

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Řezání vodním paprskem

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Diplomant: Bc. Martin Mikluš

2018

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Mikluš

Zemědělská technika

Název práce

Řezání vodním paprskem

Název anglicky

Waterjet cutting

Cíle práce

- shromáždit informace o metodách používaných pro dělení kovových materiálů,
- naplánovat, připravit, provést a vyhodnotit laboratorní experiment, 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/](http://www.awac.cz/)
- JIRKA, M., BROŽEK, M., CHMELÍK, V.: Řezání laserem. Strojírenská výroba. 1995, 43(5-6). s. 28-30.
- KŘENEK, J.: Dělení materiálů kapalinovým paprskem. Bakalářská práce. Praha, ČVUT FS 2010. 52 s.
- MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Praha, ČVUT 1993. 50 s.
- normy, časopisy, firemní literatura.
- VALÍČEK, J. et al.: Experimental analysis of irregularities of metallic surfaces generated by abrasive waterjet. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(11). s. 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(3-4). s 323-328.
- VLASTNÍK, J.: Dělení materiálů paprskem kapaliny. Kandidátská disertační práce. Praha, ČVUT FS 1983. 125 s.
- VOMOČIL, L.: Vodní paprsek nyní dokáže řezat se stálým pracovním tlakem 6000 barů. Technik, 2008, 16(9). 25-26.
- WaterJets.org ... the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z [www: http://waterjets.org/](http://waterjets.org/)
-

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 13. 1. 2017

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 13. 10. 2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Řezání 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, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících § 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 rady, odborné vedení a pomoci při jejím zpracování. Dále bych chtěl poděkovat nejbližším za jejich podporu a konzultace při zpracování diplomové práce.

Abstrakt:

Předmětem diplomové práce je shrnutí poznatků metod dělení kovových materiálů. V úvodu práce je popsáno rozdělení způsobů dělení materiálů a bližší rozbor technologie vodního paprsku. V experimentální části práce je zkoumána závislost šířky spáry řezu a velikosti úhlu úkosu řezu na řezné rychlosti, množství abraziva a tloušťky materiálu. Pro experiment byly použity různé druhy kovových materiálů (ocel, měď, dural, litina a nerezová ocel) o tloušťkách 5, 10 a 20 mm. Dále bylo vyhotoveno 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 main subject of the Diploma thesis is a summary of knowledge of metal cutting methods. Methods distribution of material separation and analysis of the water jet technology are described at the beginning of the Diploma thesis. Experimental part of the thesis is focused on dependence of the width and angle size of cutting joint, the amount of abrasive and thickness of material. For the experiment were used various types of metallic materials (steel, copper, duralumin, cast iron and stainless steel). Metallic materials thickness were 5, 10 and 20 mm. In the Diploma thesis was made technical and economic evaluation. Results were summarized in conclusion part.

Keywords:

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

Obsah

1	Úvod	1
2	Rozdělení metod dělení kovových materiálů	2
2.1	Konvenční metody dělení kovových materiálů	3
2.1.1	Dělení materiálu řezáním	3
2.1.2	Dělení materiálu stříháním	4
2.1.3	Dělení materiálu rozbrušováním	4
2.1.4	Dělení materiálu upichováním	5
2.1.5	Dělení materiálu lámáním	5
2.2	Nekonvenční metody dělení kovových materiálů	6
2.2.1	Dělení materiálu kyslíkem.....	6
2.2.2	Dělení materiálu laserem.....	6
2.2.3	Dělení materiálu plazmou.....	7
2.2.4	Elektroerozivní dělení materiálu	9
2.2.5	Dělení materiálu elektronovým paprskem.....	9
2.2.6	Dělení materiálu ultrazvukem	10
3	Dělení materiálu vodním paprskem	12
3.1	Vodní paprsek	12
3.2	Typy vodního paprsku	12
3.3	Kontinuální vodní paprsek.....	13
3.3.1	Čistý vodní paprsek	13
3.3.2	Abrazivní vodní paprsek.....	13
3.3.3	Kryogenní vodní paprsek	14
3.3.4	Kavitační vodní paprsek	15
3.3.5	Ultravysokotlaký vodní paprsek.....	15
3.4	Diskontinuální vodní paprsek	15
4	Základní konstrukční části zařízení	16
4.1	Zdroj vysokotlaké kapaliny	16

4.1.1	Zařízení s multiplikátorem	16
4.1.2	Zařízení s triplexovým plunžrem.....	18
4.2	Akumulátor tlaku (tlumič pulzů)	18
4.3	Filtry a způsoby úpravy vody	18
4.4	Elementy pro rozvod vody.....	19
4.5	Vodní trysky	19
4.6	Lapač vody a opěrná mřížka.....	20
4.7	Dávkovač abraziva.....	20
4.8	Abrazivo.....	20
5	Charakteristika řezu.....	22
5.1	Kvalita řezu.....	22
5.2	Drsnost povrchu.....	22
5.3	Vady řezu.....	23
6	Výhody, nevýhody technologie řezání vodním paprskem.....	25
7	Cíl práce.....	26
8	Metodika práce	27
8.1	Charakteristika vzorků.....	27
8.2	Zvolené technologické parametry experimentu.....	29
8.3	Měřicí přístroj a použitý software.....	30
8.4	Postup měření šířky spáry závislé na řezných parametrech	31
8.5	Postup výpočtu velikosti úhlu úkosu řezné spáry.....	32
9	Výsledky experimentu	33
9.1	Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka řezné spáry	33
9.2	Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, velikost úhlu úkosu.....	34
9.3	Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka řezné spáry	34
9.4	Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, velikost úhlu úkosu.....	35
9.5	Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka řezné spáry	36
9.6	Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, velikost úhlu úkosu	36

9.7	Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka řezné spáry.....	37
9.8	Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, velikost úhlu úkosu.....	38
9.9	Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, šířka řezné spáry	38
9.10	Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, velikost úhlu úkosu.....	39
9.11	Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, šířka řezné spáry	40
9.12	Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, velikost úhlu úkosu.....	40
9.13	Nerezová ocel ČSN 17 153.2, šířka řezné spáry.....	41
9.14	Nerezová ocel ČSN 17 153.2 – 5 mm, velikost úhlu úkosu	42
9.15	Měď ČSN 42 3001, Litina ČSN 42 2420, Ocel ČSN 11 375 – 5 mm.	42
10	Diskuze.....	46
11	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	47
12	Závěr	52
13	Citovaná literatura	53
14	Seznam obrázků.....	56
15	Seznam tabulek	57
16	Přílohy.....	58

1 Úvod

Se stále rozvíjející se lidskou společností se zvyšují nároky na uspokojování lidských potřeb. Pocit uspokojení se stal fenoménem posledních staletí, a proto člověk vyvíjel neustále nová a nová řešení, jak těmto požadavkům vyhovět. Růst požadavků se projevuje snad ve všech oblastech neopomínaje oblastí strojírenské technologie. Již od dob minulých při zpracování surového železa se vynalezaly první konvenční technologie dělení kovových materiálů, které se díky lidské vynalézavosti vyvíjely neustále kupředu.

V dnešní době jsou konvenční technologie hojně zastoupeny ve formě řezání, stříhání a dalších metod, které bezpochybně k úpravám kovu patří. Avšak důraznější nároky na kvalitu povrchu, produktivitu práce a ekologické hledisko dalo podnět pro vývoj nových technologií pro přesné, rychlé, účinné a ekologické dělení. Takovým to metodám se říká nekonvenční nebo taky progresivní, do kterých můžeme zařadit následující technologie: elektroerozivní obrábění, obrábění laserem, plazmou, paprskem elektronů a ultrazvukem a v neposlední řadě také obrábění vodním paprskem, který je předmětem diplomové práce.

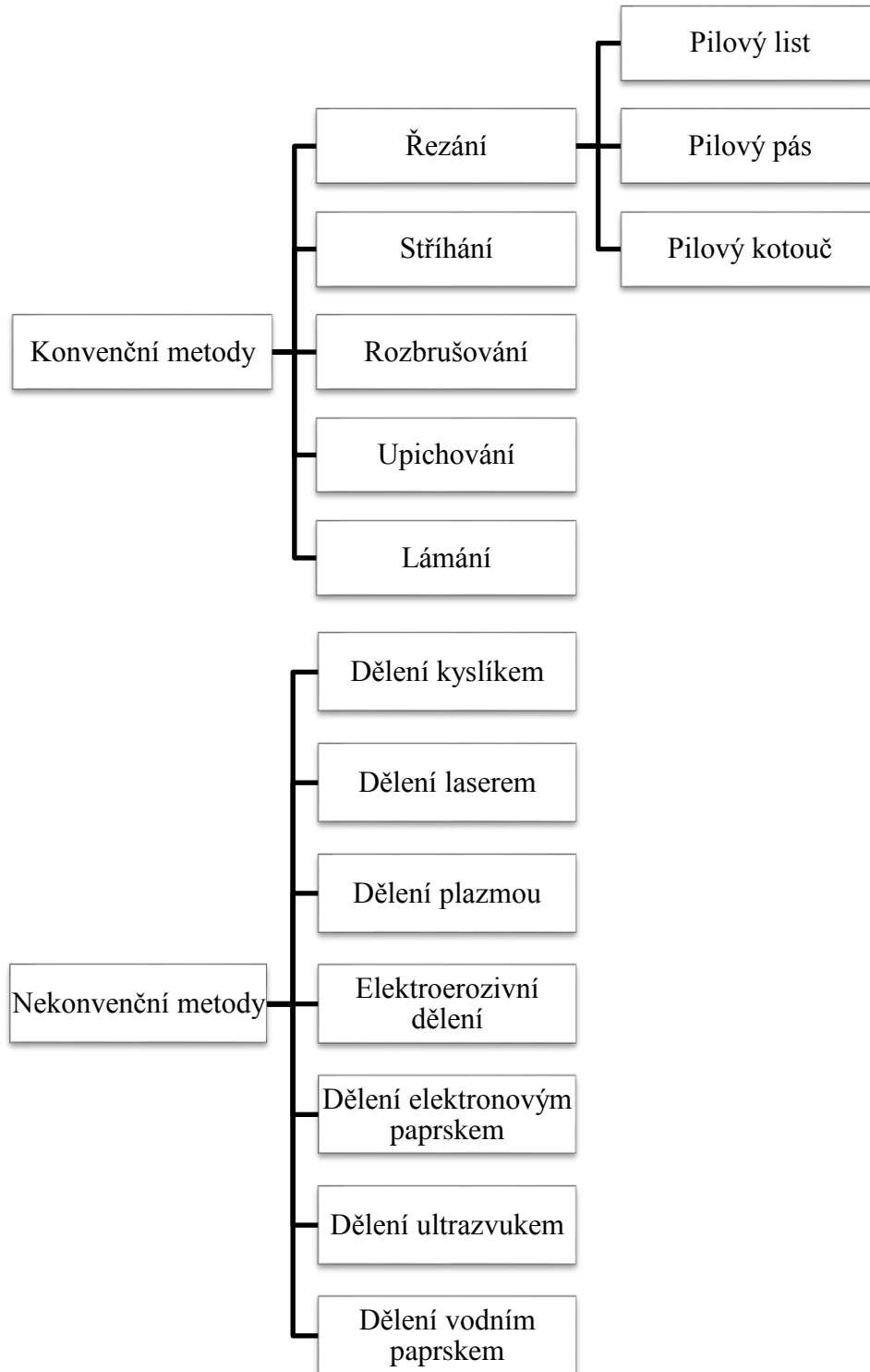
K prvnímu využití tlaku vodního paprsku došlo již v 80. letech 19. století v dolech pro dělení měkkých hornin. V 70. letech minulého století docházelo ke snaze využít vodní paprsek nejen k rozdrůžování hornin, ale také k dělení měkčích materiálu jako je dřevo apod. V následujících letech se vodní paprsek používal i pro dělení kovů a jiných tvrdších materiálů. Od té doby metoda prošla značným vývojem a dnes nachází velkou škálu uplatnění, kde opracovává a dělí široké spektrum materiálů od kovů po keramiku, plasty a kompozity. [1]

Díky své oblíbenosti a mnoha výhodám, které tato technologie obrábění přináší je vynaloženo velké úsilí na to, jak tuto metodu zdokonalovat, zefektivňovat a díky příznivému cenovému vývoji více rozšiřovat i mimo průmyslovou výrobu.

Práce se v kapitolách zabývá stručným seznámením čtenáře s výše uvedenými způsoby dělení kovového materiálu s bližším rozborem technologie řezání vodním paprskem. Dále je v práci uvedeno řešení experimentu, na kterém bylo vyhotoveno technicko-ekonomické zhodnocení.

2 Rozdělení metod dělení kovových materiálů

Metod obrábění kovového materiálu je velké množství a dají se dělit podle mnoha různých kritérií. Obecně lze však technologie rozdělit na konvenční a nekonvenční způsoby dělení.



2.1 Konvenční metody dělení kovových materiálů

Pod název konvenční dělení kovových materiálů můžeme řadit takové metody, které pro rozduřování materiálu používají mechanickou práci, při níž se může, ale také nemusí tvořit odpad v podobě třísek.

Tento způsob dělení je omezen mechanickými vlastnostmi řezného nástroje i materiálu, což má výrazný vliv na řeznou rychlost a také možnosti využití. I přes své nevýhody je způsob hojně používán díky jednoduchosti a cenové dostupnosti.

2.1.1 Dělení materiálu řezáním

Jedná se o převážný způsob dělení tyčového materiálu. Princip řezání spočívá ve vnikání břitu nástroje do děleného materiálu. Nástroje pro řezání se liší svou konstrukcí a také podle vykonávaného pohybu. Proto dnes rozeznáváme:

- pilový list,
- pilový pás,
- pilový kotouč. [2]

Strojní rámová pila

Slouží pro upínání strojního pilového listu v rámu pily, který pomocí klikového mechanismu může vykonávat přímočarý vratný pohyb. List pily zabírá (řeže) pouze při zpětném tedy vratném pohybu. Nástroj je opatřen zuby na jedné straně. Zuby mají jednoduchý tvar a jsou tzv. rozvedené, aby se zamezilo dření těla pilového listu o stěny řezaného materiálu.

Při řezání se musí dbát na správnou volbu strojních pilových listů. Volba je podmíněna správným počtem zubů na 25 mm délky listu rozměrem a druhem děleného materiálu. Například při řezání malých a středních tloušťek všech druhů materiálu se používá pilový list s deseti zuby na 25 mm délky. [3]

Pásová pila

Obdobně jako u rámové pily je pilový pás uložen v rámu stroje. Nástroj je napnut mezi hnací a hnaný kotouč, který vykonává rotační plynulý pohyb. V blízkosti místa řezu je pilový pás naváděn čtyřmi kladkami pro natočení pásu kolmo na obrobek. Řezné nástroje jsou vyrobeny z uhlíkové nástrojové oceli a bimetalické. Odlišnost pásů je v mechanických vlastnostech a tvrdosti povrchu. Velké nároky jsou kladeny na tvary zubů, které by měly být efektivní a neměly by způsobovat žádné vibrace. [2]

Kotoučová pila

Materiál je zde odebírán pomocí rotujícího kotouče uloženém na vřetení stroje. Posuv materiálu do řezu je ve většině případů realizován hydraulickým mechanismem, což umožňuje automatickou změnu posuvu při změně průřezu materiálu. Výhodou oproti výše uvedeným způsobům je vyšší rychlost a přesnost, řez mnohdy nevyžaduje další úpravy.

Pilový kotouč má po svém obvodu umístěné zuby. Ty jsou buď v podobě připájených břitů ze slinutých karbidů nebo je kotouč vyroben celý z nástrojové oceli. Při řezání je důležité dbát na správný typ a rozteč zubů. Špatná rozteč způsobuje usazování třísek v mezizubním prostoru, může dojít k vylomení zubu. [2], [3]

2.1.2 Dělení materiálu stříháním

Stříhání je beztržkové dělení materiálu a je klasifikováno jako nejrozšířenější operace tváření. Používá se zejména na přípravu polotovarů (stříhání plechů, sviteků, vývalků apod.), vystřihávání součástí z plechu nebo na pomocné či dokončovací operace. Kromě klasického stříhání existují i jiné operace jako jsou např. děrování, vystřihávání, prostřihávání atd. [4], [5]

Princip stříhání spočívá v oddělování části materiálu působením protilehlých řezných hran nástroje způsobující v řezné rovině smykové napětí. Vzniklé napětí převyšuje mez pevnosti, dochází tedy k porušení soudržnosti a tím k oddělení části materiálu. Materiál lze dělit stříháním za tepla i studena. [4]

Nástroje pro stříhání tvoří dvojice nožů. Střížník, který vykonává funkci horního pohyblivého nože a střížnice, která plní funkci pevného nože. Konstrukce střížníků (nožů) je různorodá. Dělí se na rovnoběžné nože, kotoučové, šikmé a nože na profily a tyče.

Výhody technologie stříhání spočívají ve vysoké produktivitě, nízkých provozních nákladech. Velkou nevýhodou je vznik otřepu a deformačního zpevnění v okolí stříhu a také omezena tloušťka stříhaného materiálu.

2.1.3 Dělení materiálu rozbrušováním

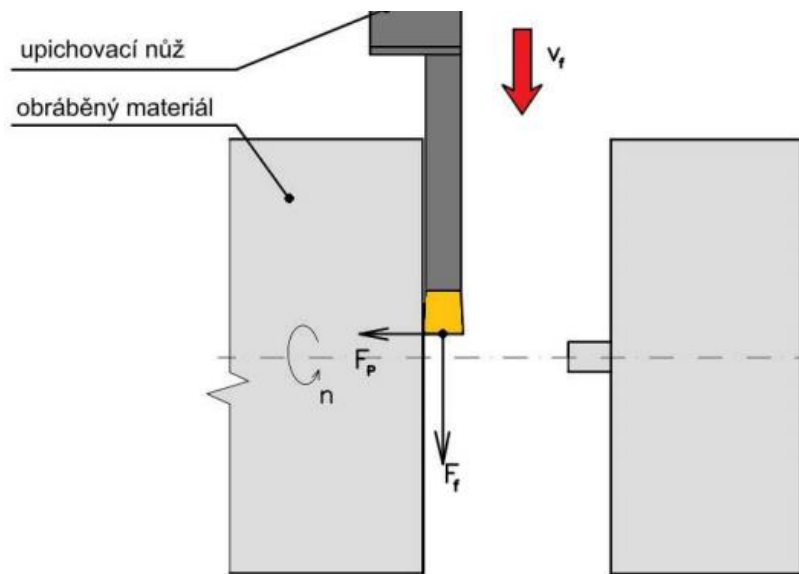
Podobně jako u dělení materiálu kotoučovou pilou je i zde k úběru materiálu používán kotouč. Ten je zhotoven ze zrn karbidu (SiC) nebo syntetického korundu (Al_2O_3). Těleso kotouče pak zpravidla bývá vyztuženo sklotextilem. Metoda se převážně používá k dělení menších průřezů materiálu s vyšší tvrdostí a pevností.

Výhodou rozbrušování je úzký řez, nevýhodou je pak nadměrná intenzita opotřebení kotouče a také dosažení vyšších teplot v průběhu řezu. Bez chlazení materiál tepelně degraduje. Proto se k rozbrušování nehodí materiály se sklonem k zakalení nebo popouštění povrchové vrstvy. [2]

2.1.4 Dělení materiálu upichováním

Metoda se nejčastěji používá pro dělení tyčového materiálu kruhového profilu. Upichování se provádí na upichovacích automatech nebo univerzálních soustruzích. Obrobek rotuje a nástroj v podobě speciálního upichovacího nože koná přímočarý posuvný pohyb od obvodu obrobku k jeho ose, jak je zřejmé z obr.1. Při této operaci vznikají poměrně značné ztráty materiálu, které mohou být kompenzovány velmi přesnými rozměry a hladkou plochou. Jako nástroje jsou používány výše zmíněné soustružnické nože z rychlořezné oceli nebo s plátky slinutých karbidů. [6]

Obr. 1 Schéma upichování



Zdroj: [7]

2.1.5 Dělení materiálu lámáním

Základní princip lámání je využití koncentrace napětí v místě vrubu, který slouží ke zúžení plochy průřezu děleného materiálu. Vrub se vytváří hoblováním, broušením, frézováním úhlovou frézou a vypálením kyslíkem. Právě poslední jmenovaný způsob je pro proces lámání výhodný. V blízkosti ohřevu vzniká tepelné napětí ovlivňující sílu lámání, které je v tomto případě nižší než u předešlých způsobů. Lámat lze pouze pevnější materiály, méně pevné se nelámou nýbrž ohýbají. Nevýhodou je možnost

vzniku trhlin v místě lomu s následným šířením trhlin do materiálu a nízká kvalita lomové plochy. Dělení se provádí na speciálních lácích strojích a v dnešní době se využívá jen okrajově. [6]

2.2 Nekonvenční metody dělení kovových materiálů

Nekonvenční metody dělení materiálu zahrnují takové způsoby dělení, které na rozdíl od klasických způsobů v nadměrné míře nepoužívají mechanickou práci k úběru materiálu. K úběru jsou využívány tepelné, elektrické, chemické, abrazivní a jiné fyzikální jevy nebo jejich kombinace. [8]

2.2.1 Dělení materiálu kyslíkem

Tato metoda, nazývána také jako kyslíkové pálení, je často používána pro tepelné dělení uhlíkových ocelí a litin větších tloušťek.

Celý proces řezání spočívá v ohřevu materiálu v místě řezu na tzv. zápalnou teplotu. Ta je zpravidla nižší, než je teplota tavení, pro železo 1150 °C. Po ohřevu na danou teplotu se k místu řezu přivádí kyslík pod tlakem, který vytváří řeznou spáru spálením (oxidací) kovu. Materiál při správné teplotě intenzivně reaguje s kyslíkem, probíhá exotermická reakce. Teplo vzniklé ohřevem stále předehřívá kov, tudíž teoreticky řezání stále pokračuje díky přiváděnému kyslíku. Kyslíkem také částečně dochází k vyfoukávání roztaveného kovu ze spáry. K předehřevu je nejčastěji využíván jako topný plyn acetylen, dále lze použít vodík, propan, zemní plyn i benzín. [9]

Výhody metody jsou malé investiční a provozní náklady, možnost řezání pod hladinou vody, mobilita a řezání velkých tloušťek. Mezi hlavní nevýhody patří malá řezná rychlost, vznik otřepů a velká tepelně ovlivněná oblast.

2.2.2 Dělení materiálu laserem

Při dělení materiálu laserem se využívá přeměna světelné energie na tepelnou, soustředěnou do jednoho místa. Z laseru vychází laserový paprsek obsahující velmi hustou energii ve formě monochromatického a koherentního záření. Ten je schopen natavit nebo odpařit materiál na ploše 1 mm² ve zlomku sekundy. Dosahovaná teplota u tohoto typu dělení je až 10 000 °C. Technologie umožňuje řezat velké množství materiálů, dělí i velmi tvrdé materiály při vysoké kvalitě a rychlosti řezu. Základem je absorpce laserového záření. Z toho vyplývá, že materiály nesmí být ideálně průzračné či odrazivé. V takovém to případě je laserový paprsek pohlcován a nevznikala by eroze, řezání by se neuskutečnilo. Pohltivost materiálu je dána jeho fyzikálními vlastnostmi jako je např. tepelná vodivost, složení, hustota, apod. [9]

Obr. 2 Schéma řezání laserem



Zdroj: [10]

V praxi se využívají pouze dva druhy laserů, Nd: YAG laser a CO₂ laser. Prvně uvedený používá jako aktivní prostředí ytrium-aluminiový granát ve formě krystalů různých tvarů (kvádr...). Tento typ využívá malé množství energie na samotný řez, vzniká tak přebytečné teplo. Účinnost bývá 3–8 %. CO₂ laser, jak už vyplývá z názvu, využívá jako médium směsi plynů CO₂, N₂ a He. Mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu, proto mají širokou škálu uplatnění. Účinnost plynových laserů je 10–15 % a užívají se především na dělení nekovových materiálů. [9]

Výhodou laserového řezání je velká řezná rychlost, malá tepelně ovlivněná oblast, dobrá jakost povrchu na úkor vysoké pořizovací a provozní ceny, a především malé účinnosti.

2.2.3 Dělení materiálu plazmou

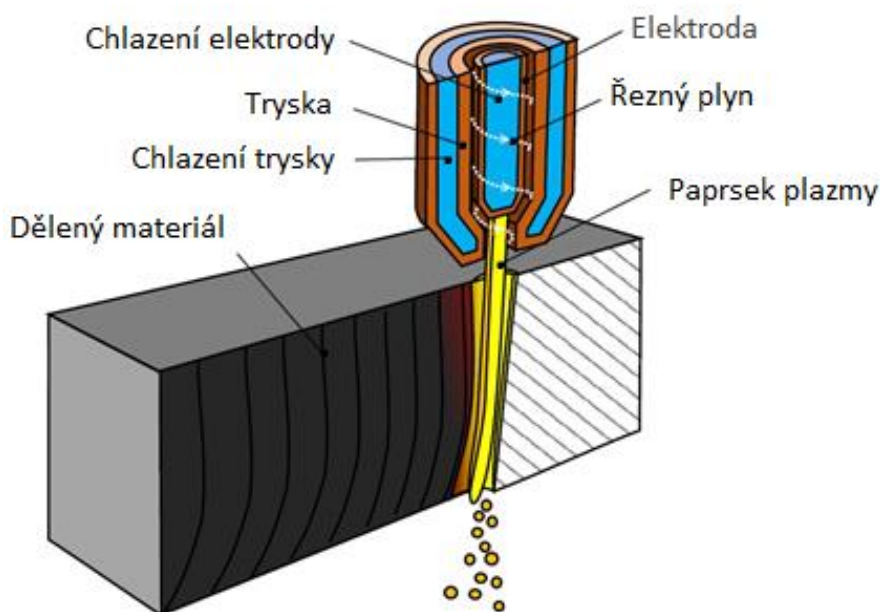
Je další způsob využívající tepelné principy, přeměna elektrické energie na tepelnou energii usměrněnou do proudu plazmatu. Základem technologie je ohřev nebo tavení materiálu při extrémně vysokých teplotách podobně jako u laserového řezání, tedy 10 000 °C a více. Takto vysoká teplota vzniká molekulárním rozkladem plynu při průchodu molekul elektrickým obloukem, který hoří mezi anodou a katodou. Katodou se rozumí wolframová elektroda a anodou řezaný materiál nebo těleso hořáku. [11]

Pro řezání plazmou je velmi důležitá stabilizace oblouku. Ta může být docílena pomocí vody, plynu nebo stlačeného vzduchu. Jedna z možností je stabilizace pomocí plynu využívající fokusační plyny. Plyny, které zužují (fokusuji) paprsek při jeho výstupu z hořáku. Pro tuto možnost se využívá dusík, argon nebo jejich vzájemná kombinace. [12]

Dále se také může použít speciální metoda dvojího proudění využívající nejen řezného plynu (dusík), ale také sekundárního plynu. Sekundární plyn chrání paprsek plazmy a řezanou plochu. Plyn se liší dle řezného materiálu. Pro názornost u uhlíkových ocelí se používá nejčastěji kyslík nebo vzduch.

Princip stabilizace vodou vychází z metody dvojího proudění, proto je sekundární plyn nahrazen vodou. Voda je vstříkována do plazmového paprsku, čímž dochází k sevření oblouku. V této zúžené oblasti může teplota dosáhnout až 35 000 °C. I přes takto vysokou teplotu k vypařování vody dochází jen parciálně, obvykle se jedná o pouhých 10 %. [11]

Obr. 3 Schéma dělení plazmou



Zdroj: [13]

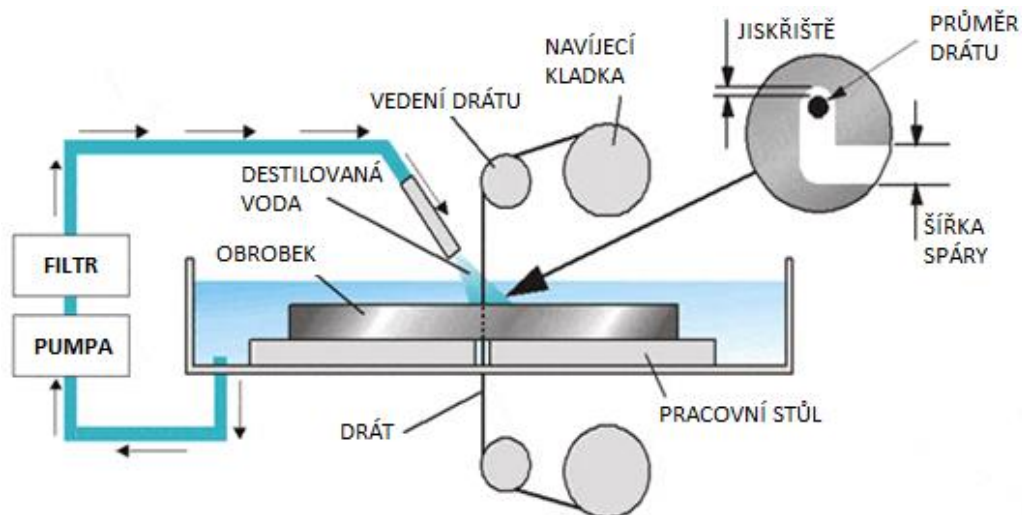
Rozmezí materiálů pro řezání plazmou je dosti široká, od nelegovaných ocelí až po neželezné kovy (slitiny hliníku...). Mezi výhody dělení patří vysoká řezná rychlost, velká tloušťka materiálu, nízká pořizovací cena (oproti laseru). Nevýhodou je vznik otřepu, zkosení řezné hrany (rozdílná šířka řezu vstup/výstup) a špatná hygiena pracovního prostředí (hluk, prach, UV záření).

2.2.4 Elektroerozivní dělení materiálu

Toto dělení je založeno na působení elektrických výbojů na povrchové vrstvy materiálu, tzv. elektrická eroze. Ta probíhá mezi dvěma elektrodami, drátem a obrobkem. K samotnému řezání materiálu je zapotřebí vytvořit elektrický výboj. Ten vyvoláme působením elektrického napětového pole mezi kladnou (materiál) a zápornou (drát) elektrodou, vznik vodivého (ionizovaného) kanálu a možnost protékání elektrického proudu. K dělení plazmovým pásmem, dochází k odtavování a odpařování materiálu na elektrodách (až 12 000 °C). Drát tedy záporná elektroda je tavením zasažena jen částečně díky napínací a odvíjecí cívce, která drát neustále odvíjí. [8], [14]

Aby technologie mohla fungovat tak jak má, je zapotřebí použít kapalinového dielektrika. Schopností kapaliny je izolovat elektrody, odvádět teplo a vzniklé zplodiny. Dělený materiál je v kapalině zcela ponořen. Nejčastěji se používají transformátorové a strojní oleje, destilovaná voda, petrolej.

Obr. 4 Elektroerozivní dělení materiálu



Zdroj: [14]

Pro své výhody jako např. vysoká přesnost dělení, možnost řezání těžkoobrobitelných materiálů je jednou z nejrozšířenějších nekonvenčních metod. Hlavní nevýhodou elektroerozivního drátového dělení je materiál. Ten může být pouze kovový (vodivý).

2.2.5 Dělení materiálu elektronovým paprskem

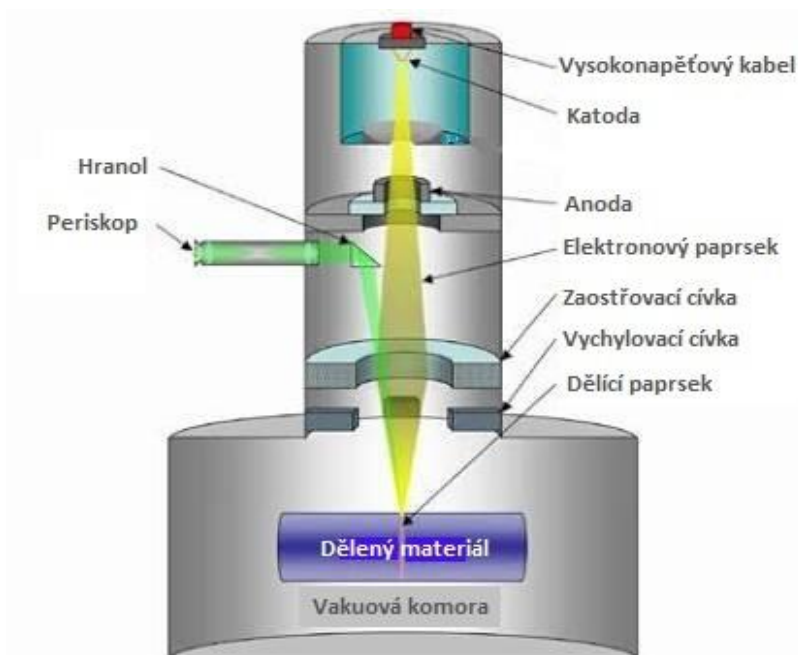
Při tomto způsobu dělení materiálu dochází k roztavení a odpaření materiálu paprskem elektronů. Princip je založený na přeměně kinetické energie, urychlených elektronů v místě dopadu, na tepelnou energii. Odpařování v místě řezu probíhá

vysokou rychlostí směrem z otvoru (řezu) a zapříčiní další zaostření pracovního místa. Zdrojem elektronového paprsku je dělo s wolframovou anodou a katodou sloužící k nahromadění, zaostření a zrychlení elektronů až na 3/4 rychlosti zvuku. K zaostření, ale také k zúžení paprsku na velmi malou plochu, se používá elektromagnetická nebo elektrostatická čočka umístěná ve vakuu. [15], [16]

Využití elektronového paprsku je především pro dělení těžkoobrobitelných materiálu (žárupevné oceli, titanové slitiny...), naopak metoda není vhodná pro řezání hořčíku, slinitých karbidů, bronzu atd. Obecně se úběr materiálu provádí ve vakuové komoře, aby se zamezilo zbytečnému rozptylu elektronů. Zajímavostí je, že technologie se využívá i pro svařování běžnými způsoby nesvařitelných materiálů, které jsou chemicky aktivní (niob, molybden apod.) [16]

Mezi výhody patří dělení tepelně odolných materiálů, vrtání otvorů o průměru 0,002 mm, obrobek je minimálně ovlivněn tepelnou degradací. Nevýhodou je mimořádná spotřeba energie při procesu, vysoká cena pořízení a provozu, relativně velké nároky na prostor.

Obr. 5 Schéma elektronového řezání



Zdroj: [17]

2.2.6 Dělení materiálu ultrazvukem

Základní podstatou ultrazvukového dělení je v mechanickém rozrušování materiálu prostřednictvím úderů abrazivních částic. Zrna abrazivního materiálu jsou přiváděna

mezi povrch obrobku a kmitající nástroj viz obr. 6, který kmitá kolmo k povrchu děleného materiálu a rozkmitává zrna na ultrazvukovou frekvenci, 18 až 25 kHz. Nástroj je současně přitlačován k obrobku určitou silou, čímž dochází k pronikání abraziva a překopírování tvaru pracovní částí do děleného obrobku. K úběru materiálu dochází i na bočních plochách v okolí nástroje, který také podléhá částečnému narušení povrchu. [18]

Pracovní prostředí technologie je kapalina, která unáší brusná zrna a způsobuje útlum kmitů svou viskozitou. Kmity nástroje způsobují v kapalině kavitaci, která podporuje rozrušování materiálu a pohyb zrn v místě řezu. Jako kapalina se nejčastěji využívá voda, líh, petrolej nebo strojní olej. Jemná zrna jsou vyrobena z diamantu, oxidu hlinitého, kubického nitridu boru a karbidu křemíku.

Obr. 6 Ultrazvukové dělení



Zdroj: [19]

Výhoda použití metody spočívá v dělení křehkých nebo těžkoobrobitelných materiálů s vysokou přesností a drsností povrchu. Nevýhodou je nízká produktivita oproti předešlým konvenčním způsobům dělení. Další nevýhodou této metody je nedělitelnost plastických materiálů, které odolávají rozrušování abrazivních zrn. Nástroj je opotřebováván stejně rychle jako materiál.

3 Dělení materiálu vodním paprskem

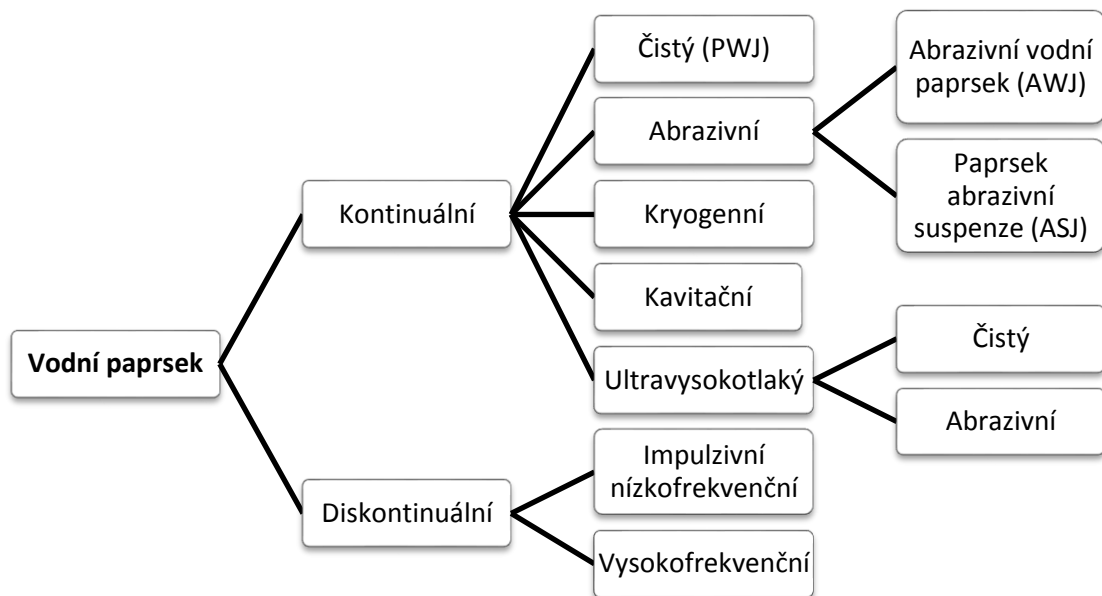
Tato kapitola je zaměřená na popis technologie vodního paprsku. V podkapitolách je čtenář stručně seznámen s typy, principem a konstrukcí strojního zařízení.

3.1 Vodní paprsek

Technologie vodního paprsku patří do skupiny nekonvenčních (progresivních) metod dělení materiálu. Proces je založený na mechanicko-fyzikálním působení paprsku vody, soustředěného do jednoho místa řezu.

Podstata řezání spočívá v odebrání materiálu kinetickou energií vysokotlakého a vysokorychlostního proudu vody (od 300 m.s^{-1} při 70 MPa do 1000 m.s^{-1} při tlaku vyšším než 400 MPa), do kterého se mohou přidávat abrazivní částice pro zvýšení účinku řezu. Zdrojem tlaku vody je vysokotlaké čerpadlo, které prostřednictvím multiplikátoru generuje tlak dosahující přes 600 MPa . Kapalina pod vysokým tlakem prochází tzv. dýzou, jež formuje proud vody do úzkého paprsku. Materiál je odebrán erozivním procesem v důsledku působení řezného media, usměrněného do úzkého paprsku, který aktivně působí na obrobek. [1]

3.2 Typy vodního paprsku



Zdroj: [20]

3.3 Kontinuální vodní paprsek

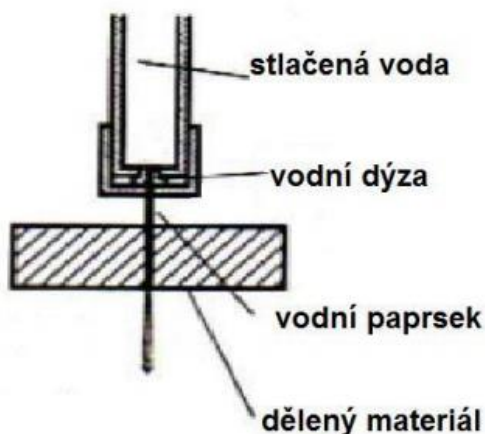
Charakteristické pro kontinuální vodní paprsek je stálá energetická hladina v průběhu pracovního procesu. Řadí se mezi nejrozšířenější metody dělení a používá se prakticky pro všechny druhy materiálů.

3.3.1 Čistý vodní paprsek

Jedná se o původní způsob dělení vodou, jehož komerční využití sahá už do dob předminulého století, kdy se jednalo o dělení měkkých hornin. Způsob využívá vlastností obyčejné vody, která je vyčištěná od nečistot a minerálů filtrací, aby nedocházelo k zbytečnému opotřebení zařízení. Proud vody zde dosahuje velmi tenkých průměrů (0,1016 až 0,254 mm) o vysokém tlaku dosahující velikosti přes 600 MPa. Takto tenkým sloupcem vody lze řezat mimořádně složitou geometrii (jemné obrysy, malé poloměry, ostré úhly...). Dále jsou zde vyvíjeny nízké řezné síly, díky kterých stačí jednoduché upnutí materiálu. [21]

V dnešní době se řezání čistou vodou využívá zejména pro neželezné materiály jako jsou např. dřevo, pryž, tenké fólie, kevlar atd. Během procesu řezání nevznikají žádné škodlivé (jedovaté) látky obsažené v párách nebo plynech, proto je metoda vhodná i pro dělení potravin.

Obr. 7 Čistý vodní paprskem



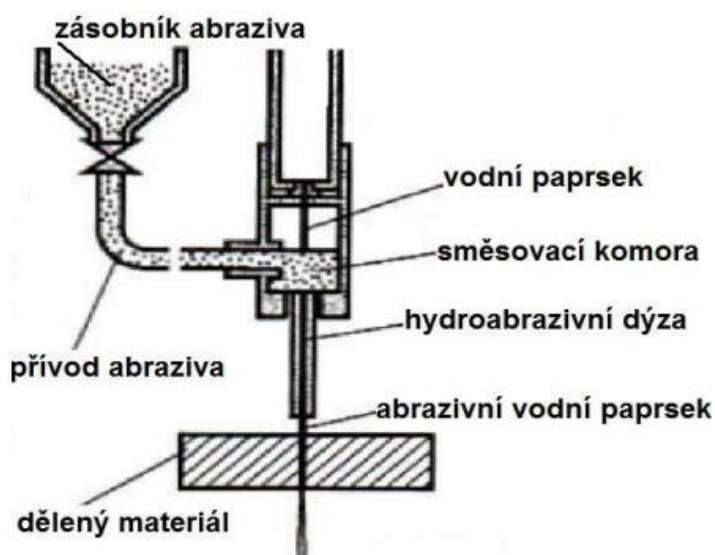
Zdroj: [1]

3.3.2 Abrazivní vodní paprsek

Zde se jedná o technologický proces odebrání částic obrobku stykem abrasiva unášeného médiem tedy proudem vody. Výsledný tvar vodního paprsku je tvořen ve

směšovací trubici a je závislý na jejím průměru, hmotnostním toku abrazivních částic a na velikosti a tvaru brusných zrn. Jako abrazivum nachází uplatnění zejména ostrohranné minerální látky v podobě granátového písku apod. Množství abrazivních částic závisí na vlastnostem materiálu, rychlosti posuvu atd., a běžně se pohybuje v rozmezí mezi 100 až 800 g.min⁻¹. Používaný tlak je zde obdobný jako v případě čistého vodního paprsku. Řezný potenciál abrazivního vodního paprsku je až tisíckrát větší než u čisté vody a je téměř neomezený, co se děleného materiálu týče. Technologie je schopná řezat velmi tvrdé materiály, proto se dnes používá především pro dělení litiny, ocelí, kompozitu, hornin i keramiky. [22], [21]

Obr. 8 Abrazivní vodní paprsek



Zdroj: [1]

3.3.3 Kryogenní vodní paprsek

Abrazivo u toho to typu vodního paprsku je nahrazeno krystalky ledu ve tvaru kuliček, které jsou taktéž přimíchávány do proudu vody. Další specifikací kryogenního paprsku je využívání tekutého dusíku. Ten pracuje v podobném systému jako čistý vodní paprsek. Pracovní teplota dusíku dosahuje až -190 °C. U teplot vyšších, než je -151 °C dochází k rychlému odpaření dusíku a tím ztrátě řezného výkonu. Metoda je šetrnější k životnímu prostředí díky vypařování řezného média a tím eliminací odpadu. Paprsek se používá všude tam, kde nelze použít klasický vodní paprsek, jako např. u chemicky reaktivních materiálů, materiálů nesnášejících vodu apod. [23]

3.3.4 Kavitační vodní paprsek

Pracuje s jevy tzv. imploze, což je zborcení kavitační dutiny. Kavítace se objevuje, pokud je kapalina podrobena rychlé změně tlaku. Ve vodním sloupci paprsku se vyskytují dutiny pár a plynů a ty se využívají pro erozi na řezném materiálu. Při zborcení dochází ke vzniku vysokorychlostního mikropaprsku, který vysokou koncentrací energie narušuje povrch obrobku. Metoda není příliš rozšířená, kvůli velmi nízké přesnosti a konstrukční složitosti.

3.3.5 Ultravysokotlaký vodní paprsek

Základem ultravysokotlakého vodního paprsku je snížení jednotkových nákladů na obrábění, zrychlení a zvýšení kvality řezu. Tlak vody zde vstoupil téměř o 50 % vzhledem k stávajícím systémům, což znamená vyšší kinetickou energii. Zařízení pracuje s tlakem 600 MPa a více, které obstarávají např. vícestupňová čerpadla (ve dvou stupních natlakují vodu nejdříve na 300 MPa a ve druhém stupni na konečnou hodnotu 600 MPa) nebo tzv. tlakové převodníky. Nutno též použít lepší rozváděcí systém. Se vzrůstajícím tlakem vyplývá, že dochází nejen k snížení spotřeby vody, ale také k snížení množství přidaných abrazivních částic. [24]

Použití extrémních tlaků přináší i komplikace projevující se sníženou životností více namáhaných dílů. Ve většině případů se jedná o vysokotlaká čerpadla, řezací hlavy apod.

3.4 Diskontinuální vodní paprsek

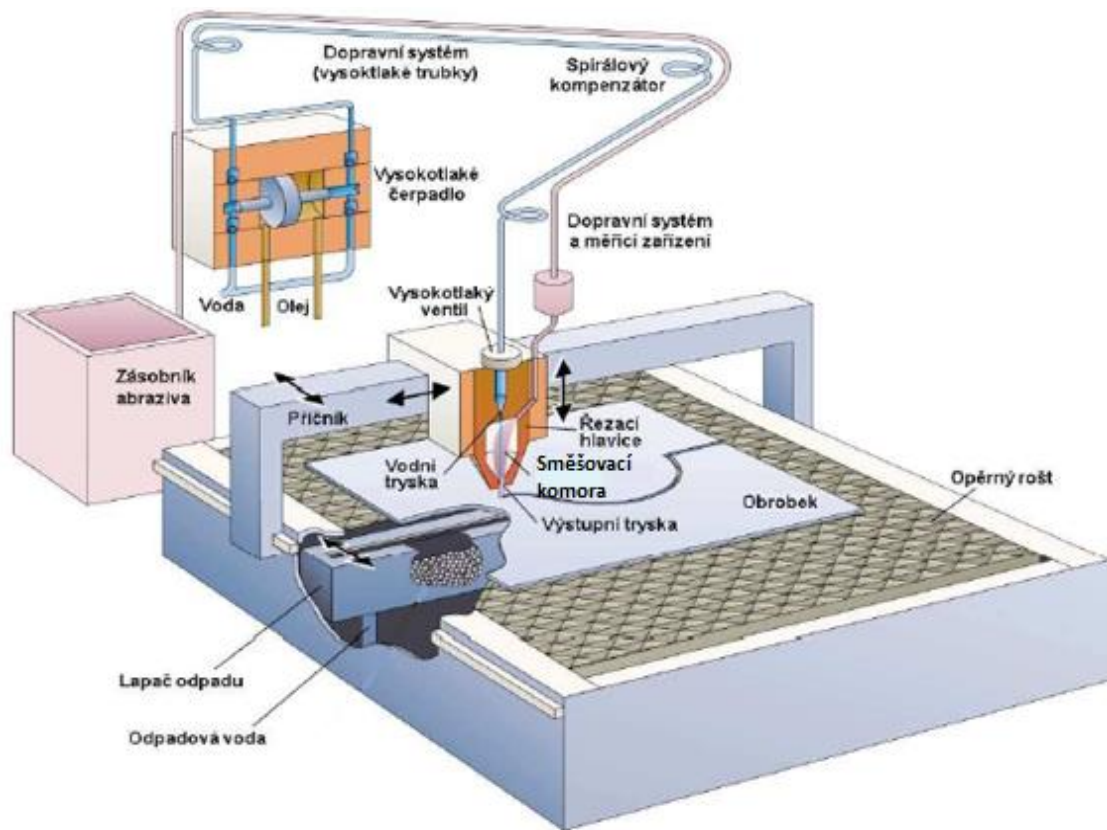
V porovnání s kontinuálním vodním paprskem je diskontinuální paprsek charakterizován proměnnou hladinou energie paprsku po dobu trvání řezného procesu. Hlavním cílem je zvětšení účinnosti zavedením přídavné energie do paprsku nebo využití principu tzv. impaktního tlaku. Tlak vzniká při nárazu čela vodního sloupce paprsku na povrch materiálu. Vodním rázem v krátkém okamžiku vzroste tlak z nulové hodnoty na několikanásobně vyšší, než je tlak generovaný dopadem kontinuálního proudu vody. [25]

V podstatě se jedná o systém pulzujících paprsků vody, které se po krátkých intervalech opakují a vytváří tlakové intervaly jejímž účinkem urychlují rozšíření řezné mezery. Metoda je vhodná k vrtání a řezání hornin či jiných nerostů.

4 Základní konstrukční části zařízení

Princip řezání vodním paprskem se může z počátku jevit jako prostý, ale z hlediska konstrukčního provedení však nikoliv. Zařízení této technologie je konstrukčně složité, náročné na životnost a přesnost jednotlivých komponentů vzhledem k tlakovému namáhání. Stroj se skládá z mnoha součástí viz obr. 9 jejichž hlavní komponenty budou popsány v následujících podkapitolách.

Obr. 9 Schéma zařízení vodního paprsku AWJM



Zdroj: [26]

4.1 Zdroj vysokotlaké kapaliny

Základem je hydraulická jednotka, která slouží k vyvinutí vysokého tlaku paprsku pomocí systému hydraulických čerpadel. Vysokotlaký vodní sloupec se generuje hydraulickým zařízením s multiplikátorem nebo triplexovým šoupátkem.

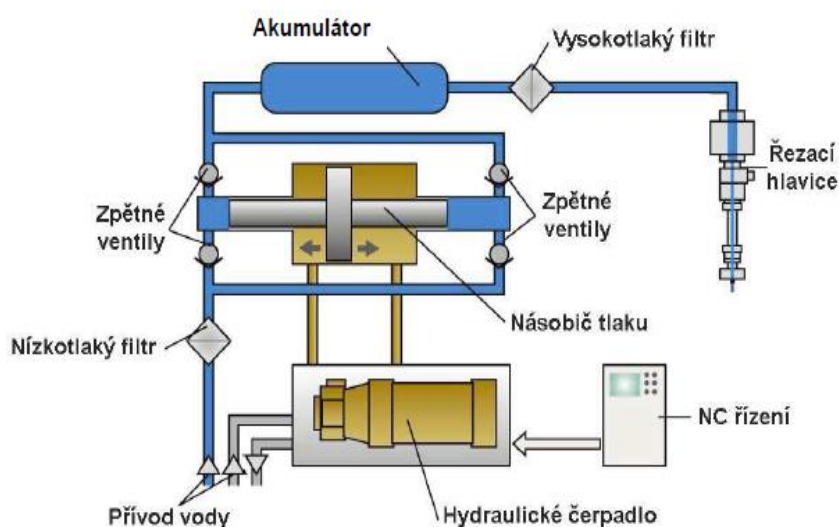
4.1.1 Zařízení s multiplikátorem

Multiplikátorové čerpadlo je součástí hydraulické jednotky a využívá hydraulického řízení posouvání pístu pro zvýšení tlaku vody na požadovanou hodnotu. Zvýšení tlaku je závislé na poměru ploch pístu, které obstarává zařízení zvané

multiplikátor. Díky změně polohy pístu vzniká na výstupu multiplikátoru pulzace kapaliny, kterou je potřeba eliminovat. Proto se do obvodu umísťuje akumulátor tlakových rázů, udržování konstantní hodnoty tlaku vody. [1]

Soustava má dva okruhy skládající se z primárního (nízkotlakého) olejového okruhu a sekundárního (vysokotlakého) vodního okruhu. Tlaky u nízkotlakého okruhu jsou běžně v rozsahu cca 16-35 MPa a u sekundárního to bývá 100-500 MPa.

Obr. 10 Soustava s multiplikátorovým čerpadlem



Zdroj: [27]

Multiplikátor

Principem je transformování nízkého tlaku oleje na vysoký tlak vody. Pracuje na bázi dvou rozdílných ploch pístu, které jsou k sobě pevně spojeny. Činnost je odvozena z Pascalova zákona (4.1), kdy při působení vstupního tlaku p_1 na plochu S_1 se bude na ploše S_2 vyvíjet příslušný výstupní tlak p_2 .

$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \quad (4.1)$$

kde: p_1 [Pa] – vstupní tlak
 p_2 [Pa] – výstupní tlak
 S_1 [m²] – vstupní plocha
 S_2 [m²] – výstupní plocha

4.1.2 Zařízení s triplexovým plunžrem

Využívá jednoduchou konstrukci klikového zařízení. Tlak je zde generován paralelně zařazenými válci s jednočinnou pístnicí. U tohoto typu není potřebný akumulátor díky snížení pulzace tlaku vody a zvýšení účinnosti. Výhoda této soustavy je její rozměrová nenáročnost a přímé zapojení do okruhu vody.

4.2 Akumulátor tlaku (tlumič pulzů)

Jak už bylo výše zmíněno, akumulátor tlumí rázy vody vyvolané pulzací a je umístěn ve vysokotlakém obvodu obsahující multiplikátor, jak je patrné z obr. 10. Princip spočívá ve pohlcování vodních rázů způsobující krátké přerušování toku pracovní kapaliny. Pulzní rázy vznikají v krajních polohách pístu, kde tlak značně klesá a poté následně rychle stoupá. Jinými slovy akumulátor slouží k udržení stálého tlaku na výstupní části trysky, tak aby byl docílen kontinuální paprsek vody, řezná rychlost i výkon. [28]

4.3 Filtry a způsoby úpravy vody

Při obrábění vodním paprskem by se měly provádět tři základní druhy úpravy vody:

- Mechanická úprava vody (povrchová, hloubková a koláčková filtrace)
- Fyzikálně-chemická úprava
- Biologická úprava

Filtry jsou nedílnou součástí celého strojního zařízení. Chrání důležité komponenty (např. trysku) před poškozením, odlučováním nečistot o malých rozměrech od 1,2 μm do 0,5 μm . V oběhu jsou použity dva druhy filtru. Vysokotlaké a nízkotlaké. Na obr. 10 je znázorněno použití těchto filtrů, nízkotlaký je umístěn v nízkotlakém okruhu před vstupem do multiplikátoru (násobiče tlaku). Vysokotlaký se naopak nachází za akumulátorem pro zabezpečení čistoty vody směřující k tryskám. Usazováním částic nečistot se musí provádět pravidelné intervaly výměny filtrů, výměna může být také podmíněna změnami tlaku. [1]

Biologická a fyzikálně-chemická úprava se provádí pro zabezpečení kvality výstupní vody odcházející do kanalizace.

Do dalších způsobů úpravy vody patří zejména změkčování. To se využívá jako přípravný krok před deionizací, která slouží k lepšímu odstranění rozpuštěných látek.

4.4 Elementy pro rozvod vody

Do skupiny rozváděcích elementů patří ty komponenty, které zprostředkovávají dodávku kapaliny do místa řezu. Patří mezi ně vysokotlaké hadice a potrubí (normalizované). Ke konstrukci se využívají korozivzdorné oceli a průměr vedení (potrubí...) se pohybuje v rozmezí 6–8 mm. Samotné elementy musí být přizpůsobené pohybu řezací hlavy a v úvahu se také musí brát pokles tlaku při ohybu hadice a vzdálenost mezi vysokotlakou jednotkou a řezací hlavou. [1], [28]

4.5 Vodní trysky

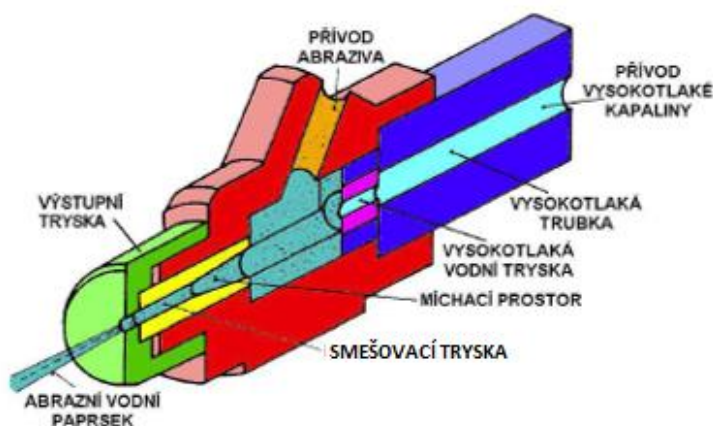
Součástí řezné hlavy je vodní dýza neboli vodní tryska. Tryska je základní a nejdůležitější součástí zařízení, neboť formuje vysokorychlostní kapalinu do úzkého paprsku. Ovlivňuje nejen kvalitu a produktivitu řezání, ale také řadu dalších parametrů jako je kolmost řezné hrany, kvalitu řezné plochy atd.

V současné době se pro dělení materiálů používají dva odlišné druhy trysek:

- tryska pro řezání čistou vodou,
- tryska pro řezání s abrazivními částicemi.

Mezi materiály používané na výrobu dýz patří safír, rubín a syntetický diamant. Diamantové dýzy mají v porovnání se safírovými (průměrně 200 hodin) a rubínovými až desetinásobnou životnost, tomu také odpovídá cena, která je cca 10x vyšší. Další výhodou diamantových dýz je zachování jejich vlastností při opakovaném čištění z důvodu usazování minerálních složek a nečistot ve štěrbině. Skutečně dosažitelná životnost závisí na technických parametrech a kvalitě pracovního média. Průměry vstupních otvorů dýz bývají od 0,8 do 2,2 mm. [1]

Obr. 11 Schéma hydroabrazivní řezací hlavy



Zdroj: [26]

4.6 Lapač vody a opěrná mřížka

Jak už z názvu vyplývá, lapač slouží k zachycování vody s použitým abrazivem a vytvořenou třískou z obrobeného materiálu. Zachycená voda s nečistotami poté odtéká do sedimentační nádrže a z ní pak do kanalizace.

Opěrná mřížka plní funkci podpory materiálu. Je vyrobená z oceli a vzdálenost jednotlivých lamel roštu je cca 25 mm. Proudem vody dochází k poškozování lamel, které se při nadměrném poškození otáčí na méně častou používanou plochu. Případně se převrací o celých 180 °. Konstrukční uspořádání lapače s opěrnou mřížkou lze vidět na obr. 10. [29]

4.7 Dávkovač abraziva

Dávkovače umožňují plynule měnit průtok abraziva během provozu, bez nutnosti zastavení řezného procesu. Udržují systém vodního paprsku v optimální účinnosti díky zajištění přesnosti a stability abrazivního průtoku. Množství abraziva se reguluje s ohledem na druh a tloušťku materiálu a tím se snižují náklady spojené s přebytečným abrazivem. Zařízení je umístěno v blízkosti řezné hlavy a abrazivum je do něj dopravováno pomocí potrubí stlačeným vzduchem ze zásobníku. [30]

Obr. 12 Dávkovač abraziva



Zdroj: [30]

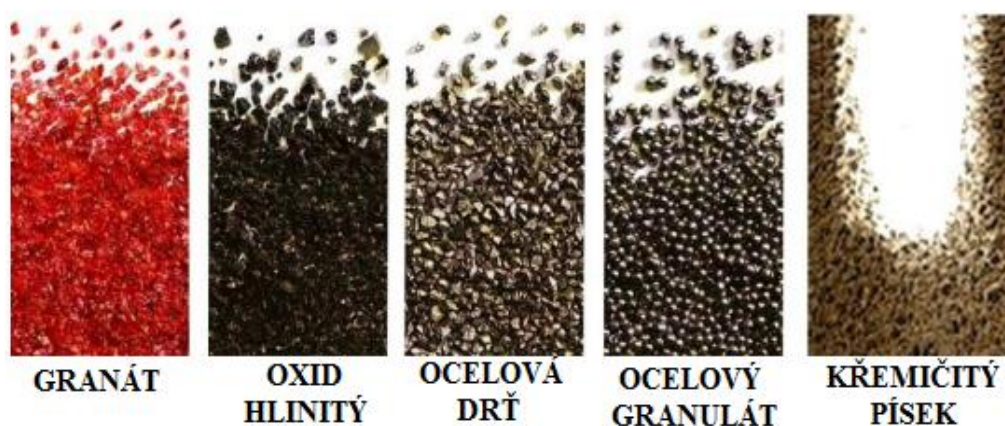
4.8 Abrazivo

Je nepostradatelná složka pro hydroabrazivní dělení materiálu. Tvoří jej drcená směs drobných krystalků granátu, oxidu hlinitého, ocelového granulátu apod. Správným druhem abraziva ovlivníme řezný výkon, minimalní opotřebení trysky a minimální dopad na pracovní a životní prostředí, nesmí se opomenout také na snížení nákladů.

Mezi významná kritéria pro správnou volbu abraziva patří:

- **Řezivost** – je zajištěna krystalickou strukturou abraziva. Krystalové mřížky dodávají abrazivu schopnost „netupit se“, tzn. při sražení hrany dopadem na materiál se vytváří několik hran nových. Díky této skutečnosti lze použité abrazivo recyklovat a znovu uvést do oběhu se sníženými řeznými parametry. [1]
- **Tvrđost** – zvyšuje účinnost řezu materiálem, ale zároveň snižuje životnost řezné trysky. Použitím optimální tvrdosti docílíme maximální efektivity řezného procesu.
- **Zrnitost** – udává velikost zrn abraziva a určuje se v jednotkách MESH (počet ok síta na jeden palec). Velikost zrn se pohybuje od 0,1 μm do 0,5 μm a stanovuje hodnotu drsnosti Ra a řeznou rychlost.
- **Cena** – z ekonomického hlediska se musí brát v potaz také cena nabízených směsí abraziva. Je nutné pokaždé uvážit, pro jaký materiál a tloušťku lze abrazivo využít. Cena není vždy v lineárním poměru s řeznými charakteristikami brusiva.

Obr. 13 Druhy používaného abraziva



Zdroj: [31]

V praxi se dnes výhradně využívá abrazivo na bázi granátu z důvodu tvrdých a pevných zrn. Granát se rozděluje podle místa náležiště na granát indický, granát australský, ruský či granát čínský.

5 Charakteristika řezu

5.1 Kvalita řezu

Z hlediska technologie řezu a jeho vlivu na obrobený materiál lze řez charakterizovat jako studený, bez viditelně ovlivněných zón teplem. Řez má minimální ztráty materiálu, pracuje s přesností od 0,1 mm až do 0,05 mm a řezná hrana má po dokončení operace otřep.

Obecně lze řez rozdělit na tři základní oblasti, jak je zřejmé z obr. 14. Prvotní hladká zóna se vytváří v horní části řezu v místě proniknutí paprsku. S nárůstem hloubky klesá energie proudu vody a vzniká tak rýhová zóna, která se vyznačuje ostrými výběžky a žlábký na obrobené ploše. Mezi výše uvedenými se vytváří tzv. přechodová zóna se stále poměrně kvalitním povrchem. [32]

Kvalitu řezu můžeme hodnotit podle kvalitativního stupně Q1 až Q5. Přičemž stupeň kvality Q1 je nejméně jakostní řez. Jednotlivé stupně jsou popsány v tabulce 1, která udává přibližné hodnoty přesnosti povrchů. Skutečné hodnoty mohou být rozdílné, dle typu a tloušťky materiálu.



Zdroj: [33]

5.2 Drsnost povrchu

Na ploše řezané vodním paprskem vzniká typická textura se dvěma zřetelnými oblastmi, horní erozivní zóna (hladký řez) a dolní erozivní zóna (rýhy). Kvalita drsnosti je v oblastech posuzována průměrnou aritmetickou úchylkou povrchu Ra. Číselné hodnoty parametru profilu Ra jsou v horní erozivní zóně výrazně nižší než v dolní zóně. Opodstatněním jsou měnicí se řezné parametry ve větších hloubkách. Z toho vyplývá, že do určité hloubky se očekává obrobený povrch hladký s nízkou drsností Ra, naopak s rostoucí hloubkou se drsnost obrobeného povrchu zvyšuje. [32]

Tabulka 1 Orientační přehled užívaných stupňů kvality řezu [27]

Stupeň kvality	Charakteristika řezu	Drsnost Ra horní/dolní část	Tvarová přesnost horní/dolní část [mm]	Úkos
Q1	Separáčnický řez	cca 6,3 / do 40	$\pm 0,2$ / výrazné nepřesnosti	Výrazný + úkos
Q2	Hrubý řez	cca 4,0 / do 25	$\pm 0,2$ / dle typu a tl. mat.	Dle typu a tl. mat.
Q3	Čistý řez	cca 4,0 / do 12,5	$\pm 0,15$ / dle typu a tl. mat.	Dle typu a tl. mat.
Q4	Kvalitní řez	cca 3,2 / cca 6,3	$\pm 0,1$ / $\pm 0,2$	Většinou minimální
Q5	Excelentní řez	cca 3,2 / cca 3,2	$\pm 0,1$ / $\pm 0,1$	Mírný podřez

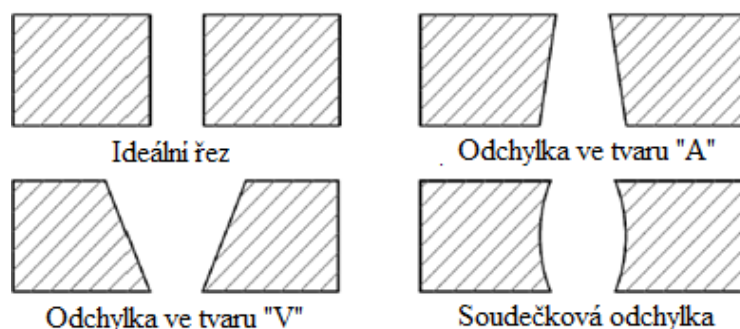
5.3 Vady řezu

Odchylka kolmosti

Geometrie řezání je negativně ovlivněna odchýlením vodního paprsku od kolmého směru, díky proměnlivé kinetické energii paprsku panující na vstupu a výstupu řezu. Obecně se jedná o zúžení stěn obrobené plochy. Základní odchylky kolmosti jsou následující:

- **Odchylka tvaru V** – případ, kdy je řez v horní části obrobku širší než v dolní části. Příčina je v delším působení proudu v horní části materiálu nebo odraz vodního paprsku od materiálu.
- **Odchylka tvaru A** – opačný případ tvaru V. Zde je řez v horní části užší než v dolní části obrobku. Vznik zejména u měkkých materiálů.
- **Soudečková odchylka** – střed řezu je širší než horní a dolní část. Tato odchylka je běžná při řezání velmi tlustých materiálů.
- **Lichoběžníková odchylka** – v podstatě jde o odchylku tvaru V, která nastane špatným nakloněním úhlu řezné hlavičky.

Obr. 15 Tvary odchylek kolmosti



Zdroj: [32]

Odklon proudu

Jedná se o odklonění proudu o určitý úhel. Abrazivní paprsek se od určité délky zakřivuje vůči směru posuvu řezné hlavy a důsledkem tohoto odklonu proudu je zhoršování kvality povrchu.

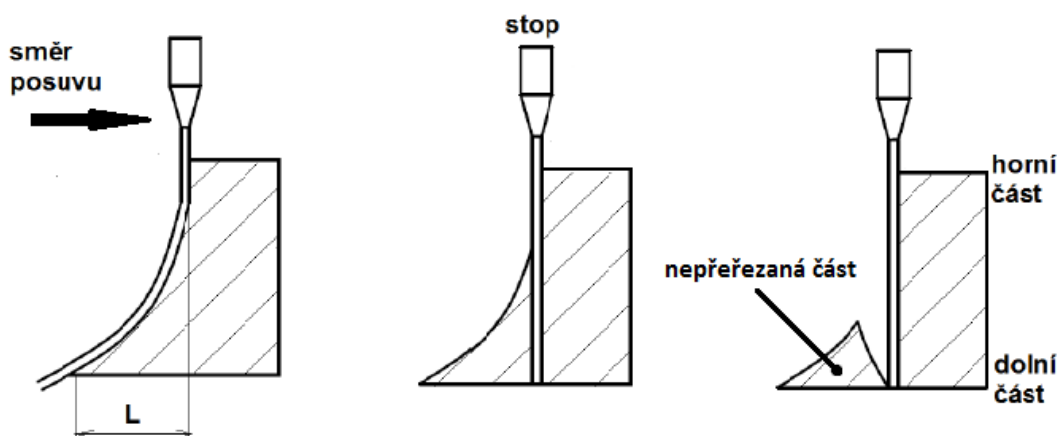
Striace

Během řezného procesu dochází ke změně tvaru řezné hrany tzv. striace. Ta se projevuje zvlněním řezné plochy a její tvar, velikost a hloubka je závislá na řezaném materiálu, tloušťce, řezné rychlosti a dalších faktorech. Striace značně ovlivňuje drsnost povrchu.

Neúplný konec řezu

Nastává tehdy, pokud nedochází k přeřezání materiálu po celé jeho hloubce. Častou příčinou je zastavení nebo výrazné zpomalení rychlosti posuvu, kdy hydroabrazivní paprsek stále eroduje materiál. Ve spodní části tak dochází k přeskočení proudu a vzniká nepřeřezaná část materiálu. [32]

Obr. 16 Neúplný konec řezu



Zdroj: [32]

Povrchové kazy

Vznikají porušením povrchové vrstvy materiálu rozptýlenými částicemi vody a abraziva v blízkosti místa řezu. Důležitým faktorem je dostatečná energie, která rozptýleným částicím umožní narušit povrch. Jev lze ovlivnit optimálně nastavenou vzdáleností trysky od obrobku. Povrchové kazy se vyznačují zdrsněním a ztrátou původního lesku, avšak k závažnému porušení funkčnosti materiálu nedochází. [32]

6 Výhody, nevýhody technologie řezání vodním paprskem

VÝHODY

- Malé ztráty materiálu
- Vysoká přesnost vyřezávaných dílů (až $\pm 0,04$ mm)
- Vysoká energetická účinnost 80 % (oproti laseru)
- Relativně studený řez (40 °C až 50 °C)
- Obrobené hrany nevykazují tepelnou deformaci
- Nevzniká zbytkové napětí ani mikrotrhliny
- Obrobky se nemusejí upínat
- Možnost obrábění pod vodou
- Šetrnost k životnímu prostředí, recyklace odpadu
- Provozní spolehlivost
- Jako unášecí médium lze použít i jiné pracovní kapaliny (olej, máslo, tuky...)
- Abrazivum lze nahradit ledovou tříští, v potravním průmyslu solí, cukrem apod.
- Proces je bezprašný (nevynikají žádné plyny, páry)

NEVÝHODY

- Hlučný a mokrá způsob dělení
- Problémové dělení materiálů odolávající vlhkosti
- Zaoblení vnitřních rohů, vznik úkosu
- Průstřel materiálu (náběh)
- Ošetření materiálu podléhajícího korozi
- Vysoušení savých materiálů a případné čištění
- Malá řezná rychlost u tvrdých materiálů
- Rozměrová omezenost výroby dílů (pod 50 mm)
- Ekonomicky nevhodné pro dělení ocelových plechů do tloušťky 10 mm, nízká produktivita a vyšší náklady oproti jiným technologiím dělení
- Horší kvalita řezu tlustších materiálů, vznik striace

7 Cíl práce

V rešerši se tato práce zabývá shromážděním informací z literárních a internetových zdrojů o možných způsobech dělení kovových materiálů. Konkrétně jsou zde uvedené konvenční a nekonvenční technologie dělení, které jsou rozvedeny a stručně popsány. U nekonvenčních metod dělení materiálu byla vybrána a blíže popsána technologie řezání vodním paprskem, která úzce souvisí se experimentální částí práce.

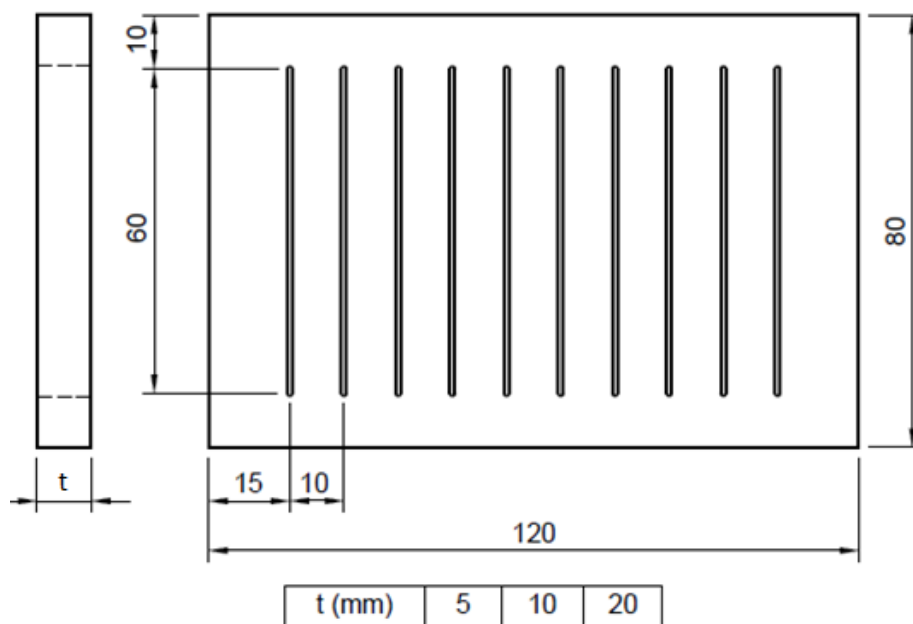
Experimentální část je zaměřena na zkoumání naměřených hodnot ze vzorků kovového materiálu. Experiment se skládá ze dvou částí, kde první část zkoumá vliv parametrů řezání na jakost vzorků. Jelikož tvar vznikající spáry ovlivňuje ztráta energie hydroabrazivního paprsku, řezná rychlost, množství abraziva a mechanické vlastnosti děleného materiálu. Druhá část se zabývá 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.

8 Metodika práce

Pro výzkum bylo vybráno deset vzorků o pěti druzích materiálu a třech tloušťkách. Materiál byl nejdříve opracován na zkušební vzorky o rozměrech 120x80xt mm. Na každém zkušebním vzorku bylo vyhotoveno 10 řezů se vzrůstající rychlostí řezného posuvu, přičemž generovaný abrazivní vodní paprsek dosahoval konstantního tlaku o stálém objemu přidávaného abraziva. Z důvodu měnící se řezné rychlosti viz. tabulka 2 nemuselo dojít k úplnému prořezání řezné spáry po celé hloubce materiálu. Tato fakta byla brána v potaz a dále byla zohledněna při postupu měření. Řezy byly provedeny vedoucím diplomové práce.

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. Do pole působnosti byl vyznačen určitý počet přímek cca po 3 mm pro lepší orientaci místa měření. Takto vyznačená oblast byla vytvořena jak na lícové, tak i na rubové straně vzorku.

Obr. 17 Rozměry zkušebního vzorku



Zdroj: vlastní, rozměry převzaty od vedoucího diplomové práce

8.1 Charakteristika vzorků

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

- Dural ČSN 42 4254 – tloušťka 5, 10, 20 mm
- Dural ČSN 42 4203 – tloušťka 5 mm
- Litina s lupínkovým grafitem ČSN 42 2420 – tloušťka 5 mm
- Měď ČSN 42 3001 – tloušťka 5, 10 mm
- Nerezová ocel (feritická) ČSN 17 153.2 – tloušťka 5 mm
- Ocel ČSN 11 375 – tloušťka 5, 10 mm

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. [34]

Dural ČSN 42 4203

Materiál tzv. superdural se používá jen ve vytvrzeném stavu. Je nevhodný ke svařování, ale dá se obrábět, leštit, eloxovat. Pevnost v tahu dosahuje 420 MPa a tvrdost bezmála 110 HB. [34]

Litina s lupínkovým grafitem ČSN 42 2420

Slitina železa, křemíku, uhlíku, manganu a dalších přísadových prvků. Pevnost tahu této slitiny je 200 MPa s dosaženou tvrdostí až 220 HB. Litina se běžně používá na odlitky, kde nejsou kladeny vysoké nároky na pevnost a houževnatost (radiátory, umělecké odlitky, použití v automobilovém průmyslu). V našem případě litina tvořila závaží staršího typu modelu pračky. [35]

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. [34]

Nerezová ocel ČSN 17 153.2

Žáruvzdorná, feritická, chromová ocel. Za tepla dobře svařitelná za studena nikoliv. S mořeným nebo obrobeným povrchem odolá korozi. Vhodná pro použití na žáruvzdorná zařízení. Tvrdost oceli je 223 HB a pevnost v tahu min 520 MPa. [35]

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. [35]

8.2 Zvolené technologické parametry experimentu

Na experiment byl použit CNC stroj firmy AWAC spol, s.r.o. vlastněný katedrou Materiálu a strojírenské technologie na technické fakultě ČZU. Parametry a podmínky experimentu byly stanoveny vedoucím diplomové práce v rámci systematického zkoumání parametrů řezání hydroabrazivním vodním paprskem.

Technologické parametry:

- Tlak vody: 380 MPa
- Průměr abrazivní trysky: 0,8 mm
- Průměr diamantové trysky: 0,3 mm
- Vzdálenost trysky od obrobku: 3 mm
- Uhel sklonu paprsku vůči obrobku: 90°
- Hmotnostní tok abraziva: $206,9 \pm 1,6 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$
- Druh a velikost abraziva: Granát, MESH 80
- Řezná rychlost: viz. tabulka níže

Tabulka 2 Použité řezné rychlosti

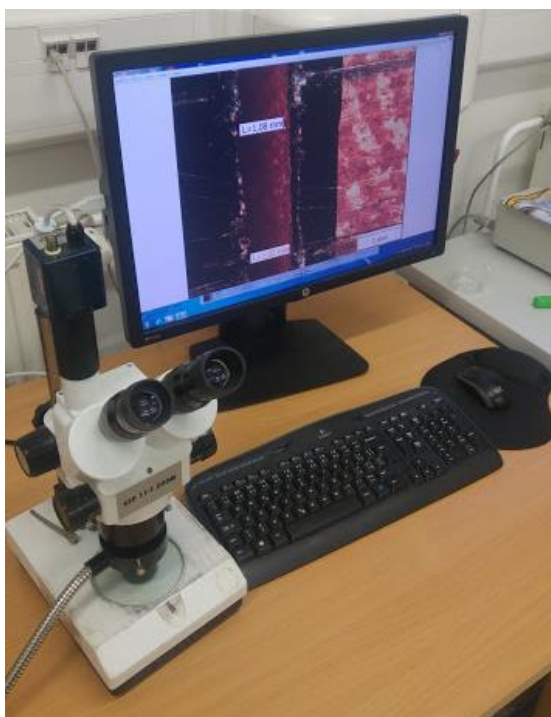
Druh materiálu	Tl. mat. (mm)	Použita řezná rychlost (min·min ⁻¹)									
		25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Dural ČSN 42 4254	20										
Dural ČSN 42 4254	10	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Měď ČSN 42 3001	10	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
Ocel ČSN 11 375	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Dural ČSN 42 4254	5	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Dural ČSN 42 4203	5	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Měď ČSN 42 3001	5	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Litina ČSN 42 2420	5	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Ocel ČSN 11 375	5	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440
N. ocel ČSN 17 153.2	5	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260

*Červená pole řezné rychlosti nejsou zahrnuta do měření (neúplné prořezání spáry)

8.3 Měřicí přístroj a použitý software

Měření spáry probíhalo na stereoskopickém mikroskopu SPZ 11-T ZOOM, který je k dispozici v laboratoři Technické fakulty a lze jej použít k pozorování trojrozměrných předmětů. Rozsah zvětšení tohoto zařízení dosahuje 7 – 45 násobku původního obrazu. Přístroj je rozšířen o digitální kameru CMOS, která umožňuje zkoumaný předmět sledovat, vyfotit a pořízený záznam přenést do sledovacího zařízení v podobě stolního počítače. Samotné měření tak probíhalo na obrazovce počítače s podporou programu QuickPHOTO industrial 2.3. Pořízené snímky optikou mikroskopu byly zobrazeny na monitoru počítače s výsledným zvětšením 3,5krát.

Obr. 18 Stereoskopický mikroskop SPZ 11-T ZOOM, stolní počítač



Software QuickPHOTO industrial 2.3. se využívá pro měření délek, ploch, úhlů, obvodů, vzdálenosti rovnoběžek, tvrdosti a mikrotvrdosti. Dále umožňuje vytvořený snímek upravovat (nastavení jasu, sytosti, barev atd.) dle požadavků pracovníka pro dosažení optimálních výsledků. Před měřením je důležité program zkalibrovat pomocí etalonu pro konkrétní hodnotu zvětšení tak, aby měl každý pixel definovanou velikost. Definováním velikosti pixelů zajistíme programu měřit rozměry na obrázku ve správném měřítku.

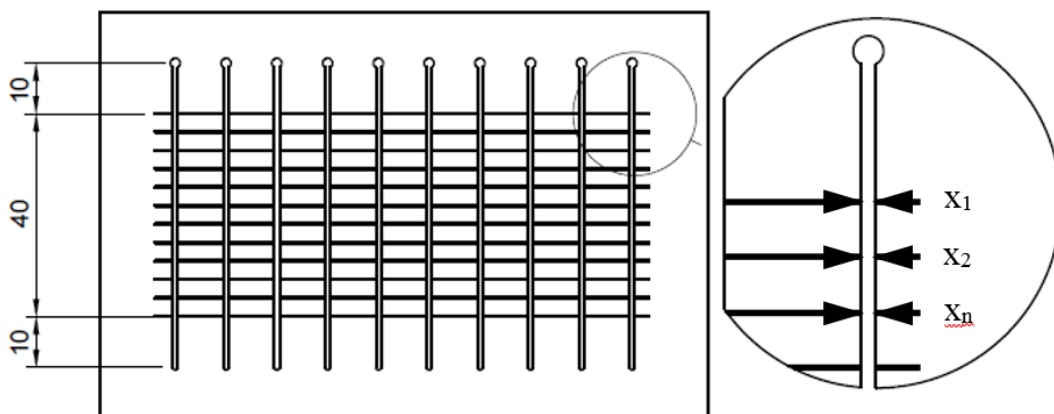
8.4 Postup měření šířky spáry závislé na řezných parametrech

Podkapitola popisuje první část experimentu na vyhotovených zkušebních vzorcích, jejichž spáry byly nařezány na stroji AWAC o hmotnostním toku abraziva $206,9 \pm 1,6 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$, konstantním tlaku vody 380 MPa a proměnnou řeznou rychlostí, která v materiálu vytvářela rozdílné šířky spár, jež byly zkoumány. Pro jaký typ materiálu byla použita řezná rychlost je uvedeno v tabulce 2.

Vzorky s vytyčenou pracovní oblasti obsahují 12 přímek protínající řezné spáry, které označovaly potenciální místa měření viz obr. 19 byly postupně vkládány pod zkalibrovaný stereoskopický mikroskop pro pečlivý rozbor. Samotné měření probíhalo tak, že pro jednotlivou spáru bylo pořízeno 6 snímků obsahující 12 naměřených hodnot. Z toho vyplývá, že jeden snímek zahrnuje 2 naměřené hodnoty. Celkem pro jednu stranu vzorku např. pro lícovou bylo teoreticky pořízeno 60 snímků se 120 hodnotami. Měřit se nejprve začalo na straně vstupu abrazivního vodního paprsku do materiálu a poté na straně výstupu z materiálu.

Velmi důležité je zde zdůraznit, že měřeny byly pouze ty spáry, které vykazovaly čistý řez, tzn. spára byla prořezána po celé délce a hloubce materiálu. Z předchozího tvrzení je patrné, že počet naměřených hodnot i snímků se může lišit.

Obr. 19 Postup měření šířky spáry



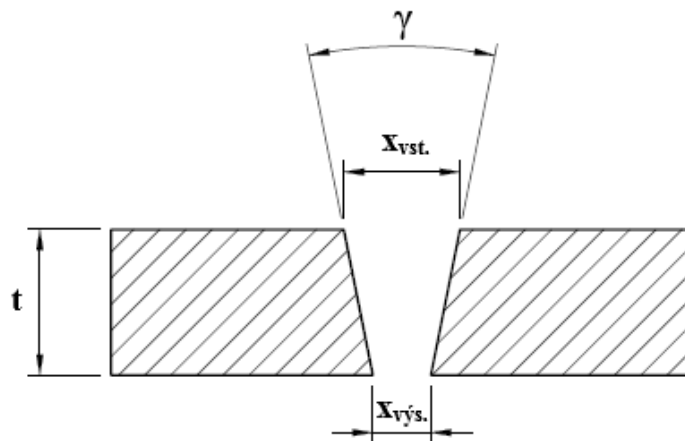
Tímto způsobem se změřily všechny spáry a typy vzorků. Výsledné hodnoty jsou zpracovány v tabulkách a pomocí programu Statistica 12 byly vyneseny do grafů, které graficky znázorňují závislost šířky spáry na řezných parametrech.

8.5 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, nýbrž se využívají naměřené hodnoty z předešlého měření (šířka řezné spáry na vstupu a výstupu). Pro výpočet bylo potřeba použít vzorec (8.2), obsahující goniometrickou funkci a vzorec (8.3) 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.

Obr. 20 Úkos řezné spáry



$$\frac{\gamma}{2} = \tan^{-1} \cdot \frac{x_{vst} - x_{vys}}{2 \cdot t} \quad (8.2)$$

$$\gamma = \frac{\gamma}{2} + \frac{\gamma}{2} \quad (8.3)$$

x_{vst} ...	vstupní šířka spáry	[mm]
x_{vys} ...	výstupní šířka spáry	[mm]
t ...	tloušťka materiálu	[mm]

9 Výsledky experimentu

U vyhodnocených výsledku se dá očekávat, že při vysoké řezné rychlosti, se bude kinetická energie paprsku snižovat a bude docházet ke zúžení šířky řezné spáry. Naopak při nízké řezné rychlosti se bude velikost řezné spáry zvyšovat. Na lícové tedy vstupní straně paprsku se tvrzení bude projevovat méně než na straně rubové, kde rozdíly budou patrnější.

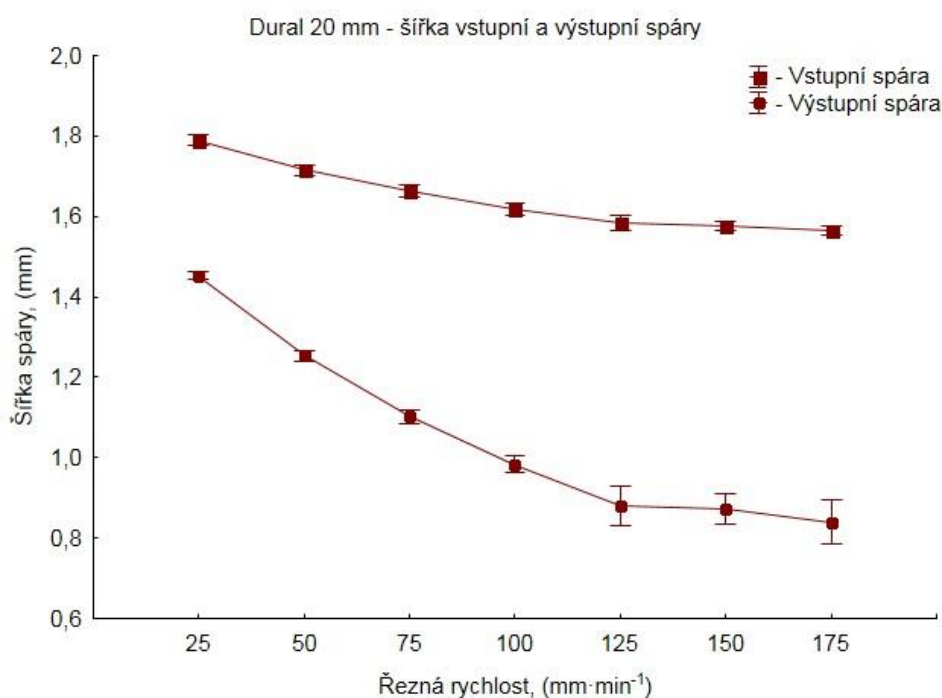
9.1 Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, šířka řezné spáry

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 obr. 21 je patrný pozvolna klesající trend vstupní šířky řezné spáry. Šířka u nejmenší řezné rychlosti $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vykazuje hodnotu 1,79 mm, která je cca dvojnásobně větší než šířka abrazivního vodního paprsku při opouštění řezné hlavy.

Výstupní hodnoty šířky řezné spáry naplňují predikci vyslovenou v úvodu kapitoly 9, jenž naznačuje klesající hodnotu šíře spáry se zvyšující se řeznou rychlosti. Pro předposlední dvě hodnoty řezné rychlosti $125 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ platí přibližně stejná šířka řezu činicí rozdíl jen 0,01 mm viz obr. 21.

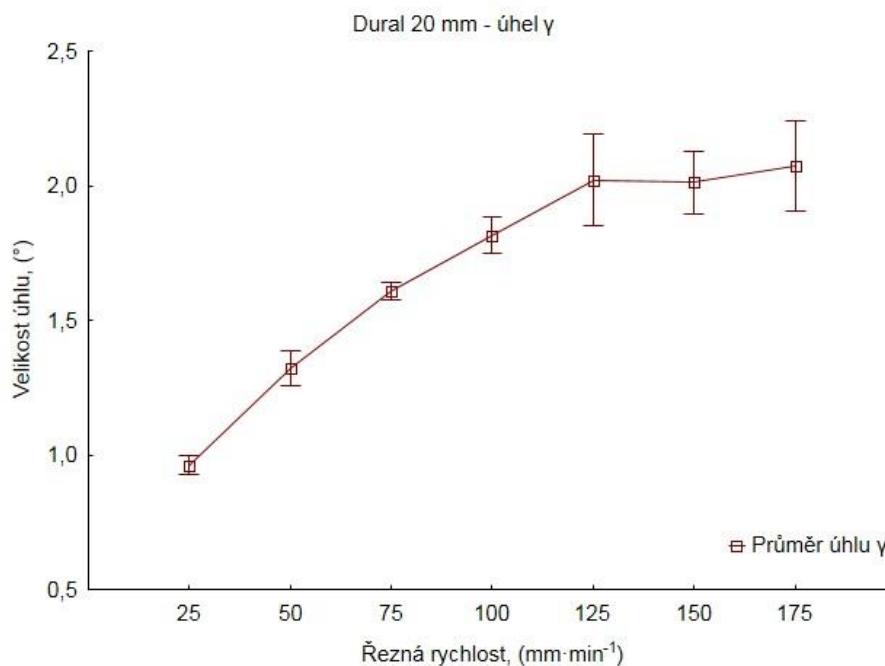
Obr. 21 Vstupní a výstupní strana, Dural - 20 mm



9.2 Dural ČSN 42 4254 – 20 mm, velikost úhlu úkosu

Z vypočtených hodnot velikosti úhlu γ zanesených do grafu viz obr. 22, lze konstatovat, že pro první řeznou rychlost je hodnota velikosti úhlu nejmenší 0,58'. Naopak se zvyšující se řeznou rychlostí stoupala velikost celkového úhlu a možnost vytvořit ideální řez se vzdalovala. Nepatrná odchylka od růstu úhlu nastala při řezné rychlosti 125 mm·min⁻¹.

Obr. 22 Velikost úhlu γ , Dural - 20 mm

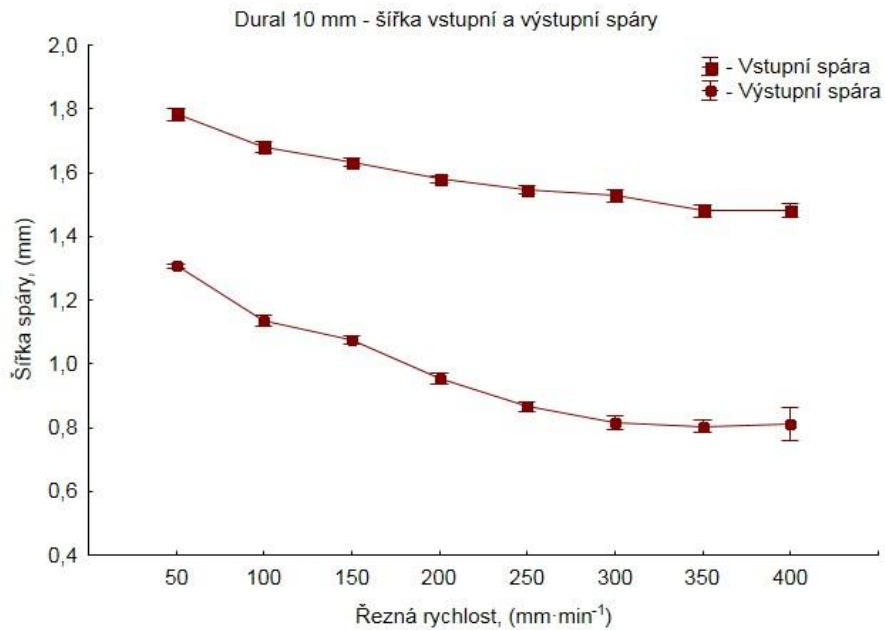


9.3 Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, šířka řezné spáry

U duralu tloušťky 10 mm lze navzdory vyšším řezným rychlostem pozorovat obdobnou počáteční šířku vstupní spáry jako v předchozím případě, dvojnásobek průměru řezné trysky. Trend opět pozvolna klesá bez výrazných rozdílů, až do hodnoty předposledního řezu. Zde u řezných rychlostí 350 a 400 mm·min⁻¹ je šířka vstupní spáry stejně velká a to 1,48 mm dle obr. 23.

Na výstupní straně abrazivního paprsku z děleného materiálu si můžeme povšimnout u poslední hodnoty řezu, mírného nárůstu spáry o nepatrných 0,01 mm, kde také jsou patrnější maximální a minimální rozdíly.

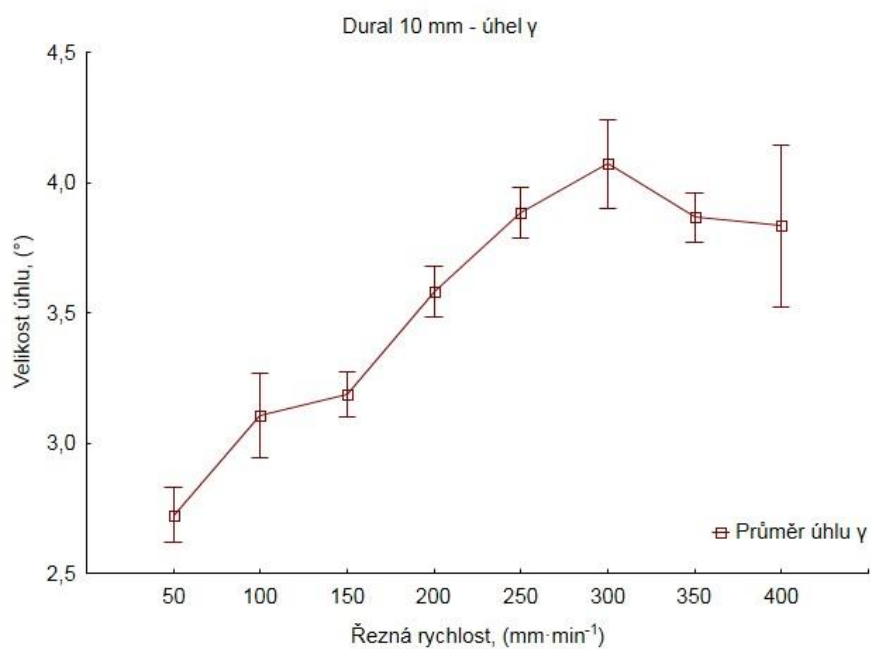
Obr. 23 Vstupní a výstupní strana, Dural - 10 mm



9.4 Dural ČSN 42 4254 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Při pohledu na obr. 24 je zřejmé, že hodnota maxima úhlu γ je dosažena při řezné rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ nikoli při vyšších rychlostech obsažených v grafu. Od této skutečnosti až do konce hodnot měření, velikost úhlu γ se zvyšující se řeznou rychlostí značně klesá. Velikost úhlu při řezné rychlosti $350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosahuje $3^{\circ}86'$ a při $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ dosahuje $3^{\circ}83'$.

Obr. 24 Velikost úhlu γ , Dural - 10 mm

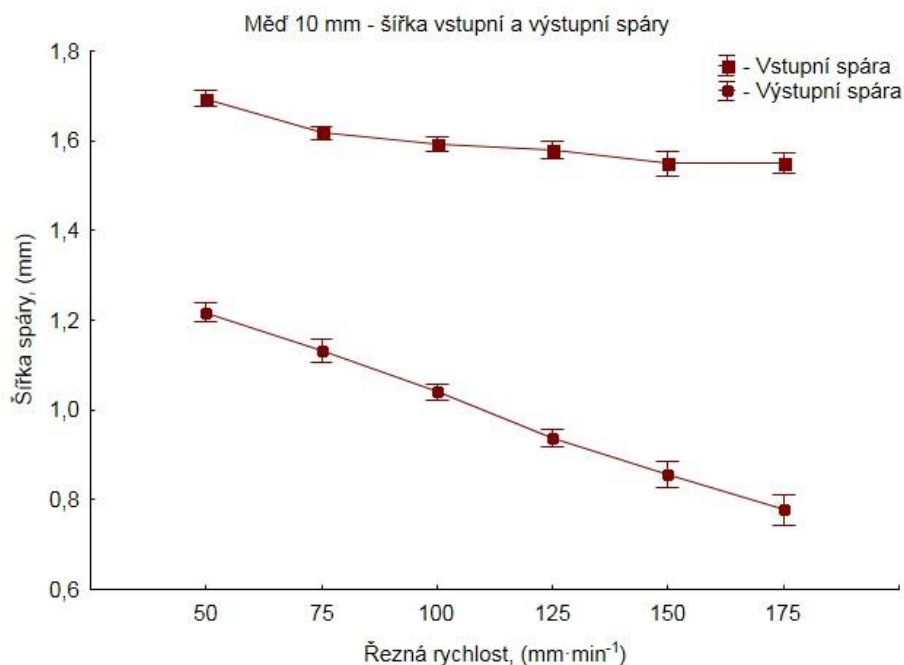


9.5 Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, šířka řezné spáry

Na obr. jsou znázorněny výsledky měření šířky řezné spáry na lícové a rubové straně obrobku pro tloušťku 10 mm. Je zřejmé, že i zde šířka spáry na vstupu paprsku se mění se zvyšující se řeznou rychlostí. U hodnot řezné rychlosti 150 a 175 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ je velikost spáry totožná, 1,55 mm.

Dalo by se říci, že trend výstupní hodnoty mezery prakticky lineárně klesá. Křivka vykazuje poměrně stálou hodnotu velikosti odebíraného materiálu s přibývajícím rychlostí posuvu, v průměru se jednalo cca o 0,09 mm na 25 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ řezné rychlosti.

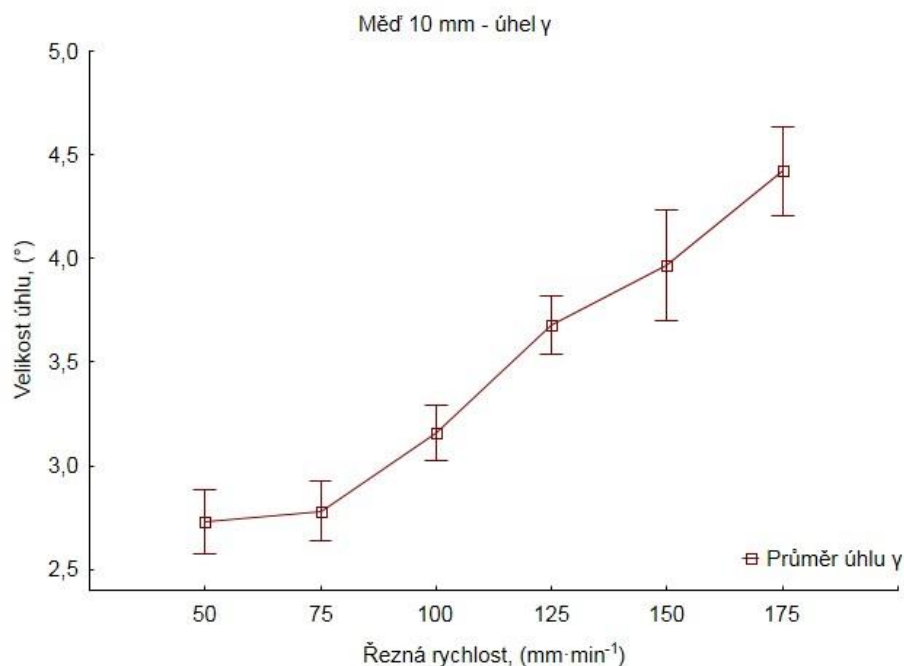
Obr. 25 Vstupní a výstupní strana, Měď – 10 mm



9.6 Měď ČSN 42 3001 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Obr. 26 ukazuje vypočtené výsledky odchylek povrchu řezné spáry od kolmosti ideálního řezu. Křivka stoupá se zvyšující se řezným posuvem. Od druhé řezné rychlosti 75 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ se začala odchylka výrazněji zvětšovat až na konečnou hodnotu kolem $4^{\circ}25'$ při 175 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

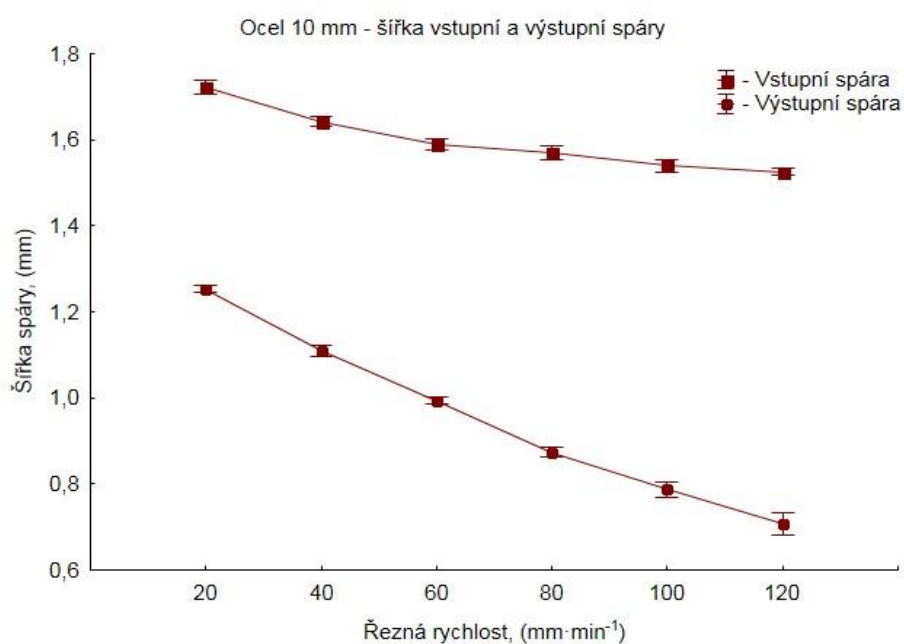
Obr. 26 Velikost úhlu γ , Měď – 10 mm



9.7 Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, šířka řezné spáry

Z obr. 27 jde jasně pozorovat, že znázorněné výsledky šířky řezných spár na obou stranách jsou takřka totožné s výsledky mědi z předchozího měření, ačkoli se jedná o dva různé materiály. Hodnoty odchylek se pohybují v rozmezí pro lícovou spáru $\pm 0,01$ mm a pro rubovou spáru $- 0,05$ mm.

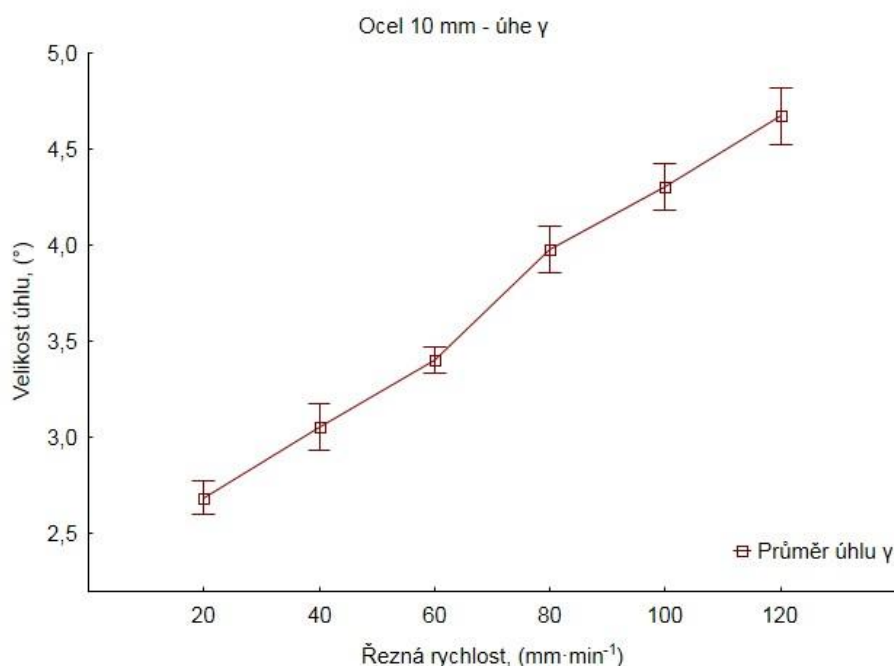
Obr. 27 Vstupní a výstupní strana, Ocel – 10 mm



9.8 Ocel ČSN 11 375 – 10 mm, velikost úhlu úkosu

Na obr. 28, který znázorňuje odchylky řezné spáry od kolmosti vidíme očekávaný narůst velikosti úhlů s rostoucí řeznou rychlostí. Trend pozvolna stoupá a např. oproti duralu stejné tloušťky (10 mm) vykazuje maximální hodnotu úhlu při nejvyšší řezné rychlosti. Předpoklad se tedy naplňuje.

Obr. 28 Velikost úhlu γ , Ocel – 10 mm



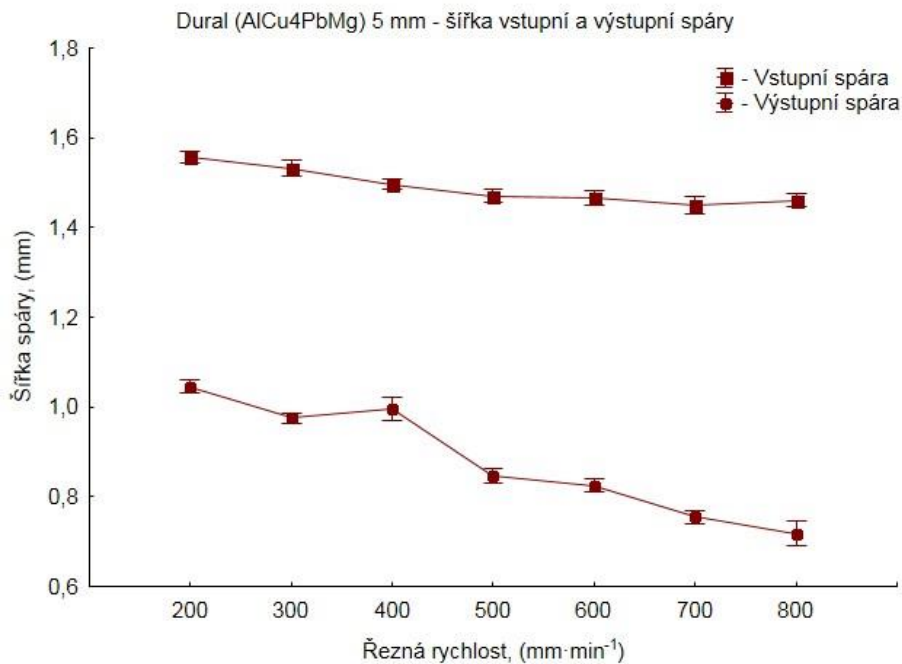
9.9 Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, šířka řezné spáry

Vzhledem k předchozím zkušenostem u tohoto typu materiálu (10 a 20 mm) lze předpokládat, že výsledky měření budou velice podobné, co se závislosti spáry na řezné rychlosti týče.

Vstupní spára u obr. 29 vykazuje viditelně snižující se trend. Zhruba v polovině měření se spára začíná viditelně ustalovat na jedné hodnotě, přičemž na předposlední hodnotě řezné rychlosti spára nepatrně klesla. Rozdíly hodnot činí $\pm 0,01$ mm.

Výstupní spára se vymyká určenému předpokladu, kdy křivka z počátečních hodnot klesá a poté na hodnotě řezné rychlosti 400 mm·min⁻¹ opět stoupne. Od této výchyly křivka pozvolna klesá se zvyšujícím se posuvem.

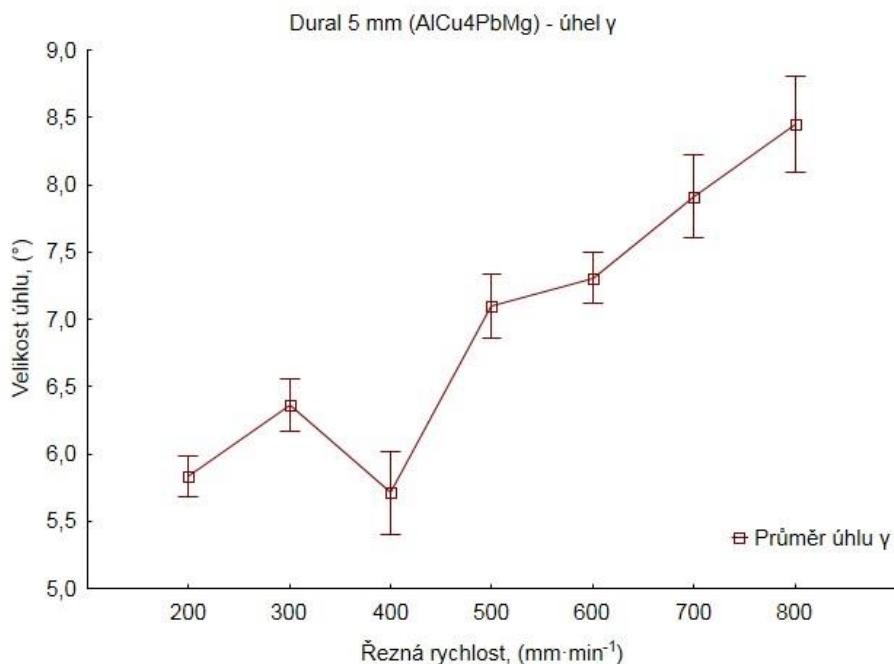
Obr. 29 Vstupní a výstupní strana, Dural – 5 mm



9.10 Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, velikost úhlu úkosu

Obr. 30 ukazuje hodnoty odchylky kolmosti pro tloušťku 5 mm. Je zde patrné, že velikost odchylky pro řeznou rychlost 400 mm·min⁻¹ rapidně klesla, a to až pod hodnotu odchylky při počáteční řezné rychlosti. Úhel u této anomálie dosahuje hodnoty 5°42'. Dále pak odchylky opět stoupají až do konečné hodnoty.

Obr. 30 Velikost úhlu γ , Dural – 5 mm



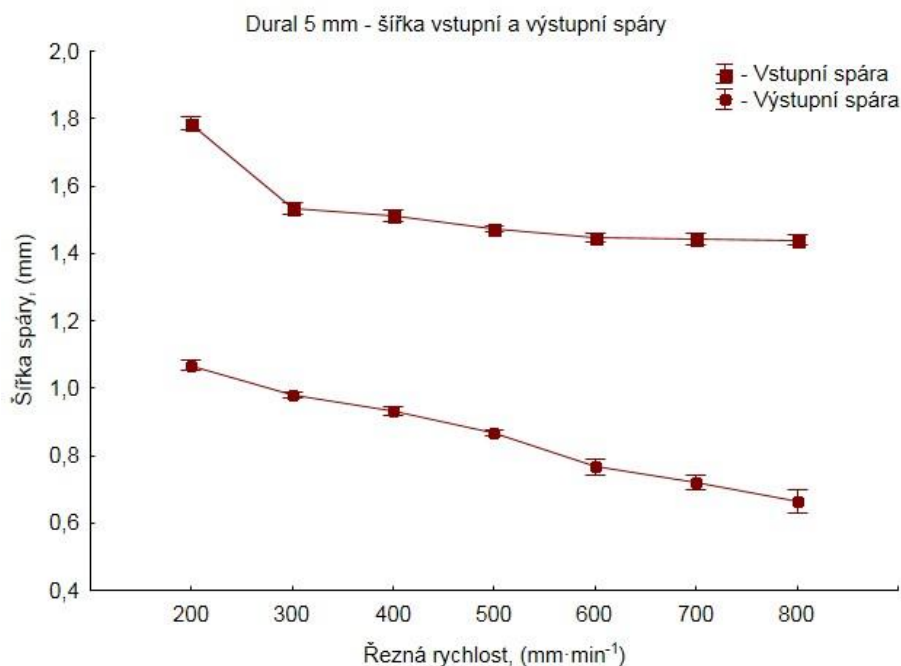
9.11 Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, šířka řezné spáry

Ačkoli se jedná takřka o totožný typ materiálu jako u předchozí podkapitoly, z obr. 31 obsahující výsledky měření šířky řezné spáry na rubové a lícové straně lze zpozorovat menší odchylky křivek, při netradičně stejně zvolené řezné rychlosti u obou vzorků.

Graf vykazuje poměrně stálou šířku spáry zhruba od poloviny měření obdobně jako u obr. 29. Pouze při prvním měření s nejnižší řeznou rychlostí došlo k výjimce, kdy odchylka je výrazně vyšší než ostatní, a to cca o 0,2 mm.

Na výstupních hodnotách lze spatřit pozvolna klesající trend bez výrazných odchylek jako je tomu u obr. 29 při řezné rychlosti $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

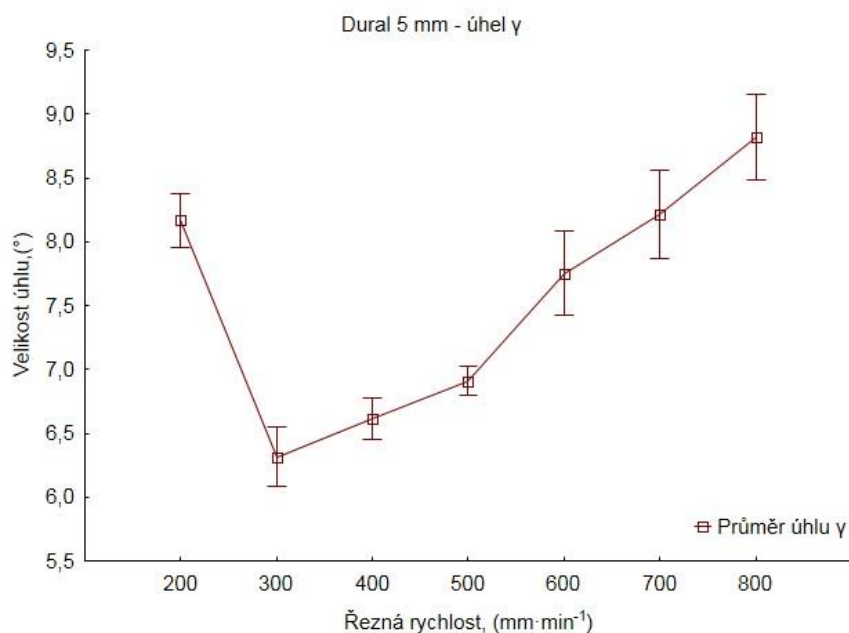
Obr. 31 Vstupní a výstupní strana, Dural - 5 mm



9.12 Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, velikost úhlu úkosu

Na obr. 32 je zřetelně viditelná odchylka u počáteční řezné rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Hodnota odchylky v tomto bodě činí přes 8° a poté rapidně klesá pod hodnotu $6^\circ 30'$. Zajímavostí je, že při předposlední řezné rychlosti $700 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a počáteční řezné rychlosti jsou velikosti odchylek takřka totožné.

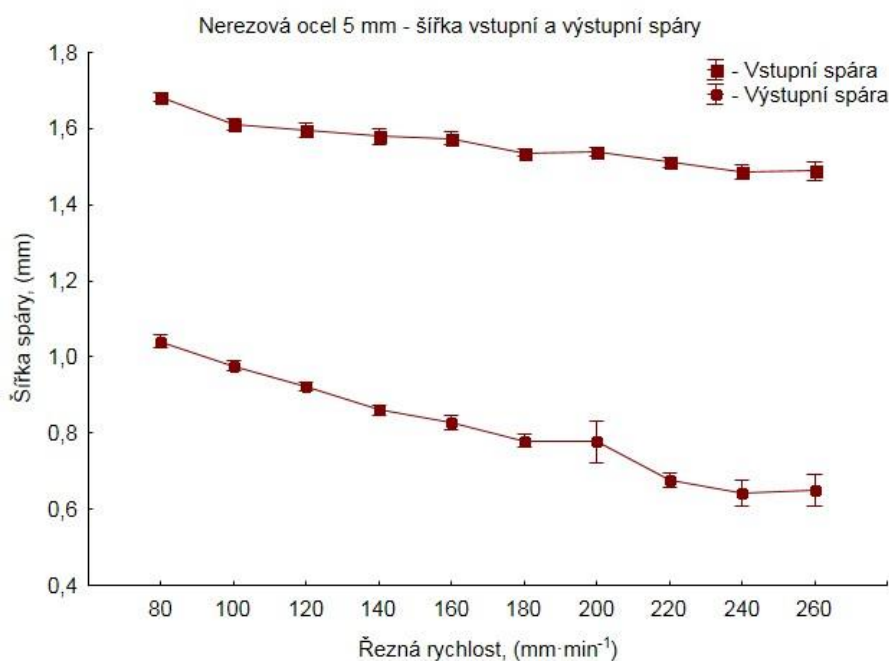
Obr. 32 Velikost úhlu γ , Dural – 5 mm



9.13 Nerezová ocel ČSN 17 153.2, šířka řezné spáry

Z obr. 33 je zřejmé, že proud abrazivního paprsku prořezal materiál ve všech spárách. Vstupní strana paprsku vykazuje klesající průběh křivky, přičemž na hodnotě řezné rychlosti 180, 200 a 240, 260 mm·min⁻¹ je šířka spáry konstantní. Výstupní spára obdobně klesá až do řezné rychlosti 180 mm·min⁻¹ kde je opět šířka spáry shodná pro následující řeznou rychlost. Ke konci se odchylka nepatrně zvýšila.

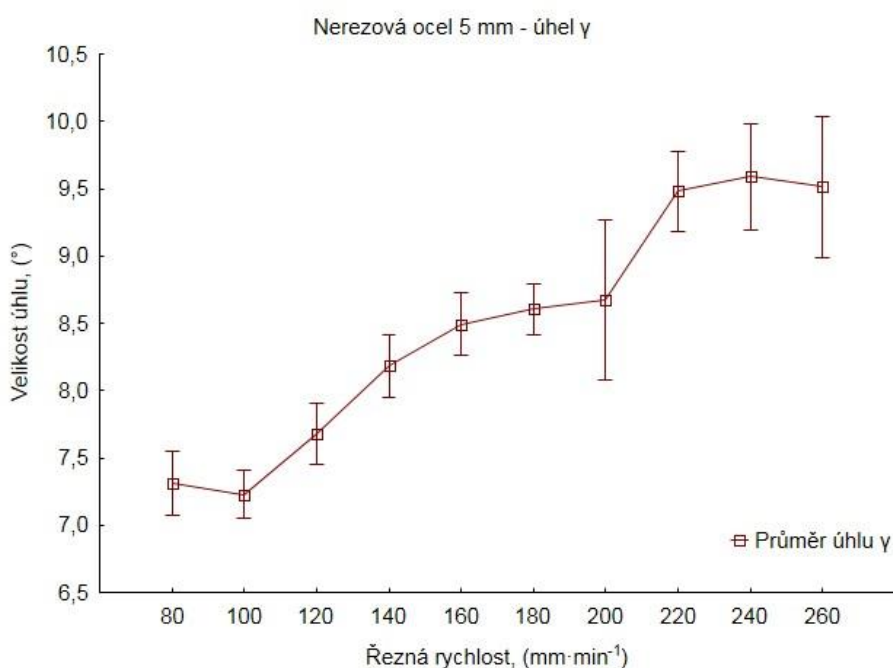
Obr. 33 Vstupní a výstupní strana, Nerezová ocel 5 mm



9.14 Nerezová ocel ČSN 17 153.2 – 5 mm, velikost úhlu úkosu

Obr. 34 znázorňuje vypočtené odchylky od kolmosti nerezové oceli 5 mm. Z grafu je patrné, že druhá odchylka oproti první mírně klesla. Poté se projevuje závislost velikosti úkosu na řezné rychlosti, kdy odchylky opět stoupají, až do předposlední hodnoty. V průběhu stoupání jedna odchylka vykazuje patrně značné rozpětí maximální a minimální hodnoty. V závěru velikost úkosu lehce klesá.

Obr. 34 Velikost úhlu γ – Nerezová ocel 5 mm



9.15 Měď ČSN 42 3001, Litina ČSN 42 2420, Ocel ČSN 11 375 – 5 mm

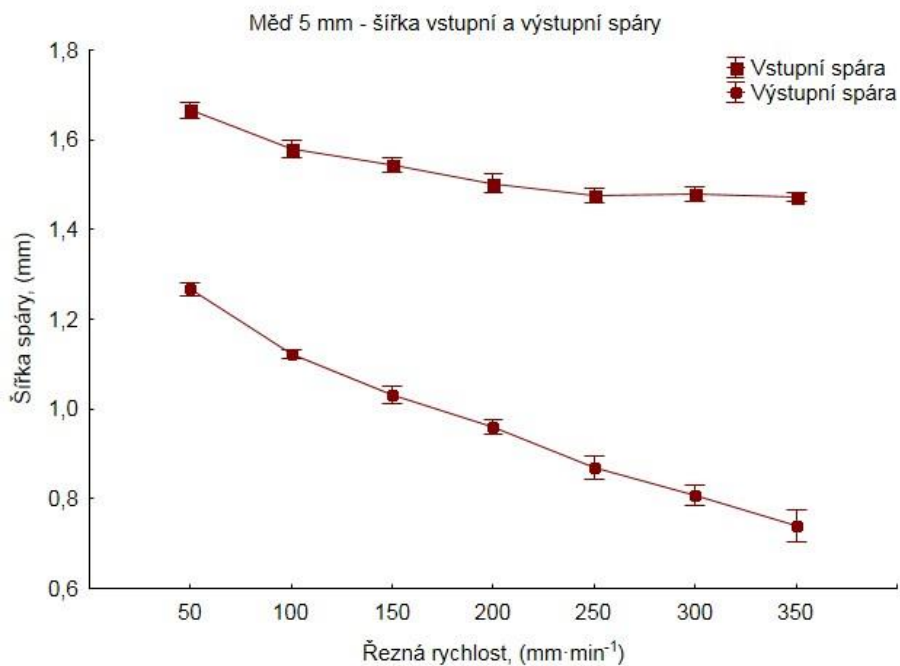
Vzhledem k podobným parametrům (tloušťka materiálu, řezná rychlost) a grafickému vykreslení budou následující zkušební vzorky popsány v této podkapitole. Grafy jsou vloženy do textu za hromadným komentářem v pořadí uvedeném v názvu podkapitoly.

U obr. 35, 37, 39 je zřejmé, že se zvyšující se řeznou rychlostí se odchylka výrazně zvyšuje, a to při největších řezných rychlostech. U mědi lze pozorovat stejnou šířku spáry 1,48 mm u řezných rychlostí 250 a 300 mm·min⁻¹. Obr. 35 a 37 vykazuje stejnou konečnou hodnotu rychlosti posuvu.

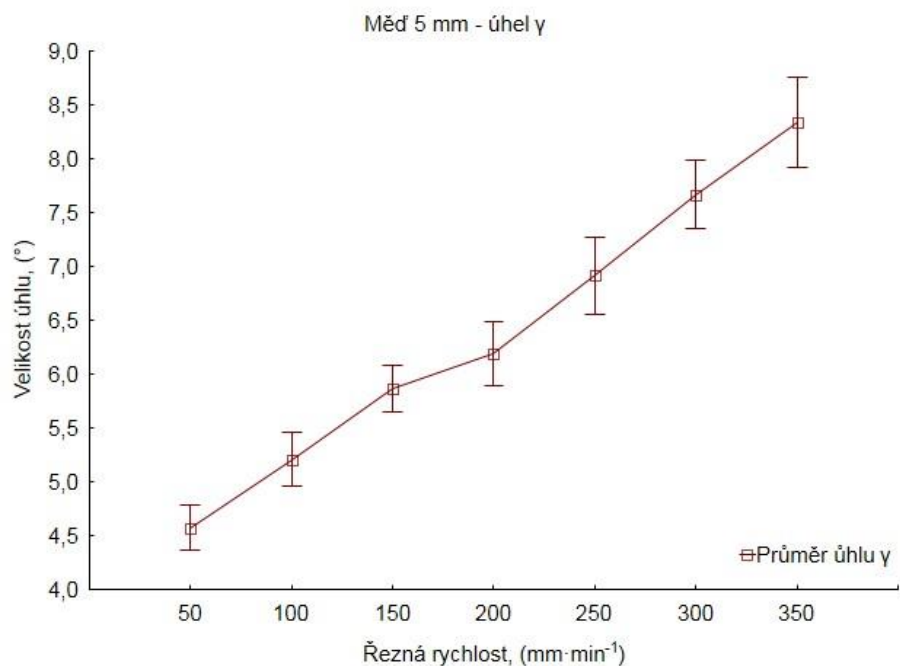
Rubová spára u všech grafů šířek řezné spáry pozvolna klesá a nevykazuje, žádné velké anomálie vůči předpokladu.

Obr. 40 oproti obr. 36 a 38 vykazuje menší změnu růstu velikosti úkosu se vzrůstající řeznou rychlostí. Velikost koncové odchylky je shodná s odchylkou předchozí. U mědi a litiny je relativně patrné stejné vykreslení mezi rychlostí posuvu 150 a 250 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. U oceli tento jev nastává taktéž, ale mezi hodnotami 160 a 240 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$.

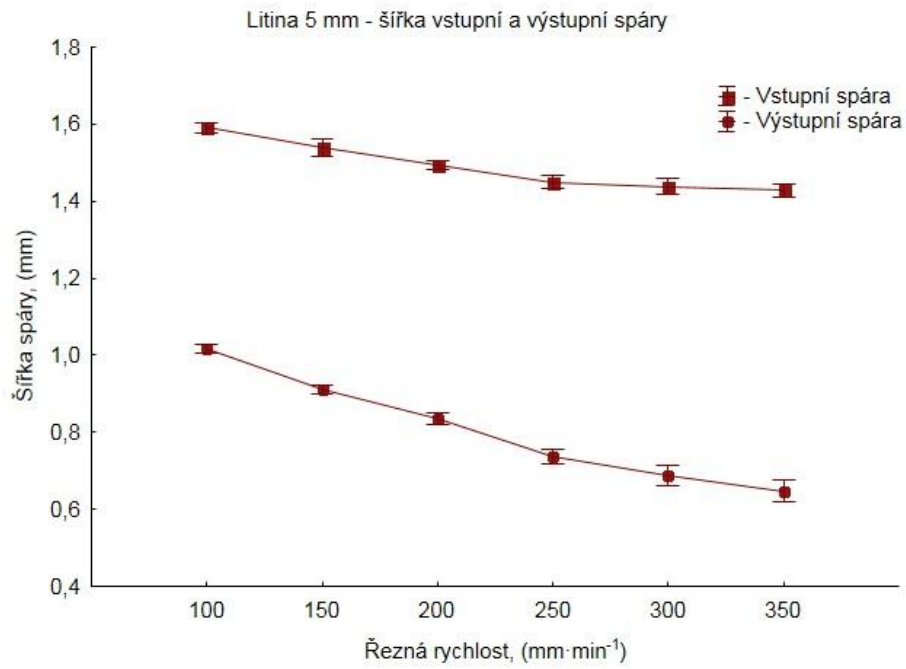
Obr. 35 Vstupní a výstupní strana - Měď 5 mm



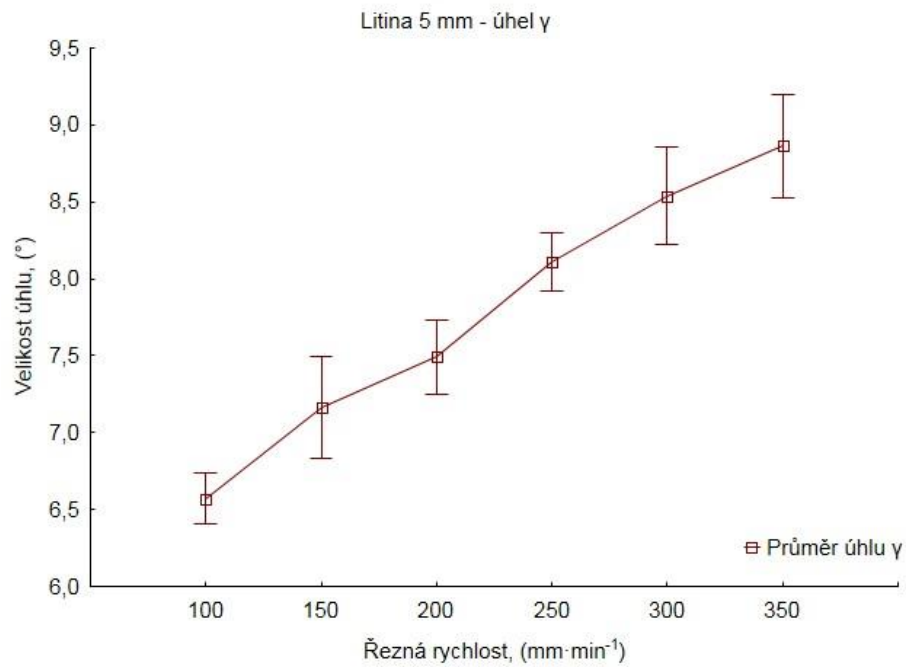
Obr. 36 Velikost úhlu γ – Měď 5 mm



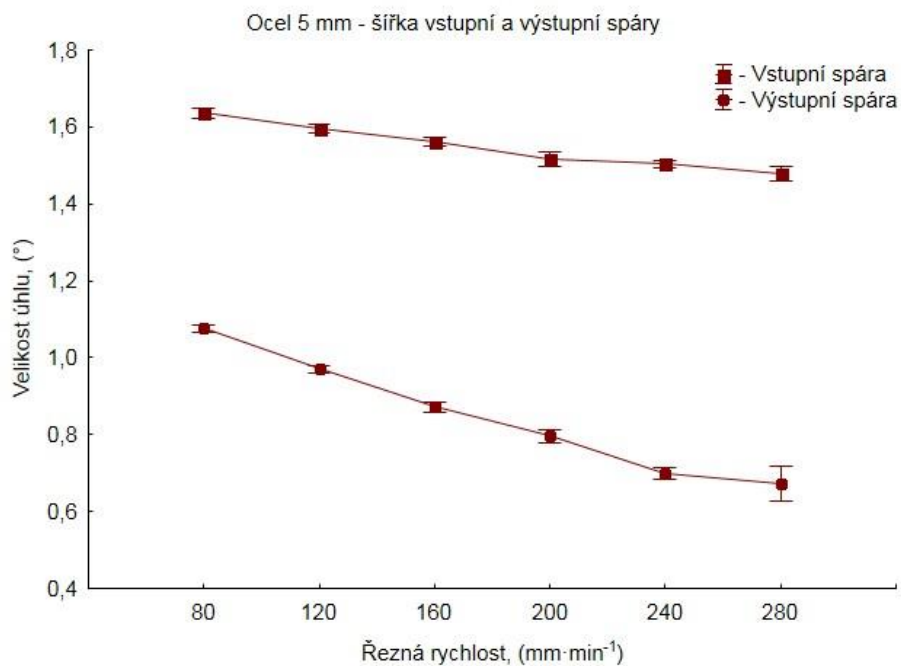
Obr. 37 Vstupní a výstupní strana, Litina - 5 mm



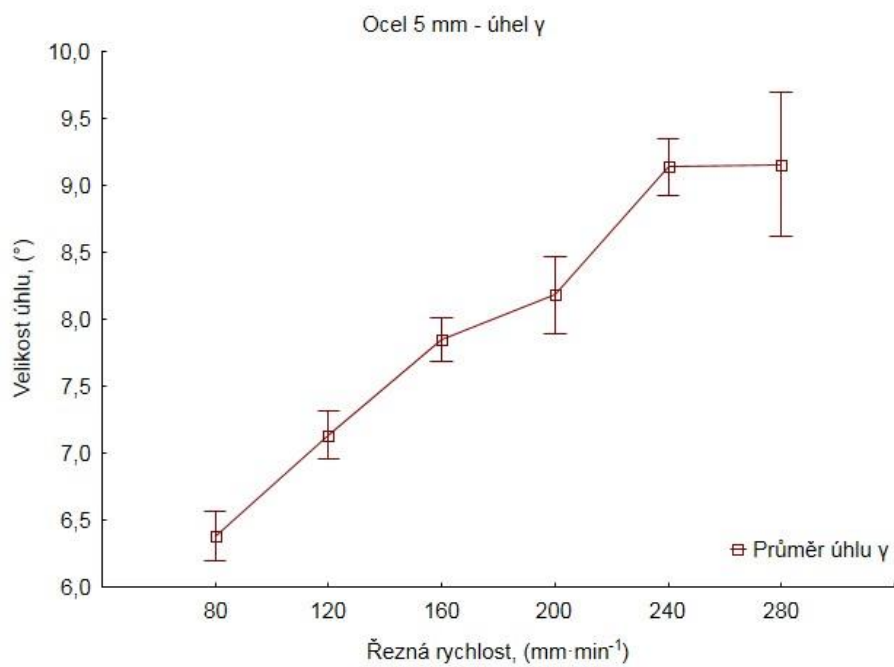
Obr. 38 Velikost úhlu γ , Litina – 5 mm



Obr. 39 Vstupní a výstupní strana, Ocel - 5 mm



Obr. 40 Velikost úhlu γ , Ocel - 5 mm



10 Diskuze

Při porovnání vzorků s nejméně výraznými odchylkami od předpokladu (Dural ČSN 42 4254 – 5 mm a Dural ČSN 42 4203 – 5 mm), které byly taktéž předmětem zkoumání zjistíme, že výsledky vzorků se od sebe mírně liší. Na výstupní straně paprsku prvně uvedeného materiálu, spára při řezné rychlosti $400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ nečekaně vzrostla oproti druhému materiálu, který vykazuje pozvolna klesající trend. Tato odchylka se samozřejmě projevila i na velikosti úhlu úkosu, jež také klesl a přiblížil se hodnotě 90° . Proč tento jev nastal, není známo, nýbrž se můžeme z výsledku domnívat, že by se mohlo jednat o vhodné parametry řezu pro tento typ materiálu. Současně velikost úhlu úkosu druhého materiálu při první řezné rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ je výrazně vyšší. Velikost se v tomto případě vymyká předpokladu o závislosti hodnoty úhlu úkosu pro nízkou řeznou rychlost. Otázkou je, co takto velký nárůst úhlu způsobilo. Pravděpodobně by se mohlo jednat o příliš nízkou řeznou rychlost, která abrazivu umožnila udělat takto velký úhel.

Celkově z naměřených dat je možné konstatovat, že až na menší odchylky existuje závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu řezné hlavy. Taktéž lze tvrdit, že zpomalením rychlosti posuvu má abrazivní vodní paprsek delší čas odebrat dělený materiál ve spodní části obrobku, kde dochází k vyrovnávání šířky řezné spáry v jednotlivých hloubkách řezu. Z pohledu rozdílnosti mechanicko-fyzikálních vlastností materiálů je pro každý materiál potřeba zvlášť najít optimální řeznou rychlost pro konstantní tok abraziva tak, aby se samotný tvar řezné spáry blížil požadovanému tvaru, který by v ideálním případě představoval tvar ideálního řezu (šířka vstupní a výstupní spáry stejná). V našem případě se vždy jednalo o tvar písmene „V“.

11 Technicko-ekonomické zhodnocení

Kapitola se zabývá ekonomickou náročností vyhotovení experimentu. Jsou zde uvedeny příklady výpočtu jednotlivých položek, které s technicko-ekonomickým zhodnocením souvisejí.

Příklady výpočtů jednotlivých položek:

Náklad na odpis (amortizace):

V průběhu životnosti stroje dochází k snižování hodnoty pracovních prostředků vyjádřené opotřebením při provozu. Pro výpočet modelového příkladu byla stanovena cena stroje na 2 700 000 Kč včetně dopravy, stavebních úprav, instalace atd. Standardní doba odpisu pro skupiny IV je 12 let, platnost od 1.1.2016.

$$jN_a = \frac{C_p \cdot P_{ps}}{T_o \cdot P_{sr}} = \frac{2\,700\,000 \cdot 1}{12 \cdot 2000} = 112,5 \text{ Kč} \quad (11.4)$$

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	

Náklady na spotřebu vody:

Náklady na spotřebu vodu se odvíjí od spotřebovaného množství a ceně, která je pro každý region jiná podle dodavatele. Pro rok 2018 cena vody činí v lokalitě Praha 87,39 Kč·m⁻³. Spotřeba vody stroje, resp. trysky je 1,9 l·min⁻¹ plus voda na oplach vzorku.

$$jN_v = \frac{S_v \cdot T_s}{1000} \cdot C_v = \frac{2,3 \cdot 60}{1000} \cdot 87,39 = 12,06 \text{ Kč} \quad (11.5)$$

S_v ...spotřeba vody stroje	[l·min ⁻¹]
T_s ...doba provozu stroje	[min]
C_v ...cena vody	[Kč·m ⁻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.

$$jN_{abr} = \frac{M_{abr}}{1000} \cdot T_p \cdot C_{abr} = \frac{206}{1000} \cdot 60 \cdot 13,40 = 165,62 \text{ Kč} \quad (11.6)$$

M_{abr} ... množství přiváděného abraziva [g·min⁻¹]

T_p ... doba provozu stroje [min]

C_{abr} ... cena abraziva [Kč·kg⁻¹]

Náklady na spotřebu elektrické energie:

Vzhledem k tomu, že se stroj skládá z mnoha elektrických zařízení (kompresor, čerpadlo...) je jeho celková spotřeba stanovená na cca 22 kW. Průměrná cena 1 kWh je 3,82 Kč.

$$jN_e = \frac{W_{celk}}{60} \cdot T_p \cdot C_{el} = \frac{22}{60} \cdot 60 \cdot 3,82 = 84,26 \text{ Kč} \quad (11.7)$$

W_{celk} ... spotřeba el. energie stroje [kW·hod⁻¹]

T_p doba provozu [min]

C_{el} cena elektrické energie [kWh]

Náklady na nejběžněji používané díly:

Pro zjištění některých finančních položek náhradních dílů byla kontaktována firma AWAC spol, s.r.o. Nejběžněji používané díly podle firmy jsou uvedeny v následující tabulce 3.

Tabulka 3 Nejběžněji používané díly

Název dílu	Průměrná životnost (h)	Cena (Kč)	Náklady na 1 hodinu [Kč·hod ⁻¹]
Diamantová vodní tryska	500	12 500	25,00
Abrazivní tryska	100	2599	25,99
Vysokotlaký válec	2500	16 342	6,54
Nízkotlaký válec	10 000	4349	0,43
Vysokotlaké těsnění	500	3687	7,37
Nízkotlaké těsnění	1000	1350	1,35
Jednosměrný ventil	500	5000	10,00
Vodní filtry 0,5; 1; 10 μm	400	1186	2,97
Ostatní díly	900	2000	2,22
Celková suma			81,85

Celkové hodinové náklady na provoz stroje:

Po sečtení všech výše vypočtených nákladů docílíme k ceně práce stroje za hodinu, která je ve výši 455.29 Kč. Do této sumy není zahrnuta mzda zaměstnance, která by se za normálních okolností pohybovala kolem 450 Kč·hod⁻¹. Celková cena práce řezacího stroje s obsluhou je zaokrouhlená na **905 Kč·hod⁻¹** (15 Kč·min⁻¹).

Stanovení ceny řezu pro zkušební vzorek:

Pro výpočet celkových nákladů na jeden vzorek potřebujeme stanovit čas potřebný k vytvoření spáry dlouhé 60 mm. Ten se vypočítá dle vztahu (11.8), který aplikujeme na jeden vybraný vzorek např. Dural ČSN 42 4254 – 20 mm.

$$t_c = \frac{l_r}{v_p} + t_p = \frac{60}{25} + 0,5 = 2,9 \text{ min} \quad (11.8)$$

Kde:

t_c ... čas řezu	[min]
l_r ... délka řezu	[mm]
v_p ... řezná rychlost	[mm·min ⁻¹]
t_p ... doba prostřelení obrobku paprskem	[min]

Dále je nutné zjistit konečnou cenu jednoho řezu dle vzorce (11.9)

$$C_v = t_c \cdot C_p = 2,9 \cdot 15 = 43,5 \text{ Kč} \quad (11.9)$$

Kde:

C_v ... cena jednoho řezu [Kč]
 t_c čas řezu [min]
 C_p ... průměrná cena hodiny práce stroje se mzdou obsluhy [Kč·min⁻¹]

Cena jednoho řezu vzorku duralu pro nejnižší dosahovanou řeznou rychlost je 43,5 Kč. Výpočet je nutno opakovaně použít na všechny řezy, jelikož mají rozdílně řezné rychlosti. Tabulka 4 názorně představuje ceny jednotlivých řezů pro různé řezné rychlosti vzorku.

Tabulka 4 Jednotlivé ceny řezů pro Dural ČSN 42 4254

Dural ČSN 42 4254–20 mm	
Řezná rychlost (mm·min ⁻¹)	Cena řezu (Kč)
25	43,5
50	25,5
75	19,5
100	16,5
125	14,7
150	13,5
175	12,6
200	12,0
225	11,5
250	11,1
Suma celkem	180

Náklady na řezání vzorků:

V tabulce 5 jsou uvedeny náklady na provedení experimentu a náklady na vyhotovení jednotlivých vzorků. V cenách je zahrnuta hodinová mzda zaměstnance.

Tabulka 5 Součet nákladů na řezání jednotlivých vzorků

Název vzorku	Náklady na vzorek (Kč)
Dural ČSN 42 4254 – 20 mm	180
Dural ČSN 42 4254 – 10 mm	128
Měď ČSN 42 3001 – 10 mm	148
Ocel ČSN 11 375 – 10 mm	207
Dural ČSN 42 4254 – 5 mm	93
Dural ČSN 42 4203 – 5 mm	93
Měď ČSN 42 3001 – 5 mm	128
Litina ČSN 42 2420 – 5 mm	111
Ocel ČSN 11 375 – 5 mm	120
N.ocel ČSN 17 153.2 – 5 mm	136
Celkové náklady	1344

Dílčí závěr technicko-ekonomického zhodnocení

Náklady na provedení řezu experimentální části práce jsou podle výše provedených kalkulací vypočteny na 1344 Kč. Tato částka neobsahuje náklady na materiál, jehož cena je 1034 Kč a ostatní práce (příprava, manipulace, seřizování...), které jsou ve výši 1500 Kč. Tudiž celkové náklady na vyhotovení experimentu jsou 3878 Kč.

12 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na téma řezání vodním paprskem. V úvodu teoretické části práce jsou shromážděny a popsány používané metody dělení kovového materiálu spolu s výhodami a nevýhodami metod. Konkrétně jsou zde uvedeny konvenční a nekonvenční technologie dělení. Dále se práce zabývala samotnou technologií vodního paprsku. Jsou zde popsány typy vodního paprsku (kontinuální, diskontinuální) a základní konstrukční části zařízení, která umožňují generovat vysoký tlak potřebný k dělení a obrábění materiálu. V neposlední řadě v závěru teoretické části práce je uvedena charakteristika řezu, která obsahuje poznatky o samotné kvalitě řezu a jeho vadách.

Praktická část diplomové práce je věnována experimentálnímu posouzení vlivu řezné rychlosti, množství abraziva, druhu materiálu a jeho tloušťky na šířku řezné spáry a úhlové odchylky od kolmosti. Technologické parametry experimentu byly stanoveny vedoucím diplomové práce.

Ze zpracovaných výsledků měření je patrné, že všechny výše uvedené faktory skutečně ovlivňují kvalitu řezu. S přibývajícím řeznou rychlostí šířka řezu (spáry) klesá, ale naopak stoupá velikost úhlu úkosu. Je zřejmé, že pokud vysokotlaký abrazivní vodní paprsek má dostatek času na destrukci materiálu, tudíž řezná rychlost je malá, tak velikost úhlu úkosu γ např. u duralu tloušťky 20 mm při $25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vykazuje hodnoty blízké se k optimálnímu tvaru, tedy ke kolmému řezu. Vzorky vykazovaly tvary řezu „V“, ačkoli bylo použito více druhů materiálu s rozdílnými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi a tloušťkami. Druh materiálu však hrál roli při šířce řezné spáry, ale vzhledem k velmi malým rozdílům je můžeme považovat za irelevantní. Pokud předmětem zájmů bude jen dělení kovového materiálu, tak kvalita řezu pro uvedené materiály by měla být dostačující. V opačném případě můžeme využít změnu technologických parametrů (objem přidávaného abraziva, větší tlak vody, řezná rychlost...) nebo použít inovační technologie jako např. naklápění řezné hlavy pro eliminování úhlu úkosu.

Závěr práce byl věnován technicko-ekonomickému zhodnocení, v němž jsou uvedeny jednotlivé náklady na náhradní díly, amortizaci, elektřinu, abrazivo apod. pro konečné vykalkulování celkových nákladů na hodinu provozu stroje spojené s provedením experimentální části diplomové práce. Celková cena výzkumu byla vypočtena na 3878 Kč.

13 Citovaná literatura

1. MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologic: Advenced method of material removal* . Košice : Vienaľa, 2000. str. 275. ISBN 80-7099-430-4.
2. ŘASA, J. a GABRIEL, V. *Strojirenská technologic 3: Metody, stroje a nástroje pro strojirenskou výrobu*. 1 vyd. Praha : Scientia, 2000. 256 s. ISBN 80-718-3207-3.
3. Nástroje na řezání kovu. *Pilana*. [Online] 2006. [Citace: 2018-01-31] Dostupné z: <http://www.pilana.cz/cz/nastrojova-poradna-nastroje-na-rezani-kovu>.
4. LENFELD, P. *Technologic plošného tváření: Stříhání*. [Online] [Citace: 2018-01-31] Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#0118.
5. NOVOTNÝ, J a LANGER, Z. *Stříhání a další dělení kovových materiálů*. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1980. 213 s. L 13–B3-IV 41/22674.
6. LENFELD, P. *Technologic II - Část 1. Tváření kovu*. 2. vyd. Liberec : Technická unoverzita v Liberci, 2009. 110 s. ISBN 978-80-7372-466-5.
7. POLÁČKOVÁ, N. *Moderní řezné nástroje pro zapichování a upichování*. Brno, 2011. Diplomová práce (Ing.), Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojirenské technologic.
8. MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň : Západočeská univerzita, Fakulta technologic obrábění, 1992. 109 s. ISBN 80-7082-518-9.
9. MINAŘÍK, V. *Tepelné dělení materiálu*. 2.vydání. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. 50 s. ISBN 80-01-01028-7.
10. STAVINOHA, Z. *Nekonvenční metody obrábění*. [Online] 2012. [Citace: 2018-02-02] Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?doc=33788&docGroup=4931&instance=2>.
11. ŘASA, J., POKORNÝ, P. a GABRIEL, V. *Strojirenská technologic 3: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologic obrábění - 2.díl*. 1.vydání. Praha : Scientia, 2001. 221 s. ISBN 80-7183-227-8.
12. MÁDL, J. et.al. *Technologic obrábění - 3.díl*. 2.vydání. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 88 s. ISBN 978-80-01-03752-2.
13. Plasma Cutting. *Ionix*. [Online] [Citace: 2018-02-08] Dostupné z: <http://www.ionix.fi/en/technologies/plasma-processing/plasma-cutting/>.

14. Wire EDM. *Engineeringclicks*. [Online] [Citace: 2018-02-02] Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wire-edm/>.
15. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění-6.díl. MM Průmyslové spektrum*. [Online] 2008. [Citace: 2018-02-07] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-2.html>.
16. Electron Beam Machining (EBM) Principles. *Basicmechanicalengineering*. [Online] [Citace: 2018-02-07] Dostupné z: <https://basicmechanicalengineering.com/electron-beam-machining-ebm-principles/>.
17. Electron Beam Machining (EBM). *Learnengineering.wordpress*. [Online] [Citace: 2018-02-07] Dostupné z: <https://learnengineering.wordpress.com/>.
18. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění- 3.díl . MM Průmyslové spektrum*. [Online] 2007. [Citace: 2018-02-10] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-3-dil.html>.
19. Obrábění ultrazvukem. *Mlgeardesigns*. [Online] [Citace: 2018-02-10] Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/obrabeni-ultrazvukem>.
20. VESELÝ, R. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2008. Vysoké učení technické. Fakulta strojního inženýrství, energetický ústav.
21. Všeobecné informace o řezání vodním paprskem . *BFS-Pumps*. [Online] [Citace:2018-02-11] Dostupné z: <http://cz.bft-pumps.com/Rezani-vodnim-paprskem/obecnny>.
22. Slovník k Vodnímu Paprsku. *Flow*. [Online] [Citace: 2018-02-11] Dostupné z: https://www.flowwaterjet.cz/Zdroje/Slovnicek.aspx#pure_waterjet.
23. JÁCHYM, J. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2009. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
24. GOLETTI, M., a další. Condition Monitoring of an Ultra High Pressure Intensifier for Water Jet Cutting Machines. *ScienceDirect*. [Online] [Citace:2018-02-12] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113006756>.
25. VESELÝ, R. *Řezání materiálu vodním paprskem*. Brno, 2008. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
26. Vodní paprsek. *Mlgeardesign*. [Online] 2015. [Citace: 2018-02-15] Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1503/vodni-paprsek>.

27. BRYM, R. *Trendy vývoje obrábění vodním paprskem*. Brno, 2008. Diplomová práce (Ing.). Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
28. Pumps. *WardJet*. [Online] [Citace: 2018-02-15] Dostupné z: <https://wardjet.com/waterjet/university/nozzle-orifice>.
29. Waterjet Glossary. *Waterjets*. [Online] [Citace: 2018-02-18] Dostupné z: <http://waterjets.org/archive/about-waterjets/overview-of-waterjets/waterjet-glossary/>.
30. Abrasive Regulator II . *Hypertherm*. [Online] [Citace: 2018-02-17] Dostupné z: <https://www.hypertherm.com/hypertherm/waterjet/abrasive-regulator-ii/?region=EMEA>.
31. TRNKA, L. *Nekonvenční paprskové metody* . Brno, 2013. Bakalářská práce (Bc.). Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
32. HÍREŠ, O. HATALA, M. HLOCH, S. *Delenie kovových materiálův okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. . Ostrava-Poruba : Jiří Pustina , 2007. 147 s . ISBN 978-80-8073-769-6.
33. Abrasive Waterjet Cutting. *Abrasive Waterjet of India*. [Online] [Citace: 2018-02-22] Dostupné z: <http://www.waterjetindiana.com/waterjet-capabilities.html>.
34. Měď, hliník, bronz a mosaz. *Feropol*. [Online] [Citace: 2018-03-04] Dostupné z: <http://www.feropol.cz/>.
35. Materiálové normy. *Ferona*. [Online] [Citace: 2018-03-07] Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>.
36. ŘASA, J., HÁNĚK, V. a KAFKA, J. *Strojírenská technologie 4: Návrhy nástrojů, přípravků a měřidel. Zásady montáže*. 1 vydání. Praha : Scientia, 2003. 505 s. ISBN 80-7183-284-7.
37. Plasma Cutting-The History of Plasma Cutting. *Azom*. [Online] [Citace: 2018-02-02.] Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1061>.

14 Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma upichování.....	5
Obr. 2 Schéma řezání laserem	7
Obr. 3 Schéma dělení plazmou.....	8
Obr. 4 Elektroerozivní dělení materiálu	9
Obr. 5 Schéma elektronového řezání.....	10
Obr. 6 Ultrazvukové dělení	11
Obr. 7 Čistý vodní paprskem.....	13
Obr. 8 Abrazivní vodní paprsek	14
Obr. 9 Schéma zařízení vodního paprsku AWJM	16
Obr. 10 Soustava s multiplikátorovým čerpadlem	17
Obr. 11 Schéma hydroabrazivní řezací hlavy.....	19
Obr. 12 Dávkovač abraziva	20
Obr. 13 Druhy používaného abraziva.....	21
Obr. 14 Oblasti řezu.....	22
Obr. 15 Tvary odchylek kolmosti.....	23
Obr. 16 Neúplný konec řezu.....	24
Obr. 17 Rozměry zkušebního vzorku	27
Obr. 18 Stereoskopický mikroskop SPZ 11-T ZOOM, stolní počítač	30
Obr. 19 Postup měření šířky spáry	31
Obr. 20 Úkos řezné spáry	32
Obr. 21 Vstupní a výstupní strana, Dural - 20 mm.....	33
Obr. 22 Velikost úhlu γ , Dural - 20 mm.....	34
Obr. 23 Vstupní a výstupní strana, Dural - 10 mm.....	35
Obr. 24 Velikost úhlu γ , Dural - 10 mm.....	35
Obr. 25 Vstupní a výstupní strana, Měď – 10 mm	36
Obr. 26 Velikost úhlu γ , Měď – 10 mm	37

Obr. 27 Vstupní a výstupní strana, Ocel – 10 mm	37
Obr. 28 Velikost úhlu γ , Ocel – 10 mm.....	38
Obr. 29 Vstupní a výstupní strana, Dural – 5 mm.....	39
Obr. 30 Velikost úhlu γ , Dural – 5 mm	39
Obr. 31 Vstupní a výstupní strana, Dural - 5 mm.....	40
Obr. 32 Velikost úhlu γ , Dural – 5 mm	41
Obr. 33 Vstupní a výstupní strana, Nerezová ocel 5 mm	41
Obr. 34 Velikost úhlu γ – Nerezová ocel 5 mm	42
Obr. 35 Vstupní a výstupní strana - Měď 5 mm.....	43
Obr. 36 Velikost úhlu γ – Měď 5 mm	43
Obr. 37 Vstupní a výstupní strana, Litina - 5 mm	44
Obr. 38 Velikost úhlu γ , Litina – 5 mm.....	44
Obr. 39 Vstupní a výstupní strana, Ocel - 5 mm	45
Obr. 40 Velikost úhlu γ , Ocel - 5 mm	45

15 Seznam tabulek

Tabulka 1 Orientační přehled užívaných stupňů kvality řezu	23
Tabulka 2 Použité řezné rychlosti	29
Tabulka 3 Nejběžněji používané díly	49
Tabulka 4 Jednotlivé ceny řezů pro Dural ČSN 42 4254	50
Tabulka 5 Součet nákladů na řezání jednotlivých vzorků.....	51

16 Přílohy

Naměřené hodnoty a vypočtené hodnoty

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		25	50	75	100	125	150	175
Číslo měření	1	1,79	1,73	1,67	1,63	1,62	1,58	1,57
	2	1,77	1,75	1,68	1,59	1,60	1,59	1,55
	3	1,82	1,73	1,69	1,61	1,60	1,59	1,55
	4	1,80	1,72	1,70	1,65	1,64	1,57	1,57
	5	1,83	1,73	1,67	1,64	1,56	1,59	1,57
	6	1,80	1,74	1,65	1,63	1,58	1,56	1,54
	7	1,77	1,69	1,66	1,61	1,61	1,60	1,59
	8	1,78	1,71	1,67	1,64	1,59	1,54	1,56
	9	1,76	1,70	1,65	1,63	1,55	1,59	1,59
	10	1,78	1,68	1,65	1,60	1,56	1,59	1,58
	11	1,78	1,71	1,62	1,61	1,55	1,55	1,55
	12	1,78	1,69	1,65	1,57	1,56	1,56	1,55
Průměr		1,79	1,72	1,66	1,62	1,59	1,58	1,56
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]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		25	50	75	100	125	150	175
Číslo měření	1	1,45	1,26	1,12	0,98	0,86	0,89	0,88
	2	1,45	1,23	1,12	0,92	0,87	0,86	0,93
	3	1,45	1,26	1,11	0,93	0,84	0,86	0,84
	4	1,45	1,24	1,12	0,99	0,85	0,82	0,78
	5	1,48	1,26	1,11	0,99	0,78	0,82	0,90
	6	1,45	1,26	1,11	1,00	0,76	0,93	0,84
	7	1,42	1,25	1,12	0,97	0,82	0,86	0,92
	8	1,45	1,22	1,13	0,98	0,94	0,80	0,92
	9	1,44	1,25	1,09	1,01	1,02	0,81	0,80
	10	1,46	1,26	1,07	0,99	0,96	0,95	0,63
	11	1,47	1,24	1,06	1,02	0,95	0,89	0,76
	12	1,46	1,31	1,06	1,02	0,90	0,99	0,88
Průměr		1,45	1,25	1,10	0,98	0,88	0,87	0,84
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,02	0,03	0,07	0,06	0,08

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Číslo měření	1	1,77	1,73	1,63	1,61	1,57	1,50	1,52	1,48
	2	1,79	1,71	1,60	1,59	1,55	1,53	1,54	1,50
	3	1,81	1,67	1,61	1,58	1,54	1,51	1,51	1,51
	4	1,79	1,69	1,62	1,58	1,52	1,51	1,47	1,50
	5	1,81	1,67	1,66	1,60	1,55	1,51	1,50	1,50
	6	1,83	1,66	1,65	1,56	1,54	1,51	1,47	1,51
	7	1,80	1,70	1,61	1,57	1,52	1,58	1,48	1,50
	8	1,79	1,68	1,62	1,58	1,51	1,59	1,44	1,52
	9	1,76	1,64	1,65	1,55	1,57	1,50	1,46	1,45
	10	1,73	1,69	1,66	1,59	1,56	1,51	1,45	1,41
	11	1,76	1,66	1,65	1,57	1,54	1,53	1,48	1,45
	12	1,75	1,64	1,63	1,57	1,57	1,54	1,44	1,44
Průměr		1,78	1,68	1,63	1,58	1,55	1,53	1,48	1,48
Směr. odchylka		0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Číslo měření	1	1,33	1,12	1,09	0,99	0,91	0,85	0,85	0,90
	2	1,31	1,14	1,06	0,94	0,86	0,87	0,86	0,87
	3	1,30	1,13	1,03	1,01	0,87	0,80	0,81	0,74
	4	1,30	1,07	1,08	0,96	0,89	0,82	0,82	0,94
	5	1,31	1,17	1,07	0,94	0,85	0,83	0,77	0,79
	6	1,31	1,13	1,08	0,95	0,85	0,78	0,80	0,92
	7	1,30	1,14	1,08	0,91	0,85	0,84	0,77	0,73
	8	1,31	1,12	1,06	0,98	0,85	0,78	0,79	0,70
	9	1,31	1,15	1,06	0,94	0,89	0,79	0,81	0,77
	10	1,30	1,15	1,09	0,95	0,87	0,84	0,80	0,83
	11	1,30	1,14	1,10	0,93	0,87	0,81	0,80	0,77
	12	1,30	1,17	1,11	0,94	0,83	0,77	0,77	0,77
Průměr		1,31	1,14	1,08	0,95	0,87	0,82	0,80	0,81
Směr. odchylka		0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,08

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		50	75	100	125	150	175
Číslo měření	1	1,70	1,64	1,62	1,63	1,64	1,57
	2	1,67	1,61	1,58	1,63	1,57	1,55
	3	1,72	1,63	1,62	1,57	1,53	1,63
	4	1,69	1,58	1,62	1,56	1,57	1,60
	5	1,71	1,64	1,62	1,60	1,60	1,53
	6	1,69	1,63	1,58	1,59	1,57	1,52
	7	1,68	1,65	1,62	1,57	1,53	1,52
	8	1,67	1,62	1,60	1,54	1,51	1,51
	9	1,70	1,62	1,57	1,58	1,54	1,55
	10	1,76	1,59	1,56	1,56	1,48	1,55
	11	1,69	1,61	1,58	1,59	1,55	1,56
	12	1,65	1,59	1,54	1,54	1,51	1,52
Průměr		1,69	1,62	1,59	1,58	1,55	1,55
Směr. odchylka		0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		50	75	100	125	150	175
Číslo měření	1	1,15	1,17	1,04	0,96	0,78	0,67
	2	1,21	1,11	1,00	0,92	0,80	0,77
	3	1,28	1,14	1,01	0,95	0,88	0,82
	4	1,22	1,20	1,02	0,92	0,87	0,85
	5	1,24	1,18	1,06	0,96	0,88	0,79
	6	1,21	1,11	1,05	0,99	0,82	0,72
	7	1,22	1,16	1,08	0,95	0,88	0,80
	8	1,22	1,12	1,06	0,92	0,83	0,82
	9	1,19	1,11	1,08	0,94	0,96	0,70
	10	1,20	1,07	1,02	0,89	0,84	0,79
	11	1,26	1,14	1,02	0,89	0,87	0,82
	12	1,21	1,07	1,04	0,96	0,87	0,78
Průměr		1,22	1,13	1,04	0,94	0,86	0,78
Směr. odchylka		0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		20	40	60	80	100	120
Číslo měření	1	1,75	1,66	1,58	1,59	1,55	1,53
	2	1,74	1,63	1,55	1,57	1,52	1,50
	3	1,73	1,65	1,61	1,60	1,57	1,53
	4	1,75	1,66	1,60	1,59	1,55	1,53
	5	1,73	1,67	1,60	1,58	1,56	1,52
	6	1,71	1,64	1,60	1,56	1,54	1,54
	7	1,72	1,67	1,61	1,55	1,56	1,54
	8	1,69	1,64	1,60	1,51	1,52	1,52
	9	1,75	1,61	1,60	1,59	1,55	1,51
	10	1,72	1,63	1,59	1,55	1,53	1,52
	11	1,69	1,63	1,57	1,58	1,52	1,55
	12	1,68	1,62	1,55	1,56	1,50	1,52
Průměr		1,72	1,64	1,59	1,57	1,54	1,53
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01

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

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		20	40	60	80	100	120
Číslo měření	1	1,25	1,09	0,98	0,88	0,81	0,68
	2	1,25	1,11	0,98	0,87	0,78	0,75
	3	1,26	1,08	0,99	0,88	0,80	0,75
	4	1,25	1,11	0,98	0,85	0,77	0,78
	5	1,23	1,11	1,02	0,89	0,78	0,70
	6	1,25	1,07	0,99	0,87	0,73	0,71
	7	1,26	1,12	1,01	0,91	0,83	0,71
	8	1,25	1,10	0,99	0,88	0,81	0,68
	9	1,28	1,14	1,00	0,87	0,78	0,71
	10	1,26	1,12	1,01	0,84	0,75	0,66
	11	1,25	1,14	0,99	0,86	0,81	0,73
	12	1,24	1,11	0,98	0,88	0,79	0,64
Průměr		1,25	1,11	0,99	0,87	0,79	0,71
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04

Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		200	300	400	500	600	700	800
Číslo měření	1	1,58	1,52	1,50	1,48	1,49	1,49	1,46
	2	1,55	1,54	1,50	1,47	1,44	1,47	1,44
	3	1,58	1,50	1,52	1,52	1,52	1,44	1,46
	4	1,54	1,51	1,51	1,47	1,49	1,46	1,42
	5	1,57	1,57	1,52	1,48	1,45	1,50	1,51
	6	1,55	1,57	1,50	1,48	1,43	1,48	1,46
	7	1,55	1,57	1,51	1,46	1,45	1,41	1,49
	8	1,57	1,54	1,49	1,44	1,45	1,46	1,47
	9	1,58	1,55	1,49	1,45	1,46	1,43	1,46
	10	1,55	1,52	1,47	1,43	1,46	1,43	1,45
	11	1,55	1,50	1,47	1,47	1,47	1,41	1,45
	12	1,51	1,50	1,48	1,49	1,47	1,41	1,45
Průměr		1,56	1,53	1,50	1,47	1,47	1,45	1,46
Směr. odchylka		0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02

Dural ČSN 42 4254 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		200	300	400	500	600	700	800
Číslo měření	1	1,04	0,99	1,04	0,86	0,83	0,76	0,75
	2	1,02	0,97	1,01	0,82	0,82	0,76	0,77
	3	1,07	0,95	1,02	0,83	0,87	0,78	0,69
	4	1,06	0,96	0,99	0,87	0,84	0,80	0,63
	5	1,08	0,99	1,05	0,89	0,84	0,71	0,67
	6	1,06	0,96	0,99	0,88	0,84	0,75	0,70
	7	1,02	1,00	0,93	0,85	0,82	0,75	0,71
	8	1,06	0,97	0,92	0,81	0,80	0,75	0,73
	9	1,05	0,98	1,00	0,87	0,81	0,73	0,75
	10	1,02	0,97	1,04	0,83	0,83	0,75	0,70
	11	1,05	0,96	0,99	0,84	0,81	0,78	0,78
	12	1,02	1,00	0,98	0,82	0,78	0,73	0,73
Průměr		1,05	0,98	1,00	0,85	0,82	0,75	0,72
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04

Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		200	300	400	500	600	700	800
Číslo měření	1	1,77	1,59	1,45	1,47	1,44	1,43	1,48
	2	1,78	1,54	1,52	1,48	1,47	1,49	1,44
	3	1,83	1,57	1,53	1,47	1,45	1,46	1,46
	4	1,84	1,51	1,50	1,48	1,45	1,45	1,44
	5	1,73	1,51	1,54	1,48	1,46	1,48	1,48
	6	1,78	1,51	1,51	1,46	1,48	1,46	1,41
	7	1,79	1,53	1,52	1,48	1,47	1,41	1,43
	8	1,75	1,54	1,54	1,46	1,46	1,41	1,43
	9	1,80	1,49	1,51	1,46	1,43	1,42	1,44
	10	1,79	1,56	1,51	1,48	1,42	1,43	1,43
	11	1,78	1,52	1,52	1,46	1,42	1,45	1,42
	12	1,78	1,52	1,49	1,49	1,41	1,41	1,42
Průměr		1,79	1,53	1,51	1,47	1,45	1,44	1,44
Směr. odchylka		0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02

Dural ČSN 42 4203 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		200	300	400	500	600	700	800
Číslo měření	1	1,04	0,98	0,91	0,86	0,80	0,70	0,71
	2	1,07	0,97	0,96	0,89	0,79	0,73	0,63
	3	1,09	0,98	0,93	0,87	0,80	0,65	0,63
	4	1,08	0,96	0,95	0,85	0,68	0,76	0,75
	5	1,03	0,99	0,94	0,87	0,78	0,74	0,73
	6	1,09	0,97	0,92	0,88	0,77	0,75	0,56
	7	1,06	0,98	0,94	0,87	0,76	0,71	0,65
	8	1,10	1,00	0,95	0,84	0,71	0,74	0,66
	9	1,09	0,99	0,90	0,88	0,80	0,72	0,67
	10	1,08	0,97	0,91	0,87	0,75	0,71	0,65
	11	1,04	1,00	0,94	0,84	0,79	0,66	0,61
	12	1,04	0,96	0,93	0,88	0,76	0,77	0,72
Průměr		1,07	0,98	0,93	0,87	0,77	0,72	0,66
Směr. odchylka		0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05

Měď ČSN 42 3001 – 5 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		50	100	150	200	250	300	350
Číslo měření	1	1,67	1,6	1,55	1,55	1,48	1,49	1,46
	2	1,67	1,62	1,55	1,52	1,49	1,47	1,46
	3	1,65	1,6	1,55	1,49	1,52	1,52	1,47
	4	1,64	1,61	1,51	1,51	1,47	1,51	1,45
	5	1,66	1,62	1,52	1,48	1,46	1,51	1,49
	6	1,70	1,59	1,54	1,51	1,47	1,49	1,48
	7	1,69	1,55	1,58	1,52	1,53	1,43	1,47
	8	1,65	1,54	1,58	1,55	1,48	1,47	1,51
	9	1,73	1,56	1,55	1,46	1,45	1,47	1,47
	10	1,65	1,54	1,51	1,47	1,47	1,47	1,45
	11	1,63	1,57	1,53	1,52	1,46	1,47	1,49
	12	1,66	1,55	1,56	1,45	1,44	1,46	1,47
Průměr		1,67	1,58	1,54	1,50	1,48	1,48	1,47
Směr. odchylka		0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02

Měď ČSN 42 3001 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]						
		50	100	150	200	250	300	350
Číslo měření	1	1,26	1,13	1,06	0,98	0,88	0,78	0,72
	2	1,27	1,11	1,02	0,94	0,93	0,84	0,79
	3	1,29	1,12	1,08	0,98	0,90	0,78	0,63
	4	1,25	1,15	1,05	0,97	0,88	0,82	0,77
	5	1,24	1,12	1,00	0,96	0,79	0,81	0,70
	6	1,26	1,10	1,02	0,93	0,90	0,76	0,70
	7	1,26	1,12	1,04	0,92	0,80	0,78	0,82
	8	1,28	1,13	1,04	0,98	0,85	0,79	0,77
	9	1,30	1,14	1,04	0,98	0,88	0,85	0,80
	10	1,30	1,13	0,97	0,93	0,88	0,88	0,68
	11	1,24	1,13	1,04	0,97	0,89	0,81	0,73
	12	1,25	1,10	1,01	0,98	0,86	0,78	0,77
Průměr		1,27	1,12	1,03	0,96	0,87	0,81	0,74
Směr. odchylka		0,02	0,01	0,03	0,02	0,04	0,03	0,05

Nerezová ocel ČSN 17 153.2 - 5 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]									
		80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
Číslo měření	1	1,71	1,64	1,63	1,63	1,62	1,55	1,54	1,53	1,52	1,56
	2	1,68	1,62	1,65	1,63	1,60	1,56	1,53	1,51	1,47	1,51
	3	1,71	1,65	1,63	1,61	1,58	1,54	1,55	1,52	1,51	1,44
	4	1,68	1,58	1,58	1,59	1,61	1,53	1,58	1,55	1,50	1,46
	5	1,67	1,59	1,59	1,58	1,56	1,55	1,52	1,51	1,51	1,51
	6	1,69	1,62	1,61	1,57	1,59	1,55	1,53	1,53	1,47	1,51
	7	1,66	1,61	1,57	1,54	1,58	1,52	1,56	1,50	1,49	1,52
	8	1,67	1,59	1,55	1,56	1,55	1,53	1,55	1,51	1,51	1,41
	9	1,67	1,61	1,57	1,58	1,56	1,53	1,52	1,50	1,48	1,47
	10	1,69	1,60	1,60	1,57	1,56	1,54	1,54	1,48	1,52	1,50
	11	1,68	1,63	1,58	1,54	1,53	1,51	1,53	1,52	1,44	1,50
	12	1,68	1,59	1,59	1,55	1,55	1,53	1,53	1,47	1,43	1,47
Průměr		1,68	1,61	1,60	1,58	1,57	1,54	1,54	1,51	1,49	1,49
Směr. odchylka		0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04

Nerezová ocel ČSN 17 153.2 - 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]									
		80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
Číslo měření	1	1,01	0,95	0,92	0,87	0,85	0,80	0,74	0,67	0,65	0,57
	2	0,98	0,96	0,93	0,82	0,81	0,80	0,74	0,68	0,56	0,78
	3	1,03	1,01	0,91	0,89	0,82	0,76	0,66	0,65	0,63	0,63
	4	1,03	0,95	0,92	0,88	0,87	0,79	0,72	0,63	0,54	0,61
	5	1,08	0,98	0,91	0,87	0,83	0,80	0,71	0,66	0,68	0,71
	6	1,06	0,97	0,94	0,85	0,80	0,74	0,67	0,70	0,63	0,67
	7	1,06	0,97	0,90	0,84	0,82	0,80	0,89	0,72	0,67	0,63
	8	1,04	1,01	0,92	0,88	0,82	0,76	0,75	0,62	0,62	0,65
	9	1,03	0,97	0,96	0,85	0,84	0,81	0,91	0,68	0,66	0,66
	10	1,06	0,98	0,91	0,89	0,87	0,74	0,85	0,68	0,72	0,54
	11	1,04	0,99	0,94	0,84	0,84	0,77	0,88	0,71	0,65	0,62
	12	1,07	0,98	0,90	0,84	0,76	0,79	0,81	0,71	0,70	0,73
Průměr		1,04	0,98	0,92	0,86	0,83	0,78	0,78	0,68	0,64	0,65
Směr. odchylka		0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,08	0,03	0,05	0,06

Litina ČSN 42 2420 – 5 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		100	150	200	250	300	350
Číslo měření	1	1,60	1,49	1,49	1,48	1,50	1,48
	2	1,61	1,50	1,45	1,50	1,47	1,46
	3	1,58	1,54	1,50	1,42	1,47	1,40
	4	1,59	1,60	1,48	1,41	1,45	1,42
	5	1,57	1,57	1,50	1,43	1,45	1,43
	6	1,60	1,54	1,50	1,44	1,43	1,45
	7	1,60	1,55	1,49	1,47	1,41	1,41
	8	1,58	1,54	1,50	1,45	1,39	1,43
	9	1,58	1,58	1,49	1,45	1,43	1,41
	10	1,55	1,57	1,51	1,44	1,41	1,40
	11	1,63	1,50	1,50	1,46	1,43	1,43
	12	1,61	1,49	1,51	1,45	1,42	1,41
Průměr		1,59	1,54	1,49	1,45	1,44	1,43
Směr. odchylka		0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02

Litina ČSN 42 2420 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm·min ⁻¹]					
		100	150	200	250	300	350
Číslo měření	1	1,01	0,93	0,82	0,76	0,77	0,62
	2	1,04	0,93	0,86	0,81	0,67	0,63
	3	1,00	0,89	0,81	0,72	0,67	0,60
	4	0,99	0,90	0,86	0,73	0,69	0,66
	5	1,01	0,90	0,85	0,76	0,70	0,73
	6	0,99	0,92	0,82	0,75	0,68	0,67
	7	1,04	0,90	0,85	0,74	0,60	0,67
	8	1,02	0,91	0,83	0,70	0,69	0,63
	9	1,02	0,90	0,87	0,73	0,64	0,61
	10	1,02	0,93	0,83	0,72	0,74	0,58
	11	1,04	0,89	0,80	0,72	0,69	0,71
	12	1,01	0,93	0,83	0,71	0,71	0,66
Průměr		1,02	0,91	0,84	0,74	0,69	0,65
Směr. odchylka		0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Ocel ČSN 11 375 – 5 mm, šířka vstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm/min]					
		80	120	160	200	240	280
Číslo měření	1	1,64	1,61	1,52	1,52	1,51	1,45
	2	1,62	1,61	1,56	1,48	1,51	1,48
	3	1,69	1,62	1,59	1,55	1,52	1,46
	4	1,63	1,59	1,57	1,58	1,48	1,44
	5	1,62	1,60	1,57	1,50	1,52	1,53
	6	1,65	1,58	1,56	1,48	1,49	1,49
	7	1,63	1,59	1,57	1,51	1,52	1,51
	8	1,61	1,56	1,56	1,53	1,51	1,49
	9	1,64	1,60	1,57	1,52	1,48	1,52
	10	1,62	1,59	1,54	1,54	1,50	1,47
	11	1,66	1,60	1,58	1,51	1,50	1,44
	12	1,62	1,60	1,55	1,47	1,50	1,45
Průměr		1,64	1,60	1,56	1,52	1,50	1,48
Směr. odchylka		0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,03

Ocel ČSN 11 375 – 5 mm, šířka výstupní spáry paprsku

Šířka spáry [mm]		Řezná rychlost [mm/min]					
		80	120	160	200	240	280
Číslo měření	1	1,10	0,95	0,87	0,80	0,70	0,63
	2	1,09	0,95	0,90	0,82	0,72	0,67
	3	1,08	0,98	0,90	0,83	0,68	0,70
	4	1,09	0,98	0,86	0,78	0,71	0,76
	5	1,08	0,98	0,86	0,84	0,71	0,63
	6	1,08	0,96	0,87	0,77	0,72	0,54
	7	1,08	0,98	0,90	0,81	0,71	0,72
	8	1,08	0,99	0,83	0,79	0,69	0,62
	9	1,06	0,97	0,86	0,80	0,73	0,79
	10	1,06	0,96	0,86	0,79	0,70	0,71
	11	1,07	0,95	0,89	0,75	0,67	0,60
	12	1,05	0,99	0,87	0,78	0,65	0,69
Průměr		1,08	0,97	0,87	0,80	0,70	0,67
Směr. odchylka		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,07