně jako jednotlivé komponenty vysokotlakého čerpadla, především multiplikátoru. Provozní nákladová cena provozu zařízení na vysokotlakou vodu (ve firmě ENVI-PUR, s.r.o.) pohybuje za hodinu práce v rozmezí od 1690 Kč/hod do 2000 Kč/hod. [24]

Do budoucna se očekává stagnace či mírný růst těchto provozně nákladových cen, protože ceny vstupních zdrojů neustále rostou (ceny za energii, požadavky na zvyšování platů atd.).

16. Závěr

Diplomová práce je zaměřena na téma řezání materiálu vodním paprskem. Cílem experimentální části diplomové práce byla prokázat jak rozdílná posuvná rychlost abrazivního vodního paprsku ovlivňuje šířku spáry obrobenej plochy a zároveň závislost šířky spáry řezu a velikosti úhlu úkosu na řezné rychlosti, tloušťky a typy materiálů. Bylo provedeno měření tlouštěk a rozměrů drážek na zkušebních vzorcích a měření šířky spáry lícni straně (vstup vodního paprsku) a rubní straně (výstup vodního paprsku) a byla vypočtena velikost úhlu úkosu. Při řezání vzorků byly použity pouze takové parametry, při kterých byl materiál proříznut v celém úseku. Získané hodnoty a závislosti byly přehledně znázorněny v tabulkách a grafech. Z experimentálních dat je zřejmé, že čím vyšší je rychlost posuvu, tím užší je šířka spodní spáry a s přibývající řeznou rychlostí šířka řezu spáry klesá, ale velikost úhlu úkosu naopak stoupá. Vyšší hodnota šířky spodního zářezu ve vztahu k šířkám horního zářezu při nízkých hodnotách posuvové rychlosti naznačuje, že zářez je tvarově odlišný. Šířka směrem dolů se zmenšuje a má tvar písmene „V“.

Pro porozumění a pochopení fungování celého systému jsou v teoretické části diplomové práce podrobně rozebrané všechny nejdůležitější komponenty v systému vodních paprsků. Konkrétně se jedná o technologie WJ, AWJ. Provedeno rozdělení technologií kapalinového paprsku se zaměřením na vysokotlaký vodní a hydroabrazivní paprsek. Dále následuje rozdělení technologií kapalinového paprsku vysvětlení principu a metod činnosti vodních paprsků a nakonec popis rozdělení paprsků podle různých kritérií a rozbor možných výhod a nevýhod této technologie.

Obrábění vodním paprskem je přesná a všestranná technologie, která by se snížením provozních nákladů mohla stát převládajícím způsobem dělení materiálu.

Technicko-ekonomickému zhodnocení byl věnován spočítání konečných celkových nákladu na hodinu provozu stroje.

17. Použitá literatura

- [1] *HISTORIE řezání vodním paprskem* [online]. Ekaterinburg: UTK service, 2018 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.utk-service.ru/history-gidroabrazivnaya-rezka/>
- [2] Princip řezání vodním paprskem. *Alcom Alval s.r.o.* [online]. Praha: Alcom Alval s.r.o., 2013 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.vodnipaprsek.com/o-vodnim-paprsku/>
- [3] *Analýza procesu rozpojování hornin vysokorychlostními vodními paprsky na základě laboratorních měření*. Ostrava, 2000. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4] ILDIKÓ, Maňková, . *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] CALLUS, Petr. Řezání vodním paprskem vnáší nový rozměr do stavebnictví. *Tretiruka* [online]. Praha: České ekologické manažerské centrum, z. s., 2013 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/rezani-vodnim-paprskem-vnasi-novy-rozmer-do-stavebnictvi1/>
- [6] VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. 1. vydání. Ostrava: Sergej Hloch, 2008. ISBN 9788025435855.
- [7] MOMBER, Andreas. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. 1. USA: Springer, 2012. ISBN 9781447115748.
- [8] BARCÍK, ŠTEFAN. *Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem*. 1. vyd. Praha: Mapcards.net, 2012. ISBN 978-80-87415-60-3.
- [9] KRAJNÝ, Zdenko. *Vysokotlakový vodný lúč*. 1. slovensko: Stu, 2011. ISBN 978-80-227-3535-3.
- [10] Slovník k Vodnímu Paprsku. *Flowwaterjet* [online]. Shape Technologies Group, 2019 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#direct_drive_pump
- [11] *On the Selection of Manufacturing Methods Illustrated by an Overview of Separation Techniques for Sheet Materials*. Vol.39/2. Nizozemsko: CIRP Annals, 1989.

- [12] BRYM, R. *TRENDY VÝVOJE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPERSEM*. Brno, 2008. DIPLOMOVÁ. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] ŘASA, Jaroslav. *Strojírenská technologie 3*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 978-80-7183-336-9.
- [14] NECKÁŘOVÁ, Jarmila. *Potrubí a armatury*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1990.
- [15] Microstep. *Microstep* [online]. Bratislava, 2019 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.microstep.eu/software/control-system/imsnc/>
- [16] STROJE PRO NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, , 573 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/6.3.pdf
- [17] Tvar řezné mezery. In: *Mmspektrum* [online]. b.r. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/6.3.pdf
- [18] *Kvalita a cena* [online]. Chomutov: CHPS s.r.o., b.r. [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <http://www.chps.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena>
- [19] SLANÝ, Martin. *Obrábění vodním paprskem*. Brno, 2006. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [20] *ProgressJet* [online]. Hostivice: PTV, 2014 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/progressjet/>
- [21] BROŽEK, Milan. *Steel cutting using abrasive water jet*. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2017. ISSN 1691-3043.
- [22] *Materiálové normy* [online]. Ferona, 2017 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.vodnipaprsek.com/o-vodnim-paprsku/>
- [23] MIKLUŠ, Martin. *Řezání vodním paprskem*. Praha, 2018. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [24] Řezání vodním paprskem. [Http://www.envi-pur.cz/cz/rezani-vodnim-paprskem/](http://www.envi-pur.cz/cz/rezani-vodnim-paprskem/) [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.envi-pur.cz/cz/rezani-vodnim-paprskem/>

18. Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení kapalinových paprsků [3]	12
<i>Obr. 2 Technologie WJM</i> [4]	13
Obr. 3 Technologie AWJ [4]	15
Obr. 4 Proudění s stabilizátorem [7]	20
Obr. 5 Proudění bez stabilizátoru [7].....	20
Obr. 6 Schéma zařízení vodního paprsku	23
Obr. 7 Schéma multiplikátoru tlaku.....	25
Obr. 8 Řezací hlavy pro abrazivní vodní paprsky [31].....	26
<i>Obr. 9 Řídící systém iMSNC</i>	30
Obr. 10 Tvar řezné mezery [17].....	31
Obr. 11 Kvalitativní stupně řezu.....	33
Obr. 12 Váznutí paprsku ya řezem	34
Obr. 13 Dynamic Waterjet firmy Flow	37
Obr. 14 ProgressJet firmy PTV.....	38
Obr. 15 Tvar a rozměry zkušební vzorku [21].....	39
Obr. 16 Pohled shora na zkušební vzorky	42
Obr. 17 Stereoskopický mikroskop SPZ 11-T ZOOM, stolní počítač.....	43
Obr. 18 Úkos řezné spáry [23].....	44
Obr. 19 Vstupní a výstupní strana, Dural - 10 mm.....	46
Obr. 20 Velikost úhlu γ , Dural 10 mm.....	46
Obr. 21 Vstupní a výstupní strana, Dural - 20 mm.....	47
Obr. 22 Velikost úhlu γ , Dural 20 mm.....	48
Obr. 23 Vstupní a výstupní strana, Měď - 10 mm	49
Obr. 24 a) vstup vodního paprsku(Měď 10 mm) b) výstup vodního paprsku(Měď 10 mm)	49
Obr. 25 Velikost úhlu γ , Měď 20 mm.....	50
Obr. 26 Vstupní a výstupní strana, Ocel - 10 mm	51
Obr. 27 Velikost úhlu γ , Ocel – 10 mm	52
Obr. 28 Vstupní a výstupní strana, Zinková slitina -10mm Obr. 30 Vstupní a výstupní strana, Zinková slitina - 20 mm	53

19. Seznam tabulek

Tab. 1 Typická aplikace technologie řezání čistým vodním paprskem	14
Tab. 2 Typická aplikace technologie řezání vodním paprskem s příměsí abraziva.....	17
<i>Tab. 3 Vlastnosti abrazivních materiálů [8]</i>	<i>18</i>
Tab. 4 . Stupeň kvality řezných ploch [18].....	32
Tab. 5 Posuvová rychlost [21]	40
Tab. 6 Nejběžněji používané díly	57

20. Přílohy

Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]						
		60	90	120	150	180	210	240
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,38	1,23	1,27	1,27	1,18	1,16	1,03
	2	1,38	1,27	1,22	1,21	1,07	1,02	1,14
	3	1,34	1,27	1,26	1,10	1,04	1,04	0,95
	4	1,31	1,29	1,14	1,07	1,07	0,96	1,02
	5	1,36	1,33	1,23	1,16	1,15	1,07	0,93
	6	1,32	1,21	1,33	1,22	1,01	0,91	0,94
	7	1,25	1,21	1,27	1,11	1,12	1,14	0,89
	8	1,25	1,28	1,27	1,20	1,09	1,10	1,05
	9	1,22	1,38	1,19	1,12	1,12	0,96	0,99
	10	1,24	1,36	1,12	1,10	1,17	1,18	0,02
	11	1,33	1,25	1,19	1,14	1,16	1,11	1,00
	12	1,21	1,25	1,24	1,16	1,15	0,01	0,92
Průměr		1,30	1,28	1,23	1,16	1,11	0,97	0,91
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02

Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]						
		60	90	120	150	180	210	240
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,12	0,99	0,85	0,84	0,60	0,66	0,71
	2	1,18	1,01	0,94	0,81	0,72	0,01	0,60
	3	1,21	0,99	0,81	0,78	0,78	0,65	0,75
	4	1,14	0,96	0,84	0,78	0,72	0,67	0,78
	5	1,12	0,93	0,86	0,75	0,71	0,78	0,75
	6	1,11	0,91	0,81	0,76	0,66	0,68	0,68
	7	1,22	0,92	0,85	0,82	0,86	0,78	0,67
	8	1,11	0,98	0,86	0,70	0,61	0,84	0,59
	9	1,17	0,99	0,81	0,73	0,52	0,70	0,02
	10	1,12	1,03	0,86	0,81	0,69	0,84	0,75
	11	1,07	0,96	0,86	0,82	0,76	0,01	0,78
	12	1,13	1,00	0,79	0,68	0,73	0,07	0,74
Průměr		1,14	0,97	0,85	0,77	0,70	0,56	0,65
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,06	0,07

Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,58	1,56	1,52	1,46	1,43	1,43	1,37	1,36
	2	1,60	1,54	1,48	1,45	1,43	1,39	1,36	1,37
	3	1,61	1,54	1,45	1,48	1,39	1,36	1,36	1,36
	4	1,59	1,56	1,55	1,48	1,40	1,43	1,35	1,36
	5	1,60	1,58	1,47	1,43	1,41	1,43	1,34	1,31
	6	1,59	1,59	1,45	1,43	1,39	1,41	1,32	1,32
	7	1,60	1,56	1,49	1,43	1,40	1,43	1,33	1,30
	8	1,59	1,53	1,47	1,43	1,40	1,41	1,36	1,31
	9	1,59	1,52	1,49	1,43	1,38	1,40	1,36	1,31
	10	1,62	1,47	1,45	1,43	1,37	1,39	1,35	1,31
	11	1,59	1,44	1,48	1,43	1,36	1,39	1,35	1,32
	12	1,67	1,46	1,44	1,41	1,34	1,38	1,36	1,31
Průměr		1,60	1,53	1,48	1,44	1,39	1,40	1,35	1,33
Směr. odchylka		0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03

Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,39	1,19	1,17	1,07	0,94	0,89	0,85	0,73
	2	1,36	1,19	1,15	1,04	0,96	0,84	0,81	0,73
	3	1,35	1,18	1,16	1,07	0,92	0,90	0,70	0,77
	4	1,36	1,20	1,15	1,07	0,91	0,87	0,80	0,81
	5	1,34	1,19	1,14	1,05	0,91	0,85	0,79	0,79
	6	1,33	1,20	1,12	1,03	0,91	0,86	0,76	0,75
	7	1,34	1,20	1,12	1,02	0,89	0,84	0,81	0,71
	8	1,32	1,20	1,10	0,99	0,93	0,86	0,81	0,71
	9	1,34	1,19	1,13	1,00	0,88	0,85	0,79	0,74
	10	1,33	1,21	1,10	1,04	0,92	0,82	0,74	0,73
	11	1,33	1,21	1,07	1,05	0,89	0,84	0,75	0,75
	12	1,32	1,20	1,08	1,02	0,92	0,81	0,73	0,70
Průměr		1,34	1,20	1,12	1,04	0,92	0,85	0,78	0,74
Směr. odchylka		0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,08

Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]							
		20	40	60	80	100	120	140	160
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,57	1,42	1,33	1,13	1,15	1,07	0,65	0,86
	2	1,43	1,36	1,32	1,20	1,23	0,92	0,97	0,81
	3	1,52	1,40	1,31	1,17	1,05	0,92	0,86	0,81
	4	1,45	1,37	1,21	1,20	1,07	0,92	0,89	0,81
	5	1,45	1,32	1,31	1,15	1,07	0,92	0,91	0,87
	6	1,44	1,33	1,21	1,22	1,04	0,98	0,81	0,65
	7	1,46	1,37	1,26	1,10	1,07	1,07	1,05	0,65
	8	1,43	1,38	1,23	1,15	1,07	0,96	0,93	0,64
	9	1,44	1,33	1,30	1,16	1,12	0,86	0,86	0,63
	10	1,44	1,35	1,22	1,29	1,16	1,05	1,03	0,63
	11	1,43	1,37	1,29	1,31	1,07	1,01	0,68	0,65
	12	1,42	1,34	1,33	1,12	1,06	0,83	0,70	0,62
Průměr		1,46	1,36	1,28	1,18	1,10	0,96	0,86	0,72
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02

Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]							
		20	40	60	80	100	120	140	160
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,27	1,03	0,92	1,00	0,94	0,71	0,53	0,65
	2	1,22	1,10	1,01	0,80	0,79	0,65	0,56	0,78
	3	1,22	1,09	1,06	0,86	0,70	0,63	0,57	0,75
	4	1,19	0,99	1,00	0,97	0,65	0,65	0,65	0,56
	5	1,24	1,12	0,87	0,86	0,75	0,77	0,72	0,41
	6	1,26	1,06	0,91	0,93	0,74	0,45	0,49	0,68
	7	1,24	1,10	0,98	0,91	0,93	0,60	0,55	0,64
	8	1,27	1,11	1,00	0,72	0,81	0,60	0,73	0,39
	9	1,27	1,06	1,07	0,86	0,70	0,50	0,52	0,64
	10	1,24	1,09	1,01	0,83	0,71	0,69	0,62	0,63
	11	1,26	1,18	1,09	0,91	0,72	0,60	0,81	0,43
	12	1,22	1,12	1,07	0,88	0,77	0,68	0,39	0,56
Průměr		1,24	1,09	1,00	0,88	0,77	0,63	0,60	0,59
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01	0,02

Zinková slitina ČSN EN 1774 - 20 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]							
		100	150	200	250	300	350	400	450
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,34	1,17	1,29	1,23	1,17	1,10	0,91	1,02
	2	1,34	1,22	1,16	1,20	1,14	1,05	0,83	0,03
	3	1,36	1,22	1,19	1,23	1,15	1,81	0,91	0,92
	4	1,36	1,23	1,16	1,22	1,22	1,14	0,78	0,75
	5	1,36	1,23	1,15	1,22	1,11	1,03	0,03	0,04
	6	1,34	1,26	1,17	1,22	1,11	1,02	0,95	0,63
	7	1,21	1,15	1,16	1,10	1,15	0,94	1,01	0,97
	8	1,23	1,27	1,20	1,15	1,17	1,04	1,01	0,81
	9	1,33	1,23	1,13	1,10	1,01	0,85	0,91	0,76
	10	1,28	1,27	1,24	1,12	1,12	1,05	0,95	0,81
	11	1,27	1,31	1,19	1,20	1,03	0,94	0,86	1,04
	12	1,36	1,31	1,17	1,13	1,02	1,04	0,03	0,04
Průměr		1,32	1,24	1,18	1,18	1,12	1,08	0,77	0,65
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01

Zinková slitina ČSN EN 1774 - 10 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]							
		100	150	200	250	300	350	400	450
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	0,97	0,86	0,82	0,62	0,58	0,83	0,68	0,77
	2	1,01	0,88	0,78	0,65	0,62	0,85	0,71	0,02
	3	1,01	0,84	0,73	0,63	0,65	0,51	0,87	0,69
	4	0,92	0,84	0,65	0,63	0,58	0,66	0,72	0,88
	5	0,99	0,84	0,75	0,56	0,64	0,70	0,02	0,59
	6	0,98	0,83	0,76	0,64	0,66	0,67	0,68	0,60
	7	1,03	0,90	0,83	0,60	0,60	0,53	0,64	0,60
	8	1,03	0,86	0,76	0,64	0,78	0,65	0,64	0,44
	9	1,06	0,86	0,84	0,60	0,70	0,55	0,55	0,57
	10	1,06	0,94	0,81	0,68	0,62	0,51	0,60	0,73
	11	1,03	0,89	0,76	0,67	0,58	0,47	0,69	0,78
	12	0,99	0,86	0,77	0,67	0,66	0,56	0,48	0,01
Průměr		1,01	0,87	0,77	0,63	0,64	0,62	0,61	0,56
Směr. odchylka		0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,08	0,03

Zinková slitina ČSN EN 1774 - 20 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]							
		25	50	75	100	125	150	175	200
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,62	1,46	1,34	1,14	1,00	1,14	1,01	0,98
	2	1,61	1,52	1,22	1,17	1,12	1,19	1,06	0,01
	3	1,53	1,47	1,31	1,15	1,12	1,10	1,06	0,97
	4	1,50	1,47	1,32	1,31	1,17	1,18	0,99	0,99
	5	1,53	1,45	1,32	1,28	1,16	1,17	1,14	1,02
	6	1,58	1,46	1,22	1,17	1,10	1,04	1,12	0,96
	7	1,53	1,21	1,15	1,16	1,07	1,17	1,08	0,93
	8	1,51	1,32	1,27	1,12	1,14	1,12	1,06	0,90
	9	1,56	1,34	1,29	1,12	1,05	1,17	1,15	0,91
	10	1,52	1,44	1,22	1,19	1,17	1,11	1,13	1,00
	11	1,41	1,30	1,33	1,08	1,10	1,18	1,15	0,96
	12	1,58	1,33	1,29	1,16	1,13	1,05	1,01	0,01
Průměr		1,54	1,40	1,27	1,17	1,11	1,14	1,08	0,80
Směr. odchylka		0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04

Zinková slitina ČSN EN 1774 - 20 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]							
		25	50	75	100	125	150	175	200
Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]	1	1,37	1,02	1,10	0,79	0,65	0,86	0,70	0,64
	2	1,27	1,07	0,93	0,66	0,81	0,65	0,78	0,01
	3	1,28	1,03	0,99	0,82	0,68	0,84	0,77	0,96
	4	1,27	1,03	1,00	0,70	0,70	0,68	0,57	0,86
	5	1,23	1,02	0,85	0,70	0,77	0,76	0,82	0,01
	6	1,29	1,23	0,92	0,78	0,65	0,53	0,88	0,56
	7	1,24	0,94	1,03	0,70	0,78	0,60	0,81	0,70
	8	1,38	1,04	0,86	0,79	0,82	0,72	0,79	0,01
	9	1,43	1,10	1,02	0,70	0,74	0,87	0,85	0,58
	10	1,44	1,04	1,07	0,83	0,77	0,65	0,76	0,81
	11	1,42	1,07	1,00	1,01	0,81	0,55	0,34	0,78
	12	1,33	1,10	1,00	0,86	0,32	0,75	0,49	0,86
Průměr		1,33	1,06	0,98	0,78	0,71	0,71	0,71	0,57
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02

Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky vstupní spáry [mm]							
		25	50	75	100	125	150	175	200
Rezná rychlost [mm · min ⁻¹]	1	1,43	1,39	1,33	1,27	1,20	1,26	1,28	1,30
	2	1,46	1,43	1,36	1,32	1,28	1,16	1,15	1,27
	3	1,41	1,43	1,37	1,23	1,23	1,21	1,21	1,26
	4	1,43	1,34	1,39	1,22	1,21	1,27	1,23	1,22
	5	1,47	1,38	1,38	1,24	1,25	1,17	1,17	1,18
	6	1,42	1,37	1,33	1,30	1,27	1,26	1,21	1,25
	7	1,37	1,49	1,34	1,32	1,24	1,26	1,21	1,14
	8	1,37	1,38	1,33	1,26	1,22	1,29	1,17	1,12
	9	1,38	1,27	1,31	1,31	1,28	1,09	1,20	1,12
	10	1,41	1,39	1,36	1,38	1,27	1,25	1,27	1,12
	11	1,47	1,34	1,26	1,25	1,18	1,20	1,18	1,11
	12	1,40	1,36	1,38	1,17	1,28	1,18	1,17	1,21
Průměr		1,42	1,38	1,35	1,27	1,24	1,22	1,20	1,19
Směr. odchylka		0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02

Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Průměr šířky výstupní spáry [mm]							
		25	50	75	100	125	150	175	200
Rezná rychlost [mm · min ⁻¹]	1	1,27	1,15	1,12	1,08	0,97	0,78	0,58	0,81
	2	1,22	1,16	1,12	1,11	0,94	0,84	0,66	0,60
	3	1,23	1,22	1,12	0,96	0,90	0,93	0,60	0,63
	4	1,26	1,12	1,12	1,00	0,87	0,91	0,75	0,75
	5	1,28	1,22	1,01	0,99	1,00	0,84	0,81	0,73
	6	1,33	1,29	1,05	0,97	0,99	0,74	0,88	0,68
	7	1,30	1,24	1,05	0,98	0,97	0,63	0,86	0,84
	8	1,29	1,20	1,04	1,03	0,99	0,86	0,70	0,72
	9	1,32	1,22	1,10	1,01	0,97	0,97	0,78	0,68
	10	1,36	1,29	1,07	1,02	0,99	1,07	0,70	0,59
	11	1,36	1,22	1,05	0,98	0,95	0,75	0,81	0,74
	12	1,33	1,21	1,09	1,00	0,89	0,87	0,54	0,68
Průměr		1,30	1,21	1,08	1,01	0,95	0,85	0,72	0,70
Směr. odchylka		0,02	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04