

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálů a strojírenské technologie**



**Diplomová práce**

**Řezání vodním paprskem**

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

Diplomant: Bc. David Šilha

© 2020 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

David Šilha

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Řezání vodním paprskem**

Název anglicky

**Waterjet cutting**

---

### **Cíle práce**

- \* shromáždit informace o technologiích používaných pro dělení kovů se zaměřením na řezání vodou
- \* na základě provedeného experimentu hodnotit proces řezání vybraného materiálu, 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; 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/) .
- BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture 2017, 16. s. 75-81.
- Časopisy zahraniční (<https://www.sic.czu.cz/cs/r-8833-odborne-databaze/r-8883-infozdroje>) a tuzemské (Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM (Svařování, dělení, spojování materiálů), Strojírenská technologie, Strojárstvo / Strojírnoství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie / Svařování).
- KIM, S. I., KIM, M. H.: Evaluation of cutting characterization in plasma cutting of thick steel ship plates. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013, 14(9). s. 1571-1575.
- MAŇKOVÁ, I.: Progresivne technologie. Košice, TU SF Edícia vedeckej a odbornej literatúry, Viena, vydavateľstvo a tlačiareň 2000. 275 s.
- MINAŘÍK, V.: Tepelné dělení materiálu. Praha, ČVUT 1993. 50 s.
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., del VAL, J. et al.: Laser cutting of aluminum alloy Al-2024-T3. Procedia Manufacturing, 2017, 13. s. 396-401.
- STEEN, W. M.: Laser material processing. 3rd Ed., London, Springer 2003. 408 s.
- ŘAVODOVÁ, M., NÁPRSTKOVÁ, N.: Hodnocení kvality povrchu materiálu po řezání AWJ. Strojírenská technologie, 2012, 17(3). s. 186-192.
- WaterJets.org ... the most complete waterjet resource on the web [online]. Dostupné z [www: http://waterjets.org/](http://waterjets.org/) .
- 

### Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

### Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

### Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírské technologie

Elektronicky schváleno dne 15. 1. 2019

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 01. 10. 2019

## **Čestné 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 s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc., za jeho cenné rady a odborné vedení při tvorbě práce. Dále bych rád poděkoval panu Klenovci od firmy Trumpf a panu Březinovi od firmy Awac za přípravu cenových nabídek.

# Řezání vodním paprskem

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá dělením kovových materiálů pomocí technologie vodního a laserového paprsku. Úvod práce je věnován konvenčním a nekonvenčním metodám dělení kovových materiálů. Čtenář je primárně seznámen s technologiemi využitými v praktické části diplomové práce s důrazem na jejich princip a popis jednotlivých komponent, které tvoří funkční celek zařízení. Experimentální část diplomové práce je věnována posouzení řezného procesu v případě materiálu Hardox 450 s tloušťkou 3, 6, 10, 15 mm v závislosti na rychlosti řezání. Předmětem analýzy je šířka řezné spáry, vizuální zhodnocení a dopočet úhlu řezu s následným porovnáním obou metod. Dále je provedeno technicko-ekonomické zhodnocení, ve kterém je stanovena režijní cena zařízení pomocí cenových nabídek a demonstrace roční ziskovosti na stanoveném typovém díle.

**Klíčová slova:** Vodní paprsek, dělení materiálu, laserový paprsek, ekonomické zhodnocení.

## Water jet cutting

### Abstract

This diploma thesis deals with the separation of metallic materials using water and laser beam technology. The introduction is devoted to conventional and unconventional methods of cutting metal materials. The reader is primarily acquainted with the technologies used in the practical part of the thesis with an emphasis on their principle and description of the individual components that make up the functional unit of the device. The experimental part of the thesis is devoted to the assessment of the cutting process in the case of Hardox 450 material with a thickness of 3, 6, 10, 15 mm depending on the cutting speed. The subject of the analysis is the width of the cutting gap, visual evaluation and calculation of the cutting angle with subsequent comparison of both methods. Furthermore, a technical-economic evaluation is carried out, in which the overhead price of the equipment is determined by means of quotations and a demonstration of annual profitability on the specified type work.

**Keywords:** Water jet, material cutting, laser jet, economical evaluation.

## Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>1</b>
<b>Cíl práce a metodika.....</b>	<b>2</b>
1.1 Cíl práce .....	2
1.2 Metodika .....	2
<b>2 Rozdělení metod dělení kovových materiálů .....</b>	<b>3</b>
2.1 Konvenční metody dělení .....	4
2.2 Nekonvenční metody dělení.....	6
<b>3 Technologie řezání vodním paprskem .....</b>	<b>8</b>
3.1 Rozdělení technologie řezání vodním paprskem .....	8
3.1.1 Základní princip řezání vodním paprskem .....	9
3.2 Druhy vodních paprsků .....	11
3.2.1 Řezání vodou bez přídavného abraziva (WJM).....	11
3.2.2 Řezání vodou s přídavným abrazivem (AWJM) .....	11
3.2.3 Kryogenní vodní paprsek.....	12
3.2.4 Kavitační vodní paprsek .....	13
3.2.5 Diskontinuální vodní paprsek .....	13
3.3 Konstrukce zařízení pro řezání vodním paprskem.....	14
3.3.1 Multiplikátorové čerpadlo.....	15
3.3.2 Akumulátor tlaku .....	17
3.3.3 Filtrační systém a změkčování vody.....	17
3.3.4 Řezací ústrojí .....	18
3.3.5 Dýzy.....	19
3.3.6 Abrazivo.....	20
<b>4 Technologie řezání laserem .....</b>	<b>21</b>
4.1 Princip laseru.....	21
4.2 Schéma a hlavní parametry dělení .....	24
4.3 Systémy a metody řezání .....	26
4.4 Pevnolátkové lasery .....	27
4.4.1 Rubínový laser .....	28
4.4.2 Nd:YAG laser .....	28
4.4.3 Vláknové lasery .....	29
4.5 Plynové lasery .....	30
4.5.1 CO <sub>2</sub> laser .....	30
4.5.2 Helium-neonový laser.....	31
4.5.3 Argonový laser.....	31

4.5.4	Excimetrový laser .....	31
<b>5</b>	<b>Výhody a nevýhody využitých technologií.....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Experimentální zhodnocení – Praktická část .....</b>	<b>33</b>
6.1	Dělený materiál .....	34
6.2	Technologie použité při experimentu.....	35
6.3	Vizuální vyhodnocení .....	37
6.3.1	Metoda vodní paprsek.....	38
6.3.2	Metoda laserový paprsek .....	39
6.4	Měření šířky řezné spáry .....	40
6.4.1	Měřicí laboratorní zařízení.....	40
6.4.2	Metodika měření .....	41
6.5	Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 3 mm .....	43
6.6	Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 3 mm .....	44
6.7	Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 6 mm .....	45
6.8	Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 6 mm .....	46
6.9	Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 10 mm .....	47
6.10	Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 10 mm .....	48
6.11	Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 15 mm .....	49
6.12	Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 15 mm .....	50
6.13	Výpočet úhlu řezu .....	51
6.13.1	Vyhodnocení úhlu řezu 3 mm.....	52
6.13.2	Vyhodnocení úhlu řezu 6 mm.....	53
6.13.3	Vyhodnocení úhlu řezu 10 mm.....	54
6.13.4	Vyhodnocení úhlu řezu 15 mm.....	55
<b>7</b>	<b>Diskuse a porovnání výsledků měření.....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Technicko-ekonomické zhodnocení.....</b>	<b>57</b>
8.1	Stanovení hodinové sazby metody vodního paprsku (AWJM).....	58
8.2	Stanovení hodinové sazby metody laserového paprsku (LBM) .....	61
8.3	Stanovení režijní ceny typového dílu .....	64
<b>9</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>68</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>70</b>
<b>11</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>74</b>
<b>12</b>	<b>Seznam obrázků, tabulek, grafů .....</b>	<b>91</b>

# 1 Úvod

Dělení kovových materiálů představuje na poli strojírenské technologie jednu ze základních metod tvorby polotovarů či výrobků. Z historického hlediska probíhalo dělení především za použití ručního nářadí nebo mechanických prostředků, které disponovaly především nízkou produktivitou práce a omezenými možnostmi použití. S postupně rostoucí poptávkou po dělení materiálů větších rozměrů vznikaly metody na bázi elektrického oblouku nebo hořlavých plynů, které ovšem měly značné nevýhody plynoucí z vysokého tepelného namáhání a nízké přesnosti řezu. Trend vývoje dnešního moderního strojírenství je zaměřený především na zvýšení produktivity, jakosti a požadované kvality s vysokými nároky na snížení ekologické zátěže. Kvantitativní zvyšování produkce klade velké požadavky na zvyšování úrovně automatizace a robotizace výrobních zařízení, které mají za úkol snížení výrobních časů. Tyto trendy se staly hlavním hnacím prvkem pro vývoj a výzkum nových progresivních technologií, které našly uplatnění i v mnoha jiných oborech jako v případě vodního a laserového paprsku. Zásadním zvratem ve využití vodního paprsku v oblasti výrobních prostředků bylo přesné dělení měkkých materiálů v sedmdesátých letech minulého století. Díky specifickým vlastnostem řezacího média ve formě vody našel uplatnění jako dělicí nástroj v potravinářském a chemickém průmyslu s vysokými požadavky na čistotu a prašnost prostředí. Významným technicko-ekonomickým posunem těchto nastupujících technologií od původních nekonvenčních metod je vnímání děleného polotovaru jakožto konečného výrobku, který nevyžaduje následné opracování. Konkurence v oblasti progresivních technologií je velmi vysoká, pro dominantní tržní postavení musí výrobce své technologie neustále zdokonalovat, vyvíjet nové metody a respektovat požadavky zákazníka. Rešeršní část diplomové práce se zaměřuje na shrnutí metod dělení kovových materiálů s důrazem na metody využití při experimentu. Praktická část je zaměřena na zhodnocení dělení pomocí nekonvenční technologie vodního paprsku u děleného materiálu Hardox 450. Pro porovnání výsledků a stanovení ekonomických ukazatelů byla do experimentu zahrnuta metoda laserového paprsku.



# **Cíl práce a metodika**

## **1.1 Cíl práce**

V teoretické části je diplomová práce zaměřena na sběr dat a informací z literárních zdrojů s tématem dělení kovových materiálů se zaměřením na metody využití v experimentální části. V tomto případě se jedná o nekonvenční „progresivní“ technologie vodního a laserového paprsku. Experimentální část je zaměřena na vyhodnocení řezných parametrů u ořezávacího materiálu s obchodním označením Hardox 450. Vzhledem k povaze výzkumu budou vyhodnocovány parametry šířky řezné spáry, vizuální kvality řezu a úhlu řezu. V závěrečné části bude stanoveno technicko-ekonomické porovnání použitých metod.

## **1.2 Metodika**

V teoretické části budou shrnuty poznatky vyhledané z knižních a internetových zdrojů. V praktické části budou vytvořeny experimentální vzorky hodnoceného materiálu. Zkoumaným problémem je vyhodnocení procesu řezu za přítomnosti materiálu Hardox 450 s rostoucí rychlostí řezání. Experiment se skládá ze tří hlavních částí vizuálního zhodnocení, měření šířky řezné spáry a dopočet úhlu řezu. Metodika měření a vyhodnocení dat je detailně shrnuta v experimentální části diplomové práce.

## 2 Rozdělení metod dělení kovových materiálů

Dělení materiálů je v dnešní průmyslové strojírenské výrobě nedílnou součástí základních technologických operací. Výběr metody technologické operace je ovlivněn primárně požadavky, které jsou určeny na základě požadované kvality stanovené konstruktérem, produktivity a technologicko-hospodářského zhodnocení. Vzhledem k dlouhému vývoji metod používaných pro dělení kovů existuje široké množství technologických procesů a operací, které lze rozdělit podle vývojového stupně [1]. Z literatury Maňkové [1] lze metody dělení rozdělit do tří kategorií:

- **Klasické metody dělení** – vyznačují se operacemi, které jsou založené na působení mechanické síly. Jsou též označovány jako metody konvenční. Jedná se především o soustružení, frézování a tváření.
- **Doplňkové metody dělení** – tyto metody jsou založené na působení fyzikálních a chemických jevů. Jsou označovány jako metody nekonvenční.
- **Vylepšené inovační metody dělení** – jsou zaměřené na zpracování tvrdých materiálů (Hard Machining), přesné stříhání a vysokorychlostní obrábění.

Směr vývoje inovačních technologií vyplývá z nedostatků původních technologií a současných poznatků určujících vylepšení. Tento trend lze rozdělit podle Maňkové [1] do dvou hlavních směrů:

- Vylepšené klasické procesy založené primárně na vytváření extrémních řezných podmínek jako v případě vysoko řezných rychlostí HSC (High Speed Cutting) v porovnání s klasickými metodami.
- Procesy založené na nových principech, kdy směr vývoje těchto metod je založen na nových poznatcích a fyzikálně mechanických metodách. Typickým příkladem jsou metody LAM (laserově podporované řezání a broušení). Jedním z posledních trendů dnešní doby jsou metody (Rapid prototyping a Rapid Tooling), které jsou navrženy pro rychlou komplexní výrobu prototypů a nástrojů.

## 2.1 Konvenční metody dělení

Hlavní podstatou konvenčních metod je působení a rozrušování materiálu pomocí mechanické energie, která působí přímo na materiál s výsledným efektem tvorby třísky. Pomocí těchto metod lze zajistit homogenitu řezu a výslednou kolmost, což je u nekonvenčních technologií problematické. [1]

Klasické metody konvenčních technologií dosáhly svého vrcholu koncem šedesátých let dvacátého století díky rostoucím požadavkům na kvalitu, jakost a dobu zpracování. V další etapě se postupně proměnily ve výkonnější procesy jako je (výkonné broušení a sdružené operace). [1, 2]

### Dělení materiálu řezáním

Způsob dělení materiálu řezáním je aplikovatelný na kotoučových nebo rámových pilách a patří k nejužívanějším metodám dělení. Při dělení je určitá část materiálu odebrána ve formě třísek. Objem třísek závisí na šířce pilového pásu či kotouče. Hlavním parametrem u všech dílčích metod dělení je rychlost řezného elementu vůči materiálu (posuv na zub). Z technologického hlediska dělíme řezání na: [2]

- Řezání na rámových pilách - předností rámových pil je nízká pořizovací cena s nízkou spotřebou energie, která vede k vysoké hospodárnosti. Díky těmto kritériím je rámová pila určena především pro kusové nebo malosériové provozy. Značnou výhodou přináší v jednoduchosti a nízké poruchovosti, která má přímý vliv na kvalifikovanost obsluhy. Základní nevýhodou je nízká produktivita a malá přesnost řezu.
- Řezání na kotoučových pilách - vyniká svým universálním použitím. Hlavním řezacím elementem je řezný kotouč, který může být stacionárně umístěn vůči pohybu materiálu. Úbytek materiálu je přímo úměrný tloušťce kotouče.
- Řezání na pásových pilách - patří k nejproduktivnějším metodám dělení materiálů vzhledem k ztrátám způsobeným prořezem. K značným výhodám patří vysoká kvalita a kolmost řezu. Dělicím nástrojem je pevně spojený pilový pás, který tvoří uzavřenou smyčku (nekonečný pás).

### **Dělení materiálu stříháním a lámáním**

Ve strojírenské praxi se stříhání a lámání řadí k nejproduktivnějším metodám dělení polotovarů. Stříhání se používá primárně pro dělení ocelových plechů, pásů a tyčí. Deformace materiálu při stříhání vzniká vzájemným smykovým působením dvou řezných hran. Drtivá většina případů se provádí za studena, výjimkou jsou nízko-plastické a slitinové oceli. V těchto případech může teplota předehřevu dosahovat až 650 °C. V malých sériích jsou plechy dělené do tloušťky 1 mm s použitím ručních nůžek. V případě formátových plechových tabulí jsou využity speciální stříhací zařízení až do tloušťky 150 mm za studena. [2]

Dělení lámáním se provádí za studena na speciálních lamačích u ocelí, jejichž pevnost v tahu převyšuje 600 MPa. Důležitým aspektem této metody je vytvoření vrubu v místě lomu, jehož hloubka se pohybuje okolo 10 % průřezu profilu. Podstata lámání spočívá ve vytvoření síly, která zapříčiní vysokou koncentraci napětí v místě lomu. [2]

### **Dělení materiálu upichováním**

Podstatou technologie je dělení materiálu převážně rotačních polotovarů. Nejčastěji se provádí na CNC automatech nebo soustruzích, které využívají upichovací destičky (VBD) vyrobené ze slinutých karbidů či rychlořezné oceli. Při pracovní operaci je na nástroj vyvinuta síla, která se v průběhu upichování mění z důvodu měnící se obvodové rychlosti při vnikání do materiálu. Značnou výhodou této metody je kolmost a čistota řezu. [2]

### **Dělení materiálu rozbrušováním**

Podstatou metody rozbrušování je oddělení materiálu pomocí abrazivního účinku řezného nástroje. Nejrozšířenějším nástrojem jsou brousící kotouče s přísadami karbidu křemíku (SiC) nebo oxidu hlinitého ( $Al_2O_3$ ). V případě těžkoobrobitelných materiálů jsou využity kotouče s pryskyřičným pojivem. Druhou významnou metodou v této kategorii je rozbrušování pomocí brusného drátu. Dělení materiálu touto metodou je prováděno pomocí účinku pohyblivého drátu, který působí nepatrnou silou na polotovar. Drát je povlakovaný diamantovým prachem o průměru od 0,2 do 2,2 mm. Technologie rozbrušování se používá především pro dělení polotovarů menších rozměrů s vyšší pevností. Při činnosti se plochy řezu intenzivně ohřívají. Technologie dělení pomocí brusných kotoučů či brusného drátu není vhodná pro dělení kalených a popouštěných ocelí. [2]

## **2.2 Nekonvenční metody dělení**

Způsob dělení materiálu pomocí nekonvenčních metod je založený na principu působení fyzikálních či fyzikálně - chemických principech bez použití silových mechanických účinků. Hlavní užitek těchto metod spočívá ve zpracování těžkoobrobitelných materiálů, které jsou v případě konvenčních metod těžko zpracovatelné.

### **Dělení laserem (Laser Beam Machining – LBM)**

Základním principem řezání laserem je přeměna světelné energie na tepelnou energii pomocí stimulované emise záření a vytvoření monochromatického paprsku směřovaného na malou plochu v materiálu. Metoda je založená na principu roztavení kovového materiálu a následného vyfouknutí z místa řezu pomocí technického plynu. Vzhledem k malé velikosti paprsku dosahuje koncentrace teplot v lázni roztaveného kovu velmi vysokých hodnot. Vlivem auto-fokusačního systému je možné dělit kovy slitiny a jiné materiály bez závislosti na jejich mechanických vlastnostech. Technologie laserové řezání je v dnešní době velmi progresivní, vyznačuje se vysokou přesností a vysokou produktivitou. Tato technologie je detailněji popsána v dalších kapitolách. [1]

### **Dělení vodním paprskem (Water Jet Machining – WJM)**

Metoda dělení vodním paprskem je založená na působení vysokého tlaku vody směřovaného do místa řezu. V případě přítomnosti abrazivního materiálu, který zvyšuje účinnost řezání, hovoříme o metodě AWJM (Abrasive Water Jet Machining). Proces řezání probíhá za působení tlaku, jehož hodnota může dosahovat až 6500 barů. Vytvoření vysokého tlaku probíhá za pomoci speciálních čerpadel, které směřují tlakové médium do řezací hlavičky. Pomocí vodního paprsku lze dělit širokou škálu materiálů. Vzhledem k povaze média, které tvoří voda, je materiál při řezném procesu chlazený proto nedochází k tepelné deformaci v místě řezu. Detailní princip této technologie je popsán v dalších kapitolách. [1, 3].

### **Dělení kyslíkem**

Proces dělení je založený na zdroji tepelné energie, který přehřívá dělený materiál na zápalnou teplotu pomocí hořlavých plynů jako např. acetylén. V případě běžných uhlíkových ocelí se teplota pohybuje okolo 1 350 °C. Roztavený kovový materiál se v proudu kyslíku spaluje na kovové oxidy, které se pomocí tlaku kyslíku vylučují z místa řezu. Se specializovanými hořáky lze dělit materiály s tloušťkou 1000 mm. [1, 3]

### **Dělení plasmou – (Plasma Beam Machining – PBM)**

Plasmové dělení kovových materiálů je založeno na přeměně elektrické energie na tepelnou energii. Oblouk je nejčastěji tvořený katodou ve formě wolframové elektrody a anodou jakožto řezným materiálem. Samotná plasma vzniká rozkladem molekul plynu za přítomnosti elektrického oblouku. Tepelná energie plasmového oblouku přesahuje hodnotu 10 000 °C. V technické praxi se při řezání plasmou nejčastěji používají směsi argonu (Ar) a vodíku (H<sub>2</sub>). [1]

### **Dělení elektroerozivním účinkem (Electrical Discharge Machining - EDM)**

Podstatou elektroerozivního dělení je odebrání materiálu v důsledku cyklicky se opakujících elektrických impulsů mezi nástrojem a obrobkem. Proces probíhá za přítomnosti dielektrika ve formě kapalného média. Hlavním požadavkem účinnosti elektroerozivního obrábění je vodivost polotovaru a teplota tavení. Touto metodou lze dosahovat vysokých přesností okolo tisícín milimetrů. [1]

### **Dělení elektronovým paprskem – (Electron Beam Machining – EBM)**

Technologie je založená na využití kinetické energie urychlených elektronů působících na polotovar ve vakuu. Srážka elektronů s materiálem je následně přeměněna na tepelnou energii, která je schopna odpařit či natavit materiál v místě dopadu. Proces dělení je možné aplikovat na kovové i nekovové materiály. [1]

### **Dělení ultrazvukem – (Ultrasonic machining – USM)**

Opracování pomocí ultrazvuku je proces probíhající za pomoci účinků brusiva aplikovaného do kapaliny kmitající s frekvencí okolo 20 kHz. Vysokofrekvenční zdroj vytváří kmitání s nízkou amplitudou, která je přenášena pomocí nástroje do suspenze. Pomocí této technologie lze opracovávat kovové i nekovové materiály s tvrdostí vyšší než 40 HRC. Nedoporučují se používat měkké a houževnaté materiály z důvodu poškození povrchu. [1, 4]

### 3 Technologie řezání vodním paprskem

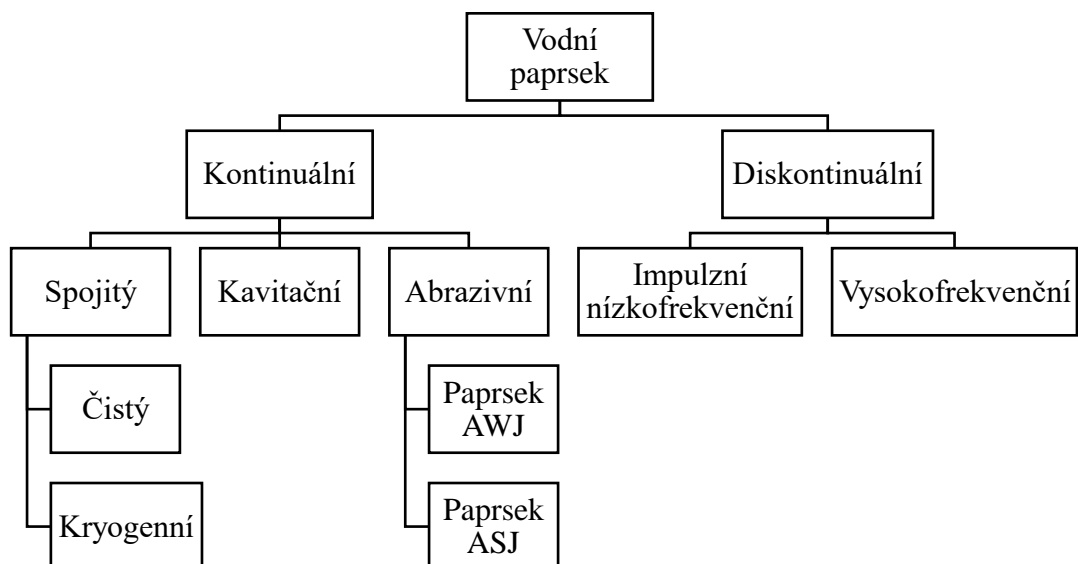
První zmínky o vodním paprsku jsou datovány již na počátku 18. století, kdy v Rusku a na Novém Zélandu používali horníci tlakovou vodu k odstranění sypkých zbytků zemin a uhlí. V tom samém století se v USA během zlaté horečky používala stejná technologie na těžbu zlata z měkkých hornin. V těchto případech se nejednalo o vodní paprsek určený pro dělení materiálů a to kvůli nízkým tlakovým účinkům. [5]

Ve 30. letech 20. století byl vodní abrazivní paprsek poprvé použit jako technologický prvek pro řezání papíru ve strojírenských závodech díky Leslie Tirrellovi a Elmo Smithové. V prvopočátku byla životnost abrazivních trysek velmi krátká, ovšem díky ohlasu této technologie byly vytvářeny nové návrhy. V poválečné době 50. let experimentoval Dr. Norman Franz s vysokotlakým paprskem ve snaze řezání kmenů. Jeho experimenty prokázaly, že pomocí technologie vodního paprsku lze účinně řezat tvrdší materiály. Zásadní zlom vývoje přinesla v 60. letech 20. století společnost Bendix, která díky konstrukci prvního komerčního zařízení přišla s vylepšenými krystalickými vodními tryskami.

#### 3.1 Rozdělení technologie řezání vodním paprskem

Vodní paprsek se využívá v širokém spektru průmyslu. Podle [4] lze rozdělit jednotlivé typy paprsku na:

Obrázek 1 Rozdělení technologie vodního paprsku



Zdroj:[4]

### 3.1.1 Základní princip řezání vodním paprskem

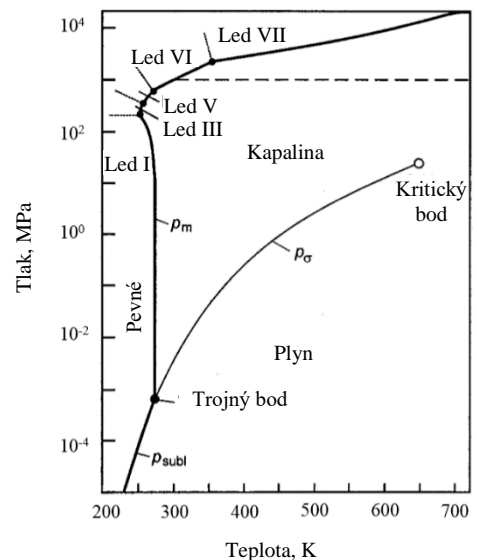
Technologie vodního paprsku je zařazena do skupiny nekonvenčních metod dělení materiálů. Základní princip řezání vodním paprskem spočívá v odebrání materiálu pomocí mechanické energie, kterou představuje úzký proud kapaliny s vysokou rychlostí a kinetickou energií. Působící síla vytvořená proudem kapaliny na plochu materiálu vyvolává vysoké napětí, které vede k vylamování částic. Dle [4] používá vodní paprsek pro rozrušení materiálu tyto mechanismy:

- Šíření trhlin, které vznikly v důsledku propojení trhlin pod povrchem materiálu. Mechanismus se projevuje u křehkých materiálů.
- Kluzných lomů v důsledku posouvajících se napětí.

Proces vodního paprsku je ekvivalentem vodní eroze ovšem s velmi zrychlenými účinky. Vysokotlaké zařízení umožňuje stlačit kapalinu až na 6 500 bar. Následně je kapalina urychlována přes dýzu o malém průměru. Výstupní rychlost kapaliny procházející dýzou se pohybuje okolo 600 až 900 m·s<sup>-1</sup>. [4, 5]

Výzkumy z poslední doby se zaměřují na zvýšení efektivity vodního paprsku pomocí generování vysokých tlakových účinků. Nutným předpokladem pro vývoj nových metod je určení chování pracovního média, které se může za působení různých tlakových účinků chovat odlišně, v některých případech i destruktivně. V případě vody jako řezacího média lze vycházet z fázového p-T diagramu obr. 2, který slouží k zobrazení stavových veličin skupenství. Z charakteru vody lze vyčíst, že vodní paprsek nelze použít jako řezací médium při tlaku převyšující 900 MPa při 20 °C z důvodu změny skupenství na led. Experimentální

Obrázek 2 P-T diagram vody



Zdroj: [6]

výzkum [6] se zabýval účinky řezání a opotřebením komponent vysokotlakým paprskem s tlakem 900 MPa. Na základě výsledků experimentu bylo zjištěno, že riziko zamrznutí vody při vstupních teplotách v rozmezí 10 až 15 °C není patrné z důvodu adiabatického zahřívání, které je způsobené třením řezacího média a jednotlivých komponent. Toto zvýšení teploty



zamezilo tvorbě ledu. Největší destrukci zaznamenaly trysky, které byly vlivem vysokého tlaku namáhány až do mezí plastické deformace. [6]

Dělení materiálu pomocí vodního paprsku s přídavkem abraziva je odlišné od čistého vodního paprsku. V případě abrazivní metody slouží vodní paprsek jako element a nositel k urychlování abraziva, nejčastěji drceného granátu, s jehož pomocí rozrušuje materiál. Tato metoda je násobně účinnější než čistý vodní paprsek. V současnosti lze pomocí této technologie dělit materiály až do tloušťky 250 mm. Dnes jsou ve většině případů děleny pomocí vodního abrazivního paprsku materiály jako např. ocelové plechy, neželezné kovy, litina. Významnou roli hraje tato technologie i v potravinářském průmyslu a to díky bezprašnému a netoxickému provozu. V těchto případech může být použit jako řezací médium glycerin, mléko nebo živočišný tuk. [1, 5, 37]

Mezi nesporné výhody při úběru materiálu patří absence vnitřního pnutí, díky kterému nedochází k tvorbě metastabilních struktur. Bylo zjištěno, že vlivem tření abrazivních částic se zvyšuje teplota řezu v rozmezí od 20 do 40 °C. V porovnání s ostatními nekonvenčními metodami se jedná o zanedbatelnou hodnotu, která nemá vliv na dělený materiál. Hlavními nevýhodami této technologie je kontakt děleného materiálu s řezným médiem. Tato skutečnost s sebou nese v případě náchylných materiálů změnu tvaru nebo možnou nepříznivou intoxikaci. [1, 37]

Faktory ovlivňující účinek vodního paprsku:

- Tlak a průměr paprsku
- Rychlost posuvu
- Úhel dopadu
- Délka trysky
- Druh používaného abraziva
- Velikost a tvar abrazivního zrna
- Hmotnostní průtok abraziva
- Druh řezacího média

## 3.2 Druhy vodních paprsků

V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé druhy vodních paprsků.

### 3.2.1 Řezání vodou bez přídavného abraziva (WJM)

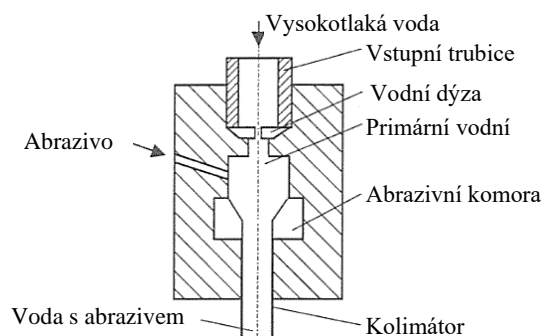
Jedná se o typ vodního paprsku, který využívá jako řezací medium stlačenou kapalinu bez abrazivního činitele. Důležitým doporučením je použití vhodné filtrace a úpravy kapaliny a její změkčení a deionizace. Tato metoda je určena primárně pro dělení měkkých materiálů. Podstatou procesu řezání je stlačení pracovní kapaliny pomocí vysokotlakého čerpadla, která se pohybuje v rozmezí od 80 do 500 MPa. Tento řezací tlak je směřován do řezací hlavy, která zajišťuje integritu vodního paprsku pomocí dýzy o průměru, který se pohybuje v rozmezí od 0,2 do 0,5 mm. Optimální vzdálenost řezací trysky od obráběného materiálu se pohybuje v rozmezí od 10 do 15 mm. Tato řezací metoda je vhodná především do sanitárního prostředí, a to díky absenci abrazivních přídavných částí. Typickými materiály pro dělení jsou plasty, potraviny, papír apod. [4, 5].

### 3.2.2 Řezání vodou s přídavným abrazivem (AWJM)

Proces dělení materiálu s abrazivním činitelem je odlišný od původní metody řezání WJM. Podstatou metody je přidání abraziva do proudícího vodního paprsku. Průměr abrazivních částic se pohybuje od 1 do 1,5 mm. Hlavním přínosem této metody je zvýšení řezacího výkonu a schopnost vyšší řezací rychlosti. Z konstrukčního hlediska podle [4] rozdělujeme vstup abraziva do vodního paprsku těmito způsoby:

- Abrazivo je dávkováno přímo ze zásobníku do směšovací komory, kde již proudí vodní paprsek vysokou rychlostí. Tato metoda je znázorněna na obr. 3.
- Abrazivo je dávkováno již v nádobě s vysokotlakou vodou a stlačená suspenze je přiváděna do dýzy.

Obrázek 3 Schéma metody AWJM



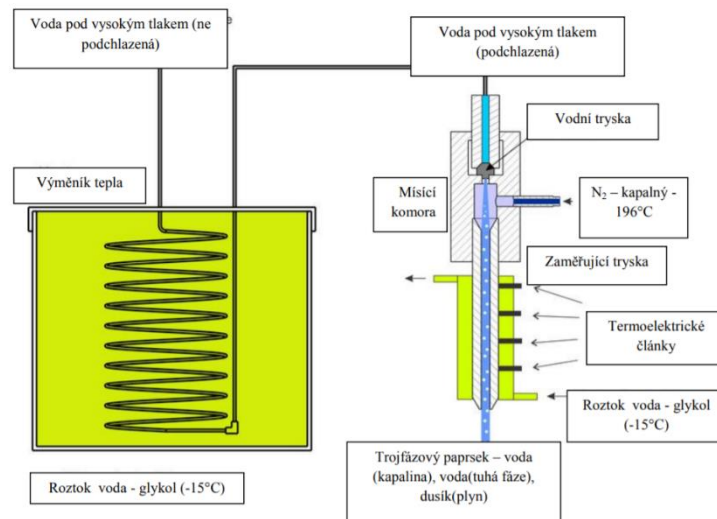
Zdroj: [4]

### 3.2.3 Kryogenní vodní paprsek

Technologie kryogenního paprsku je založena na pracovní kapalině, kterou tvoří voda s krystalky ledu. Díky přidání abraziva ve formě ledových částic je tento způsob na rozdíl od původní metody, účinnější a disponuje vyššími erozivními vlastnostmi. Je tedy schopen řezat do tvrdších materiálů jako je ocel, kámen a keramika.

Druhým způsobem práce s tímto paprskem je využití tekutého dusíku. V technologii je nutné systém rozšířit o ochlazovací nádrže a mnoho dalších komponent, které jsou určeny pro pracovní zatížení v nízkých teplotách pohybujících se okolo  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  za přítomnosti kapalného dusíku. Účinnost řezání je srovnatelná jako při řezání původním vodním paprskem. Schéma kryogenního vodního paprsku je znázorněno na obr. 4. [7, 5]

Obrázek 4 Schéma kryogenního paprsku



Zdroj: [7]

Významnou výhodou je ekonomičnost a ekologičnost celého procesu. Po ukončení řezání je brusný materiál ve formě ledových částic umístěn do zásobníků s vodou, kde taje. Následně lze vodu vyčistit, stlačit a znovu použít pro účely řezání a vytvořit tak uzavřený okruh. Kryogenní vodní paprsek se využívá v potravinářství, chemii a medicíně, a to především díky použití abraziva ve formě ledových částí, které nezprašují a tím nekontaminují okolní prostředí. [7]

### 3.2.4 Kavitační vodní paprsek

Jedná se o technologii řezání vodním paprskem, jehož účel je založený na lokálním destruktivním porušení materiálu díky kavitačním účinkům bublin. Zvýšení erozivního účinku je způsobeno lokálními tlakovými rázy, které zapříčiní kavitační bubliny. Podle [4] se teoreticky může rázový tlak zvyšovat až desetinásobně. Velikost bubliny by neměla převyšovat průměr jednoho milimetru. Pro generování kavitačního paprsku se využívají speciálně upravené vodní trysky. [4, 1]

### 3.2.5 Diskontinuální vodní paprsek

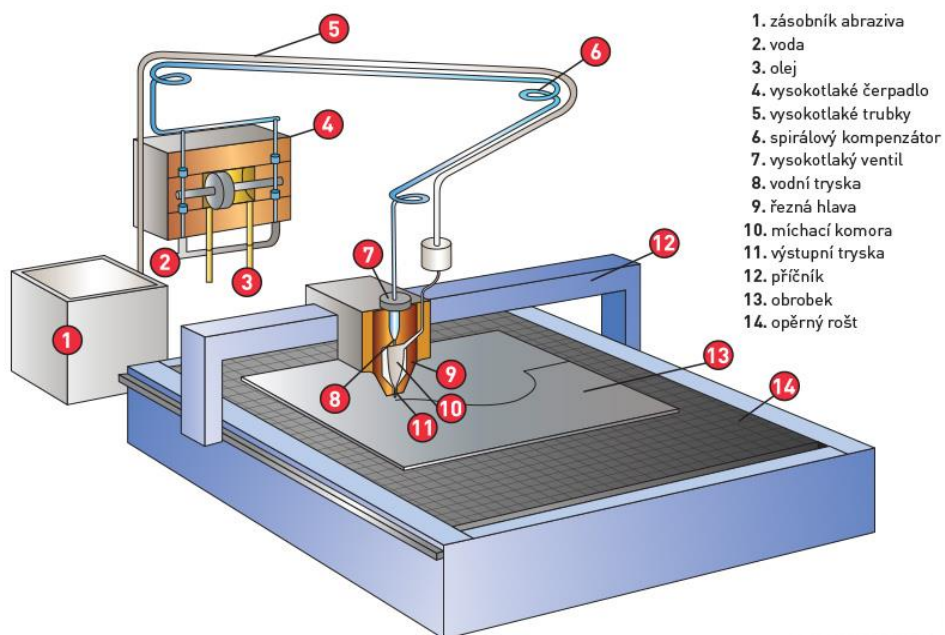
První poznatky o diskontinuálním průtoku kapaliny určené pro dělení materiálu jsou datovány v 70. letech 20. století. Podstatou diskontinuálního řešení je zvýšení výkonu a řezné rychlosti zařízení díky využití proměnného tlaku a pulzace paprsku po dobu pracovní operace. V podstatě se jedná o časově proměnnou pulzaci, která vytváří tlakové rázy, jejichž účinkem je rozšíření mezery řezu. Na základě poznatků [4] bylo zjištěno, že díky opakované změně nárazového tlaku se významně zvyšuje účinnost vůči kontinuálnímu řešení. Diskontinuální paprsky dělíme na: [7, 4]

- **Pulzní nízkofrekvenční** – generování pulzů probíhá pomocí hydraulických generátorů na principu elektro-hydraulického výboje nebo zařízení s volným pístem.
- **Pulzní modulovaný** – průchodem z dýzy zařízení se paprsek chová jako kontinuální do určité vzdálenosti, o které hovoříme jako o vzdálenosti dopadu, kde se začíná rozpadat. Jednotlivé elementy v průřezu paprsku mají různé rychlosti, které se mají tendenci shlukovat. Náraz do obrobku je uskutečněn pomocí impaktních tlaků. Paprsek je vytvořen pomocí modulátorů jako jsou rezonátory, ultrazvukové rezonátory a mechanické modulátory průtoku. Tato metoda je velmi efektivní, protože paprsek vlivem modulace neztrácí svou energii.
- **Pulzní přerušovaný** – po výstupu z trysky se paprsek chová jako kontinuální. Rozdělení na jednotlivé sloupce vody probíhá průchodem přerušovače umístěného za tryskou, který zapříčiní vznik pulzace. Přerušovač je mechanické rotační zařízení obsahující zářezy, které díky svému tvaru a rychlosti otáčení reguluje frekvenci generovaných pulzů. Nevýhodou této metody je poměrně značná ztráta energie paprsku vlivem nárazu do kotouče přerušovače, který paprsek odráží zpět.

### 3.3 Konstrukce zařízení pro řezání vodním paprskem

Metoda řezání vodním paprskem je využitelná v mnoha oborech, které mají různé požadavky na výkon a kvalitu řezu. Z konstrukčního hlediska jsou stroje navrhovány, tak aby byly pro dané aplikace co nejpříjemnější z ekonomického hlediska. Zařízení s touto technologií prošlo značným vývojem již od prvopočátku 50. let 20. století. Hlavním požadavkem vývoje je zvýšení životnosti součástí vzhledem k vysokému tlakovému namáhání. Technologické řízení vodního paprsku je v dnešní době značně automatizováno a ovládáno průmyslovou číslicovou technikou pomocí 3D CAD programů, které slouží k návrhu součástí až po CAM programy, které vytvářejí samotný kód pro běh programu a samotného řezání. Na obr. 5 jsou zobrazeny komponenty tvořící zařízení vodního paprsku. [9, 10]

Obrázek 5 Komponenty zařízení vodního paprsku



Zdroj: [12]

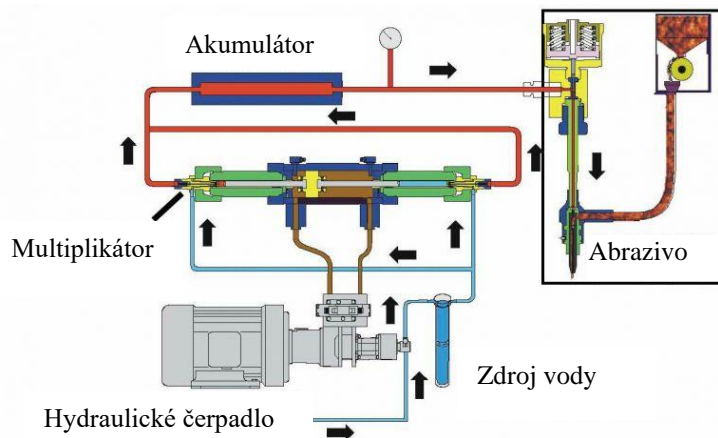
### 3.3.1 Multiplikátorové čerpadlo

Hydraulická jednotka je srdcem zařízení vodního paprsku. Úkolem jednotky je vytvoření požadovaného tlaku a průtoku pomocí systému hydraulických čerpadel. Dnešní hydraulické systémy lze rozdělit do dvou kategorií: [5, 11]

1. Multiplikátorové čerpadlo
2. Přímopoháněné rotační čerpadlo

Multiplikátorové zesilovací čerpadlo je nejrozšířenějším zdrojem tlakové vody v oblasti vodních řezacích strojů. Samotný multiplikátor je součástí celé hydraulické jednotky. Funkce násobení tlaku a průtoku je závislá na poměru ploch pístů v hydraulické a vodní vysokotlaké části čerpadla. Nevýhodou multiplikátoru jako funkčního celku je pulzace, která je tvořena cyklickým pohybem pístu. Tento jev lze eliminovat použitím akumulátoru tlakových rázů jako součást v celkovém hydraulickém systému, který zaručí vyšší homogenitu tlaku. Eliminaci tlakových pulsů je možné zajistit použitím více multiplikátorových čerpadel, které jsou vzájemně sfázovány tak, aby nepůsobily tlakovými účinky proti sobě. Systém hydraulické jednotky s jednotlivými dílčími periferiemi je zobrazen na obr. 6. [11]

Obrázek 6 Schéma systému s multiplikátorovým čerpadlem



Zdroj: [36]

Soustava se skládá z hydraulického nízkotlakého a vysokotlakého vodního vedení. Olejové hydraulické čerpadlo vytváří tlak hydraulického oleje, který pomocí silových účinků působí na píst a vytváří tlak na vysokotlakém okruhu. Generovaný tlak je vytvořený pomocí rozdílných ploch pístů, které lze popsat pomocí Pascalova zákona dle rovnice (1), kdy působení vstupního

tlaku  $p_1$  na plochu pístu  $S_1$  na nízkotlakém okruhu bude rovno výstupnímu tlaku  $p_2$  na ploše  $S_2$  na vysokotlakém okruhu.

Pascalův zákon 
$$p_2 = \frac{S_1}{S_2} \cdot p_1 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Kde:  $p_1$  – vstupní tlak  
 $p_2$  – výstupní tlak  
 $S_1$  – vstupní plocha  
 $S_2$  – výstupní plocha

Přívod zdroje vody do multiplikátorů je zajištěn pomocí dvojice zpětných ventilů, které tvoří pojistnou funkci pro sání nízkotlakého vodního vedení a samotný výtlak vysokotlaké větve. Nízkotlaká část je poháněná hydraulickým olejovým čerpadlem s tlakovým rozsahem od 16 do 35 MPa. Pohonná jednotka je ve většině případů tvořená elektromotorem s příkonem od 10 do 50 kW. Výsledný výstupní tlak vysokotlakého vedení je zdatelně vyšší, tato hodnota se pohybuje od 3 000 do 6 500 bar. Výkonnost čerpadel je posuzována podle průtočného množství tlakové vody v litrech za minutu. Životnost multiplikátorových čerpadel je závislá především na kvalitě a čistotě pracovního média. Typickým zástupcem firmy PTV je vysokotlaké čerpadlo PTV JETS 2,2/60 zobrazené na obr. 7 s příkonem 22 kW a maximálním generovaným tlakem 413 MPa. [30]

Obrázek 7 Čerpadlo PTV JETS 2,2/60



Zdroj: [30]

### 3.3.2 Akumulátor tlaku

Při provozování zařízení s multiplikátorovým čerpadlem, jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, vznikají tlakové rázy z důvodu cyklického pohybu pístu. Tento nepříznivý faktor lze eliminovat pomocí akumulátoru tlaku umístěného za multiplikátorovým čerpadlem. Funkční část akumulátoru je tvořena nádobou s větším průměrem a objemem než vysokotlaké vedení. Přicházející pulzy jsou utlumeny a tím dochází k udržování stabilního tlaku ve vysokotlakém vedení směřujícím do hlavice. [4, 5]

### 3.3.3 Filtrační systém a změkčování vody

Systém pro generování vodního paprsku je mimořádně závislý na kvalitě a čistotě pracovní kapaliny, kterou ve většině případech tvoří voda. Za přítomnosti rozpuštěných minerálů dochází k značnému opotřebení dýzy a tlakového vedení, případně jednotlivých těsnění, což má za následky snížení výkonu a životnosti zařízení. Vzhledem k vysokým tlakům působícím v průběhu činnosti stroje je nutné upravit pracovní kapalinu pomocí: [4, 5]

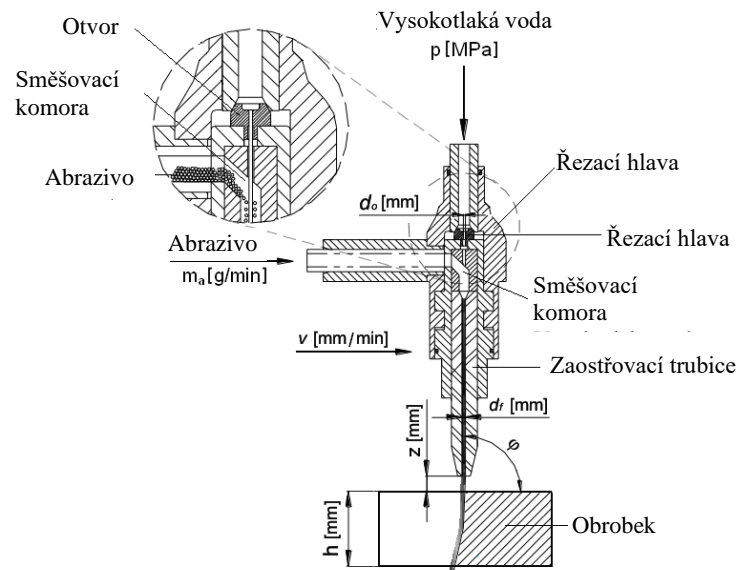
- Filtrace - Používání pevných filtrů patří k mechanickému způsobu odstranění pevných částic. Princip filtru spočívá v četnosti vrstev, které zachytávají jednotlivé částice.
- Změkčování – Upravuje tvrdost vody na požadovanou hodnotu. Princip je založen na výměně iontů, při které jsou těžko rozpustitelné minerály jako např. Mg, Ca nahrazeny ionty Na.
- Deionizace – Proces deionizace využívá výměnu iontů pomocí kationtové a aniontové pryskyřice. Voda cyklicky prochází přes kationtovou pryskyřici, která odstraňuje ionty minerálů jako je hořčík, vápník a nahrazuje je sodíkem. Druhý průchod přes aniontovou pryskyřici zajistí odstranění chloridů a sulfátů a nahradí je hydroxidy.
- Reverzní osmóza – Princip je založen na vytvoření vysokého tlaku vody protékající přes polopropustnou membránu. Díky mimořádné jemnosti membrány, která se pohybuje kolem 0,005  $\mu\text{m}$  jsou odděleny pouze čisté molekuly vody. Účinnost reverzní osmózy se pohybuje kolem 98 %.



### 3.3.4 Řezací ústrojí

Řezací hlava zobrazena na obr. 7 je jedna z nejdůležitějších komponent stroje pro dělení materiálu pomocí vodního paprsku. Paprsek vzniká v samotné řezací hlavě pomocí vysokotlaké kapaliny procházející přes úzký prostor dýzy. Základním členěním můžeme specifikovat dvě kategorie řezacích hlav, a to na základě stupňů volnosti a typu vodního paprsku. [9, 13]

Obrázek 8 Schéma řezací hlavy



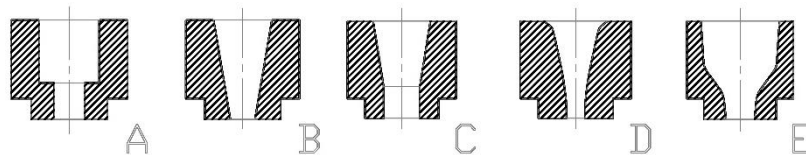
Zdroj: (Radovanović, 2016)

Podle stupňů volnosti dělíme řezací hlavy na pevné a pohyblivé. Pevné řezací hlavy se používají primárně na tříosých CNC řezacích strojích, ovšem bez možnosti eliminace úkosu vytvořeného vodním paprskem při dělení materiálu. V tomto případě je možné redukovat úkosovou hranu změnou rychlosti řezání. Pohyblivé řezací hlavy jsou určeny pro 3D řezání. Pohyblivá řezací 3D hlava je určena pro pohyb ve všech stupních volnosti, a je tak určena pro řezání prostorových tvarů. Z funkčního hlediska je vysokotlaká kapalina přivedena do horní části řezací hlavy, kde prochází přes úzký otvor trysky. Průchod malým otvorem vyvolává enormní zvýšení rychlosti proudu kapaliny, která se pohybuje okolo  $900 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při průchodu směšovací komorou se díky vysoké rychlosti proudění vytváří Venturiho efekt, který způsobí odběr abrazivního materiálu v případě metody AWJ. [1, 4, 9]

### 3.3.5 Dýzy

Pod pojmem dýza si můžeme představit vysokotlakou trysku, která je významnou součástí technologie vysokotlakého vodního řezání. Dýza vytváří a formuluje vodní paprsek do finální podoby, čím významně ovlivňuje kvalitu a produktivitu řezání, ať již v případě řezání čistou vodou nebo abrazivním vodním paprskem. Vnější tvar trysek se odvíjí především od velikosti tlakových účinků a účelu použití. Rozdělujeme dýzy pro použití čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku. Velikost trysky pro použití s abrazivním materiálem je závislá na průtočném množství a typu abrazivního materiálu. Zpravidla je větší než v případě čistého vodního paprsku s hodnotou pohybující se okolo 0,8 až 2,2 mm. Typy vyráběných dýz jsou zobrazeny na obr. 9. [4, 1]

Obrázek 9 Schéma vodních dýz



A – válcová, B – kuželová, C – kombinovaná, D – kónická, E – bikubická

Životnost trysky je ovlivněna především použitým výrobním materiálem a drsností vnitřního povrchu. V případě nízkých tlakových účinků se dýzy vyrábí z tvrdokovu. Pro vysokotlaké řezání jsou dnes již využívány materiály jako safír, rubín či syntetický diamant. Z hlediska životnosti vynikají diamantové dýzy, které jsou mimořádně odolné. V porovnání s ostatními materiály mají až desetinásobnou životnost, ovšem s vyšší pořizovací cenou. Při provozu je životnost dýz významně ovlivněna kvalitou řezacího média. Při používání tvrdé či chemicky nečisté vody se může snížit životnost trysky až pětinašobně. Průměrná životnost dýzy za běžných pracovních podmínek se pohybuje okolo 60 až 80 hodin provozu. Vzhledem k progresivnímu vývoji technologií s využitím vodního paprsku a s důrazem na zvyšování tlakových účinků, je vývoj technologie a tvarů dýz důležitým vývojovým směrem, který může významně ovlivnit provozní náklady. [1, 5]

### 3.3.6 Abrazivo

Výběr abrazivního materiálu je v případě řezání vodním abrazivním paprskem zásadním stanoviskem technologických a ekonomických vlivů. Abrazivum lze definovat jako brusivo, které se přidává do vodního paprsku pro zvýšení efektivity řezného procesu. Základními ukazateli jsou materiálové vlastnosti jako hustota, tvrdost a pevnost. Hustota abrazivního materiálu má zásadní vliv na konzistenci vodního paprsku. V případě stejného hmotnostního dávkování vytváří těžší abrazivní materiály rovnoměrný proud z důvodu průchodnosti vzduchu dávkovací trubicí, která v případě lehčích materiálů zmenšuje průchod vzduchu díky většímu objemu materiálu. Tvrdost abrazivního materiálu má především vliv na životnost dýzy. Při dělení materiálu je důležitý poměr mezi tvrdostí abraziva a děleného materiálu. V případě vyšší tvrdosti abraziva se významně zvyšuje řezná rychlost, ovšem za vyššího opotřebení směšovací komory dýzy. Vzhledem k vyššímu opotřebení se nejčastěji využívá hodnota pohybující se v rozmezí od 0,2 do 0,5 mm. Tabulka č. 1 popisuje nejčastěji používané materiály. Hodnotící parametry se vyjadřují kruhovitostí a kulatostí. Kruhovitost je definována jako největší naměřená hodnota vzdálenosti skutečné kružnice od obalové kružnice. Parametr kulatosti zhodnocuje skutečnou vzdálenost od obalové koule. V zahraniční literatuře je velikost částic stanovena pomocí jednotek MESH. Tato jednotka je odvozena od metody určující velikost částic při použití jemného síta, jehož vzdálenost mezi jednotlivými oky vztaženou na délku jednoho palce definuje již zmíněnou jednotku MESH. [4, 5]

Tabulka 1 Nejpoužívanější abrazivní materiály

Materiál	Velikost částic MESH	Vlastnosti materiálu				
		Kruhovitost	Kulatost	Tvrdost podle Knoop	Relativní tvrdost	hustota $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Granát	16-250	0,48	0,78	1350	1	3,8
Křemičitý písek	16-120	0,57	0,78	700	0,7	2,5
Karbid křemíku	80-200	0,31	0,75	2500	50	3,2
Ocelové piliny	16-100	0,55	0,82	400-800	2	7,5
Měděné piliny	16-100	0,5	0,78	1050	0,4	1,5
Sklo	10-100	1	1	400-600	0,5	2,5

Zdroj: [4]

## 4 Technologie řezání laserem

Význam slova LASER vychází z anglické zkratky Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation neboli „zesilování světla pomocí stimulovanou emisí záření“. Tento název vychází z původního označení MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) značící zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření. První zmínka o laserové technologii na bázi zesilování pomocí mikrovln je datována v roce 1958 díky dvojici vědců Ch. H. Townese a A. L. Schawlowa. O dva roky později byl historicky významným okamžikem návrh první laserové technologie amerického fyzika a inženýra Theodora Maimanna. Tato technologie spočívala na zesilování světla nucenou emisí záření s využitím aktivního prostředí ve formě syntetického krystalu rubínu ve tvaru krychle s hranou jednoho centimetru. Ve stejném roce na tomto stejném projektu intenzivně pracoval Gordon Gould, ten ovšem nestihl dokončit funkční prototyp, který by mu zajistil prvenství. Od vzniku prvního laseru v šedesátých letech dvacátého století se vývoj na poli laserové techniky neustále vyvíjí. [14, 21]

### 4.1 Princip laseru

Hlavním užitkem laserové technologie určené pro řezání je přeměna záření na energii tepelnou směřovanou do úzkého bodu na povrchu děleného materiálu. V místě dopadu paprsku se materiál zahřeje na svou tavnou teplotu, s jejíž pomocí roztavený kov prostupuje materiálem a vytvoří tak řez. Důležitým jevem působícím v aktivní prostředí laseru, který popsal Albert Einstein, je stimulovaná emise záření. Pro objasnění tohoto pojmu je nutné stanovit interakce mezi fotonem a elektronem. Jevy probíhající mezi těmito elementy nazýváme jako interakce prostředí se světlem. Jak již bylo zmíněno z odvozeného názvu slova Laser, je patrné, že stimulovaná emise záření hraje značnou roli. V kvantové soustavě, kterou tvoří molekuly, ionty a elektrony se může atom nacházet v základním nebo excitovaném stavu. Základní stav tvoří atomy s nejnižší energií. Přejít ze základního do excitovaného stavu je zapříčiněn absorpcí energie, která odpovídá rozdílu energetických hladin. Tento proces se též nazývá jako čerpání. Pokud se atom nachází v excitovaném stavu, je kvantová soustava nestabilní a snaží se sestoupit zpět do hladiny v základním stavu. Tento přechod zapříčiní uvolnění energie odpovídající rozdílu mezi hladinami. Tento jev popisuje rovnice (2). [15, 16]

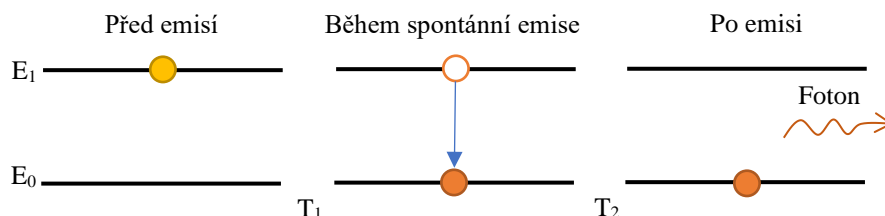
$$E = h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Kde:  $v$  – rychlost světla ve vakuu  
 $h$  – univerzální Plankova konstanta  
 $E_2$  – energie horní hladiny atomu  
 $E_1$  – energie dolní hladiny atomu

### Spontánní emise

Spontánní emise je zářivý kvantový přechod, který vzniká přechodem atomu z vyšší energetické hladiny na nižší energetickou hladinu. Princip spontánní emise je zobrazen na obr. 10. Pokud kvantová soustava absorbuje foton, musí mít stejnou energetickou hodnotu jako rozdíl mezi energetickými hodnotami  $E_0$  a  $E_1$ . V případě odlišné energie kvantová soustava foton nepřijme. Po velmi krátkém časovém intervalu, který není ve všech případech stejný, přechází kvantová soustava zpět do základního stavu. V tomto momentě vyzařuje foton energetickou hodnotou odpovídající hodnotě absorpce. Uvažovaný příklad je zobrazen na obr. 10. Znárodnuje případ se dvěma energetickými hladinami. V tomto případě při dopadu širokospektrálního záření je kvantová soustava schopna absorbovat a emitovat pouze fotony jedné složky budícího světelného záření. [16, 17]

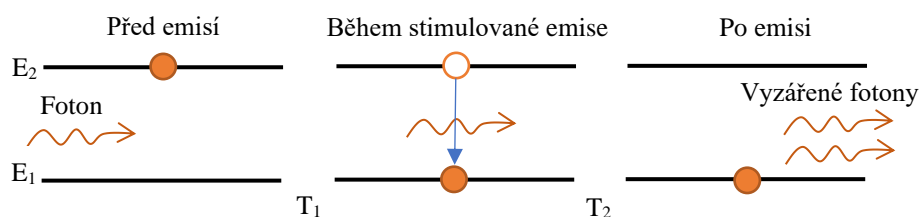
Obrázek 10 Průběh spontánní emise



### Stimulovaná emise

Vznik stimulované emise je podmíněn dopadem (pohlčením) fotonu na atom prvku, ve kterém přinutí elektron se základní energetickou hladinou vystoupit na vyšší energetickou hladinu. Tento energetický stav nevydrží v elektronu dlouhou dobu, řádově okolo  $10^{-8}$  sekundy. V této časové „diferenci“ pohltí elektron stimulující foton, který zapříčiní snížení elektronu na původní základní energetickou úroveň s vyzářeným původního a stimulovaného prvního fotonu. Vyzářené fotony se vyznačují stejným směrem šíření a totožnou vlnovou délkou. Tento princip zapříčiní vznik monochromatického záření (tzn. záření s jasně vymezenou vlnovou délkou). Průběh stimulované emise je znázorněn na obr. 11. [16, 17]

Obrázek 11 Schéma průběhu stimulované emise



Laserové dělení materiálu je v dnešní době velice populární především na poli strojních technologií. Vzhledem k ostatním metodám dělení materiálu vyniká značnou rychlostí, která se významným způsobem promítá do celkových provozních nákladů.

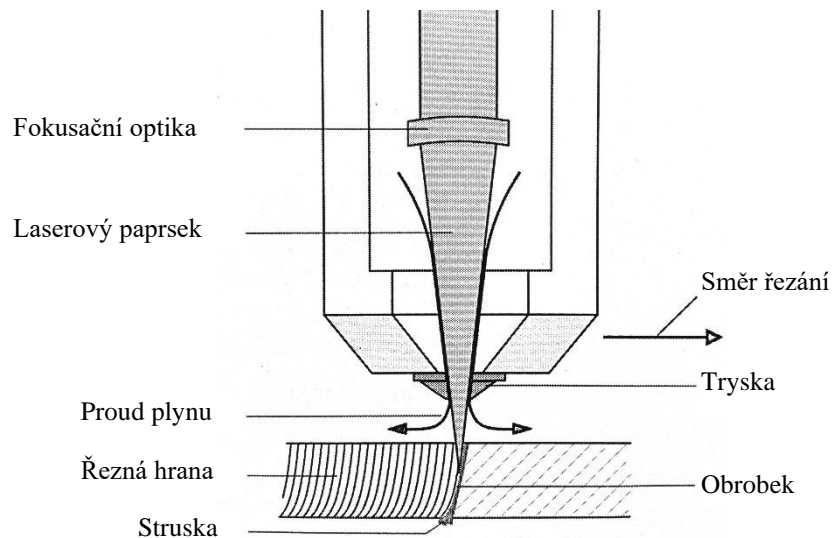
Při řezání kovových materiálů dochází ke třem základním procesům: [17, 15]

- **Sublimační řezání** – metoda sublimace je založena na odpařování materiálu v místě řezu. Během procesu řezání je vyvinuta velmi vysoká intenzita laserového záření, které je vhodně fokusováno pomocí fokusační optiky do místa řezu. Páry vytvořené při dělení materiálu jsou odfukovány technologickými plyny, jejichž směr je rovnoběžný s laserovým paprskem. Funkce proudícího plynu tvoří ochrannou atmosféru, která zabraňuje oxidaci materiálu. Nejčastější plyny jsou argon a dusík. V případě sublimačního řezání je řez kvalitní bez otřepů.
- **Tavné řezání** – v případě tavného řezání kovů je laserový paprsek použit pro roztavení kovu a vytvoření lázně. Při řezání jsou použity technologické plyny jako argon či dusík. Plyn je veden řezací hlavou s výstupem na řezací trysce pod tlakem pohybujícím se od 2 do 20 bar. Hlavním úkolem plynu je vyfukování roztaveného kovu z řezné spáry.
- **Řezání plamenem** – nejčastěji se využívá pro řezání běžných a konstrukčních ocelí. Značnou výhodou této metody je vysoká rychlost řezání. Jako technologický aktivní plyn se používá kyslík pod tlakem okolo 6 bar. Materiál se pomocí laserového paprsku zahřeje na vysokou teplotu, která s kyslíkem vytvoří exotermickou reakci a dojde k posílení účinku řezání. Obecně disponuje tato metoda vyššími řezacími rychlostmi oproti sublimačnímu nebo tavnému řezání zejména u větších tloušťek materiálu.

## 4.2 Schéma a hlavní parametry dělení

Laserovou technologii lze využít jako dělicí prostředek pro širokou škálu materiálů, což je možné především díky vysoké koncentraci energie v laserovém svazku dopadající na materiál. V současné době se jedná o nejpoužívanější technologii používanou pro dělení kovových materiálů. Schéma laserového dělení je zobrazeno na obr. 12.

Obrázek 12 řezání laserem



Zdroj: [18]

Proces laserového řezání může být negativně ovlivněn mnoha parametry, které mají zásadní vliv na kvalitu a efektivitu řezání. V případě dělení kovových materiálů jsou klíčové parametry následující: [20, 18]

- **Poloha ohniska** v procesu dělení materiálu laserovým paprskem má poloha ohniska zásadní vliv na kvalitu řezání. Určuje, v jaké vzdálenosti od povrchu materiálu je umístěn bod laserového paprsku s nejvyšší intenzitou energie vztáženou na průřez. Ve strojírenské praxi jsou moderní stroje vybaveny softwarovým auto-fokusačním systémem, který na základě parametrů předdefinovaného materiálu nastavuje konečnou polohu ohniska. Obecně jej lze definovat na základě metody řezání. V případě tavného řezání je ohnisko nastaveno na hranici rubové strany materiálu. Při sublimačním dělení je umístěno na povrchu materiálu.

- **Výkon laseru** hlavním kritériem nastavení výkonu je tloušťka a druh řezaného materiálu. Další stanovení výkonu řezání u dnešních moderních strojů je svázáno s mnoha faktory ovlivňující řezný proces, jako je například řezná rychlost, poloha ohniska či množství technologického plynu. Obecně platí, že tloušťka řezaného materiálu se zvyšuje s vyšším výkonem laseru a nižší řeznou rychlostí. Nevhodné nastavení výkonu s ohledem na ostatní parametry může vést k výraznému zhoršení kvality řezu a značnému tepelnému ovlivnění hrany řezu.
- **Řezná rychlost** je jako u ostatních parametrů závislá na tloušťce a typu řezaného materiálu. Správné nastavení rychlosti závisí i na ostatních již zmíněných parametrech.
- **Technologický plyn** výběr technologického plynu má významný vliv na kvalitu řezného procesu. V praxi se nejvíce pro řezání nerezových a vysokolegovaných ocelí využívá dusík, který je vháněn do vytvořené lázně pod vysokým tlakem 10 až 20 bar. Působením síly napomáhá vyfukovat roztavený materiál z místa řezu. Druhým nejpoužívanějším plynem je kyslík. Použití kyslíku způsobuje exotermickou reakci, která zvyšuje energii řezání. Obvykle je vháněn do roztavené lázně pod pracovním tlakem 0,5 až 6 bar.
- **Velikost a geometrie řezací trysky** – Vhodná volba trysky závisí především na děleném materiálu a jeho tloušťce. Velikost průměru trysky se odvíjí od použitého technologického plynu. V případě kyslíku se průměr pohybuje okolo 1,2 mm. Pokud je použit dusík, využívá se průměrů okolo 2,3 mm. Pro docílení kvalitního řezu je nutné zajistit souosost otvoru trysky a laserového paprsku. Kvalita řezu je též ovlivněna vzájemnou polohou trysky a materiálu, a to díky aerodynamickému působení technologického plynu.



### 4.3 Systémy a metody řezání

Mezi nejvýznamnější trendy dnešní doby na poli laserového řezání materiálu patří bezesporu produktivita procesu řezání. Z těchto faktů vznikají doplňkové technologie, s jejíž pomocí lze provozovat zařízení efektivněji. Metody dělíme na typy: [22, 23, 18]

**Plottrové 2D řezání** – v průmyslu se systém využívá především na dělení plochých materiálů jako jsou tabule plechu. Stroje jsou konstrukčně dimenzovány přímo pro velikost daného formátu. Řezací element představuje laserová hlavice, která se pohybuje nad materiálem po lineárním vedení. Stroje této kategorie disponují plnohodnotnou třetí osou z důvodu polohování řezací hlavice při změně tloušťky materiálu nebo deformovaného materiálu. V některých publikacích se označuje jako 2,5 D řezání.

**Profilové řezání** – vlivem tlaku na hospodárnost řezání hutního profilovaného materiálu konvenčními metodami bylo adaptováno laserové řezání, které významným způsobem snížilo náklady. Pro dělení a vyřezávání profilových polotovarů se využívají stroje řízené až pěti osami. Řezná hlavice je v drtivé většině případů stacionární a pohybuje se materiál. Pomocí této metody lze vyřezávat tvary do rotačních součástí či dělit profily na daný rozměr.

**Vzdálené řezání** – vlivem vývoje optických technologií a vysokých požadavků na produktivitu zařízení se pro zrychlení procesů řezání využívá technologie vzdáleného řezání (remote cutting). Systém je založen na pevné stacionární dvouosé skenovací hlavici, která se nachází nad obrobkem ve vzdálenosti od 0,5 do 2 m. Optimální velikost řezného bodu zajišťuje dynamický expandér umístěný před skenovací hlavici. Při řezném procesu optika promítá fokusovaný laserový paprsek do místa řezu. Metoda dělení je v tomto případě sublimační. Systém je využíván především pro řezání tenkých materiálů a je oblíbený v automobilovém průmyslu. Pomocí vzdáleného řezání je možné docílit mimořádně vysokých rychlostí řezání, které se mohou pohybovat okolo  $100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ .

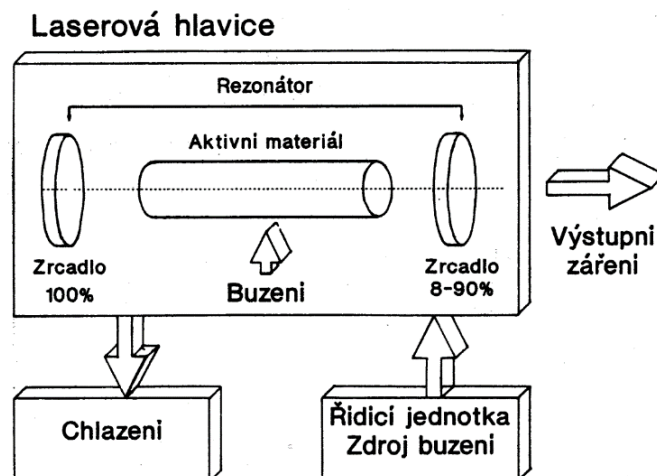
**3D řezání** – technologie je nejčastěji využita za pomoci vláknového laseru, který je umístěn na rameno robota. V případě vláknového laseru je laserový paprsek veden optickým vláknem do řezací hlavice, což je značnou výhodou implementace laseru do robota. Pro využití  $\text{CO}_2$  laserů, jejichž paprsek nelze vést pomocí optického vlákna, je využito difuzně chlazeného laseru umístěného v rameni robota.

## 4.4 Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím pevnolátkových laserů tvoří dielektrikum jakožto pevnou opticky propustnou látku v podobě krystalů, oxidů či skel. Základním materiálem je matrice, která určuje většinu technických vlastností daného krystalu. Na matici jsou kladeny vysoké požadavky na chemickou stálost, čistotu a vyrobiteľnost. Schéma pevnolátkového laseru je zobrazeno na obr. 13. Hlavní materiály používané při výrobě matrice dělíme na: [19]

- Krystalické materiály – oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, tungstáty.
- Skleněné materiály – matrice vyrobené ze skleněných materiálů vynikají díky snadnější výrobě svou homogenitou. Méně náročné v porovnání s krystalickými materiály je i opracovávání skla pro dosažení lepší optické kvality povrchu. Nevýhodou těchto matic je menší tepelná vodivost a tvrdost.
- Keramika – tyto materiály vynikají především nízkou cenou a vyšší tepelnou vodivostí v porovnání se skleněnými maticemi.

Obrázek 13 Schéma pevnolátkového laseru



Zdroj:[19]

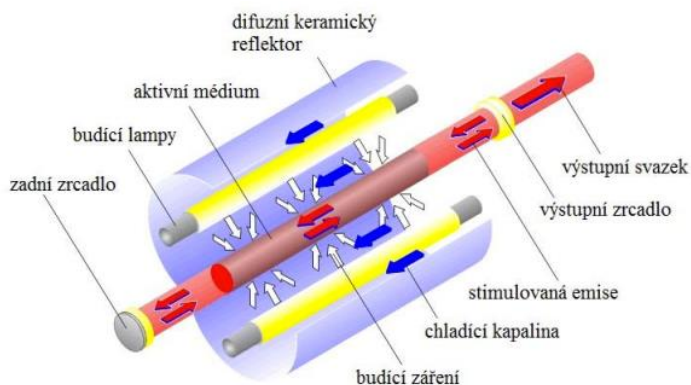
#### 4.4.1 Rubínový laser

Rubínový laser je jeden z typů pevnolátkových laserů, jehož aktivní prostředí tvoří monokrystal rubínu  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , v němž jsou rovnoměrně rozptýleny trojmocné ionty chromu  $\text{Cr}^{3+}$ . Tyč z aktivního materiálu je ozařovaná ze všech stran pomocí xenonové výbojky. Laser generuje světlo tmavočervené barvy o vlnové délce  $0,6943 \mu\text{m}$ . Značnou výhodou těchto zařízení je tepelná vodivost a optická zpracovatelnost. Z historického hlediska jde o první laser, který uvedl do provozu a zkonstruoval Theodor Maimann v roce 1960. [1, 19]

#### 4.4.2 Nd:YAG laser

Aktivní prostředí Nd:YAG laseru tvoří izotropní krystal yttrium aluminium granát, který obsahuje okolo 1% neodymu. Schéma laseru je znázorněno na obr. 14. V dnešní době se jedná o nejpoužívanější pevnolátkový laser s vlnovou délkou  $1,06 \mu\text{m}$ . Systém čerpání (buzení) je realizován dvěma způsoby. První metodou je systém LPSS – (lamp pumped solid state), který je tvořen výbojkami na bázi kryptonu. Tyto lasery jsou používány především v pulsním režimu pro laserové svařování a vrtání. Výkonově tento typ laseru pracuje v rozmezí 100 až 4 000 W. Značnou výhodou je vysoká energie pulsů, která je technologicky důležitá pro výrobní aplikace. Budící zařízení ve formě výbojky je uloženo v dutině rezonátoru, kde mohou být umístěny okolo aktivního prostředí, vyzařují však velké množství tepelné energie. Z tohoto důvodu se zvyšují nároky na chlazení pomocí demineralizované vody. Značnou nevýhodou jsou vysoké provozní náklady a nízká účinnost, která se pohybuje okolo 5–10 %. V druhém případě je aktivní prostředí buzené laserovými diodami s označením DPSS – (diode pumped solid state). [14, 21]

Obrázek 14 Schéma Nd:YAG laseru



Zdroj: [17]

V tomto systému rozlišujeme dle uspořádání rezonátoru dva druhy buzení (boční a zadní). V případě zadního buzení je vedeno záření z laserových diod do YAG krystalu pomocí optických vláken. Bočním buzením působíme na krystal rovnoběžně s jeho řezem. V porovnání podle Kořána [17] zadním buzením je dosaženo lepší kvality svazku, ale nižších výkonů. V případě bočního působení lze dosáhnout vyšších výkonů s nižší kvalitou svazku. Diodově buzené YAG lasery se provozují primárně v pulsním režimu, kde se jejich výkon pohybuje okolo 100 W. Jsou vhodné především pro aplikace gravírování kovů a plastů. [17, 19]

#### **4.4.3 Vláknové lasery**

Tento typ laserového paprsku je označován jako Fiber laser. V dnešní době se jedná o nejmodernější typ pevnolátkové laserové technologie. Aktivní prostředí tvoří optické vlákno dopované prvky vzácných zemin ze skupiny lanthanoidů, svojí funkcí odpovídají krystalům používajících se u pevnolátkových laserů. Optická vlákna určená pro vytvoření laserového paprsku jsou konstrukčně složena ze dvou hlavních optických vláken, která jsou soustředně uložena vůči generovanému paprsku. Buzení systému je generováno pomocí laserových diod, jejichž paprsek je veden vnějším obalem vlákna do středního aktivního vlákna dopovaného vzácnými prvky. Pro dosažení paprsku s vysokou energetickou hodnotou je nutné sjednotit vytvořené záření pomocí optického zesilovače. Emise je zajištěna pomocí Braggovy mřížky (strukturovaná mříž vytvořená pomocí UV záření v aktivním vlákně optického vlákna, jejíž podstata spočívá ve filtrování vlnové délky a světelného spektra). Na rozdíl od zrcadel používaných v případě jiných pevnolátkových laserů nedochází k značným ztrátám způsobeným přeměnou odrazu na tepelnou energii. Výstupem z vláknového laseru je monochromatický stabilní paprsek o vysokém výkonu. Podle Leonarda [26] se účinnost paprsku pohybuje okolo 25 %, v případě převodu elektrické energie na laser okolo 50 %. Celkový systém je vysoce spolehlivý a odolný vůči poškození. Životnost laseru se odvíjí od použití velkoplošných diod a řádově se pohybuje okolo 150 000 hodin. [26]

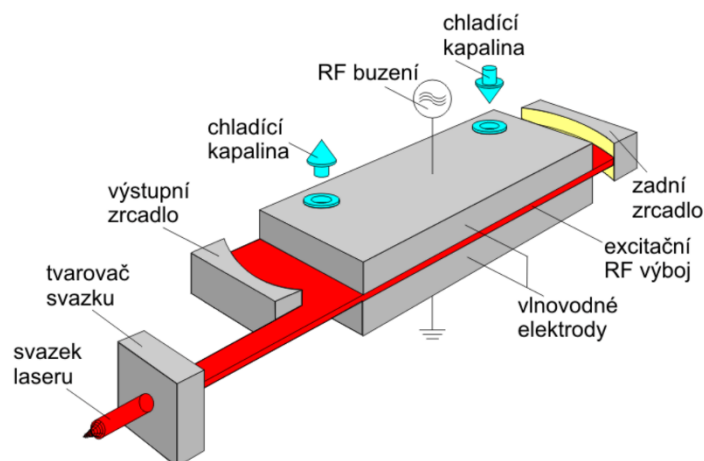
## 4.5 Plynové lasery

Plynové lasery jsou zařízení, jejichž aktivní prostředí je vytvořeno molekulami nebo ionty plynu či směsí plynů umístěných v kruhové zavřené trubici. Pracovní trubici tvoří speciální skla, délka trubice se pohybuje od několika milimetrů až do metru. Plynové lasery excelují výbornými parametry díky homogennímu prostředí plynů, což jim umožňuje využívat velké objemy aktivních prostředí. Z hlediska výkonové charakteristiky jsou schopné generovat výkon od miliwattů po desítky kilowatt. Jsou schopny generovat záření ve vysokém rozsahu rentgenových i infračervených oblastí. Excitace je zajištěna pomocí elektrického výboje. Podle Sadílka [27] je nejrozšířenějším plynovým laserem v průmyslu infračervený CO<sub>2</sub> laser s podélným prouděním plynu pro řezání a svařování kovů. [19, 27]

### 4.5.1 CO<sub>2</sub> laser

Jak již bylo zmíněno, CO<sub>2</sub> laser je jeden z nejstarších laserů používaných v průmyslových aplikacích. Díky své specifické vyzařované vlnové délce 10,6 μm se využívá na dělení organických materiálů, jako je papír či kůže. Aktivní prostředí je zajištěno pomocí směsi plynů obsahujících CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He (hélium). Prostředí je buzeno radiofrekvenčním nebo stejnosměrným výbojovým účinkem. Schéma CO<sub>2</sub> laseru je na obr. 15. [17]

Obrázek 15 Schéma CO<sub>2</sub> laseru



Zdroj: [17]

#### 4.5.2 Helium-neonový laser

Helium-neonový laser je jeden z typů plynových laserů. Ruano [24] uvádí, že aktivní prostředí je vytvořeno za pomoci směsi He a Ne plynů v koncentraci od 5:1 do 20:1 pracujících při tlaku 1 300 Pa. Z konstrukčního hlediska se laser skládá ze tří hlavních komponent: zdroj světla, trubice a rezonátor vytvořený pomocí dvou zrcadel rovnoběžně orientovaných. Rozlišujeme dvojí umístění optických rezonátorů. Vnitřní rezonátor je vytvořený pomocí zrcadel umístěných uvnitř výbojové trubice. Nevýhodou tohoto řešení je postupná degradace zrcadel v průběhu výboje. V druhém případě vnějšího rezonátoru jsou zrcadla umístěna mimo výbojovou trubici. Díky tomuto uložení nastávají vnitro-rezonátorové ztráty. [24, 19]

#### 4.5.3 Argonový laser

Funkce laseru je založena na aktivním prostředí tvořícím ionty Ar. Buzení probíhá za pomoci silnoprůdého elektrického výboje na principu nepružných srážek elektronů s ionty Ar. Vznik stimulované emise probíhá buzením stupňovitě, v první fázi nejprve elektrony ionizují atomy a ionty, poté při dalších srážkách znovu ionizují a excitují. Výstupní svazek záření argonového laseru se pohybuje o vlnové délce od 0,457 do 0,514  $\mu\text{m}$ . [19]

#### 4.5.4 Excimerový laser

Aktivní prostředí excimerových laserů tvoří interakce halogenů K, F s atomy netečných plynů, např. Ne. Při působení energetického buzení pomocí elektronového svazku nebo radiofrekvenčního pulsu tvoří atomy halogenových prvků s ostatními prvky nové molekuly tzv. excimery (molekula vytvořená stejnými atomy s jedním atomem v excitovaném stavu). Po stimulované reakci se opět molekula dostává do základního stavu, kde se rozpadá na volné atomy, což má za následek vyprazdňování základní hladiny laserového přechodu a vysokou účinnost. [19, 28]

## **5 Výhody a nevýhody využitých technologií**

### **Technologie vodního paprsku**

#### Výhody

- Vysoká kvalita řezu zejména u nízkých rychlostí
- Vhodnost do bezprašných prostředí
- Řezání širokého spektra materiálů
- Řezání tlouštěk až 250 mm
- Řezná hrana bez tepelného ovlivnění
- Nižší pořizovací cena vůči laserové technologii

#### Nevýhody

- Úprava řezacího média
- Nízká rychlost řezání
- Velká šířka spáry

### **Technologie laserového paprsku**

#### Výhody

- Vysoká kvalita řezu
- Vysoká rychlost řezání
- Možnost gravírování
- Možnost využití více řezacích hlav
- Auto-fokusační systémy

#### Nevýhody

- Vysoká pořizovací cena
- Teplem ovlivněné hrany řezu
- Vyšší režijní náklady
- Prašné prostředí, nutnost odsávání

## 6 Experimentální zhodnocení – Praktická část

V teoretické části byly popsány jednotlivé metody dělení kovových materiálů se zaměřením na technologii vodního paprsku a laseru. V praktické části je výzkum zaměřen na stanovení optimálních parametrů řezání materiálu Hardox 450. Dělení materiálu probíhalo v tloušťkách 3, 6, 10, 15 mm u každé metody. V případě dělení materiálu vodním paprskem jsou nejvýznamnější parametry řezná rychlost a množství dávkovaného abraziva, uvedeno v tab. 2, které mají zásadní vliv na kvalitu a jakost řezu. Při experimentu bylo nastaveno u všech experimentálních vzorků dávkování abraziva na konstantní hodnotu  $196,4 \pm 1,6$  g/min. Samotný proces dělení materiálu a stanovení rychlostí posuvu byl realizován vedoucím práce.

Tabulka 2 Řezné rychlosti vodního paprsku

Vodní paprsek [mm·min <sup>-1</sup> ]	Řez 1	Řez 2	Řez 3	Řez 4	Řez 5	Řez 6	Řez 7	Řez 8	Řez 9	Řez 10	Řez 11	Řez 12	Řez 13
TL. 3	50	90	130	170	210	250	290	330	370	410	450	490	530
TL. 6	10	35	60	85	110	135	160	185	210	235	260	285	
TL. 10	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160		
TL. 15	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110		
Abrazivu: Granát MESH-80 - dávkování $196,4 \pm 1,6$ g/min													

Při řezání laserovým paprskem byly provozní hodnoty stanoveny podle technologických postupů, které jsou součástí databáze stroje. Systém na základě tloušťky a typu materiálu stanoví optimální řezné podmínky ovlivňující kvalitu a jakost řezu pomocí nastavení rychlosti posuvu, výkonu a přípusti technologického plynu. Z hlediska zajištění homogenních podmínek pro všechny vzorky byl výkon laseru manuálně nastaven na 4000 W a tlak technologického plynu na 6 bar. Pro účely experimentu stanovení závislosti šířky spáry na rychlosti posuvu byly hodnoty rychlosti manuálně změněny procentuálním rozsahem vycházejícím z hodnot databáze. Nominální hodnota rychlosti vycházející z databáze v případě experimentálního vzorku s tloušťkou 3 mm byla stanovena na  $3500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tloušťka 6 mm disponovala posuvovou rychlostí  $2400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . V případě tloušťky 10 mm byla výchozí hodnota rychlosti  $1600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Pro poslední experimentální vzorek s tloušťkou 15 mm byla zvolena nominální hodnota  $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . Rozsah rychlostí u všech experimentálních vzorků byl stanoven procentuálním poměrem od 20 do 110 % nominální hodnoty. Výsledné řezné rychlosti jsou uvedeny v tab. 3.



Tabulka 3 Řezné rychlosti laserového paprsku

Laserový paprsek	Kyslík	Řez 1	Řez 2	Řez 3	Řez 4	Řez 5	Řez 6	Řez 7	Řez 8	Řez 9	Řez 10
TL. 3	6 bar	700	1050	1400	1750	2100	2450	2800	3150	3500	3850
TL. 6		480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400	2640
TL. 10		320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600	1760
TL. 15		180	270	360	450	540	630	720	810	900	990

## 6.1 Dělený materiál

Jako experimentální materiál byla zvolena ořezuvzdorná ocel s obchodním označením HARDOX 450. Tento materiál je určen pro speciální aplikace namáhaných konstrukcí a komponent. Materiál je vyráběn v tloušťkách dle normy EN 10 029, třídy A. Ocel je bez problémů svařitelná a lze ji tvářet za studena. Za tepelného zpracování nad 350 °C se popouští a ztrácí své pevnostní vlastnosti. Z tahové zkoušky je určena mez kluzu  $R_{eh}$  1250 MPa a mez pevnosti  $R_m$  1400 MPa. Chemické složení materiálu zobrazené v tab. 4 je garantováno dodavatelem SSAB. Složení materiálu bylo ověřeno pomocí spektrometru Delta dynamic XRF. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka 4 Složení Hardox 450

Označení	Procentuální zastoupení prvků								
	C % max	Si % max	Mn % max	P % max	S % max	Cr % max	Ni % max	Mo % max	B % max
Hardox 450									
SSAB	0,26	0,70	1,60	0,03	0,01	1,40	1,50	0,60	0,01
Tloušťka 3	0,15	0,23	1,33	0,02	0,01	0,26	0,08	0,02	-
Tloušťka 6	0,18	0,41	1,22	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	-
Tloušťka 10	0,14	0,53	1,19	0,03	0,01	0,04	0,06	0,04	-
Tloušťka 15	0,24	0,62	0,70	0,02	0,01	0,78	0,05	0,02	-

## 6.2 Technologie použité při experimentu

V případě vodního paprsku byl pro experimentální dělení materiálu použit stroj s označením AW CT 0806 TKX (obr. 16) vyrobený společností AWAC. Zařízení disponuje generátorem tlaku ve formě multiplikátorového čerpadla, které vyvine regulovatelný tlak od 500 – do 3 800 barů. Mechanické polohování jednotlivých os je zajištěno pomocí lineárního prizmatického vedení a kuličkových šroubů se servomotory.

Obrázek 16 Vodní paprsek stroj AWCT 0806 TKX



Zdroj: [20]

V tabulce č. 5 je uvedena základní specifikace technologie vodního paprsku použité při realizaci experimentu.

Tabulka 5 Specifikace CNC řezacího stroje s technologií vodního paprsku

AWAC AW-CT 0806 TKX specifikace		
Řezná rychlost	Přesnost polohování	Příkon
12000 mm·min <sup>-1</sup>	0,05 mm	3,5 kW
Vysokotlaké čerpadlo		
Provozní tlak	Maximální tlak	Příkon čerpadla
500-3800 bar	4140 bar	22 kW
Rozměry		
Délka	Šířka	Výška
935 mm	1392 mm	800 mm

Zdroj: AWAC, Vedoucí diplomové práce

Druhou metodou experimentálního dělení bylo použití laserové CO<sub>2</sub> technologie od společnosti Trumpf. Stroj s označením TruLaser 3030 je zobrazen na obr. 17. Zařízení disponuje laserovým plynným systémem na bázi CO<sub>2</sub> s výkonem 4 kW. Pracovní plocha je určena pro střední formáty plechu o rozměru 1,5 x 3 m. Polohování os je řešeno přes kuličkové šrouby a servomotory umístěné v rámu stroje. Zařízení je určeno pro dělení konstrukční oceli do tloušťky 20 mm.

Obrázek 17 Laserové centrum Trumpf Tru Laser 3030



V tabulce č. 6 jsou uvedené základní parametry stroje použitého pro dělení laserovým paprskem.

Tabulka 6 Specifikace Trumpf TruLaser 3030

Trumpf TruLaser 3030 4KW specifikace		
Rozměry		
Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]
9300	4700	2200
Pracovní rozsahu		
Osa X [mm]	Osa Y [mm]	Max. hmotnost obrobku [kg]
3000	1500	900
Specifikace řezání		
Konstrukční ocel [mm]	Ušlechtilá ocel [mm]	Hliníkový plech [mm]
20	15	10

Zdroj: (Trumpf, 2016)

### 6.3 Vizuální vyhodnocení

V dnešní strojírenské praxi jsou na metody laserového a vodního paprsku kladena vysoká kritéria na kvalitu a strukturu řezných hran po finálním dokončení řezných operací. Hlavním důvodem je zvyšující se trend snižování nákladů z hlediska dalšího zpracování. Kvalita řezu je ovlivněna mnoha parametry, které souvisí jak s fyzikální podstatou dělicí technologie, tak s nastavením optimálních hodnot. Vzhledem k povaze experimentu není možné stanovit výsledky v plném rozsahu všech experimentálních vzorků z důvodu struktury řezů a vzniku otřepů. V tomto případě byla zvolena jednotlivá kritéria, která budou zhodnocovat řez po vizuální a technologické stránce. Pro posouzení vizuální kvality není stanovena norma s jasnými kritérii. Ve strojírenské praxi jsou hodnoty vizuální kontroly stanoveny vnitropodnikovými normami. V případě experimentální části práce byla hodnocena následující vizuální kritéria:

- Rozsah tepelně ovlivněné oblasti
- Povrch řezu
- Šířka řezné spáry
- Kolmost řezné hrany
- Nepravidelnost řezu

Stanovení výsledků vizuální kvality je shrnuto dle zvoleného rozsahu Q1 až Q5 podle následujících kritérii:

- **Výborný řez Q5** – Okraje řezné hrany jsou čisté a ostré. Hrana řezu nevykazuje výstupky a okuje. Řez má minimální tepelné ovlivnění. Šířka řezné spáry je konstantní.
- **Velmi dobrý řez Q4** – Okraje řezné hrany jsou čisté a ostré. Hrana řezu vykazuje minimální výstupky a okuje. Řez má minimální tepelné ovlivnění s konstantní šířkou řezné spáry.
- **Dobrý řez Q3** – Okraje řezu vykazují přechodový rádius s proměnlivou hodnotou. Hrana vykazuje malé výstupky a okuje. Rozsah tepelného ovlivnění řezu je proměnlivý a řez nemá konstantní šířku.
- **Uspokojivý řez Q2** – Okraje řezu vykazují velký rádius s proměnlivou hodnotou. Hrana řezné spáry má výstupky a obsahuje značné nerovnosti. Tepelné ovlivnění je značné a nerovnoměrné.
- **Nevyhovující řez Q1** – Materiál nebyl oddělen.

### 6.3.1 Metoda vodní paprsek

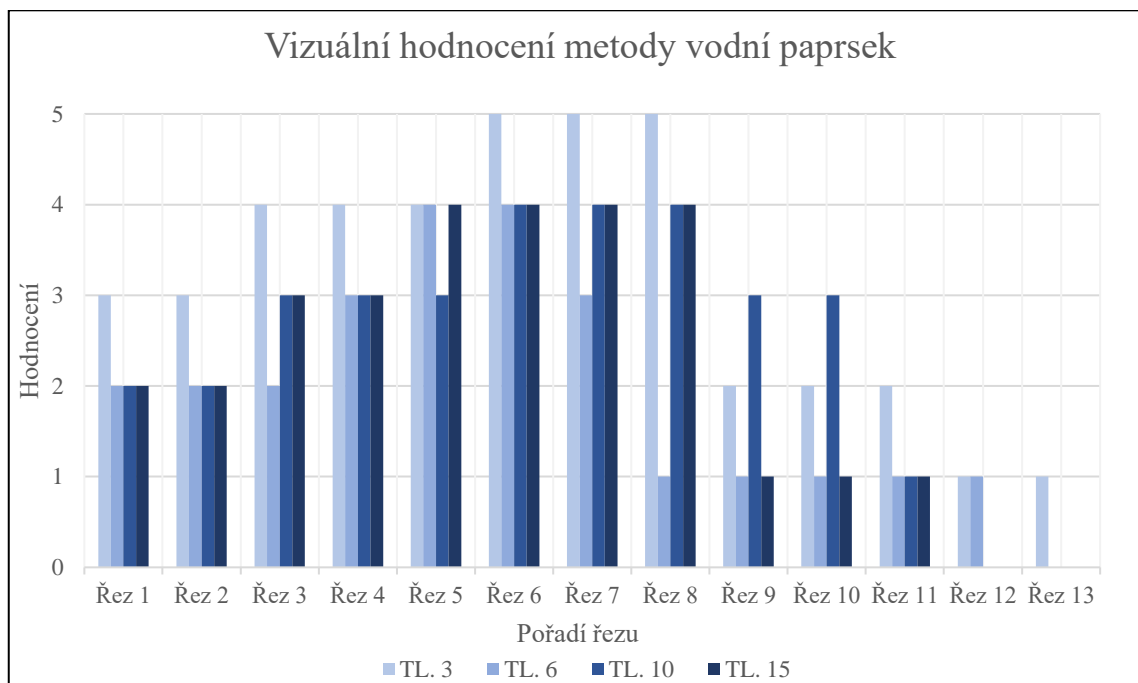
Vizuální vyhodnocení řezů u jednotlivých tloušťek v případě technologie vodního paprsku je zobrazeno v grafu č. 1. U vzorku s tloušťkou 3 mm byly vyhodnoceny nejlepší výsledky v řezech 6, 7, 8 při rychlostech řezání 250, 290, 330 mm·min<sup>-1</sup>. Ostatní řezy byly oddělené v celé délce ovšem s nerovnoměrným profilem řezu.

V případě vzorku s tloušťkou 6 mm byly vyhodnoceny nejlepší řezy č. 5, 6 s rychlostí řezání 110 a 135 mm·min<sup>-1</sup> s hodnocením velmi dobře. Oddělení materiálu neproběhlo v řezech 9 a 10. V porovnání s tloušťkou 3 mm se nejlepší řezy pohybují při podobné rychlosti. Průběh ostatních oddělených řezů disponoval velkou šířkou spáry a nerovnoměrně kolmou hranou.

U vzorku s tloušťkou 10 mm byly vyhodnoceny jako nejlepší řezy č. 6, 7, 8 s rychlostí řezání 85, 100, 115 mm·min<sup>-1</sup> s hodnocením velmi dobře. V průběhu jednotlivých řezů této tloušťky lze zpozorovat vysokou vizuální nerovnoměrnost hrany řezu u malých rychlostí řezání. U této tloušťky byl oddělen materiál ve všech řezech.

U vzorku s tloušťkou 15 mm byly stanoveny nejlepší řezy č. 5, 6, 7, 8 při rychlostech řezání 50, 60, 70, 80 mm·min<sup>-1</sup> s hodnocením velmi dobře. V ostatních případech byl znatelný úkos řezu či velký rádius na hraně po vstupu paprsku nebo neoddělení materiálu.

Graf 1 Vizuální zhodnocení řezů vodního paprsku



### 6.3.2 Metoda laserový paprsek

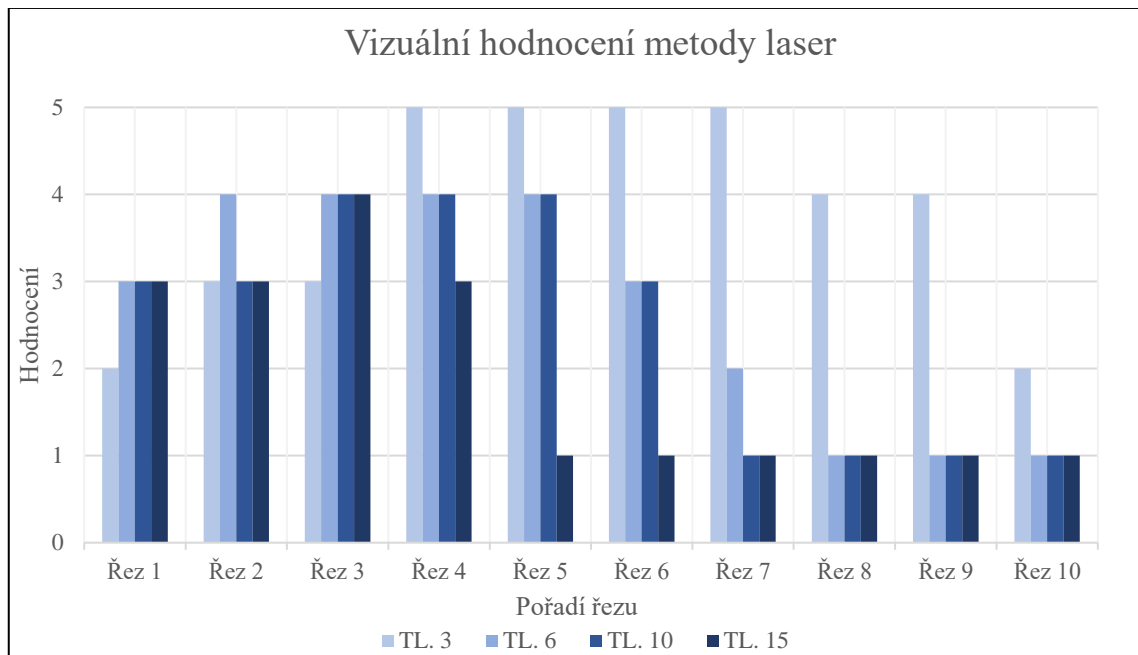
V druhém případě byly vizuálně vyhodnoceny vzorky dělené pomocí laserového paprsku. Výsledky jsou uvedeny v grafu č. 2. U tloušťky 3 mm byly vyhodnoceny jako nejlepší řezy s hodnocením velmi dobře č. 4, 5, 6, 7 a rychlostí řezání 1750, 2100, 2450, 2800 mm·min<sup>-1</sup>. Řezy jsou u této metody velmi úzké a hrany ostré s minimálním tepelným ovlivněním. U řezů č. 1, 2, 3 a 8, 9, 10 je hrana řezu nerovnoměrná se znatelnými otřepy.

U řezů tloušťky 6 mm byly vizuálně vyhodnoceny jako nejlepší řezy s hodnocením velmi dobře č. 2, 3, 4, 5 a rychlostí řezání 720, 960, 1200, 1440 mm·min<sup>-1</sup>. V tomto případě měly řezy velmi ostré hrany bez znatelného tepelného ovlivnění a s úzkou spárou. Řezy č. 8, 9, 10 nebyly odděleny.

U řezů tloušťky 10 mm jsou nejlepšími řezy č. 3, 4, 5 s hodnocením velmi dobře. Rychlost řezání byla v případě těchto řezů 640, 800, 960 mm·min<sup>-1</sup>. Řezy č. 7, 8, 9, 10 nebyly odděleny a v jejich případě lze pozorovat značné množství nataveného materiálu.

U řezů tloušťky 15 mm vyniká především řez č. 3 s rychlostí řezání 370 mm·min<sup>-1</sup>, který disponuje úzkou mezerou a nejnižším tepelným ovlivněním. Tento řez je ohodnocen jako velmi dobrý. V ostatních případech je znatelné vysoké tepelné ovlivnění a neoddělený prostor řezu vyplněný nataveným materiálem.

Graf 2 Vizuální zhodnocení řezů laseru



## 6.4 Měření šířky řezné spáry

V této kapitole jsou graficky prezentovány výsledky z měření závislosti šířky řezné spáry na rychlosti posuvu u experimentálního materiálu Hardox 450. Vzhledem k vizuální přehlednosti v grafu jsou porovnávány jednotlivé vzorky odděleně.

### 6.4.1 Měřicí laboratorní zařízení

V prvním kroku experimentálního měření se posuzuje závislost šířky řezné spáry na rychlosti posuvu. Pro vyhodnocení experimentu byl použit stereoskopický mikroskop SPZ 1000 ZOOM obr. 19. Tento druh mikroskopu disponuje možností připojení digitální kamery CMOS, díky které je možné měření digitalizovat a posuzovat výsledky na ploše monitoru. Mikroskop je vybaven zvětšující optikou pro 3,5-násobné zvětšení.

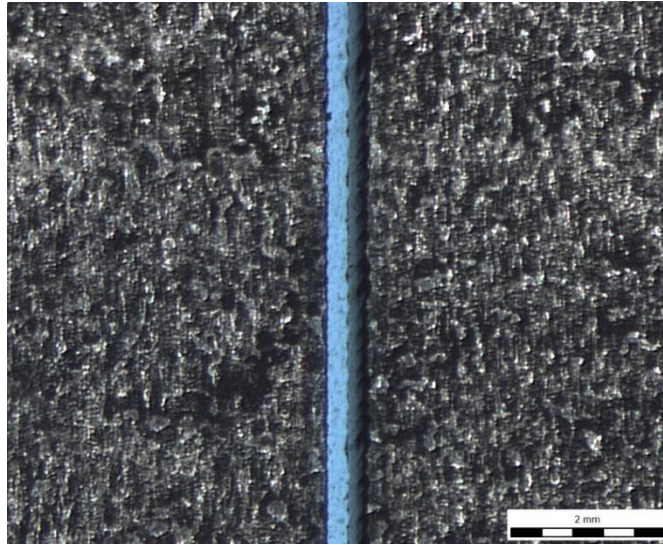
Pro ovládání a vyhodnocení nasnímaného obrazu byl využit softwarový balík Quick Photo Industrial, verze 2.3. Program je spojen s kamerovým systémem pomocí kabelového vedení USB, který zajišťuje živý přenos obrazu do počítače. Na základě zvolené optiky je nutné mikroskop zkalibrovat pomocí měření etalonového vzorku. Následně lze zvolit aktuální měřítko snímání. Průběh měření na snímku probíhá pomocí programových měřících nástrojů, se kterými je možné měřit vzdálenosti, velikosti úhlů či celé obvody.

Obrázek 18 Mikroskop SPZ 1000 ZOOM



Na obr. 20 je zobrazena detailní fotografie experimentálního vzorku tloušťky 3 mm s použitím zobrazovacího mikroskopu. Pro každý řez byly vyhotoveny čtyři detailní snímky lícové i rubové strany na účely měření.

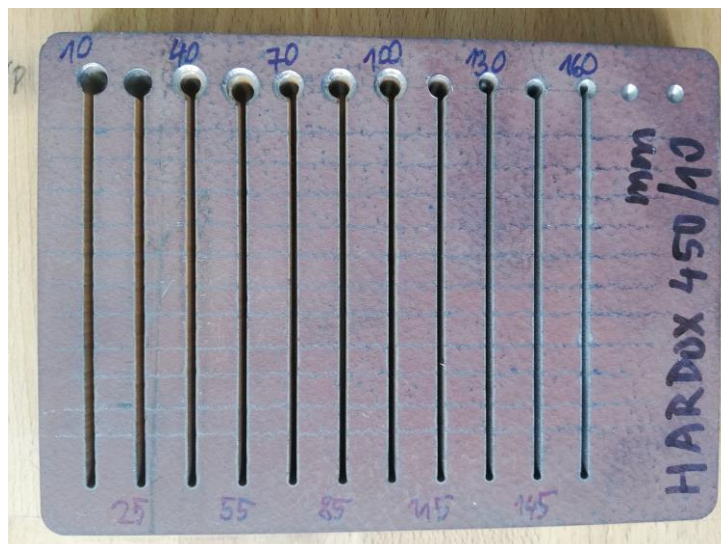
Obrázek 19 Výstup z mikroskopu



#### 6.4.2 Metodika měření

Pro účely experimentu měření šířky řezných spár byly vytvořeny experimentální vzorky pomocí technologie vodního abrazivního paprsku a laseru. Samotná koncepce vzorku zobrazena na obr. 21 vychází z rozměrů vzorků používaných vedoucím diplomové práce. Pro účely dělení laserem byl vzorek překreslen pomocí programu Solidworks.

Obrázek 20 Experimentální vzorek



Celkově bylo realizováno 11 měření na lícové i rubové straně u jednoho odděleného řezu. Vzhledem k zrychlení a zpomalování řezné hlavičky byl stanoven počátek prvního měření vždy 10 mm od počátku nebo konce řezu. Kromě tohoto nedostatku vzniká velké tepelné ovlivnění z důvodu prvotního propalu materiálu u laserového paprsku. Naměřené hodnoty oddělených



řezů byly statisticky zhodnoceny pomocí rovnic č. (3), (4). Součástí statistického výpočtu je stanovení střední kvadratické chyby aritmetického průměru měřených dat dle rovnice č. (5). Porovnány jsou vždy stejné tloušťky materiálu. V grafickém zobrazení jsou využity metody spojnicových grafů se směrodatnými odchylkami jednotlivých řezů, pro větší přehlednost. Z důvodu velikosti datového souboru jsou naměřené hodnoty součástí přílohy č. 1, 2.

Aritmetický průměr 
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Kde:  $n$  – počet měření

$x_n$  – hodnota šíře spáry

Směrodatná odchylka: 
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Kde:  $n$  – počet měření

$x_i$  – naměřená hodnota

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

Střední kvadratická chyba aritmetického průměru: 
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (5)$$

Kde:  $n$  – počet měření

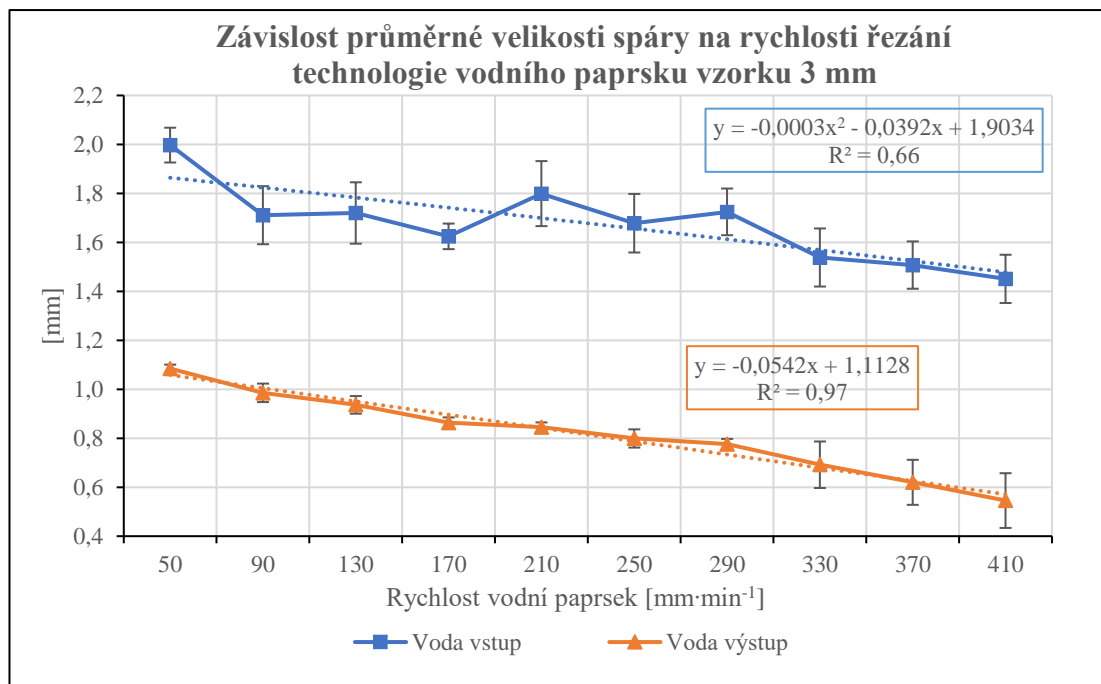
$x_i$  – naměřená hodnota

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

## 6.5 Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 3 mm

V grafu č. 3 je znázorněna závislost průměrné šíře lícové a rubové spáry na rychlosti posuvu vodního paprsku při konstantním dávkování abraziva  $196,4 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ . Vzhledem k fyzikálním vlastnostem materiálu a podstatě řezného procesu lze předpokládat, že s rostoucí rychlostí posuvu bude klesat šířka řezné spáry. Křivka znázorněná modrou barvou vyjadřuje průměrnou vstupní šířku spáry. Vázanost mezi hodnotami je vyjádřena polynomicou křivkou druhého řádu se stanovenou hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,66, která vyjadřuje značný stupeň vázanosti výsledků a vhodnost zvolené funkce. Celkově bylo realizováno 13 řezů. Průměrná šíře řezu č.1 při rychlosti  $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  byla naměřená 2,00 mm. Po zvyšování rychlosti posuvu klesla průměrná šíře spáry na 1,45 mm u řezu č. 10. Řezy č. 11, 12, 13 nebyly zcela odděleny a nejsou součástí vyhodnocení. Regresivní funkce má celkově klesající charakter a lze potvrdit předpokládanou závislost. Chybovost měření je vypočtena pomocí střední kvadratické chyby aritmetického průměru, tato hodnota je uvedena v příloze č. 1, 2.

Graf 3 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 3 mm

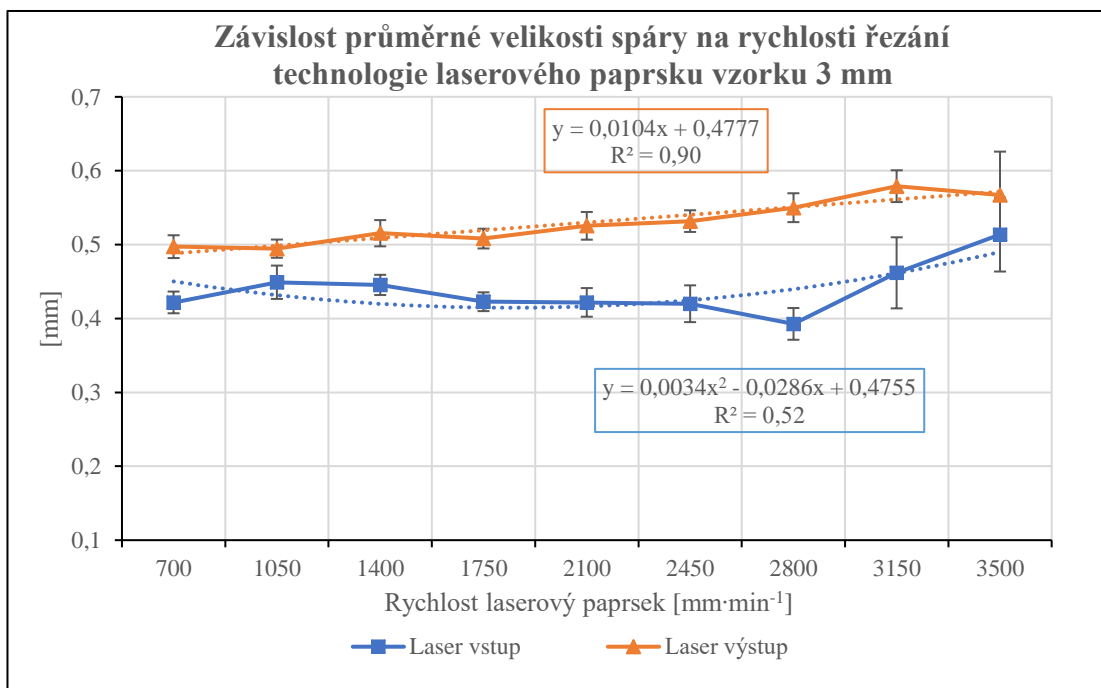


Výstupní rubová strana je znázorněná oranžovou barvou. Z průběhu je patrná klesající tendence vyjádřená zápornou závislostí lineární regrese s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  - 0,97 vyjadřující velmi těsný vztah vázanosti hodnot a vhodnosti regresní funkce. Průměrná šíře řezu č.1 byla naměřena s hodnotou 1,08 mm. Poslední oddělený řez byl stanoven s hodnotou 0,51 mm.

## 6.6 Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 3 mm

Vyhodnocení dělení experimentálního vzorku 3 mm pomocí laserového paprsku je uvedeno v grafu č. 4. Modrou barvou je znázorněna křivka značící průměrnou vstupní šíří řezu. Vázanost proměnných je vyjádřena polynomicou funkcí druhého řádu s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,52, která značí značnou těsnost výsledků. Celkově bylo realizováno 10 řezů. První řez č.1 disponuje průměrnou šířkou spáry 0,42 mm při rychlosti dělení  $700 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Konečný oddělený řez č. 9 byl stanoven s průměrnou šířkou 0,51 mm při rychlosti posuvu  $3500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Řez č. 10 nebyl zcela oddělen a není součástí vyhodnocení. Z grafického průběhu je viditelná stoupající opačná závislost oproti vstupní „lícové“ straně vodního paprsku v grafu č. 3, zejména v případě řezů č. 7, 8, 9. Tento jev je způsoben auto-fokusačním systémem laserové technologie, který mění pozici ohniska pro dosažení kvalitnějších řezů.

Graf 4 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 3 mm

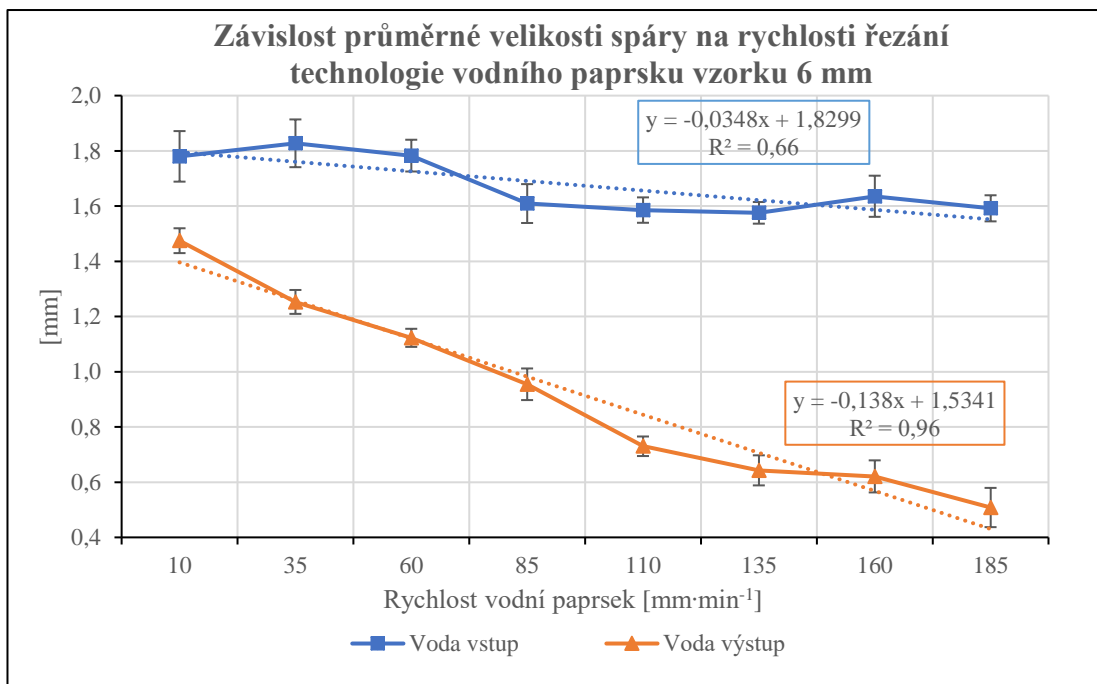


Výstupní strana vzorku 3 mm je znázorněna oranžovou barvou. Z průběhu je viditelná celkově vyšší hodnota jednotlivých výsledků vůči vstupní „lícové“ straně. Regresní funkce je vyjádřena stoupající lineární závislostí s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,90, která vyjadřuje vysoký stupeň vázanosti výsledků. Řez č. 1 je stanoven s průměrnou šířkou spáry 0,50 mm. Poslední oddělený řez č. 10 disponoval hodnotou 0,57 mm.

## 6.7 Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 6 mm

Vyhodnocení průměrné šířky spáry vstupní strany vodního paprsku je znázorněno v grafu č. 5 modrou barvou. Celkově bylo realizováno 12 řezů. První řez č. 1 byl stanoven s průměrnou hodnotou 1,78 mm při rychlosti posuvu 10 mm·min<sup>-1</sup>. Poslední oddělený řez č. 8 disponuje průměrnou hodnotou 1,59 mm při rychlosti posuvu 185 mm·min<sup>-1</sup>. Řezy č. 9 až 12 nebyly odděleny v celé šíři řezu a z toho důvodu nejsou součástí vyhodnocení. Z grafického průběhu je viditelná celkově klesající tendence vyjádřená lineární regresí s hodnotou spolehlivosti R<sup>2</sup> 0,66. Vázanost výsledků je zde stanovena se stupněm význačné těsnosti. V porovnání se vzorkem 3 mm je v grafu č. 3 opět viditelná celkově klesající tendence potvrzující základní hypotézu klesající hodnoty průměrné šíře spáry se zvyšující se rychlostí posuvu.

Graf 5 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 6 mm

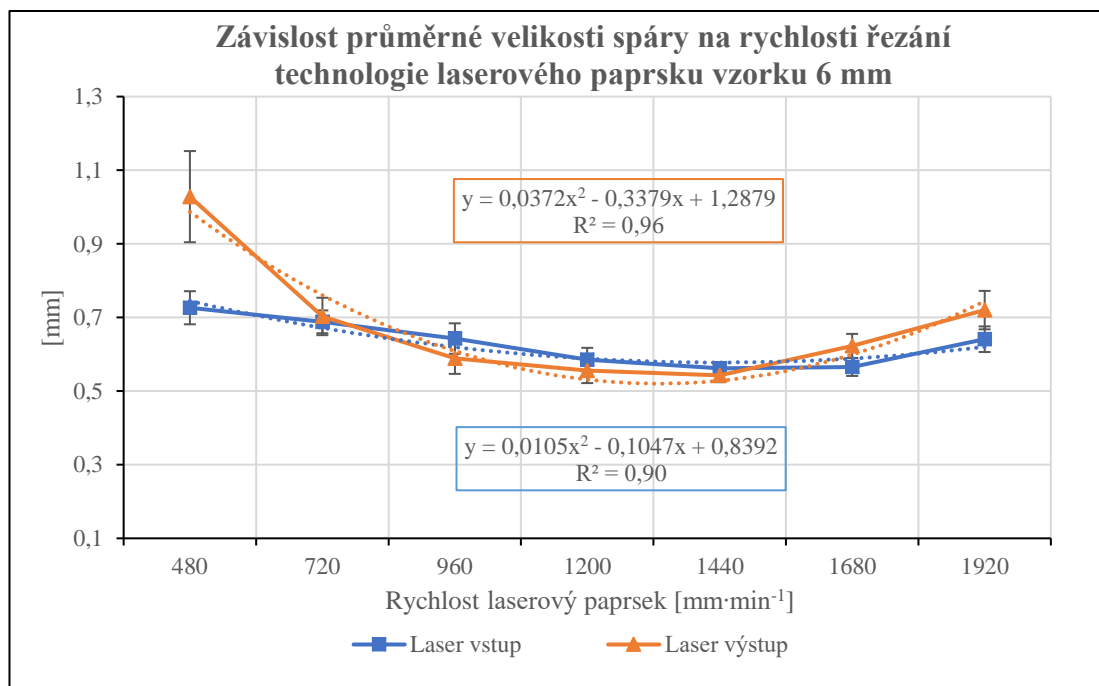


Výstupní strana vzorku 6 mm je znázorněna v grafu č. 5 oranžovou barvou. Průběh potvrzuje klesající tendenci vyjadřující zápornou lineární regresivní funkci s hodnotou spolehlivosti R<sup>2</sup> 0,97, která značí velmi těsný vztah mezi výsledky a funkční vázaností vybrané regrese. V případě řezu č. 1 byla stanovena průměrná šíře 1,47 mm. Poslední oddělený řez č. 8 vykazuje hodnotu 0,51 mm. Z grafu je patrná strmější klesající tendence v porovnání se vstupní stranou. Tento jev je způsoben klesající intenzitou paprsku při rostoucí rychlosti posuvu, zejména v oblastech výstupní strany.

## 6.8 Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 6 mm

Vyhodnocení výsledků průměrné šíře spáry vstupní strany je zobrazeno v grafu č. 6 modrou barvou. Celkově bylo realizováno 10 řezů. Řez č.1 je stanoven s průměrnou hodnotou šíře spáry 0,73 mm s rychlostí posuvu  $480 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední oddělený řez č. 7 je stanoven s průměrnou hodnotou 0,64 při rychlosti posuvu  $1920 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Řezy č. 7, 8, 9, 10 nebyly odděleny v celé délce. Z grafického průběhu je patrná kvadratická závislost vyjádřená pomocí regresní funkce polynomu druhého řádu s hodnotou spolehlivosti  $R^2 0,90$ , která v tomto případě značí velmi těsný vztah výsledků a vhodnosti regresní funkce. V porovnání s výsledky vodního paprsku v grafu č. 5 je znatelný zejména vyšší stupeň regresivní funkce. Celkově lze zpozorovat velmi úzké průměrné rozpětí hodnot vstupní a výstupní strany, zejména v případě řezů č. 3, 4, 5. V tomto případě je závislost značně ovlivněna auto-fokusačním systémem. Z uvedených závislostí je především u řezu č. 1, 2 a 6, 7 je patrná fokusace paprsku a to zejména ve vyšší hloubce materiálu, která disponuje vyšší hodnotou průměrné šíře spáry na výstupu oproti vstupním průměrným hodnotám.

Graf 6 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 6 mm

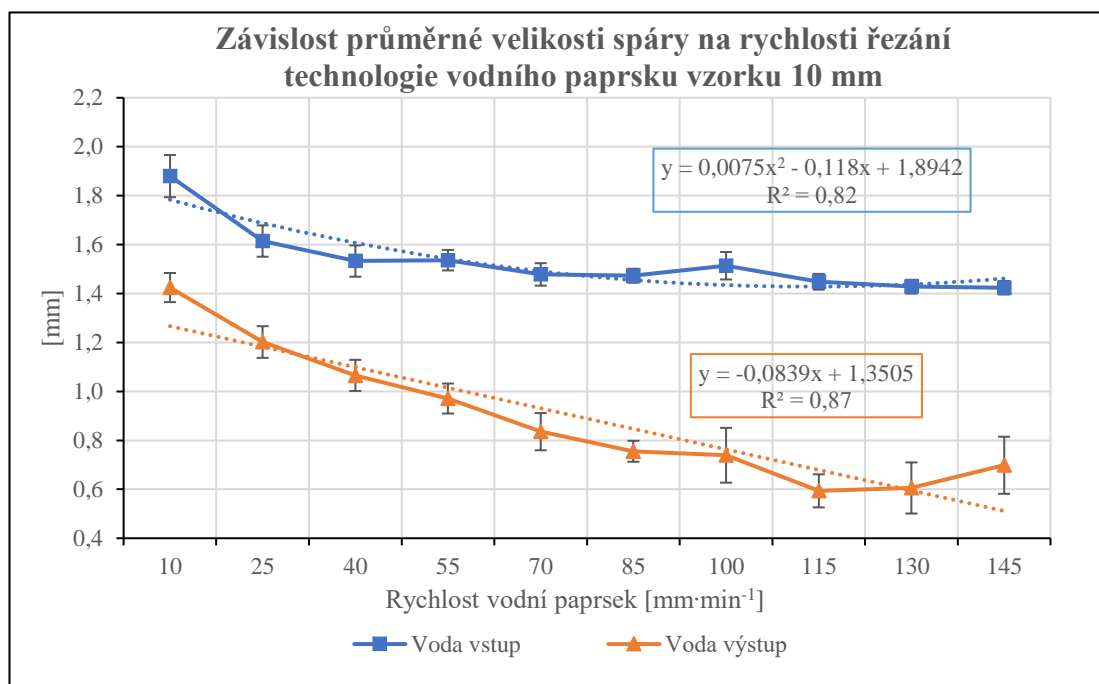


Průměrná šíře jednotlivých řezů výstupní strany je znázorněna oranžovou barvou. Průměrná šíře řezu č. 1 byla stanovena s hodnotou 1,03 mm. V případě řezu č. 7 průměrná šíře spáry klesla na hodnotu 0,72 mm. Vázanost proměnných je vyjádřena regresní křivkou v podobě polynomu druhého stupně jako v případě vstupní strany. Hodnota spolehlivosti  $R^2 0,96$  značí velmi těsný vztah výsledků ke stanovené regresní funkci.

## 6.9 Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 10 mm

Závislost vstupní šířky spáry vzorku 10 mm je znázorněna modrou barvou v grafu č. 7. V tomto případě bylo realizováno 11 řezů. Řez č. 1 byl oddělen s průměrnou šířkou spáry 1,88 mm při rychlosti posuvu  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední oddělený řez č. 10 je stanoven s průměrnou hodnotou 1,42 mm. Řez č. 11 nebyl oddělen v celé šíři a není součástí vyhodnocení. Funkce má na první pohled klesající charakter. Vázanost proměnných je vyjádřena regresivní funkcí v podobě polynomicke funkce druhého řádu s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,82. Z uvedeného koeficientu vázanosti jsou výsledky ohodnoceny jako velmi těsné vůči využití regresní funkce.

Graf 7 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 10 mm

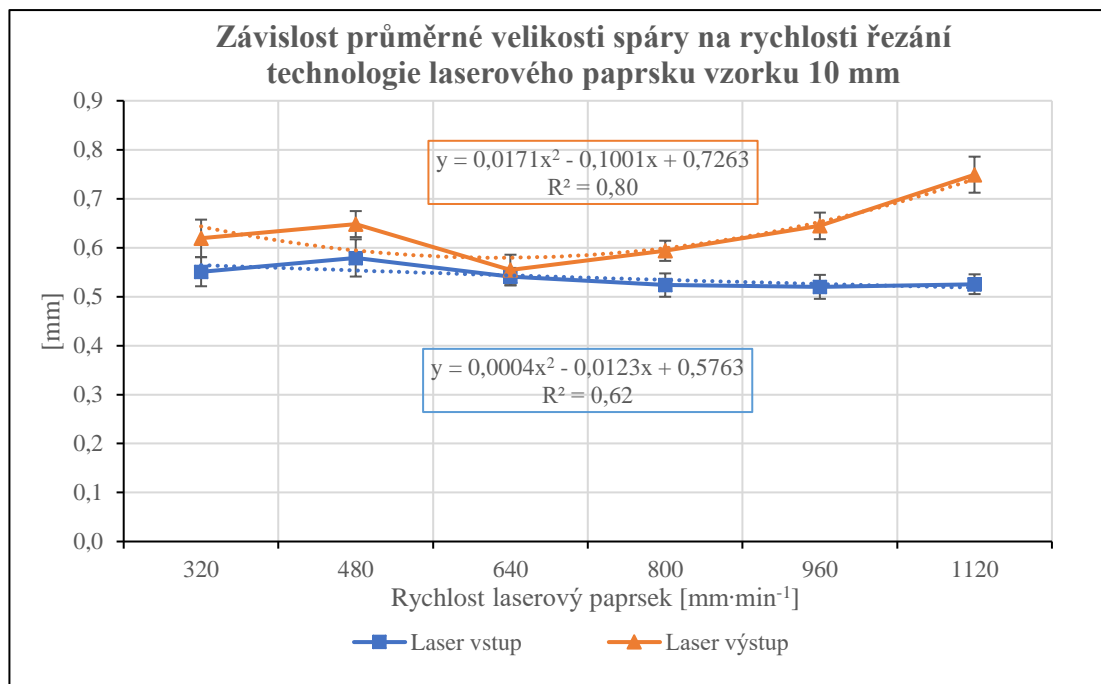


Závislost výstupní průměrné šířky spáry je znázorněna oranžovou barvou. Křivka má celkově klesající charakter vyjádřený lineární regresí s koeficientem spolehlivosti  $R^2$  0,87, který značí velmi těsný vztah vázanosti výsledků. Průměrná šíře řezu č. 1 je 1,42 mm. V případě posledního řezu č. 10 byla změřena průměrná šíře 0,70 mm. Z celkového průběhu vstupní a výstupní strany lze potvrdit závislost klesající hodnoty průměrné šíře řezné spáry s rostoucí rychlostí posuvu.

## 6.10 Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 10 mm

Závislost průměrné šíře řezné spáry na rychlosti posuvu vstupní strany je zobrazena v grafu č. 8 modrou barvou. Z průběhu vstupních a výstupních hodnot je patrná opět nižší průměrná hodnota na vstupní straně experimentálního vzorku. V porovnání s technologií vodního paprsku v grafu č. 7 dosahuje průměrná šíře vstupní strany zřetelně vyšších hodnot vůči straně výstupní. Celkově bylo realizováno 10 řezů. Řez č. 1 byl změřen s výslednou průměrnou hodnotou 0,55 mm, s konstantní rychlostí posuvu  $320 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední oddělený řez č. 6 byl naměřen s hodnotou 0,53 mm při rychlosti posuvu  $1120 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Pro dosažení vyšší vázanosti výsledků byl zvolen polynom druhého řádu jako regresní funkce. Hodnota spolehlivosti  $R^2$  0,62 značí význačnou těsnost výsledků.

Graf 8 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 10 mm

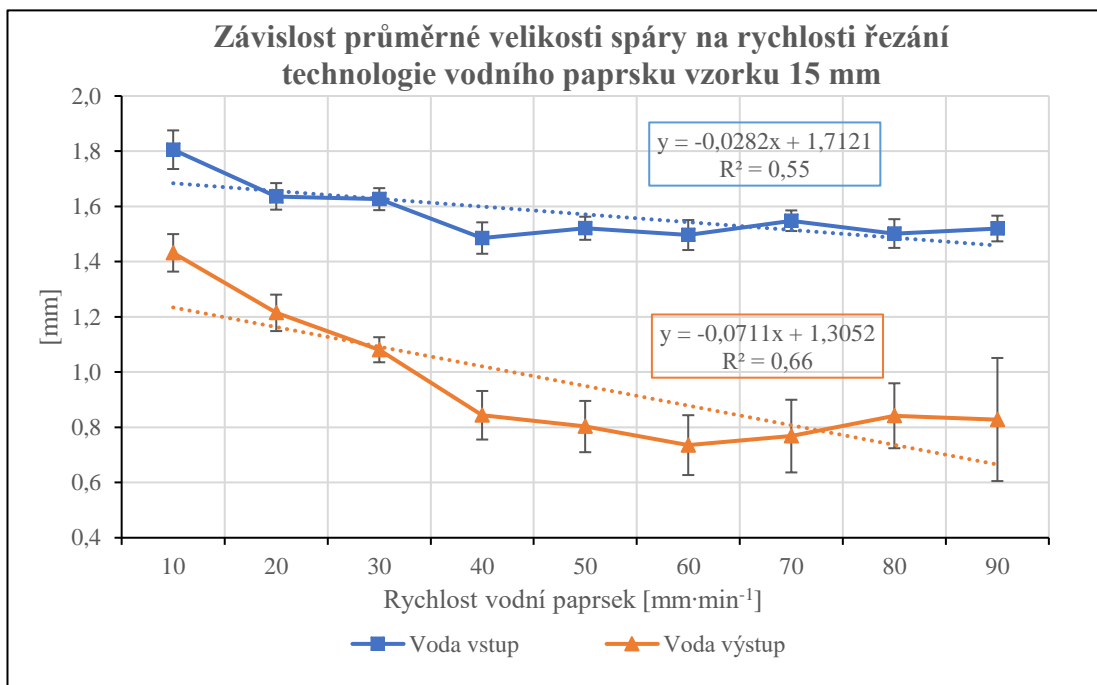


Výstupní strana vzorku 10 mm je znázorněna oranžovou barvou. Řez č. 1 byl stanoven s hodnotou 0,62 mm. Poslední oddělený řez č. 6 disponuje hodnotou 0,75 mm. Regrese je tvořena polynomickou funkcí druhého řádu z důvodu dosažení vyšší vázanosti proměnných s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,80, která značí vysoký stupeň těsnosti výsledků s regresní funkcí. Z průběhu grafu je patrný nárůst hodnot průměrné šíře spáry, zejména u řezů č. 4, 5, 6. V porovnání s technologií vodního paprsku v grafu č. 7 je viditelný celkově nižší rozdíl průměrné šíře spáry mezi vstupní a výstupní stranou, zejména u řezu č. 3, který disponuje rozdílem 0,01 mm. Samotný průběh je opět ovlivněn, jako v případě grafu č. 6, 4, autofokusačním systémem.

## 6.11 Vyhodnocení šířky spáry vodního paprsku vzorku 15 mm

V grafu č. 9 je znázorněna průměrná šíře spáry vstupní strany modrou barvou. Celkově bylo realizováno 11 řezů. Řez č. 1 byl stanoven s průměrnou šířkou spáry 1,81 mm při rychlosti posuvu  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední oddělený řez č. 9 byl stanoven s průměrnou hodnotou 1,52 mm při posuvové rychlosti  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Ostatní řezy nebyly odděleny po celé délce. Samotný průběh výsledků má klesající tendenci vyjádřenou lineární regresí s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,55. Tento koeficient determinace stanovuje význačnou těsnost výsledků k regresní funkci. V porovnání s výsledky laserového paprsku zejména v grafech č. 4, 6, 8 vykazují vstupní strany vodního paprsku klesající tendenci.

Graf 9 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 15 mm



Výstupní strana vzorku je znázorněna v grafu č. 9 oranžovou barvou. Průměrná hodnota řezu č. 1 je stanovena s hodnotou 1,43 mm. Poslední řez č. 9 disponuje průměrnou hodnotou 0,83 mm. Samotný průběh vykazuje klesající tendenci, která je vyjádřena lineární regresí s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,66, což značí význačnou těsnost vztahu.

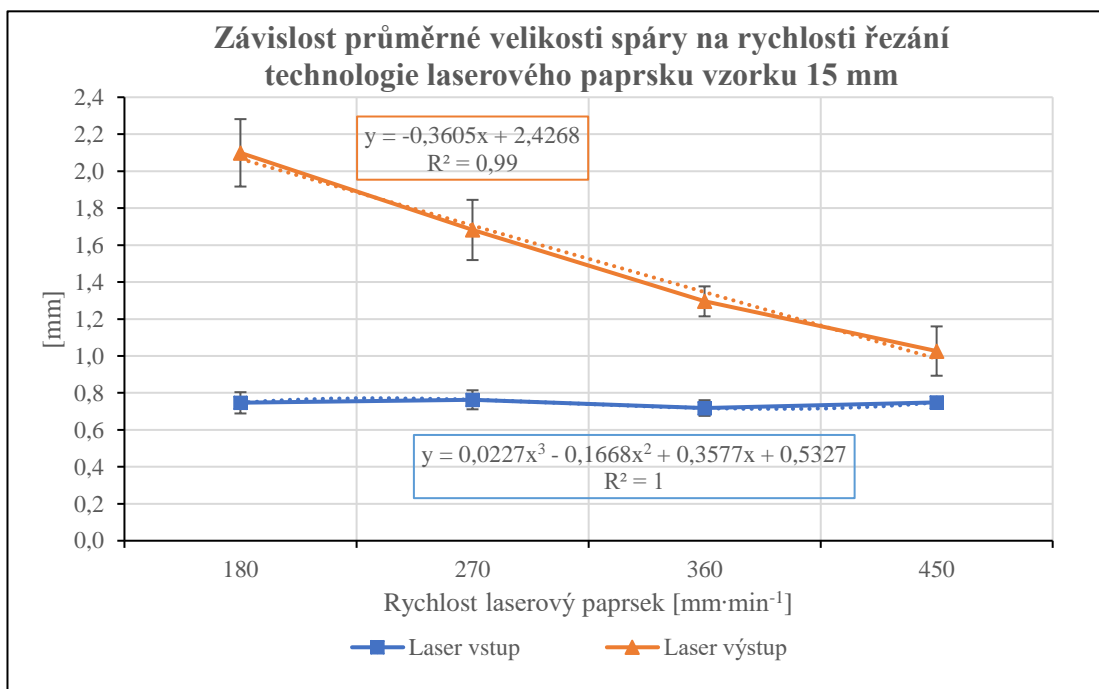


## 6.12 Vyhodnocení šířky spáry laserového paprsku vzorku 15 mm

Vstupní průměrná šíře řezné spáry vzorku 15 mm s využitím dělení laserové technologie je znázorněna v grafu č. 10 modrou barvou. Celkem bylo realizováno 10 řezů. Řez č.1 byl stanoven s průměrnou hodnotou 0,75 mm při rychlosti posuvu  $180 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Průměrná hodnota posledního řezu č. 4 je 0,75 mm. Ostatní řezy nebyly odděleny po celé délce a nejsou součástí vyhodnocení. Funkční závislost je v tomto případě zobrazena pouze schematicky. Z důvodu nízkého počtu výsledků a dosažení vázanosti výsledků byla vybrána regresní funkce v podobě polynomu třetího řádu, který reprezentuje velmi vysokou vázanost výsledků. V případě volby lineární regrese jsou výsledky nezávislé. Z technologického hlediska je pro využitou laserovou technologii tato tloušťka hraniční pro dělení, především z důvodu výkonu laseru.

Výstupní strana je v grafu č. 10 reprezentována oranžovou barvou. Řez č. 1 disponuje průměrnou hodnotou 2,1 mm. Poslední oddělený řez č. 4 je stanoven s průměrným výsledkem 1,03 mm. Závislost proměnných je vyjádřena pomocí lineární funkce, která s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  tvoří velmi těsný vztah výsledků. K nízkému počtu naměřených hodnot je tato regrese znázorněna schematicky. V porovnání se vstupními stranami v grafech č. 4, 6, 8 je viditelná strmě klesající tendence průběhu.

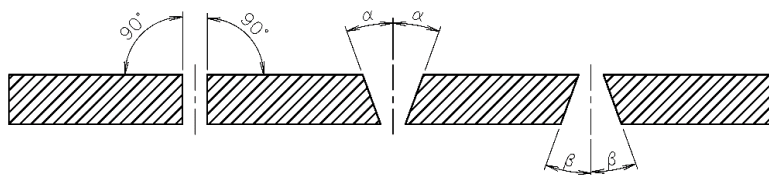
Graf 10 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 15 mm



## 6.13 Výpočet úhlu řezu

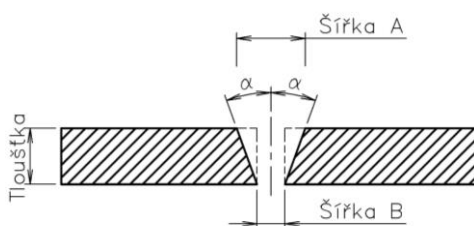
Dělení materiálu může probíhat za pomoci mnoha metod využívajících nejrůznější fyzikální zákony. Při dělení vodním paprskem či laserem vzniká nerovnoměrné rozložení šířky spáry v průběhu její hloubky. V ideálním případě by měla být rovina řezu shodná s obr. 22 s označenou kolmostí. U tohoto případu by měl řez svírat kolmý úhel s plochou materiálu. V další variantě znázorněné hodnotou  $\alpha$  svírá řez s lícovou plochou materiálu kladný úhel, který vzniká za předpokladu větší průměrné šíře lícové strany oproti straně rubové. Poslední možností je záporný úhel znázorněný koeficientem  $\beta$ , který vzniká větší průměrnou hodnotou šíře spáry rubové strany oproti straně lícové.

Obrázek 21 Úhel řezu



Experimentální část dopočtu úhlu je založena na hodnotách naměřených na lícové straně A a rubové straně B, které vznikly za řezných podmínek dané technologie. Samotný úhel je dopočítán pomocí goniometrické funkce tangens dle rovnice (6), která je definovaná jako poměr protilehlé odvěsny k přilehlé odvěsně. Vzhledem k naměřeným hodnotám byl stanoven aritmetický průměr ke každému řezu dle rovnice (3). Součástí výsledků je stanovení směrodatné odchylky měření, která je uvedena v jednotlivých grafech a je součástí přílohy č. 5.

Obrázek 22 Dopčet úhlu



Dopčet úhlu

$$\tan \alpha = \frac{t}{\frac{(A - B)}{2}} \quad (6)$$

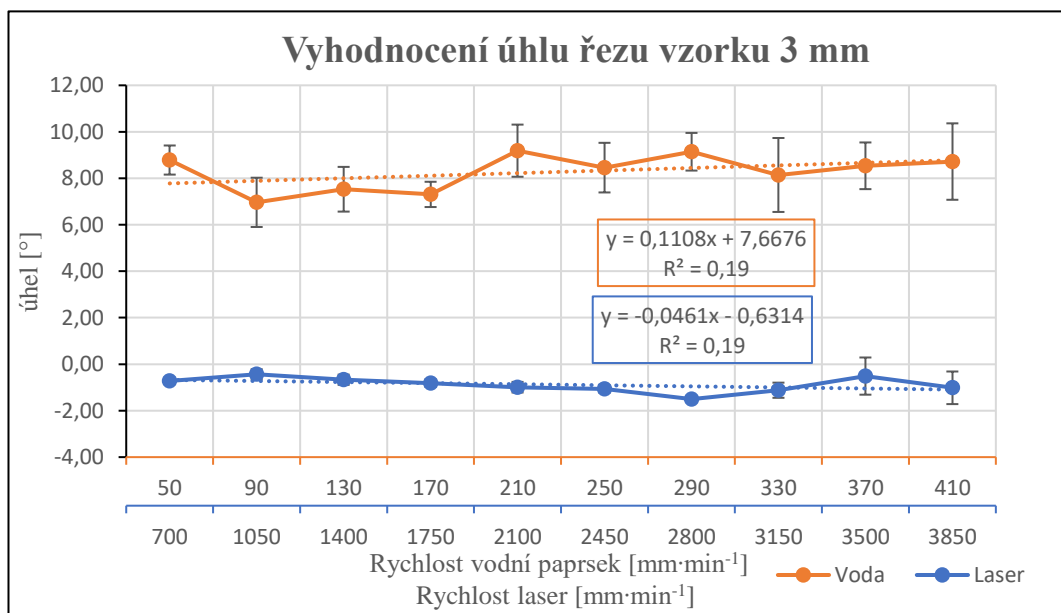
Kde:  $t$  – tloušťka materiálu;  $A$  – šířka lícové strany;  $B$  – šířka rubové strany

### 6.13.1 Vyhodnocení úhlu řezu 3 mm

V grafu č. 11 jsou zobrazeny výsledky dopočtu úhlů jednotlivých řezů tloušťky 3 mm. Oranžovou barvou je znázorněn průběh vodního paprsku. U řezu č. 1 při rychlosti posuvu 50 mm·min<sup>-1</sup> je stanoven průměrný úhel řezu 8,78°. Poslední oddělený řez č.10 disponuje hodnotou 8,72° při rychlosti řezání 410 mm·min<sup>-1</sup>. Z průběhu je patrný kladný úhel řezu orientovaný na vstupní řeznou stranu. Regrese je vyjádřena schematicky v podobě lineární funkce a to díky nízkému koeficientu vázanosti proměnných R<sup>2</sup>.

Modrou barvou je zobrazen průběh laserového paprsku. Průměrná hodnota úhlu řezu u řezu č. 1 při rychlosti řezání 700 mm·min<sup>-1</sup> je -0,72°. V případě posledního odděleného řezu č. 10 byla stanovena průměrná velikost úhlu -1,02° při rychlosti řezání 3850 mm·min<sup>-1</sup>. V porovnání výsledků s metodou vodního paprsku je viditelná celkově nižší průměrná velikost záporného úhlu orientovaného na výstupní stranu řezu. Laserová technologie vykazuje významně menší úhly než u technologie vodního paprsku v případě této tloušťky materiálu.

Graf 11 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 3 mm

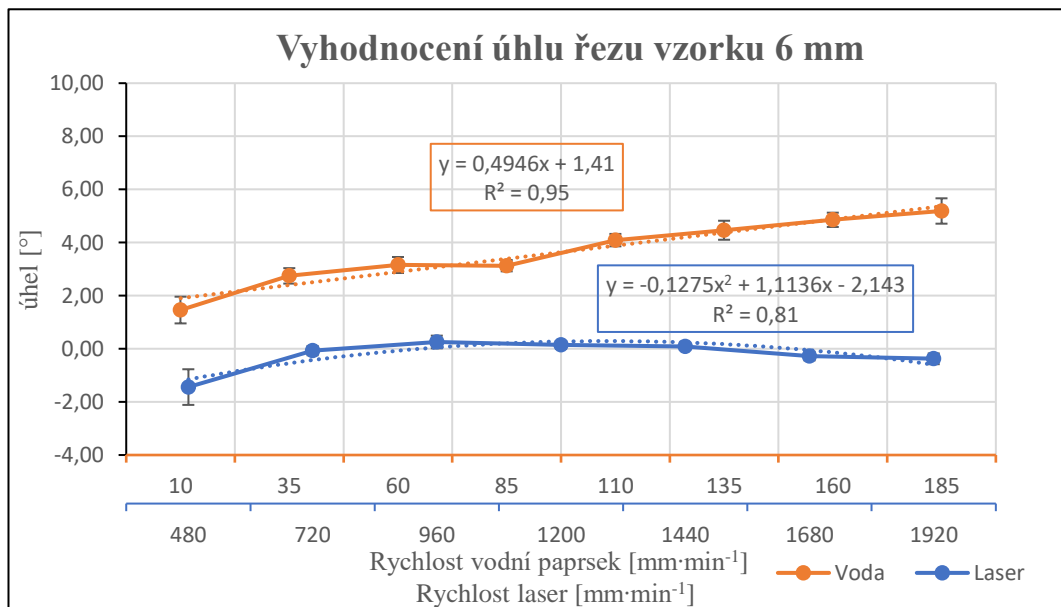


### 6.13.2 Vyhodnocení úhlu řezu 6 mm

V grafu č. 12 je zobrazena spojnice vodního paprsku oranžovou barvou. Charakter lineární regrese průměrné velikosti úhlu řezu vykazuje stoupající tendenci s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,95, která značí velmi vysokou vázanost výsledků k regresní funkci. U prvního řezu č. 1 byla stanovena průměrná velikost úhlu  $1,46^\circ$  při rychlosti posuvu  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední řez č. 8 s nejvyšší rychlostí posuvu  $185 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  disponuje hodnotou  $5,19^\circ$ . V případě této tloušťky je z funkčního průběhu viditelná závislost zvyšujícího se úhlu řezu na rychlosti posuvu a orientaci na vstupní stranu vodního paprsku.

Spojnice laserové technologie je v grafu č. 12 znázorněna modrou barvou. Pro schématické znázornění vysoké vázanosti proměnných je zvolena regresní funkce v podobě polynomu druhého stupně s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,81. Řez č. 1 s rychlostí posuvu  $480 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  disponuje průměrnou velikostí úhlu  $-1,44^\circ$ . V případě posledního řezu č. 8 děleného s rychlostí posuvu  $1920 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je dopočtena průměrná velikost úhlu  $-0,38^\circ$ . Z grafického průběhu výsledků je patrný přechod ze záporné na kladnou orientaci úhlu, zejména v případě řezů č. 3, 4, 5. Tento jev je způsoben auto-fokusačním systémem využití technologie. V porovnání s hodnotami vodního paprsku vykazuje laserová technologie nižší průměrné velikosti úhlů blízcích se ke kolmému řezu.

Graf 12 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 6 mm

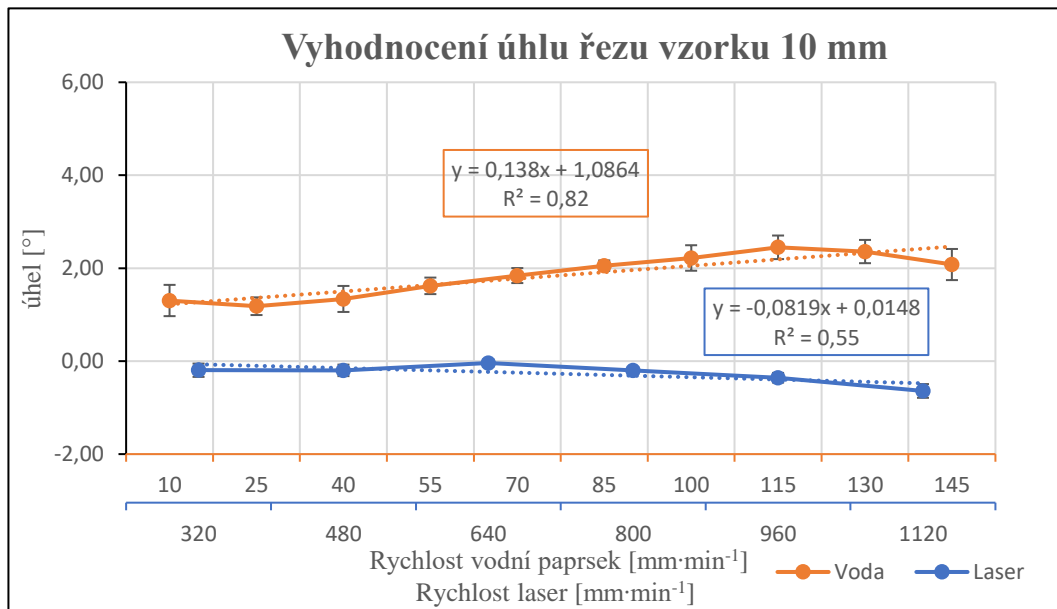


### 6.13.3 Vyhodnocení úhlu řezu 10 mm

V grafu č. 13 je vyznačena spojnice metody vodního paprsku oranžovou barvou. U prvního řezu č. 1 s rychlostí posuvu  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  byla stanovena průměrná hodnota úhlu  $1,31^\circ$ . Celkový průběh vykazuje rostoucí tendenci, která je zakončena posledním odděleným řezem s velikostí průměrného úhlu  $2,08^\circ$  s rychlostí posuvu  $145 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Závislost výsledků k regresní lineární funkci je vyjádřena hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,82, která značí vysoký stupeň vázanosti.

Vyhodnocení dopočtu úhlu laserového paprsku je znázorněno modrou barvou. Průměrná hodnota úhlu řezu č. 1 při rychlosti posuvu  $320 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je orientovaná záporným směrem na výstupní stranu vzorku s výsledkem  $-0,20^\circ$ . Poslední oddělený řez č. 8 dělený při rychlosti posuvu  $1120 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  vykazuje vyšší hodnotu průměrného úhlu s výsledkem  $0,64^\circ$ . Z grafického průběhu je viditelný zvyšující se charakter průměrného úhlu vyjádřený lineární regresní funkcí s hodnotou spolehlivosti  $R^2$  0,55. Při porovnání absolutních výsledků s metodou vodního paprsku vykazuje laserová technologie nižší hodnoty, které se přibližují ke kolmému řezu.

Graf 13 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 10 mm

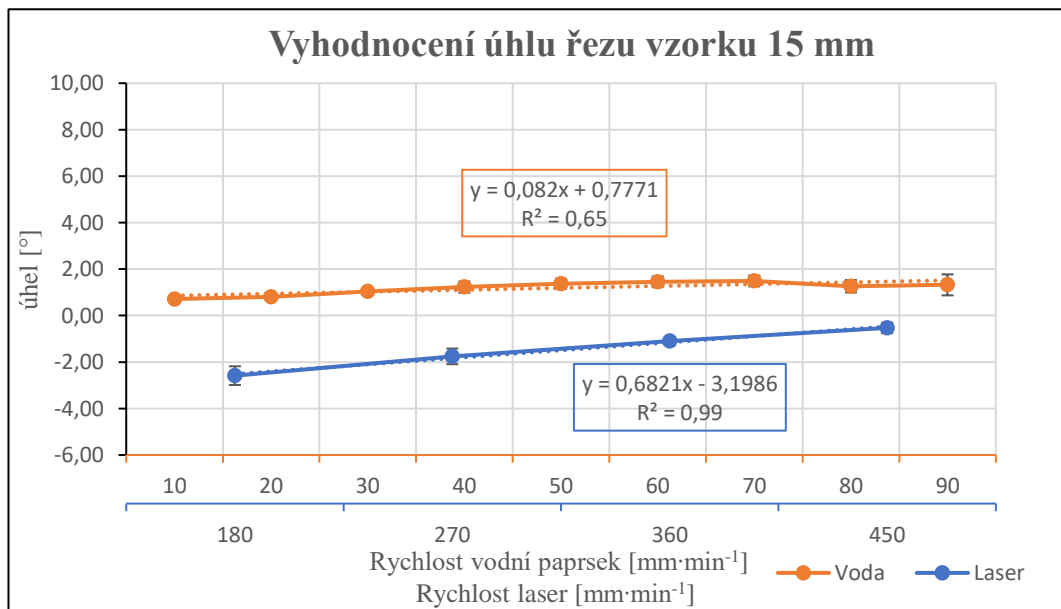


### 6.13.4 Vyhodnocení úhlu řezu 15 mm

V grafu č. 14 jsou zobrazeny výsledky průměrné velikosti úhlu řezu vodního paprsku oranžovou barvou. Řez č. 1 je vyhodnocen s výsledkem  $0,71^\circ$  při rychlosti posuvu  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Poslední oddělený řez č. 9 vykazuje vyšší průměrnou hodnotu s výsledkem  $1,32^\circ$  s rychlostí posuvu  $90 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Spojnice vykazuje stoupající tendenci vyjádřenou lineární regresní funkcí s hodnotou význačné spolehlivosti a vázanosti k výsledkům  $R^2 0,65$ . V porovnání s jednotlivými průběhy metody vodního paprsku v grafech 11, 12, 13 je viditelná klesající tendence průměrného úhlu řezu s rostoucí tloušťkou materiálu. Tento jev je způsoben klesající energií paprsku s tloušťkou materiálu.

Metoda laserového paprsku je znázorněna v grafu modrou barvou. Vyhodnocení řezu průměrného úhlu řezu č. 1 při rychlosti posuvu portálu  $180 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  je stanoveno se záporně orientovanou hodnotou  $-2,59^\circ$ . Průměrná hodnota úhlu posledního odděleného řezu č. 4 je  $-0,53^\circ$  při rychlosti posuvu  $450 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Průběh grafu vykazuje rostoucí tendenci. Vzhledem k nízkému počtu výsledků je stanovena regresní funkce schematicky v podobě lineární funkce s velmi vysokou hodnotou vázanosti a spolehlivosti výsledků  $R^2 0,99$ . V porovnání s grafickým průběhem č. 11, 12, 13 ostatních tloušťek laserové technologie vykazuje tloušťka 15 nejvyšší hodnoty průměrného úhlu řezu.

Graf 14 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 15 mm



## 7 Diskuse a porovnání výsledků měření

V rámci experimentu byly stanoveny výsledky šířky řezné spáry, úhlu řezu a vizuálního vyhodnocení materiálu Hardox 450. Pro porovnání výsledků byla do experimentu začleněna metoda laserového paprsku. Tvar a jakost řezné spáry může být ovlivněna mnoha faktory u jakékoliv nekonvenční metody. U metody vodního paprsku lze z uvedených výsledků jednoznačně potvrdit hypotézu rozšiřující se řezné spáry s klesající rychlostí posuvu za konstantních hodnot abrazivního materiálu. Abrazivní paprsek má při nižší rychlosti posuvu delší čas pro odebrání děleného materiálu. Klesající trend funkcí byl zaznamenán jak na lícové, tak rubové straně. V porovnání všech vzorků bylo v případě prvních řezů dosahováno podobných hodnot šířky řezné spáry. Regresní funkce je v tomto případě tvořena lineární závislostí. Řezy této technologie jsou velmi čisté bez tepelného ovlivnění s kladným úhlem řezu, který je orientován na vstupní stranu materiálu. V porovnání s technologií laserového paprsku vykazuje širší řezné spáry. Hodnoty úhlu řezu jsou ve všech případech orientovány na vstupní stranu materiálu z důvodu závislosti klesající energie paprsku s rostoucí hloubkou v průřezu spáry vzorku. Celkově vykazují zvyšující se charakter s rostoucí rychlostí posuvu, zejména s vysokou závislostí regresní funkce.

V porovnání s laserovou technologií je závislost odlišná u různých tloušťek. Průměrná šířka řezné spáry na vstupní i výstupní straně vykazuje výrazně nižší hodnoty oproti vodnímu paprsku s menším absolutním rozdílem mezi vstupní a výstupní stranou. Funkční závislost výsledků není stanovena homogenně u všech vzorků z důvodu nízké závislosti. Ve většině případech ji tvoří polynomy druhého stupně. Kvadratická závislost jednotlivých vzorků je způsobena auto-fokusačním systémem laserové technologie, která mění polohu ohniska výstupního paprsku pro dosažení lepších výsledků, zejména při vyšších rychlostech řezání. Úhel řezu je oproti vodnímu paprsku orientován na výstupní stranu materiálu. V porovnání úhlu řezu u vzorků 3, 6, 10 mm dosahuje laserová technologie lepších výsledků, které se blíží ke kolmému řezu, zejména díky nižší absolutní hodnotě rozdílu vstupní a výstupní spáry. Řezy této technologie disponují v porovnání s technologií vodního paprsku tepelným ovlivněním, úzkým řezem a menším úhlem řezu. Vyhodnocení úhlu laserové technologie koresponduje ve většině případech polynomickou regresní závislostí druhého stupně kromě vzorku 15 mm, jako u vyhodnocení šířky spáry řezu. Z výsledků vizuálního hodnocení a počtu oddělených řezů praktické zkoušky vyplývá, že hraniční vzorek pro dělení s využitím této laserové technologie je tloušťka 15 mm.

## 8 Technicko-ekonomické zhodnocení

Výběr vhodného technologického řešení ve strojírenských provozech závisí na výrobních požadavcích určujících kvalitativní a kvantitativní zhodnocení. Tato část diplomové práce se zaměřuje na stanovení základních ekonomických ukazatelů určujících finanční náročnost, které jsou důležitým stanoviskem ke koupi technologie. K určení ceny řezání je nutné stanovit fixní a variabilní náklady. V experimentální části byly vyhodnoceny a stanoveny poznatky určující nejvyšší kvality řezu, tyto hodnoty poslouží k určení nákladů na délku řezu stroje. Nedohledatelné položky, jako přesné nákupní ceny spotřebního materiálu, pronájmy a platy zaměstnanců jsou stanoveny fundovaným odhadem z důvodu firemního tajemství.

Podle Krále [32] fixní náklady jsou náklady, které se nemění v průběhu jednotlivých činností podniku nebo jeho aktivit. Jedná se především o tzn. kapacitní náklady vyvolané potřebou zajistit podmínky pro efektivní průběh procesu. Pod pojmem variabilní náklady si lze představit náklady vztažené na jednotku výkonu. Pro stanovení fixních nákladů byly vytvořeny cenové nabídky jednotlivých technologií.

Vlivem stárnutí a provozního opotřebení strojního vybavení dochází k pozvolnému snižování hodnoty. Z tohoto důvodu je nutné stanovit daňové úlevy ve formě odpisů. Podle přílohy zákona č. 586/1992 Sb. spadá strojní vybavení do odpisové skupiny č. 2 s délkou odepisování 5 let. V prvním roce je stanovena odpisová sazba 11,00 %, v následujících letech 22,25 %. V tabulce č. 7 je znázorněna odpisová struktura použitých technologií. Výchozí cenové relace jsou součástí nabídek v příloze č. 3, 4.[33]

Tabulka 7 Odpisy

Trumpf Trulaser 3030			1€ - 25,50 Kč
Pořizovací cena Kč		16790411	
Rok	Sazba odpisu	Roční odpis	Zůstatková cena
2019	11,00%	1846945	14943466
2020	22,25%	3735866	11207599
2021	22,25%	3735866	7471733
2022	22,25%	3735866	3735866
2023	22,25%	3735866	0
AWAC AW-CT 0806 TKX			1€ - 25,50 Kč
Pořizovací cena Kč		3024375	
Rok	Sazba odpisu	Roční odpis	Zůstatková cena
2019	11,00%	332681	2691693,75
2020	22,25%	672923	2018770
2021	22,25%	672923	1345847
2022	22,25%	672923	672923
2023	22,25%	672923	0



Náklady na odpis za hodinu provozu zařízení AWAC:

$$jN_a = \frac{\frac{P_c}{C_o}}{T_0 \cdot P_{ps}} = \frac{604875}{3 \cdot 1848} = 109 \text{ Kč} \quad (7)$$

Kde:  $jN_a$  – hodinová sazba odpisu

$P_c$  – cena zařízení

$C_o$  – počet let odpisu

$T_0$  – počet pracovních směn

$P_{ps}$  – počet hodin ve směně za rok

Náklady na odpis za hodinu provozu zařízení Trumpf:

$$jN_a = \frac{\frac{P_c}{C_o}}{T_0 \cdot P_{ps}} = \frac{3385082}{3 \cdot 1848} = 606 \text{ Kč} \quad (8)$$

Kde:

$jN_a$  – hodinová sazba odpisu

$P_c$  – cena zařízení

$C_o$  – počet let odpisu

$T_0$  – počet pracovních směn

$P_{ps}$  – počet hodin ve směně za rok

Výše nájemného je stanovena fundovaným odhadem s fixní složkou 420 000 Kč za kalendářní rok. Použité technologie v porovnání vykazují srovnatelnou potřebu pracovní plochy, která by významným způsobem ovlivňovala výslednou režijní cenu.

## 8.1 Stanovení hodinové sazby metody vodního paprsku (AWJM)

Koeficienty nákladů a hodinové sazby jsou při dělení materiálu ve většině podnicích firemním tajemstvím z důvodu případné konkurenceschopnosti či rivalitě na straně odběratelů. V případě stanovení cenové relace je vycházeno z cenových nabídek stroje, která tvoří hlavní část vstupní investice. Jednotlivé variabilní náklady, které tvoří hlavní část nákladů spojených se samotným výrobním procesem jsou stanoveny fundovaným odhadem, popřípadě tržní cenou jednotlivých spotřebních komodit. K určení cenové relace vztažené k délce řezu je nutné

stanovit hodinovou sazbu stroje pomocí sumarizace nákladů za stanoveného předpokladu třísměnného provozu s ročním hodinovým fondem 5 544 hodin. Do fixních nákladů lze zařadit odpis stroje stanovený v předešlé kapitole a pronájem výrobních prostor. Hlavním činitelem stanovení ceny jsou v tomto případě variabilní náklady.

V tabulce č. 8 jsou zobrazeny náklady na spotřební materiál vyjádřené v souhrnu roční a hodinové cenové složce. Spotřeba vody je stanovena s využitím 120 litrů za hodinu provozu s možností úpravy vody pro další použití. Cena vody a náklady spojené s výměnou vodních dýz jsou stanoveny fundovaným odhadem. Cena abraziva byla určena na základě průměrného dávkování 196 g za jednu minutu za předpokladu kupní ceny 14 Kč·kg<sup>-1</sup>. Výpočet hodinové spotřeby abraziva je uveden v rovnici (9).

$$jN_n = \frac{M_n}{1000} \cdot T_p \cdot C_{abr} = \frac{196}{1000} \cdot 60 \cdot 14 = 165 \text{ Kč} \quad (9)$$

Kde:  $jN_n$  – Cena abraziva za hodinu provozu

$M_n$  – Množství abraziva [g·min<sup>-1</sup>]

$T_p$  – Doba provozu [min.]

$C_{abr}$  – Cena abraziva [Kč·kg<sup>-1</sup>]

Tabulka 8 Náklady na nástroje AWJM

Náklady na spotřební materiál		
Náklady na dýzy	20 000	Kč/rok
Náklady na vodu	57 830	Kč/rok
Náklady na abrazivo	991791	Kč/rok
Koeficient využití	0,70	-
Cena nástrojů za hodinu	135	Kč/hod.
Cena nástrojů za minutu	2,25	Kč/min.

Ve strojírenském provozu je k většině strojům přiveden přívod stlačeného vzduchu, který je v tomto případě využíván především na čištění komponent stroje a výsledných polotovarů. Zhodnocení je vyjádřeno fundovaným odhadem s opravným koeficientem tvořícím prostroje stroje. Souhrn je uveden v tabulce č. 9.

Tabulka 9 Náklady na stlačený vzduch AWJM

Náklady stlačený vzduch		
Cena stlačeného vzduchu	3	Kč/m <sup>3</sup>
Spotřeba	25 500	m <sup>3</sup> /rok
Roční cena stlač. vzduchu	53 550	Kč/rok
Koeficient využití	0,70	-
Cena stlač. vzduchu za hodinu	20,28	Kč/hod.
Cena stlač. vzduchu za minutu	0,34	Kč/min.

Jedním z nejdůležitějších variabilních nákladů je elektrická energie, která je zobrazena v tabulce č. 10. Při výpočtu vycházíme z ceny jedné kilowatthodiny. Důležitým aspektem je zhodnocení průměrného výkonu stroje v průběhu dělení materiálu a výrobních prostojů. Pro tento případ byl výsledek upraven koeficientem.

Tabulka 10 Náklady na elektrickou energii a vytápění AWJM

Náklady na elektrickou energii a vytápění		
Cena energie	5	Kč/kWh
Příkon stroje	35	kWh
Koeficient využití	0,70	%
Náklady na vytápění	150000	Kč/rok
Roční cena elektrické energie	761226	Kč/rok
Hodinová cena energií	137,31	Kč/hod.
Minutová sazba energií	2,29	Kč/min.

Náklady na opravu a údržbu v tabulce č. 11 jsou stanoveny fundovaným odhadem. V mnoha případech jsou finanční prostředky připisovány do dalších let, kde jsou využity na repasování finančně náročnějších funkčních částí stroje.

Tabulka 11 Náklady na opravu a údržbu AWJM

Náklady na opravu a údržbu		
Roční náklady na opravy	55 000	Kč/rok
Roční náklady na údržbu	60 000	Kč/rok
Roční náklady celkem	85 000	Kč/rok
Hodinové náklady na údržbu	15,33	Kč/hod.
Minutová sazba údržby	0,26	Kč/min.

Souhrn nákladů pro účely obsluhy zobrazené v tabulce č. 12 vycházejí z průměrné mzdy v podobných provozech. Složky benefitů a ostatních nákladů jsou stanoveny odhadem. Z hodinové složky nákladů na zaměstnance je zjevná vysoká závislost na stanovení nákladů.

Tabulka 12 Náklady na pracovní obsluhu

Náklady na pracovní obsluhu		
Hrubá mzda	25 000	Kč/měsíc
Odvody	34	%
Náklady na školení	10 000	Kč/rok
Náklady na pomůcky	5000,00	Kč/rok
Benfity + stravné	25000	Kč/rok
Počet zaměstnanců	3	-
Roční náklady na zaměstnance	1326000	Kč/rok
Hodinové náklady zaměstnance	239	Kč/hod.
Minutová sazba zaměstnance	4	Kč/min.

Sumarizace dílčích nákladů technologie vodního paprsku je uvedena v tabulce č. 13. Výsledná režijní cena za hodinu provozu zařízení je stanovena na 732 Kč. Z uvedených položek je nákladově nejvíce zatěžující spotřeba elektrické energie a náklady spojené s obsluhou stroje.

Tabulka 13 Souhrn nákladů AWJM

Souhrn nákladů na hodinu stroje		
Hodinová cena nástrojů	135,05	Kč/hod.
Hodinová cena stlač. Vzduchu	20,28	Kč/hod.
Hodinová cena elektr. Energie	137,31	Kč/hod.
Hodinové náklady na údržbu	15,33	Kč/hod.
Hodinové náklady zaměstnance	239,18	Kč/hod.
Pronájem haly	75,76	Kč/hod.
Náklady na amortizaci	109,00	Kč/hod.
Hodinová cena stroje	731,91	Kč/hod.
Minutová sazba stroje	12,20	Kč/min.

## 8.2 Stanovení hodinové sazby metody laserového paprsku (LBM)

Obecně platným předpokladem potvrzujícím cenové nabídky v přílohách práce je znatelně vyšší kupní cenová relace laserové technologie vůči technologii vodního paprsku. Pro určení hodinové sazby stroje je nutné stanovit fixní a variabilní náklady. Pro porovnání metod je nutné dodržet stejné předpoklady jako je třísměnný provoz s ročním časovým fondem 5 544 hodin a pronájmem výrobních prostor. V tabulce č. 14 jsou zobrazeny odhadované náklady na spotřební materiál.

Tabulka 14 Náklady na nástroje LBM

Náklady na spotřební materiál		
Čočka	40 000	Kč/rok
Tryska	30000	Kč/rok
Rošt stroje	10000	Kč/rok
Náklady za rok	80000	Kč/rok
Náklady za hodinu	14,43	Kč/hod.
Náklady za minutu	0,24	Kč/min.

Spotřeba stlačeného vzduchu uvedená v tabulce č. 15 je oproti vodnímu paprsku navýšena z důvodu většího využití, například při automatické výměně trysek a čištění.

Tabulka 15 Náklady na stlačený vzduch LBM

Náklady stlačený vzduch		
Cena stlačeného vzduchu	3	Kč/m <sup>3</sup>
Spotřeba	30 000	m <sup>3</sup> /rok
Roční cena stlač. vzduchu	63 000	Kč/rok
Koeficient využití	0,70	-
Cena stlač. vzduchu za hodinu	11,36	Kč/hod.
Cena stlač. vzduchu za minutu	0,19	Kč/min.

V tabulce č. 16 je vyčíslena spotřeba technologického plynu. Ke zjednodušení výpočtu je stanoven předpoklad řezání pouze konstrukčních ocelí za přítomnosti kyslíku. Koeficient využití 0,7 snižuje náklady z důvodu plánovaných prostojů nebo dělení menších tlouštěk materiálu. Průměrná spotřeba při řezání železných materiálu je 30 l·min<sup>-1</sup>. Orientační cena m<sup>3</sup> technologického plynu se pohybuje okolo 298 Kč.

Tabulka 16 Náklady na technologické plyny LBM

Náklady na technologické plyny		
Cena stlačeného kyslíku	298	m <sup>3</sup>
Spotřeba za rok	9979,20	m <sup>3</sup>
Koeficient využití	0,70	-
Cena za rok	2081661,12	Kč/rok
Cena za hodinu	375,48	Kč/hod.
Náklady tech. plynů za minutu	6,26	Kč/min.

Náklady na elektrickou energii jsou součástí tabulky č. 17. Pro porovnání výsledků s metodou vodního paprsku je zachována cena jedné kilowatthodiny. Do příkonu stroje je zahrnuto osvětlení a odsávání spalin.

Tabulka 17 Náklady na elektrickou energii LBM

Náklady na elektrickou energii		
Cena energie	5	Kč/kWh
Příkon stroje	60	kWh
Koeficient využití	0,70	%
Roční cena elektrické energie	1138536	Kč/rok
Hodinová cena energií	205,36	Kč/hod.
Náklady energie za minutu	3,42	Kč/min.

Náklady na opravu a údržbu jsou uvedeny v tabulce č. 18. V prvních pěti letech se nepředpokládá rozsáhlá oprava z důvodu nového zařízení. Finanční prostředky jsou v drtivé většině případech převáděny do fondu oprav, který je následně využit pro rozsáhlejší opravu či renovaci.

Tabulka 18 Náklady na opravu a údržbu LBM

Náklady na opravu a údržbu		
Roční náklady na opravy	85 000	Kč/rok
Roční náklady na údržbu	20 000	Kč/rok
Roční náklady celkem	105 000	Kč/rok
Hodinové náklady na údržbu	18,94	Kč/hod.
Náklady za minutu	0,32	Kč/min.

V tabulce č. 20 je zobrazen souhrn nákladů laserové technologie. Pro účely porovnání jsou ve výpočtech stanoveny stejné cenové sazby elektrické energie a nákladů na pracovní obsluhu. Režijní hodinová cena je stanovena ve výši 1 547 Kč.

Tabulka 19 Souhrn nákladů LBM

Souhrn nákladů na hodinu stroje		
Náklady na nástroje	14,43	Kč/hod.
Náklady stlačený vzduch	11,36	Kč/hod.
Náklady na technologické plyny	375,48	Kč/hod.
Náklady na elektrickou energii	205,36	Kč/hod.
Náklady na opravu a údržbu	18,94	Kč/hod.
Náklady na pracovní obsluhu	239,18	Kč/hod.
Pronájem haly	75,76	Kč/hod.
Náklady na amortizaci	606,00	Kč/hod.
Hodinová cena stroje	1546,51	Kč/hod.
Náklady za minutu	25,78	Kč/min.

### 8.3 Stanovení režijní ceny typového dílu

V předešlých kapitolách byly stanoveny režijní ceny použitých technologií. Pro demonstraci cenových nákladů, ziskovosti a časů vyhotovení byl zvolen typový díl z produkce firmy JK-Machinery viz příloha č. 5. Z kapitoly 6 (Vizuální vyhodnocení) byla vybrána rychlost s nejvyšší vizuální kvalitou řezu tloušťky 3 mm. U vodního paprsku řez č. 8, u laserové technologie řez č. 7. Stanoveným předpokladem je totožná pracovní plocha řezacích zařízení s velikostí 3000 x 1500 mm z důvodu stejného dávkového množství dílů. Obvod páleného dílu zobrazeného v příloze č. 5 je 1259 mm. Celkově lze z jednoho formátu plechu vyrobit 45 kusů polotovarů. Rozmístění na ploše stroje je graficky znázorněno v příloze č. 6. V tabulce č. 20 je znázorněna časová náročnost výroby s výslednými výrobními náklady se započteným děleným materiálem v hodnotě 53,5 Kč, který byl určen na základě hmotnosti dílu. Pro porovnání jsou uvedeny i ostatní tloušťky. Z uvedených dat je zřejmá významně vyšší cena při použití vodního paprsku, primárně díky delším výrobním časům. Z důvodu pozicování řezací hlavičky jsou vypočtené řezné doby jednoho kusu výrobku navýšeny o 5 sekund.

Tabulka 20 Časové zatížení

Závislost časového zatížení na rychlosti řezání								
Parametry	Vodní paprsek				Laserový paprsek			
Rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	330	135	115	70	2800	1440	960	360
Tloušťka [mm]	3,0	6,0	10,0	15,0	3,0	6,0	10,0	15,0
Čas dělení [s]	228,0	558,0	654,0	1080,0	24,0	54,0	78,0	210,0
Celkový čas dělení [s]	233,0	563,0	659,0	1085,0	29,0	59,0	83,0	215,0
Náklady dělení [Kč] 1 kus	47,4	114,5	134,0	220,6	12,5	25,4	35,7	92,4
Náklady celkové [Kč] 1 kus	100,9	-	-	-	66,0	-	-	-

V kapitole popisující technicko-ekonomické zhodnocení jsou stanoveny faktory tvořící variabilní a fixní náklady u použitých metod. Pro určení vztahu mezi náklady, tržbami a objemem produkce je využita metoda analýzy bodu zvratu viz rovnice č. 10. Pomocí této metody lze stanovit hypotézu, kolik má technologie vyrobit a vytvořit tak rovnováhu mezi náklady a tržbami. Vzhledem k rozdílným celkovým nákladům je stanovena prodejní marže 30 % u obou metod. Výsledná cena dílu děleného pomocí vodního paprsku je 131,2 Kč. U laserové technologie 85,8 Kč. Samotné výpočty byly realizovány pomocí programu Microsoft excel. [35]

Bod zvratu

$$Q = \frac{FN}{P - CN} \quad (10)$$

Kde: FN – fixní náklady

P – prodejní cena

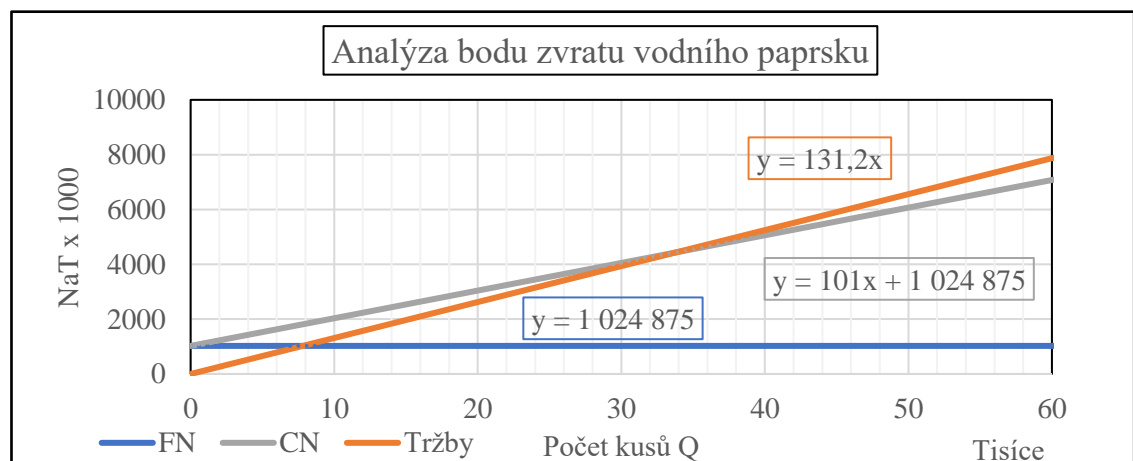
CN – celkové náklady

V grafu č. 15 je zobrazeno grafické vyjádření bodu zvratu technologie vodního paprsku. Hodnota fixních nákladů byla určena podílem pořizovací ceny stroje, délkou odpisového plánu a pronájmem prostor. Celkové náklady na jeden kus vypáleného dílu jsou součtem variabilních a fixních nákladů vztažených na jeden kus dílu. Celkově jsou koeficienty nákladů přepočteny na časovou náročnost výrobní operace. Rovnováha mezi celkovými náklady a tržbami je vypočtena dosazením do vzorce (10).

$$Q_{VP} = \frac{1024875}{131,2 - 100,9} = 33\,824 \text{ [Ks]}$$

Vzhledem k výrobnímu času jednoho kusu v tabulce. č. 20 je doba produkce k dosažení bodu zvratu vyčíslena na 2189 hodin.

Graf 15 Bod zvratu technologie vodního paprsku



Roční celková výrobní kapacita je stanovena podílem ročního hodinového fondu a časovou náročností dílu dle rovnice (11).



Roční výrobní kapacita  $Q_{rok} = \frac{T_c}{t_d} \cdot k$  (11)

Kde:  $T_c$  – roční časový fond [hod./rok]  
 $t_d$  – časová náročnost výroby jednoho dílu [hod.]  
 $k$  – koeficient vytíženosti a prostojů [-]

Dosažením do vzorce (11) lze stanovit roční kapacitu:

$$Q_{rok} = \frac{5544}{\frac{235}{3600}} \cdot 0,7 = 59\,961 \text{ [Ks]}$$

Roční zisk lze stanovit dle rovnice (12) součinem roční produkce a obchodní marže vztahované na jeden výrobek.

Roční zisk  $Z = Q_{rok} \cdot (P - CN)$  (12)

Kde:  $Q_{rok}$  – roční produkce  
 $P$  – prodejní cena jednoho výrobku  
 $CN$  – celkové náklady jednoho výrobku

Dosažením do rovnice (12) lze stanovit výši ročního zisku:

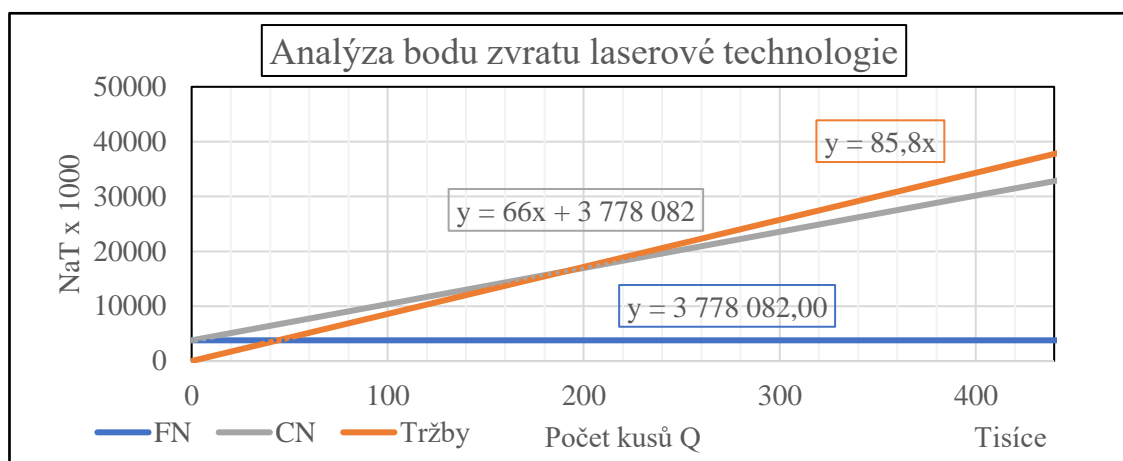
$$Z = 59961 \cdot (131,2 - 100,9) = 1\,816\,818 \text{ Kč}$$

V druhém případě v grafu č. 16 je zobrazena analýza bodu zvratu v případě laserového paprsku. Bod zvratu vypočtený dle rovnice (10) je stanoven hodnotou:

$$Q_{VP} = \frac{3778082}{85,8 - 66} = 190\,812 \text{ [Ks]}$$

Výrobní čas k dosažení bodu zvratu je s úvahou tabulky č. 20 stanoven na 1537 hodin provozu. Již z tohoto výsledku je patrná v případě této tloušťky materiálu, rychlejší produkce oproti vodnímu paprsku.

Graf 16 Bod zvratu technologie laserového paprsku



Stanovení ročního počtu kusů lze vyčíslit obdobným způsobem jako u technologie vodního paprsku dle rovnice (11).

$$Q_{rok} = \frac{5544}{\frac{29}{3600}} \cdot 0,7 = 481\,754 \text{ [Ks]}$$

Dosazení do rovnice (12) lze stanovit roční zisk laserové technologie:

$$Z = 481754 \cdot (85,8 - 66) = 9\,583\,729 \text{ Kč}$$

Stanovení technicko-ekonomických parametrů může být ovlivněno mnoha faktory. V drtivé většině případech jsou výrobní náklady strojírenských podniků firemním tajemstvím. Z tohoto důvodu nelze určit všechny vstupní parametry přesnou hodnotou. V mnoha případech jsou stanoveny fundovaným odhadem. V porovnání bodu zvratu obou technologií je zřejmá vyšší četnost výrobků k dosažení bodu zvratu u laserové technologie, zejména díky vysoké vstupní investici. Za předpokladu určení pětiletého odpisového plánu a stanovené 30 % prodejní marže z výrobních nákladů lze stanovit, že metoda laserového paprsku disponuje vyšším ročním ziskem oproti technologii vodního paprsku.

## 9 Závěr

V teoretické části diplomové práce byly shrnuty a shromážděny základní metody dělení kovových materiálů na poli konvenčních a nekonvenčních technologií se zaměřením na technologii vodního paprsku využití v experimentální části. Vzhledem k povaze experimentální části byla pro porovnání metod zařazena, dnes již nejpoužívanější metoda dělení kovových materiálů, technologie laserového paprsku. V návaznosti byly popsány historické milníky, díky kterým vývoj technologií směřoval do podoby, jak ji již známe dnes. Dále jsou popsány jednotlivé druhy laserového a vodního paprsku s důrazem na funkční a praktické využití. Vzhledem k samotné činnosti zařízení jsou určeny a popsány komponenty, které tvoří funkční části celkového systému strojů.

Zkoumaným problémem v experimentální části je stanovení procesu řezání otěruvzdorného materiálu Hardox 450. Pro určení hodnotících ukazatelů byly vytvořeny experimentální vzorky s tloušťkou 3, 6, 10, 15 mm s využitím strojního vybavení vodního paprsku značky AWAC zakoupené Katedrou materiálu a strojírenské technologie a laserové technologie Trumpf 3030 zakoupené firmou JS-Laser sídlící v Plané nad Lužnicí. Vyhodnocení procesu řezání probíhalo stanovením šířky řezné spáry, vizuálním zhodnocením kvality řezu a dopočtem úhlu řezu. Při experimentálním zhodnocení šířky řezné spáry byla v případě vodního paprsku zjištěna a potvrzena prvotní hypotéza vyplývající z teorie řezu, neboli průměrná šíře řezné spáry se zvyšuje s klesající rychlostí posuvu řezací hlavy. V porovnání s laserovou technologií byly výsledky odlišné zejména u tloušťky 3 mm a to díky auto-fokusačnímu systému, který mění polohu ohniska pro dosažení lepších výsledků. Celkově laserová technologie disponuje nižšími hodnotami průměrné šíře spáry vůči vodnímu paprsku, které se v absolutním rozdílu mezi šířkou vstupní a výstupní strany blíží ke kolmému řezu. Z hlediska vizuální kvality byly stanoveny ukazatelé, které zhodnocují vizuální kvalitu řezu v rozsahu Q1 až Q5. Vyhodnocení experimentálních vzorků poukázalo na rozdílnou vizuální kvalitu řezů u jednotlivých tloušťek v průběhu zvyšování rychlosti posuvu, zejména změnou tvaru řezu a tepelným ovlivněním řezné hrany v případě laserového paprsku zejména u vyšších rychlostí řezání. Dopčet úhlu řezu byl stanoven pomocí goniometrických funkcí za přítomnosti naměřených hodnot ze vstupní a výstupní šíře řezných spár. Bylo zjištěno, že laserový paprsek disponuje celkově menšími úhly řezu v porovnání s vodním paprskem, které jsou orientovány v drtivě většině případů na výstupní stranu materiálu.

Finanční náročnost jednotlivých technologií je základním ukazatelem pro koupi zařízení. Obecně lze tvrdit, že pro určení hodinové sazby stroje je nutné vycházet z jednotlivých výrobních dílčích nákladů, které jsou v drtivé většině případech firemním tajemstvím. Pro demonstraci ekonomických ukazatelů byly pro jednotlivé stroje vytvořeny cenové nabídky od výrobců Trumpf a AWAC s totožnou pracovní plochou. Na základě odpisů v pětiletém plánu, fixních a variabilních nákladů dané produkce byly stanoveny hodinové sazby strojů za předpokladu třísměnného provozu. Pro vyhodnocení ziskovosti byl využit typový díl, a na základě metody bodu zvratu určena ziskovost v ročním hodinovém fondu. Již z cenových nabídek je zřejmé, že metoda vodního paprsku disponuje výrazně nižšími pořizovacími náklady oproti laserové technologii. Z výsledků lze stanovit, že velikost produkce k dosažení bodu zvratu je významně vyšší u metody laserového paprsku, díky vyšší vstupní investici. V tomto exemplárním případě za předpokladu roční produkce byl zisk laserové technologie výrazně vyšší oproti vodnímu paprsku, a to primárně díky nízkým časům na výrobu.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- [1] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienaľa, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Technologie obrábění: Hoblování a obrážení, Protahování a protlačování, Dělení materiálu*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, ©2013. ISBN 978-80-248-3012-4. Dostupné také z: [http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2004%20Hoblov%C3%A1n%C3%AD%20a%20obr%C3%A1b%C5%BEen%C3%AD,%20Protahov%C3%A1n%C3%AD%20a%20protla%C4%8Dov%C3%A1n%C3%AD,%20D%C4%9Blen%C3%AD%20materi%C3%A1lu.pdf](http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_001/Technologie%20Obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD/02%20Text%20pro%20e-learning/Technologie%20obrabeni%2004%20Hoblov%C3%A1n%C3%AD%20a%20obr%C3%A1b%C5%BEen%C3%AD,%20Protahov%C3%A1n%C3%AD%20a%20protla%C4%8Dov%C3%A1n%C3%AD,%20D%C4%9Blen%C3%AD%20materi%C3%A1lu.pdf).
- [3] HÍREŠ, Ondrej, Michal HATALA a Sergej HLOCH. *Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom*. Ostrava: Sergej Hloch, 2007. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [4] MIČIETOVÁ, Anna. *Nekonvenčné metódy obrábania*. Bratislava: EDIS, 2001. ISBN 80-7100-853-2.
- [5] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi: WJM*. Bratislava: Mračko, 1998. ISBN 80-8057-091-4.
- [6] MOHAMED, Mostafa Ahmed Kamel. *Waterjet Cutting Up to 900 MPa*. Hannover: Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau, 2004. Doktorská práce. Dostupné také z: <https://d-nb.info/972544402/34>.
- [7] SUCHÁNEK, Libor. *Vliv změny parametrů řezného procesu na kvalitu řezu při nekonvenčním obrábění vodním abrazivním paprskem*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2017. Diplomová práce. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/0s1oly/>.
- [8] KMEC, Ján. *Delenie materiálov*. 2. Vyd. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2014. ISBN 978-80-553-1872-1.
- [9] KRAJNÝ, Zdenko. *Vysokotlakový vodný lúč – WJM*. Bratislava: STU, 2011. ISBN 978-80-227-3535-3.
- [10] MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.

- [11] KARKOVÁ, Monika. Abrazívne materiály využívané pri delení materiálov AWJ technológiou. *Inflow: transfer inovácií* [online]. 2013, č. 25, s. 146-149. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/25-2013/pdf/146-149.pdf>.
- [12] GUMEX. Řezání vodním paprskem. *Gumex.cz* [online]. ©1995-2020 [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>.
- [13] RADOVANIC, Miroslav a Eugen HERGHELEGIU. Perpendicularity Deviation And Surface Roughness In Abrasive Water Jet Cutting Of Carbon Steel. *Inflow: nonconventional technologies review* [online]. June, 2016. s. 39-44. [cit. 2019-10-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/321777070\\_PERPENDICULARITY\\_DEVIATION\\_AND\\_SURFACE\\_ROUGHNESS\\_IN\\_ABRASIVE\\_WATER\\_JET\\_CUTTING\\_OF\\_CARBON\\_STEEL](https://www.researchgate.net/publication/321777070_PERPENDICULARITY_DEVIATION_AND_SURFACE_ROUGHNESS_IN_ABRASIVE_WATER_JET_CUTTING_OF_CARBON_STEEL).
- [14] LEONARDO TECHNOLOGY. Historie vývoje laseru. *Lt.cz* [online]. ©2002-2019 [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>.
- [15] LASERY. Laser. *Lasery.wz.cz* [online]. [cit. 2019-12-01]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/>.
- [16] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika: lasery : kvantové generátory světla*. Praha: Idea servis, 1998. ISBN 80-85970-21-x.
- [17] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. In: *Lao* [online]. 19. února, 2013 [cit. 2019-10-08]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>.
- [18] TRUMPF. *Technický manuál laseru trumpf 3030*. Trumpf, ©2016.
- [19] VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [20] LOUKOTA, Zbyněk. *Dělení ocelových plechů*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2017. Diplomová práce.
- [21] ČERNÝ, Václav. Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím. *Inflow: Elektro* [online]. 2005, č. 4. [cit. 2019-10-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/laser-od-objevu-k-prumyslovym-aplikacim--13653>.

- [22] LEIENDECKER, Charlie. Maximizing laser cutting efficiency. *In: Van Industries* [online]. January 20, 2017 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.vanindustriesinc.com/5-methods-used-in-industrial-laser-cutting>.
- [23] ESAB KNOWLEDGE CENTER. How does the laser process work? *Esabna.com* [online]. ©2020 [cit. 2019-09-15]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/laser-cutting-process.cfm>.
- [24] RUANO, Kricia. Helium Neon Lasers. *In: Research Gate* [online]. May 2, 2017 [cit. 2019-09-25]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/329717995\\_Helium\\_neon\\_lasers\\_literature\\_research\\_paper](https://www.researchgate.net/publication/329717995_Helium_neon_lasers_literature_research_paper).
- [25] LASCAM. Rozdělení laserů. *Lascam.cz* [online]. ©2019 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>.
- [26] LEONARDO TECHNOLOGY. Princip vláknového - FIBER LASERU. *Lt.cz* [online]. ©2002-2019 [cit. 2019-20-01]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>.
- [27] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění II: obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3944-8.
- [28] ISNER, J. M., R. F. DONALDSON, L. I. DECKELBAUM, R. H. CLARKE, S. M. LALIBERTE, A. A. UCCI, D. N. SALEM a M. A. KONSTAM. The excimer laser: gross, light microscopic and ultrastructural analysis of potential advantages for use in laser therapy of cardiovascular disease. *Inflow: journal od the american college of cardiology* [online]. 1985, Nov;6(5):1102-9 [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4045033>.
- [29] VODNÍ PAPERSEK. Princip řezání vodním paprskem. *Rezani-cnc.cz* [online]. ©2016 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>.
- [30] PTV. PTV JETS - 2.2/60 bez krytáže. *Ptv.cz* [online]. ©2014 [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <http://www.ptv.cz/ptv-jets-2-2/60-bez-krytaze/>.
- [31] PRECISION. The History of Waterjet Technology. *H2ojet.com* [online]. [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://www.h2ojet.com/news/the-history-of-waterjet-technology>.
- [32] KRÁL, Bohumil. *Manažerské účetnictví*. 4. vyd. Praha: Management Press, 2018. ISBN 978-80-7261-568-1.

- [33] PORTÁL POHODA. Třídění hmotného majetku do odpisových skupin. *Zakony.pohoda.cz* [online]. ©2012 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://zakony.pohoda.cz/danove-a-financni-pravo/zakon-o-danich-z-prijmu/trideni-hmotneho-majetku-do-odpisovych-skupin/>.
- [34] DANĚ, ÚČETNICTVÍ, PRÁVO, PRÁCE A MZDY PRO PROFESIONÁLY. Daňové odpisy hmotného majetku. *Du.cz* [online]. ©1997-2020 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.du.cz/33/danove-odpisy-hmotneho-majetku-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EtEpZI-9ejV4tUkd8oh7ETk/?query=Da%F2ov%E9%20odpisy%20hmotn%E9ho%20majetku&serp=1>.
- [35] MARKETING MIND. Bod zvratu. *Marketingmind.cz* [online]. ©2017-2019 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.marketingmind.cz/bod-zvratu-priklad-vzorec-vypocet-graf/>.
- [36] PWJ PERFORMANCE WATERJET. How Waterjet Cutting Works. *Performancewaterjet.com* [online]. ©2015 [cit. 2019-12-21]. Dostupné z: <https://www.performancewaterjet.com.au/how-waterjet-works>.
- [37] PLEYER, Martin. *Dělení kovových materiálů vodním paprskem*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012. Diplomová práce.



## 11 Přílohy

### Příloha č.1 naměřené hodnoty metody vodní paprsek

Naměřené hodnoty vzorku 3 mm lícové strany [mm]													
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	50	90	130	170	210	250	290	330	370	410	450	490	530
Měření	1	1,95	1,88	1,57	1,66	1,70	1,60	1,76	1,41	1,48	1,34		
	2	2,09	1,67	1,61	1,59	1,70	1,61	1,69	1,32	1,34	1,25		
	3	1,93	1,45	1,62	1,59	1,77	1,48	1,70	1,51	1,43	1,38		
	4	1,91	1,79	1,52	1,67	1,92	1,92	1,75	1,48	1,45	1,42		
	5	2,04	1,79	1,72	1,70	1,72	1,79	1,76	1,66	1,45	1,56		
	6	2,06	1,66	1,89	1,59	1,80	1,61	1,73	1,42	1,55	1,57		
	7	1,90	1,70	1,76	1,54	1,86	1,62	1,55	1,62	1,45	1,52		
	8	2,03	1,66	1,77	1,59	1,71	1,77	1,63	1,67	1,66	1,48		
	9	1,98	1,67	1,78	1,59	1,62	1,73	1,87	1,57	1,63	1,52		
	10	1,98	1,69	1,90	1,67	2,08	1,70	1,87	1,66	1,59	1,49		
	11	2,10	1,86	1,78	1,68	1,91	1,63	1,66	1,60	1,55	1,43		
Aritmetický průměr	2,00	1,71	1,72	1,62	1,80	1,68	1,72	1,54	1,51	1,45			
Chyba měření	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03			
Směrodatná odchyl.	0,07	0,11	0,12	0,05	0,13	0,11	0,09	0,11	0,09	0,09			

Naměřené hodnoty vzorku 6 mm lícové strany [mm]													
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	35	60	85	110	135	160	185	210	235	260	285	
Měření	1	1,87	1,73	1,71	1,61	1,62	1,58	1,60	1,62				
	2	1,79	1,69	1,76	1,52	1,71	1,57	1,62	1,61				
	3	1,74	1,84	1,70	1,61	1,55	1,63	1,70	1,57				
	4	1,77	1,87	1,82	1,53	1,55	1,65	1,66	1,57				
	5	1,81	1,74	1,71	1,56	1,59	1,52	1,73	1,66				
	6	1,69	1,77	1,86	1,55	1,59	1,55	1,66	1,61				
	7	1,80	1,94	1,85	1,59	1,59	1,55	1,69	1,66				
	8	1,81	1,89	1,79	1,64	1,59	1,60	1,73	1,52				
	9	1,62	1,77	1,86	1,76	1,54	1,60	1,57	1,52				
	10	1,70	1,93	1,76	1,71	1,56	1,55	1,52	1,62				
	11	1,98	1,93	1,79	1,62	1,55	1,53	1,51	1,55				
Aritmetický průměr	1,78	1,83	1,78	1,61	1,59	1,58	1,64	1,59					
Chyba měření	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01					
Směrodatná odchyl.	0,09	0,09	0,06	0,07	0,05	0,04	0,07	0,05					

Naměřené hodnoty vzorku 10 mm lícové strany [mm]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160
Měření	1	1,87	1,66	1,60	1,52	1,56	1,52	1,46	1,50	1,44	1,44
	2	1,97	1,65	1,49	1,48	1,50	1,45	1,48	1,51	1,45	1,41
	3	1,85	1,53	1,49	1,58	1,50	1,44	1,49	1,47	1,45	1,42
	4	1,93	1,68	1,52	1,59	1,44	1,47	1,48	1,41	1,41	1,42
	5	2,01	1,66	1,51	1,51	1,46	1,46	1,52	1,41	1,43	1,41
	6	1,93	1,50	1,48	1,51	1,43	1,46	1,48	1,42	1,46	1,43
	7	1,87	1,72	1,50	1,59	1,45	1,48	1,58	1,43	1,41	1,42
	8	1,81	1,57	1,48	1,55	1,55	1,46	1,63	1,45	1,44	1,46
	9	1,73	1,57	1,57	1,47	1,50	1,53	1,59	1,45	1,46	1,48
	10	1,96	1,61	1,52	1,58	1,46	1,49	1,46	1,43	1,37	1,38
	11	1,75	1,61	1,70	1,52	1,41	1,44	1,48	1,45	1,39	1,39
Aritmetický průměr	1,88	1,61	1,53	1,54	1,48	1,47	1,51	1,45	1,43	1,42	
Chyba měření	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	
Směrodatná odchyl.	0,09	0,06	0,06	0,04	0,05	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	

Naměřené hodnoty vzorku 15 mm lícové strany [mm]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Měření	1	1,72	1,63	1,69	1,41	1,54	1,50	1,50	1,56	1,50	
	2	1,88	1,55	1,58	1,49	1,44	1,47	1,55	1,55	1,51	
	3	1,75	1,59	1,58	1,42	1,60	1,46	1,62	1,41	1,49	
	4	1,84	1,62	1,59	1,51	1,50	1,47	1,53	1,55	1,62	
	5	1,85	1,64	1,58	1,61	1,50	1,45	1,50	1,45	1,52	
	6	1,91	1,69	1,66	1,54	1,53	1,38	1,52	1,45	1,55	
	7	1,86	1,70	1,66	1,45	1,56	1,55	1,55	1,56	1,47	
	8	1,74	1,72	1,68	1,43	1,47	1,58	1,56	1,51	1,50	
	9	1,69	1,60	1,62	1,47	1,51	1,53	1,52	1,52	1,45	
	10	1,77	1,62	1,61	1,48	1,55	1,53	1,59	1,44	1,58	
	11	1,85	1,64	1,64	1,53	1,53	1,54	1,59	1,52	1,53	
Aritmetický průměr	1,81	1,64	1,63	1,49	1,52	1,50	1,55	1,50	1,52		
Chyba měření	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01		
Směrodatná odchyl.	0,07	0,05	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05		

Naměřené hodnoty vzorku 3 mm rubové strany [mm]													
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	50	90	130	170	210	250	290	330	370	410	450	490	530
Měření	1	1,08	0,99	0,88	0,87	0,86	0,80	0,80	0,80	0,58	0,62		
	2	1,06	1,06	0,93	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,61	0,61		
	3	1,09	0,98	0,90	0,87	0,82	0,81	0,75	0,71	0,52	0,59		
	4	1,08	0,99	0,92	0,84	0,86	0,87	0,77	0,75	0,54	0,38		
	5	1,10	0,99	0,95	0,84	0,82	0,77	0,76	0,72	0,55	0,59		
	6	1,12	0,95	0,99	0,82	0,85	0,75	0,79	0,58	0,59	0,54		
	7	1,06	0,95	0,91	0,86	0,86	0,82	0,77	0,45	0,62	0,47		
	8	1,09	0,95	0,90	0,89	0,82	0,77	0,73	0,66	0,61	0,59		
	9	1,08	0,93	0,98	0,89	0,84	0,78	0,79	0,70	0,63	0,32		
	10	1,08	1,02	0,96	0,88	0,87	0,86	0,80	0,72	0,70	0,55		
	11	1,09	1,03	0,98	0,88	0,87	0,76	0,80	0,78	0,87	0,74		
Aritmetický průměr	1,08	0,99	0,94	0,86	0,85	0,80	0,78	0,69	0,62	0,55			
Chyba měření	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,04			
Směrodatná odchyl.	0,02	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04	0,02	0,09	0,09	0,11			

Naměřené hodnoty vzorku 6 mm rubové strany [mm]													
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	35	60	85	110	135	160	185	210	235	260	285	
Měření	1	1,47	1,23	1,09	0,90	0,75	0,62	0,56	0,39				
	2	1,48	1,18	1,15	0,87	0,78	0,58	0,55	0,40				
	3	1,44	1,24	1,13	0,93	0,73	0,62	0,58	0,48				
	4	1,46	1,32	1,12	0,90	0,70	0,65	0,66	0,62				
	5	1,56	1,20	1,09	0,92	0,69	0,60	0,66	0,51				
	6	1,43	1,26	1,17	0,92	0,70	0,62	0,70	0,52				
	7	1,52	1,31	1,14	1,02	0,74	0,63	0,70	0,49				
	8	1,50	1,28	1,12	0,97	0,68	0,60	0,68	0,56				
	9	1,44	1,23	1,05	1,05	0,71	0,65	0,62	0,48				
	10	1,52	1,23	1,14	1,00	0,76	0,74	0,57	0,52				
	11	1,40	1,30	1,15	1,02	0,79	0,76	0,55	0,62				
Aritmetický průměr	1,47	1,25	1,12	0,95	0,73	0,64	0,62	0,51					
Chyba měření	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02					
Směrodatná odchyl.	0,04	0,04	0,03	0,06	0,04	0,05	0,06	0,07					

Naměřené hodnoty vzorku 10 mm rubové strany [mm]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160
Měření	1	1,45	1,20	0,99	0,94	1,00	0,80	0,65	0,48	0,62	0,74
	2	1,43	1,16	0,98	0,96	0,91	0,77	0,67	0,48	0,59	0,66
	3	1,35	1,20	1,00	1,05	0,84	0,78	0,66	0,63	0,84	0,67
	4	1,32	1,22	1,08	1,01	0,77	0,73	0,68	0,55	0,62	0,76
	5	1,48	1,23	1,05	0,89	0,84	0,77	0,95	0,55	0,62	0,90
	6	1,39	1,23	1,09	0,97	0,84	0,80	0,77	0,65	0,63	0,55
	7	1,44	1,34	1,12	0,95	0,87	0,76	0,66	0,60	0,45	0,84
	8	1,45	1,09	1,06	0,86	0,82	0,70	0,80	0,62	0,62	0,80
	9	1,41	1,11	1,14	0,95	0,85	0,81	0,96	0,65	0,70	0,59
	10	1,40	1,19	1,19	1,04	0,74	0,72	0,68	0,70	0,51	0,51
	11	1,55	1,25	1,02	1,06	0,71	0,67	0,65	0,62	0,46	0,66
Aritmetický průměr	1,42	1,20	1,07	0,97	0,84	0,76	0,74	0,59	0,61	0,70	
Chyba měření	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02	0,03	0,04	
Směrodatná odchyl.	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,04	0,11	0,07	0,10	0,12	

Naměřené hodnoty vzorku 15 mm rubové strany [mm]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Měření	1	1,36	1,15	1,02	0,86	0,69	0,59	0,69	0,65	0,72	
	2	1,43	1,11	1,08	0,90	0,79	0,65	0,69	0,83	0,83	
	3	1,40	1,17	1,07	0,80	0,71	0,74	1,07	0,96	0,64	
	4	1,50	1,21	1,12	0,85	0,78	0,98	0,80	0,91	0,98	
	5	1,36	1,16	1,14	0,71	0,79	0,68	0,64	0,98	1,33	
	6	1,55	1,16	1,09	0,75	0,79	0,75	0,95	0,81	0,55	
	7	1,49	1,29	1,02	0,88	0,75	0,60	0,60	0,86	0,9	
	8	1,33	1,30	1,08	1,02	0,85	0,84	0,72	0,66	0,76	
	9	1,41	1,31	1,02	0,72	0,87	0,70	0,80	1,03	1,06	
	10	1,51	1,26	1,16	0,89	0,76	0,74	0,79	0,76	0,54	
	11	1,41	1,24	1,09	0,90	1,05	0,82	0,70	0,81	0,8	
Aritmetický průměr	1,43	1,21	1,08	0,84	0,80	0,74	0,77	0,84	0,83		
Chyba měření	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,07		
Směrodatná odchyl.	0,07	0,07	0,05	0,09	0,09	0,11	0,13	0,12	0,22		

## Příloha č.2 naměřené hodnoty metody laser

Naměřené hodnoty vzorku 3 mm lícové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	700	1050	1400	1750	2100	2450	2800	3150	3500	3850
Pořadí měření	1	0,40	0,43	0,42	0,43	0,39	0,43	0,37	0,51	0,43
	2	0,43	0,43	0,46	0,44	0,41	0,48	0,37	0,57	0,45
	3	0,41	0,46	0,45	0,44	0,41	0,44	0,37	0,49	0,48
	4	0,42	0,48	0,43	0,42	0,41	0,42	0,37	0,48	0,50
	5	0,43	0,45	0,44	0,41	0,44	0,42	0,41	0,45	0,51
	6	0,42	0,48	0,45	0,41	0,41	0,41	0,38	0,45	0,54
	7	0,44	0,42	0,45	0,40	0,43	0,41	0,39	0,45	0,51
	8	0,41	0,44	0,47	0,42	0,45	0,41	0,41	0,44	0,51
	9	0,41	0,44	0,44	0,42	0,41	0,38	0,41	0,42	0,57
	10	0,45	0,43	0,44	0,43	0,43	0,41	0,42	0,41	0,60
	11	0,42	0,48	0,45	0,43	0,45	0,41	0,42	0,41	0,55
Aritmetický průměr	0,42	0,45	0,45	0,42	0,42	0,42	0,39	0,46	0,51	
Chyba měření	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	
Směrodatná odchyl.	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	

Naměřené hodnoty vzorku 6 mm lícové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400	2640
Měření	1	0,77	0,69	0,65	0,66	0,59	0,55	0,62		
	2	0,70	0,70	0,66	0,58	0,59	0,58	0,63		
	3	0,79	0,70	0,70	0,59	0,55	0,55	0,62		
	4	0,73	0,73	0,67	0,59	0,57	0,55	0,60		
	5	0,77	0,69	0,66	0,58	0,58	0,53	0,68		
	6	0,76	0,70	0,66	0,58	0,56	0,54	0,66		
	7	0,75	0,70	0,66	0,60	0,55	0,61	0,69		
	8	0,70	0,70	0,65	0,60	0,55	0,58	0,69		
	9	0,70	0,69	0,63	0,59	0,54	0,59	0,66		
	10	0,63	0,67	0,59	0,53	0,55	0,55	0,59		
	11	0,69	0,60	0,54	0,54	0,55	0,59	0,61		
Aritmetický průměr	0,73	0,69	0,64	0,59	0,56	0,57	0,64			
Chyba měření	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			
Směrodatná odchyl.	0,045	0,031	0,041	0,032	0,017	0,024	0,035			

Naměřené hodnoty vzorku 10 mm lícové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600	1760
Měření	1	0,55	0,55	0,52	0,50	0,51	0,55			
	2	0,48	0,51	0,51	0,50	0,48	0,50			
	3	0,53	0,55	0,54	0,52	0,49	0,48			
	4	0,54	0,53	0,53	0,50	0,53	0,54			
	5	0,53	0,57	0,55	0,53	0,52	0,55			
	6	0,59	0,62	0,54	0,54	0,50	0,52			
	7	0,56	0,62	0,54	0,54	0,52	0,52			
	8	0,57	0,59	0,53	0,55	0,57	0,54			
	9	0,56	0,62	0,57	0,55	0,52	0,53			
	10	0,59	0,59	0,55	0,48	0,53	0,52			
	11	0,56	0,62	0,57	0,55	0,55	0,53			
Aritmetický průměr	0,55	0,58	0,54	0,52	0,52	0,53				
Chyba měření	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01				
Směrodatná odchyl.	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02				

Naměřené hodnoty vzorku 15 mm lícové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	180	270	360	450	540	630	720	810	900	990
Měření	1	0,80	0,84	0,80	0,77					
	2	0,84	0,84	0,75	0,77					
	3	0,78	0,80	0,73	0,79					
	4	0,80	0,81	0,74	0,73					
	5	0,70	0,77	0,71	0,77					
	6	0,77	0,71	0,66	0,77					
	7	0,71	0,74	0,75	0,74					
	8	0,62	0,73	0,69	0,75					
	9	0,73	0,69	0,66	0,70					
	10	0,73	0,76	0,67	0,75					
	11	0,73	0,70	0,74	0,70					
Aritmetický průměr	0,75	0,76	0,72	0,75						
Chyba měření	0,02	0,02	0,01	0,01						
Směrodatná odchyl.	0,058	0,052	0,042	0,028						

Naměřené hodnoty vzorku 3 mm rubové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	700	1050	1400	1750	2100	2450	2800	3150	3500	3850
Měření	1	0,50	0,48	0,51	0,53	0,52	0,56	0,52	0,63	0,6
	2	0,49	0,51	0,49	0,5	0,49	0,56	0,52	0,6	0,6
	3	0,48	0,49	0,48	0,5	0,52	0,53	0,54	0,59	0,55
	4	0,5	0,5	0,52	0,51	0,55	0,53	0,54	0,57	0,56
	5	0,5	0,48	0,51	0,52	0,5	0,52	0,55	0,58	0,53
	6	0,48	0,48	0,52	0,49	0,53	0,52	0,54	0,56	0,6
	7	0,51	0,49	0,52	0,51	0,53	0,52	0,55	0,59	0,52
	8	0,47	0,5	0,52	0,49	0,52	0,53	0,57	0,56	0,61
	9	0,5	0,5	0,53	0,5	0,52	0,52	0,57	0,57	0,69
	10	0,52	0,49	0,52	0,51	0,55	0,52	0,58	0,57	0,46
	11	0,52	0,52	0,55	0,53	0,55	0,54	0,57	0,55	0,52
Aritmetický průměr	0,50	0,49	0,52	0,51	0,53	0,53	0,55	0,58	0,57	
Chyba měření	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	
Směrodatná odchyl.	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,06	

Naměřené hodnoty vzorku 6 mm rubové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400	2640
Měření	1	0,73	0,74	0,70	0,61	0,57	0,58	0,62		
	2	1,01	0,74	0,62	0,60	0,57	0,69	0,66		
	3	1,00	0,74	0,61	0,60	0,55	0,61	0,70		
	4	1,20	0,70	0,59	0,52	0,55	0,65	0,73		
	5	1,07	0,66	0,59	0,58	0,56	0,62	0,77		
	6	1,12	0,69	0,59	0,54	0,55	0,62	0,77		
	7	1,02	0,71	0,54	0,54	0,52	0,66	0,77		
	8	1,14	0,73	0,56	0,53	0,53	0,60	0,75		
	9	1,05	0,78	0,55	0,55	0,52	0,58	0,73		
	10	1,09	0,65	0,56	0,52	0,53	0,60	0,65		
	11	0,88	0,59	0,57	0,52	0,52	0,64	0,77		
Aritmetický průměr	1,03	0,70	0,59	0,56	0,54	0,62	0,72			
Chyba měření	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02			
Směrodatná odchyl.	0,12	0,05	0,04	0,03	0,02	0,03	0,05			

Naměřené hodnoty vzorku 10 mm rubové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600	1760
Měření	1	0,59	0,69	0,52	0,59	0,62	0,77			
	2	0,66	0,63	0,52	0,57	0,64	0,73			
	3	0,62	0,64	0,55	0,58	0,70	0,84			
	4	0,55	0,63	0,59	0,57	0,66	0,73			
	5	0,60	0,64	0,52	0,59	0,66	0,72			
	6	0,66	0,61	0,55	0,61	0,62	0,74			
	7	0,66	0,64	0,57	0,64	0,65	0,73			
	8	0,67	0,68	0,56	0,59	0,68	0,70			
	9	0,61	0,69	0,61	0,62	0,63	0,73			
	10	0,57	0,62	0,52	0,59	0,61	0,78			
	11	0,62	0,66	0,59	0,58	0,62	0,77			
Aritmetický průměr	0,62	0,65	0,55	0,59	0,64	0,75				
Chyba měření	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01				
Směrodatná odchyl.	0,038	0,027	0,031	0,021	0,027	0,037				

Naměřené hodnoty vzorku 15 mm rubové strany [mm]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	180	270	360	450	540	630	720	810	900	990
Měření	1	2,02	1,50	1,18	1,09					
	2	2,15	1,81	1,27	1,30					
	3	2,05	1,83	1,36	1,27					
	4	2,14	1,54	1,27	0,98					
	5	2,44	1,59	1,21	0,99					
	6	1,66	1,87	1,26	1,00					
	7	2,21	1,92	1,37	0,95					
	8	2,22	1,84	1,29	0,99					
	9	2,11	1,55	1,23	0,90					
	10	2,12	1,46	1,33	0,87					
	11	1,97	1,59	1,48	0,95					
Aritmetický průměr	2,10	1,68	1,30	1,03						
Chyba měření	0,06	0,05	0,03	0,04						
Směrodatná odchyl.	0,182	0,163	0,081	0,133						



#### Příloha 4 dopočet úhlu řezu technologie vodního paprsku

Dopočet úhlu řezu vzorku 3 mm s využitím technologie vodního paprsku [°]														
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	50	90	130	170	210	250	290	330	370	410	450	490	530	
Měření	1	8,37	8,56	6,62	7,59	8,07	7,69	9,25	5,85	8,66	6,91			
	2	9,93	5,85	6,52	7,01	8,37	7,78	8,85	5,56	7,01	6,13			
	3	8,07	4,50	6,91	6,91	9,15	6,42	9,15	7,69	8,76	7,59			
	4	7,98	7,69	5,75	7,98	10,23	10,13	9,44	7,01	8,76	10,03			
	5	9,05	7,69	7,39	8,27	8,66	9,84	9,64	9,05	8,66	9,34			
	6	9,05	6,81	8,66	7,39	9,15	8,27	9,05	8,07	9,25	9,93			
	7	8,07	7,20	8,17	6,52	9,64	7,69	7,49	11,32	7,98	10,13			
	8	9,05	6,81	8,37	6,72	8,56	9,64	8,66	9,74	10,13	8,56			
	9	8,66	7,10	7,69	6,72	7,49	9,15	10,43	8,37	9,64	11,61			
	10	8,66	6,42	9,05	7,59	11,71	8,07	10,33	9,05	8,56	9,05			
	11	9,74	7,98	7,69	7,69	10,03	8,37	8,27	7,88	6,52	6,62			
Aritmetický průměr	8,78	6,96	7,53	7,31	9,19	8,46	9,14	8,14	8,54	8,72				
Směrodatná odchyl.	0,63	1,06	0,96	0,54	1,12	1,07	0,81	1,59	1,00	1,64				

Dopočet úhlu řezu vzorku 6 mm s využitím technologie vodního paprsku [°]													
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	35	60	85	110	135	160	185	210	235	260	285	
Měření	1	1,91	2,39	2,96	3,39	4,16	4,59	4,98	5,89				
	2	1,48	2,44	2,92	3,11	4,45	4,74	5,12	5,80				
	3	1,43	2,87	2,72	3,25	3,92	4,83	5,36	5,22				
	4	1,48	2,63	3,35	3,01	4,07	4,79	4,79	4,55				
	5	1,19	2,58	2,96	3,06	4,31	4,40	5,12	5,51				
	6	1,24	2,44	3,30	3,01	4,26	4,45	4,59	5,22				
	7	1,34	3,01	3,39	2,72	4,07	4,40	4,74	5,60				
	8	1,48	2,92	3,20	3,20	4,35	4,79	5,03	4,59				
	9	0,86	2,58	3,87	3,39	3,97	4,55	4,55	4,98				
	10	0,86	3,35	2,96	3,39	3,83	3,87	4,55	5,27				
	11	2,77	3,01	3,06	2,87	3,63	3,68	4,59	4,45				
Aritmetický průměr	1,46	2,75	3,15	3,13	4,09	4,46	4,86	5,19					
Směrodatná odchyl.	0,50	0,29	0,30	0,21	0,23	0,36	0,27	0,48					

Dopočet úhlu řezu vzorku 10 mm s využitím technologie vodního paprsku [°]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	25	40	55	70	85	100	115	130	145	160
Měření	1	1,20	1,32	1,75	1,66	1,60	2,06	2,32	2,92	2,35	2,01
	2	1,55	1,40	1,46	1,49	1,69	1,95	2,32	2,95	2,47	2,15
	3	1,43	0,95	1,40	1,52	1,89	1,89	2,38	2,41	1,75	2,15
	4	1,75	1,32	1,26	1,66	1,92	2,12	2,29	2,47	2,26	1,89
	5	1,52	1,23	1,32	1,78	1,78	1,98	1,63	2,47	2,32	1,46
	6	1,55	0,77	1,12	1,55	1,69	1,89	2,03	2,21	2,38	2,52
	7	1,23	1,09	1,09	1,83	1,66	2,06	2,64	2,38	2,75	1,66
	8	1,03	1,38	1,20	1,98	2,09	2,18	2,38	2,38	2,35	1,89
	9	0,92	1,32	1,23	1,49	1,86	2,06	1,81	2,29	2,18	2,55
	10	1,60	1,20	0,95	1,55	2,06	2,21	2,24	2,09	2,47	2,49
	11	0,57	1,03	1,95	1,32	2,01	2,21	2,38	2,38	2,67	2,09
Aritmetický průměr	1,31	1,18	1,34	1,62	1,84	2,06	2,22	2,45	2,36	2,08	
Směrodatná odchyl.	0,34	0,19	0,28	0,18	0,16	0,11	0,27	0,25	0,25	0,33	

Dopočet úhlu řezu vzorku 15 mm s využitím technologie vodního paprsku [°]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Měření	1	0,69	0,92	1,28	1,05	1,62	1,74	1,55	1,74	1,49	
	2	0,86	0,84	0,96	1,13	1,24	1,57	1,64	1,38	1,30	
	3	0,67	0,80	0,97	1,18	1,70	1,38	1,05	0,86	1,62	
	4	0,65	0,78	0,90	1,26	1,38	0,94	1,39	1,22	1,22	
	5	0,94	0,92	0,84	1,72	1,36	1,47	1,64	0,90	0,36	
	6	0,69	1,01	1,09	1,51	1,41	1,20	1,09	1,22	1,91	
	7	0,71	0,78	1,22	1,09	1,55	1,81	1,81	1,34	1,09	
	8	0,78	0,80	1,15	0,78	1,18	1,41	1,60	1,62	1,41	
	9	0,53	0,55	1,15	1,43	1,22	1,59	1,38	0,94	0,74	
	10	0,50	0,69	0,86	1,13	1,51	1,51	1,53	1,30	1,99	
	11	0,84	0,76	1,05	1,20	0,92	1,38	1,70	1,36	1,39	
Aritmetický průměr	0,71	0,81	1,04	1,23	1,37	1,45	1,49	1,26	1,32		
Směrodatná odchyl.	0,13	0,12	0,14	0,24	0,21	0,23	0,23	0,27	0,45		

## Příloha 5 dopočet úhlu řezu technologie laserového paprsku

Dopočet úhlu řezu vzorku 3 mm s využitím laserové technologie [°]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]		700	1050	1400	1750	2100	2450	2800	3150	3500	3850
Pořadí měření	1	-0,96	-0,48	-0,86	-0,96	-1,24	-1,24	-1,43	-1,15	-1,62	-0,76
	2	-0,57	-0,76	-0,29	-0,57	-0,76	-0,76	-1,43	-0,29	-1,43	-1,05
	3	-0,67	-0,29	-0,29	-0,57	-1,05	-0,86	-1,62	-0,96	-0,67	-2,01
	4	-0,76	-0,19	-0,86	-0,86	-1,34	-1,05	-1,62	-0,86	-0,57	0,57
	5	-0,67	-0,29	-0,67	-1,05	-0,57	-0,96	-1,34	-1,24	-0,19	-0,76
	6	-0,57	0,00	-0,67	-0,76	-1,15	-1,05	-1,53	-1,05	-0,57	-0,86
	7	-0,67	-0,67	-0,67	-1,05	-0,96	-1,05	-1,53	-1,34	-0,10	-1,81
	8	-0,57	-0,57	-0,48	-0,67	-0,67	-1,15	-1,53	-1,15	-0,96	-0,76
	9	-0,86	-0,57	-0,86	-0,76	-1,05	-1,34	-1,53	-1,43	-1,15	-1,91
	10	-0,67	-0,57	-0,76	-0,76	-1,15	-1,05	-1,53	-1,53	1,34	-1,24
	11	-0,96	-0,38	-0,96	-0,96	-0,96	-1,24	-1,43	-1,34	0,29	-0,57
Aritmetický průměr		-0,72	-0,43	-0,67	-0,82	-0,99	-1,07	-1,50	-1,12	-0,51	-1,02
Směrodatná odchyl.		0,14	0,22	0,22	0,16	0,23	0,16	0,08	0,33	0,80	0,70

Dopočet úhlu řezu vzorku 6 mm s využitím laserové technologie [°]											
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]		480	720	960	1200	1440	1680	1920	2160	2400	2640
Měření	1	0,19	-0,24	-0,24	0,24	0,10	-0,14	0,00			
	2	-1,48	-0,19	0,19	-0,10	0,10	-0,53	-0,14			
	3	-1,00	-0,19	0,43	-0,05	0,00	-0,29	-0,38			
	4	-2,25	0,14	0,38	0,33	0,10	-0,48	-0,62			
	5	-1,43	0,14	0,33	0,00	0,10	-0,43	-0,43			
	6	-1,72	0,05	0,33	0,19	0,05	-0,38	-0,53			
	7	-1,29	-0,05	0,57	0,29	0,14	-0,24	-0,38			
	8	-2,10	-0,14	0,43	0,33	0,10	-0,10	-0,29			
	9	-1,67	-0,43	0,38	0,19	0,10	0,05	-0,33			
	10	-2,20	0,10	0,14	0,05	0,10	-0,24	-0,29			
	11	-0,91	0,05	-0,14	0,10	0,14	-0,24	-0,76			
Aritmetický průměr		-1,44	-0,07	0,26	0,14	0,09	-0,27	-0,38			
Směrodatná odchyl.		0,67	0,18	0,24	0,15	0,04	0,16	0,20			

Dopočet úhlu řezu vzorku 10 mm s využitím laserové technologie [°]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600	1760
Měření	1	-0,11	-0,40	0,00	-0,26	-0,32	-0,63			
	2	-0,52	-0,34	-0,03	-0,20	-0,46	-0,66			
	3	-0,26	-0,26	-0,03	-0,17	-0,60	-1,03			
	4	-0,03	-0,29	-0,17	-0,20	-0,37	-0,54			
	5	-0,20	-0,20	0,09	-0,17	-0,40	-0,49			
	6	-0,20	0,03	-0,03	-0,20	-0,34	-0,63			
	7	-0,29	-0,06	-0,09	-0,29	-0,37	-0,60			
	8	-0,29	-0,26	-0,09	-0,11	-0,32	-0,46			
	9	-0,14	-0,20	-0,11	-0,20	-0,32	-0,57			
	10	0,06	-0,09	0,09	-0,32	-0,23	-0,74			
	11	-0,17	-0,11	-0,06	-0,09	-0,20	-0,69			
Aritmetický průměr	-0,20	-0,20	-0,04	-0,20	-0,36	-0,64				
Směrodatná odchyl.	0,14	0,12	0,07	0,06	0,10	0,15				

Dopočet úhlu řezu vzorku 15 mm s využitím laserové technologie [°]										
Řezná rychlost [mm·min <sup>-1</sup> ]	180	270	360	450	540	630	720	810	900	990
Měření	1	-2,33	-1,26	-0,73	-0,61					
	2	-2,50	-1,85	-0,99	-1,01					
	3	-2,43	-1,97	-1,20	-0,92					
	4	-2,56	-1,39	-1,01	-0,48					
	5	-3,33	-1,57	-0,96	-0,42					
	6	-1,70	-2,22	-1,15	-0,44					
	7	-2,87	-2,25	-1,18	-0,40					
	8	-3,06	-2,12	-1,15	-0,46					
	9	-2,64	-1,64	-1,09	-0,38					
	10	-2,66	-1,34	-1,26	-0,23					
	11	-2,37	-1,70	-1,41	-0,48					
Aritmetický průměr	-2,59	-1,76	-1,10	-0,53						
Směrodatná odchyl.	0,40	0,34	0,17	0,22						

## Příloha 3 nabídka technologie vodního paprsku AWAC

### 1. Cenová nabídka CNC stroje s technologií vysokotlakého vodního paprsku

#### 1.1. **Nový CNC stroj WATERCUT 3001.15 W (portálová konstrukce) s pracovní plochou 3000 x 1500 mm / 1 řezací hlava s vodním paprskem pro 2D, nové VT čerpadlo (kompletní dodávka stroje)**

##### **Kompletní dodávka zahrnuje následující komponenty a služby:**

- Řezací stůl WATERCUT 3001.15 W s pracovní plochou 3000 x 1500 mm, včetně řídicího systému iMSNC, s lapačem zbytkové energie vodního paprsku z konstrukční oceli a s přípravou na napojení systému odsávání kalů do Big-Bagu.
- USB port na řídicím systému + síťové připojení řídicího systému pro přenos dat mezi programátorem a strojem
- IHS snímač výšky trysky nad materiálem
- Laser pointer na zaměření bodů na materiálu
- Intranet v řídicím systému – umožňuje sledování výroby, ekonomické výstupy atd.
- Dálková diagnostika stroje pomocí TeamViewer
- Software AsperWin Basic module pro přípravu řezacích programů ve 2D
- Vysokotlaké čerpadlo Hypertherm (AccuStream) HyPrecision P-30 s příkonem 22 kW a maximálním řezacím tlakem 4140 Bar včetně příslušenství (olejový chladič)
- Vysokotlaké potrubí pro připojení stroje
- Sada náhradních a spotřebních dílů pro VT čerpadlo HyPrecision P-30
- 1 řezací hlava Allfi pro řezání čistou vodou i pro abrazivní řezání s diamantovou vodní tryskou
- Dávkovač abraziva s plynulou regulací množství abraziva v rozsahu 0 – 600 gramů, ovládaný z řídicího systému stroje včetně funkce Sand flow monitoring
- Tlaková doprava abraziva se zásobníkem na 1000 kg abraziva
- Elektrorozvaděč
- Výchozí elektrovizite
- Doprava stroje a techniků, montáž stroje, zaškolení obsluhy a předání stroje zákazníkovi v Praze - Suchbale

**Konečná cena kompletní dodávky bez DPH: 118 510,- €**

##### **Option nabídka na další rozšíření dodávky stroje – dle výběru zákazníka:**

- Software AsperWin Nesting na automatické ukládání dílů na polotovary + 1 906,- €
- Sada nářadí a přípravků pro opravu a údržbu VT čerpadla Hypertherm + 1 670,- €
- Šroubový kompresor Kaeser Aircenter 12/8 včetně integrované sušičky vzduchu a vzdušníku + 6 250,- €
- Systém odsávání kalů do Big Bagu + 4 300,- €
- Regulace hladiny vody v lapači + 4 818,- €
- User management v řídicím systému iMSNC + 263,- €
- Ekoinfo - modul pro ekonomické kalkulace v řídicím systému iMSNC + 473,- €
- Machine info - modul pro machine information report v řídicím systému iMSNC + 420,- €
- Automatický backup iMSNC na server MicroStep + 1 236,- €
- Stanice na úpravu vody změkčováním + 1 250,- €
- Ovládání VT čerpadla z řídicího systému stroje WaterCut + 863,- €
- 

***Další Option vybavení lze domluvit při osobním jednání.***

##### **Konečná cena ve všech variantách obsahuje tyto max. délky kabelů a VT potrubí:**

- Vzdálenost řídicího systému od zač. kabelového nosiče do 6 m.  
Každý další metr navíc: + 205,- €
- Vzdálenost operačního panelu (display, klávesnice, myš) od řídicího systému do 1,5 m.  
Každých dalších 5 metrů navíc: + 315,- €
- Maximální délku vysokotlakého potrubí do 10 m (VT čerpadlo – řezací hlava).  
Každý další metr navíc: + 50,- €

## Příloha 4 cenová nabídka laseru Trumpf

**TRUMPF**



Datum: 16.12.2019  
Firma: David Šilha  
Stroj: TruLaser 3030 (L20)

### TruLaser 3030 (L20)



Vzhled zařízení se může od vyobrazení lišit. Jedná se pouze o ilustrační snímek.

#### Váš kontaktní partner:

TRUMPF Praha, spol. s r. o.  
pan Roman Haltuf  
K Háji 1355/2a  
155 00 Praha 5  
IČ: 48583316  
DIČ: CZ48583316  
telefon: 251 106 212, 200  
telefax: 251 106 201  
E-mail: [info@cz.trumpf.com](mailto:info@cz.trumpf.com)  
Internet: <http://www.cz.trumpf.com>

TRUMPF Praha, spol. s r. o.  
pan Martin Klenovec  
K Háji 1355/2a  
155 00 Praha 5  
IČ: 48583316  
DIČ: CZ48583316  
telefon: 720 565 734  
telefax: 251 106 201  
E-mail: [martin.klenovec@cz.trumpf.com](mailto:martin.klenovec@cz.trumpf.com)  
Internet: <http://www.cz.trumpf.com>

**TRUMPF**



Datum: 16.12.2019  
Firma: David Šilha  
Stroj: TruLaser 3030 (L20)

**Možnosti automatizace**

Ceny v EUR

<b>LoadMaster</b>	<b>Load Master zakládací zařízení vč. zakládací stanice s příčnými magnety:</b> Výkyvný odsávací rám s jednotlivými přísavkami pro rychlé a bezpečné naložení tabulí k opracování. Automatické nakládání spouští obsluha. Čerícími magnety se dosahuje spolehlivého oddělení plechových tabulí od sebe.	37.980,00
-------------------	--	-----------

**Hodnota celkem výše specifikovaného stroje: EUR 660.260,00**

# Příloha 5 Typový díl

Značka	Směr	Úhel	Vnitř. r.čok.
A	NAHORU	90°	3
B	NAHORU	90°	3
C	NAHORU	90°	3
D	DOLŮ	90°	3
E	DOLŮ	90°	3
F	DOLŮ	90°	3
G	DOLŮ	90°	3
H	NAHORU	90°	3
J	DOLŮ	90°	3
K	NAHORU	90°	3

**TABULKA OHYBŮ**

**3D MODEL**

**PÁLICÍ PLÁN: 345-00-0010.dxf**

**Kryt šneku**

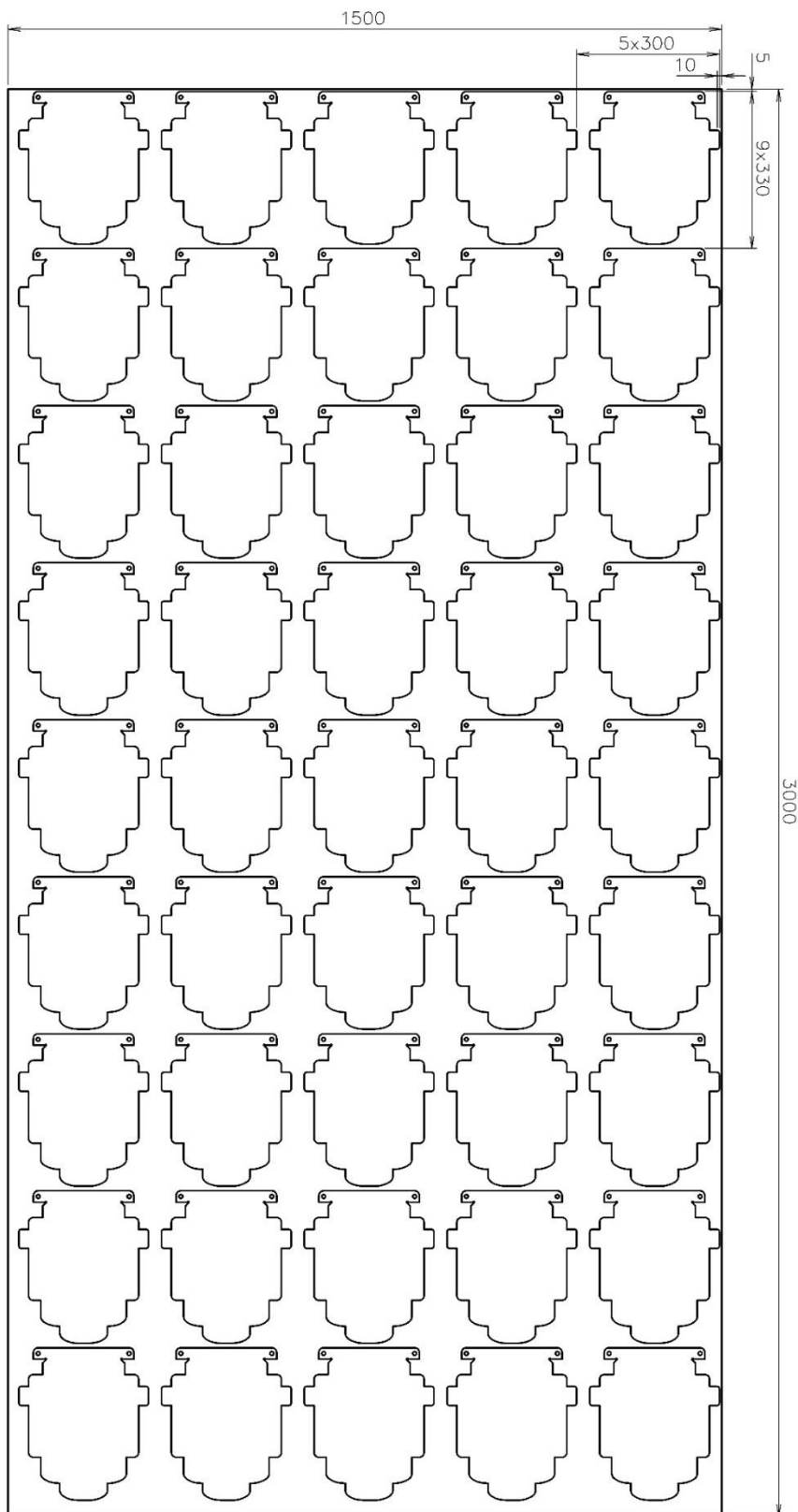
**345-00-0008**

FORMAT: A3

IND.	ZMĚNA	PODPIS	fjk machinery
ZN. MAT.: 1.0037 (S235JR)	DAT:	T.O.	
ROZM. POLOIT.: P3	NORMA R.: ČSN:25310	Č. V. SESTAVY:	MĚŘÍTKO: 1:2
REVIZE: R0	DATUM:	KS. NA STROJ:	POZICE:
NÁZEV: TYP:IVE 08			



## Příloha 6 rozmístění dílu na ploše stroje



## 12 Seznam obrázků, tabulek, grafů

### Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení technologie vodního paprsku .....	8
Obrázek 2 P-T diagram vody .....	9
Obrázek 3 Schéma metody AWJM .....	11
Obrázek 4 Schéma kryogenního paprsku .....	12
Obrázek 5 Komponenty zařízení vodního paprsku.....	14
Obrázek 6 Schéma systému s multiplikátorovým čerpadlem.....	15
Obrázek 7 Čerpadlo PTV JETS 2,2/60.....	16
Obrázek 8 Schéma řezací hlavy .....	18
Obrázek 9 Schéma vodních dýz.....	19
Obrázek 10 Průběh spontánní emise.....	22
Obrázek 11 Schéma průběhu stimulované emise .....	23
Obrázek 12 řezání laserem.....	24
Obrázek 13 Schéma pevnolátkového laseru .....	27
Obrázek 14 Schéma Nd:YAG laseru .....	28
Obrázek 15 Schéma CO <sub>2</sub> laseru.....	30
Obrázek 16 Vodní paprsek stroj AWCT 0806 TKX .....	35
Obrázek 17 Laserové centrum Trumpf Tru Laser 3030 .....	36
Obrázek 19 Mikroskop SPZ 1000 ZOOM.....	40
Obrázek 20 Výstup z mikroskopu .....	41
Obrázek 21 Experimentální vzorek .....	41
Obrázek 22 Úhel řezu .....	51
Obrázek 23 Dopočet úhlu .....	51

### Seznam tabulek

Tabulka 1 Nejpoužívanější abrazivní materiály .....	20
Tabulka 2 Řezné rychlosti vodního paprsku.....	33
Tabulka 3 Řezné rychlosti laserového paprsku .....	34
Tabulka 4 Složení Hardox 450 .....	34
Tabulka 5 Specifikace CNC řezacího stroje s technologií vodního paprsku.....	35
Tabulka 6 Specifikace Trumpf TruLaser 3030.....	36
Tabulka 7 Odpisy .....	57
Tabulka 8 Náklady na nástroje AWJM.....	59
Tabulka 9 Náklady na stlačený vzduch AWJM.....	60
Tabulka 10 Náklady na elektrickou energii a vytápění AWJM.....	60
Tabulka 11 Náklady na opravu a údržbu AWJM .....	60
Tabulka 12 Náklady na pracovní obsluhu .....	61
Tabulka 13 Souhrn nákladů AWJM .....	61
Tabulka 14 Náklady na nástroje LBM.....	62
Tabulka 15 Náklady na stlačený vzduch LBM.....	62
Tabulka 16 Náklady na technologické plyny LBM.....	62
Tabulka 17 Náklady na elektrickou energii LBM .....	63
Tabulka 18 Náklady na opravu a údržbu LBM .....	63
Tabulka 19 Souhrn nákladů LBM .....	63
Tabulka 20 Časové zatížení .....	64

## Seznam grafů

Graf 1 Vizualní zhodnocení řezů vodního paprsku .....	38
Graf 2 Vizualní zhodnocení řezů laseru .....	39
Graf 3 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 3 mm .....	43
Graf 4 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 3 mm .....	44
Graf 5 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 6 mm .....	45
Graf 6 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 6 mm .....	46
Graf 7 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 10 mm .....	47
Graf 8 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 10 mm .....	48
Graf 9 Závislost šíře spáry na rychlosti lícové strany vzorku 15 mm .....	49
Graf 10 Závislost šíře spáry na rychlosti rubové strany vzorku 15 mm .....	50
Graf 11 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 3 mm .....	52
Graf 12 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 6 mm .....	53
Graf 13 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 10 mm .....	54
Graf 14 Vyhodnocení úhlu řezu vzorku 15 mm .....	55
Graf 15 Bod zvratu technologie vodního paprsku .....	65
Graf 16 Bod zvratu technologie laserového paprsku .....	67