

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA**  
**Fakulta lesnická a dřevařská**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Praha 2018**

**Markéta MALINOVÁ**

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA**

**Fakulta lesnická a dřevařská**

**METODY OBRÁBĚNÍ LASEREM A VODNÍM PAPEREM  
A JEJICH VYUŽITÍ V DŘEVOPRŮMYSLU**

**Bakalářská práce**

**Autor: Markéta MALINOVÁ**

**Vedoucí práce: Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.**

**2018**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Markéta Malinová

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

**Metody obrábění laserem a vodním paprskem a jejich využití v dřevoprůmyslu**

Název anglicky

**Laser and water treatment methods and their use in the wood industry**

---

## Cíle práce

Cílem práce je představit a charakterizovat nekonvenční metody obrábění jejich typové rozdělení. Charakterizovat způsoby obrábění laserem a vodním paprskem. Popsat dělení materiálu, rozdíly mezi těmito operacemi.

## Metodika

Teoretický rozbor nekonvenčních metod obrábění. Výhody, nevýhody a ekonomické zhodnocení provozu při obrábění vodním paprskem a laserem. Typy strojů používané pro tyto operace, jejich ekonomické zhodnocení z hlediska pořizovacích nákladů a následné náklady na údržbu a servis strojů.

**Doporučený rozsah práce**

35 – 45 stránek

**Klíčová slova**

laser, vodní paprsek, obrábění, nástroj

---

**Doporučené zdroje informací**

- BERNARD, K. E. Schneiden mit Laserstrahlung und Wasserstrahl. Printed in Germany. 1993. s. 3-93. ISBN 3-8169-0748-2.
- CARISTAN, Ch. L. Laser cutting guide for manufacturing. 1 th ed. Michigan: SME. 2004. 447 s., ISBN 978-0-87263-686-6.
- FABIAN, S., HLOCH, S. Abrasive waterjet process factors influence on stainless steel AISI 304 Macrogeometrical cutting duality. Scientific bulletin, Volume XIX, North University of Baia Mare, Romania. 2005. s. 261- 266. ISSN 1224-3264.
- KRAJNÝ, Z. Nekonenčné technológie a bezpečnosť pri práci. Bezpečná práca 4/1991. 1991. s. 152 – 156.
- KVIETKOVÁ, M. Obrábění dřeva. CARTER Praha. 2015. 295 s., ISBN 978-80-213-2604-0.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2017/18 LS – FLD

**Vedoucí práce**

Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

**Garantující pracoviště**

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

**doc. Ing. Milan Gaff, PhD.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2018

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**

Děkan

V Praze dne 20. 04. 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Metody obrábění laserem a vodním paprskem a jejich využití v dřevoprůmysle**“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Moniky Sarvašové Kvietkové, PhD. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

.....

V Praze dne 20.4.2018.

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala své vedoucí práce Ing. Monice Sarvašové Kvietkové, PhD. za pomoc při vedení práce, cenné rady, a především trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Také za strávený čas, který věnovala mé práci při řešení dané problematiky, a poskytla potřebné a důležité informace pro vypracování mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Jak už z názvu bakalářské práce vyplývá, práce je zaměřena na metody obrábění dřeva laserem a vodním paprskem, na jejich vzájemné porovnání a ekonomické zhodnocení.

První část práce tvoří podrobná charakteristika obou metod, jejich historický vývoj, detailně a v bodovém rozdělení popisuje jednotlivá zařízení, jak se s nimi pracuje a jak probíhá opracování dřeva. Druhá část práce shrnuje obrábění laserem a vodním paprskem a obsahuje vyhodnocení a porovnání obou metod, a to z hlediska ekonomických aspektů a dalšího vývoje.

**Klíčová slova:** nekonvenční metody obrábění, laser, vodní paprsek, obrábění, nástroj

## **Abstract**

As the title suggests, the thesis focuses on the methods of woodworking by laser and water jet, and their mutual comparison and economic evaluation.

First part of the thesis characterizes both methods and their historical development, describes in detail and in point distribution, how the machines look like, how to work with them, how the woodworking proceeds. Second part of the thesis summarizes the laser and water jet machining and contains their evaluation and comparison in respect of economical issues and further development.

**Key words:** non-conventional machining methods, laser, water jet, machining working, device

# Obsah

Úvod.....	10
1. Cíl práce.....	11
2. Metodika práce.....	12
3. Nekonvenční metody obrábění dřeva .....	13
4.1 Metoda obrábění dřeva laserem.....	14
4.1.1 Historie laseru .....	14
4.1.2 Charakteristika obrábění laserem.....	14
4.1.3 Princip laseru .....	15
4.1.4 Hlavní části laseru.....	15
4.1.5 Typy laserů dle aktivního prostředí .....	18
4.1.6 Gravírování laserem.....	21
4.1.7 Laserové vrtání.....	22
4.1.8 3D řezání.....	22
4.1.9 CO <sub>2</sub> laser .....	23
4.1.10 Výhody a nevýhody laseru.....	26
4.2 Metoda obrábění dřeva vodním paprskem .....	27
4.2.1 Historie vodního paprsku .....	27
4.2.2 Charakteristika obrábění vodním paprskem .....	28
4.2.3 Princip řezání vodním paprskem.....	29
4.2.4 Řezání čistým vodním paprskem .....	30
4.2.5 Výhody řezání čistým vodním paprskem.....	31
4.2.6 Řezání vodním paprskem s příměsí abraziva.....	32
4.2.7 Konstrukční zařízení vodního paprsku .....	34
4.2.8 Vodní trysky .....	38
4.2.9 Abrazivní trysky .....	39
4.2.10 Recyklace abraziva .....	39
5.1 Ekonomické zhodnocení obrábění laserem .....	43
5.2 Ekonomické zhodnocení obrábění vodním paprskem.....	44
5.4 Porovnání metody laseru a vodního paprsku.....	45
5.3 Kvalitativní údaje jednotlivých metod v procesu řezání .....	47
5.3.1 Laser.....	47
5.3.2 Vodní paprsek .....	47
6 Závěr.....	49
7 Použitá literatura .....	50



## **Seznam obrázků**

Obrázek 1 Konstrukční schéma laseru .....	17
Obrázek 2 Laserové řezání .....	21
Obrázek 3 Laserové gravírování do dřeva .....	22
Obrázek 4 Výrobek ze 3D řezání .....	23
Obrázek 5 Princip fungování CO <sub>2</sub> laseru .....	26
Obrázek 6 Princip řezání vodním paprskem .....	30
Obrázek 7 Princip řezání čistým vodním paprskem.....	31
Obrázek 8 Princip řezání abrazivním vodním paprskem .....	33
Obrázek 9 Obrábění vodním paprskem DEMA Zvolen.....	40
Obrázek 10 Stroj pro obrábění vodním paprskem DEMA Zvolen .....	40

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Celkové náklady jednotlivých metod.....	46
Tabulka 2 Přepočtení ceny řezání odvíjející se od času řezání.....	46

## Úvod

Pro svůj výběr bakalářské práce jsem zvolila téma „Metody obrábění dřeva laserem a vodním paprskem a jejich využití v dřevoprůmyslu“. Hlavním důvodem výběru mé práce byl předpoklad, že dnešní technická doba nabízí spoustu metod, jak docílit kvalitního obrobku v oblasti dřevařského průmyslu, který bude splňovat požadované rozměry a tvary. Tyto oba způsoby si našly široká uplatnění ve spoustě oblastech, včetně dřevařského průmyslu, kde získaly také významné postavení a funkci. Když se řekne obrábění dřeva a dřevěných materiálů laserem nebo vodním paprskem, mnozí lidé netuší, oč se jedná, nedokáží si představit, jak můžou tyto způsoby změnit od základů celou strukturu dřeva. Proto bych ráda v práci nastínila tyto nekonvenční metody obrábění, konkrétně tedy metodu obrábění dřeva laserem a metodu obrábění dřeva vodním paprskem. Nekonvenční metody obrábění dřeva se začínají rozvíjet v druhé polovině 20. století, a s postupem času začíná pronikat do různých průmyslových oblastí, a nachází zde i své široké uplatnění, např. řešení problémů v kosmonautickém a leteckém průmyslu. V porovnání s konvenčními metodami obrábění, se tato metoda dostává do popředí, a získává širšího využití. Zároveň technika umožňuje propojení těchto dvou metod, díky čemuž dochází k postupnému vývoji a zlepšování obou metod, patří sem např. laserový přehřev u klasického soustružení.

Práce je především zaměřena na popis jednotlivých metod, jak už z hlediska obrábění, kvality řezu, tak byl zároveň brán v potaz ekonomická vyhodnocení, finanční náročnost, a závěrem porovnání obou metod. Konkrétně se v této bakalářské práci objevuje dělení metod, principy obrábění, výhody a nevýhody. Velmi důležitou část zde bude zaujímat kvality obrobeneho materiálů, která je důležitým faktorem pro ovlivnění ostatních parametrů, jako jsou např. cena, časová náročnost, množství vyrobených kusů, zvolený postup a metoda obrábění.

## 1. Cíl práce

Hlavním cílem této práce je seznámení se s oběma principy obrábění, jak už s metodou laseru, tak i metodou pomocí vodního paprsku. Mezi hlavní cíle mé bakalářské práce patří:

- charakteristické vlastnosti,
- historický vývoj jednotlivých metod,
- kvalitu řezu, a také důležité informace, které pomohou zhodnotit vhodnost použití jednotlivých metod,
- výhody a nevýhody obou dvou metod,
- členění laseru a vodního paprsku,
- principiální postup výroby a celkového procesu,
- základní části laseru a vodního paprsku z hlediska konstrukce,
- ekonomické vyhodnocení zadaných metod – laseru a vodního paprsku
- vyhodnocení kvality řezu během řezacího procesu,
- vzájemné porovnání jednotlivých metod, a jejich finální zhodnocení.

## **2. Metodika práce**

Práce byla zpracována na základě studia dokumentů, odborné literatury, která se problematikou metod obrábění laserem a vodním paprskem, a jejich využití v dřevoprůmyslu, zabývá. Konkrétní použitá knižní i elektronická literatura je uvedena na konci práce v seznamu literatury a použitých zdrojů.

### 3. Nekonvenční metody obrábění dřeva

Tyto metody se uplatňují zejména při obrábění těžkoobrobitelných, tvarově složitých součástí, z nichž některé by nebylo ani možno klasickými metodami vyrobit. Jejich charakteristickým znakem je, že úběr materiálu nezávisí na jeho mechanických vlastnostech, při odebrání materiálu nepůsobí na obrobek žádná síla a až na výjimky se nemění vlastnosti obrobené plochy. Když úběr materiálu za minutu je daleko menší, než se běžně dosahuje různými nástroji, dá se předpokládat, že význam těchto nekonvenčních metod obrábění neustále poroste. Výhodou nekonvenčních metod je to, že obrobek není namáhán silovým působením, nevznikají kmity, tudíž není nutné upnutí obrobku (Maňková, 2000).

Obrobitelnost materiálů pomocí nekonvenčních metod obrábění není dána jeho mechanickými vlastnostmi, jako jsou např. tvrdost, pevnost, houževnatost, ale spíše fyzikálními vlastnostmi, jakými jsou elektrická vodivost, tepelná vodivost, chemická odolnost, teplota tání a vypařování, apod. (Osička, Kalivoda, 2012).

Charakteristické znaky nekonvenčních technologií:

- možnost obrábění složitých tvarů,
- výkonnost a rychlost nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu,
- možnost zavedení plné automatizace,
- možnost zvýšení sériovosti výroby, technologičnosti konstrukce a snížení pracnosti výroby,
- možnost zavedení plné automatizace

(<http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>, 21.2.2018).

#### Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

- I. Oddělování materiálu tepelným nebo elektrotepelným účinkem:
  - elektroerozivní metody obrábění (Elektro Discharge Machining – EDM),
  - obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining – PBM),
  - obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining – LBM),
  - obrábění paprskem iontů (Iont Beam Machining – IBM),
  - obrábění paprskem elektronů (Elektron Beam Machining – EBM).

## II. Oddělování materiálu mechanickým účinkem:

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining – USM),
- obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining – WJM),
- obrábění proudem brusiva (AWJM).

## III. Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem:

- elektrochemické obrábění (Elektro Chemical Machining – ECM),
- elektrochemické broušení (ECG),
- chemické obrábění (Chemical Machining – CM),
- fotochemické obrábění (PCM) (Sadílek, 2009).

### 4.1 Metoda obrábění dřeva laserem

#### 4.1.1 Historie laseru

Historie laseru začíná už v roce 1917, kdy známý vědec Albert Einstein předpověděl, že vyjma absorpce a spontánní emise lze předpokládat, že existuje také stimulovaná emise. Významným vynálezcem se stal ruský fyzik Valentin A. Fabrikant, v roce 1939 využil možnost stimulované emise k zesílení elektromagnetického záření procházejícím prostředím. V roce 1951 získali V. A. Fabrikant, M. M. Vudynský a F. A. Butajevova patent na princip vytváření aktivního prostředí v plynovém výboji. Předchůdcem laseru byl maser, toto zařízení pracující na stejném principu (stimulovaná emise), nýbrž generuje mikrovlnné záření. První maser na bázi čpavku byl vynalezen roku 1951 panem Charlesem H. Townes a roku 1954 při pomoci Jamese P. Gordona a Herberta J. Zeigera konstruován na Columbijské univerzitě. V roce 1960 Theodore H. Maiman v USA poprvé předvedl funkční laser. Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu za využití energetických hladin; tudíž mohl laser pracovat v pulsním režimu. Nakonec byl v roce 1963 Heterostrukturální polovodičový diodový laser a tento rok také C. Kumar N. Patel vynalezl plynový CO<sub>2</sub> laser, který je jedním z nejstarších, ale stále nejpoužívanějších plynových laserem (Maňková, 2000).

#### 3.1.2 Charakteristika obrábění laserem

Podstatou tohoto způsobu obrábění je soustředění energie elektromagnetického záření viditelného světla na malou plochu obrobku, kde se mění na energii tepelnou. Materiál se

v místě dopadu tavi a odpařuje. V místě dopadu se energie světelného záření mění na energii tepelnou o hustotě energie řádově  $10^{-8}$  W.mm<sup>-2</sup>. Teplota, která se přitom vyvine (řádově 10<sup>4</sup> °C), stačí k roztavení, popřípadě k odpaření materiálu obrobku.

V oblasti obrábění se laserová technika používá pro rozřezávání těžkoobrobitelných materiálů a pro výrobu přesných otvorů malých průměrů v těžkoobrobitelných materiálech, případně v některých nekovových a elektricky nevodivých materiálech (boridy, keramické řezné materiály apod.) (<http://lasery.wz.cz/uvod.html>, 12.1.2018).

### **3.1.3 Princip laseru**

Zdrojem světelné energie o vysoké intenzitě je laser (Light Amplification stimulated Emission of Radiation). Tuto specifickou schopnost zesilovat a usměrňovat světlo, kterým byly ozářeny, mají některé materiály jako např. rubín, kalcium, fluor s přísadou uranu apod. Princip činnosti je založen na uvolňování potenciální energie atomů daného prvku, který je obsažen v nepatrném množství v základní hmotě rezonátoru. U rubínu jsou to např. dvojmocné ionty chromu. Při ozáření krystalu rubínu zeleným světlem výbojky, dochází k vybuzení některých elektronů chromu, které se přemístí na dráhu s vyšší energetickou hladinou a jsou schopny získanou energii ihned emitovat a vrátit do základního stavu. Vyzáření získané energie v průběhu posuvu elektronů zpět na původní energetickou hladinu se děje v čase přibližně 5. 10<sup>-5</sup> s. Část energie však pohlcuje základní materiál rezonátoru a ohřívá se. Emitovaná energie nazývaná kvantem, se rovná rozdílu energií mezi sousedními hladinami neboli rozdílu energetických hladin a je v podstatě elektromagnetickým zářením o určité frekvenci (<http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>, 21.2.2018).

### **3.1.4 Hlavní části laseru**

Laser se vyznačuje hned několika základními částmi, potřebnými pro jeho fungování, kterými jsou:

- 1) Laserová hlavice
- 2) Aktivní prostředí
- 3) Rezonátor
- 4) Chladicí systém

- 5) Budící řízení
- 6) Zdroj energie buzení

## **Laserová hlavička**

Hlavními částmi laserové hlavičky jsou aktivní prostředí a rezonátor, které jsou popsány níže.

### **Aktivní prostředí**

Aktivní prostředí je hlavním a důležitým krokem pro zkonstruování laseru. Aktivní prostředí charakterizujeme jako látku obsahující oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, na nichž může atom setrvávat relativně dlouho dobu. Tyto hladiny nazýváme jako metastabilní hladiny, na níž elektron setrvává poněkud dlouhou dobu (přibližně  $10^{-8}$  s a déle), než přejde spontánním přechodem na nižší hladinu. Tento samovolný přechod z excitované hladiny na metastabilní hladinu bývá obvykle nezářivý přechod, tedy bez vyzáření fotonu (<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>, 17.3.2018).

### **Rezonátor**

Rezonátor je zařízení, umožňující zesílit elektromagnetickou vlnu, která z něj vychází. Součástí rezonátoru jsou minimálně dvě zrcadla, jejichž zakřivení a průměr je udáván energetickou rozbíhavostí laserového záření a rozdělením intenzity záření. Intenzitu záření výstupu paprsku laseru určuje tzv. mod. Pod pojmem mod rozumíme pojmenování pro vlastní kmity elektromagnetického pole rezonátoru, charakteristické frekvencí a rozložením pole v rezonátoru. Energetická rozbíhavost laserového záření je popisována jako tj. divergence paprsku, znamenající míru rozšiřování vysílaného svazku laserových paprsků s rostoucí vzdáleností laseru od odrazného objektu.

Zrcadla rezonátoru nemusí být pouze rovinná, setkáváme se i se zakřivenými typy zrcadel. Stabilita záření v rezonátoru se odvíjí převážně od poloměru zakřivení zrcadla, zároveň závisí na délce rezonátoru.

U některých druhů laserů není využíván rezonátor, z toho důvodu, že takový typ laseru dokáže vyvinout dostatečně velkou energii při průchodu aktivním prostředím, tudíž není rezonátor potřeba. Mezi takový typ laseru, pracující na této bázi, se řadí kupříkladu měděný laser nebo dusíkatý laser.



## Chladící zařízení

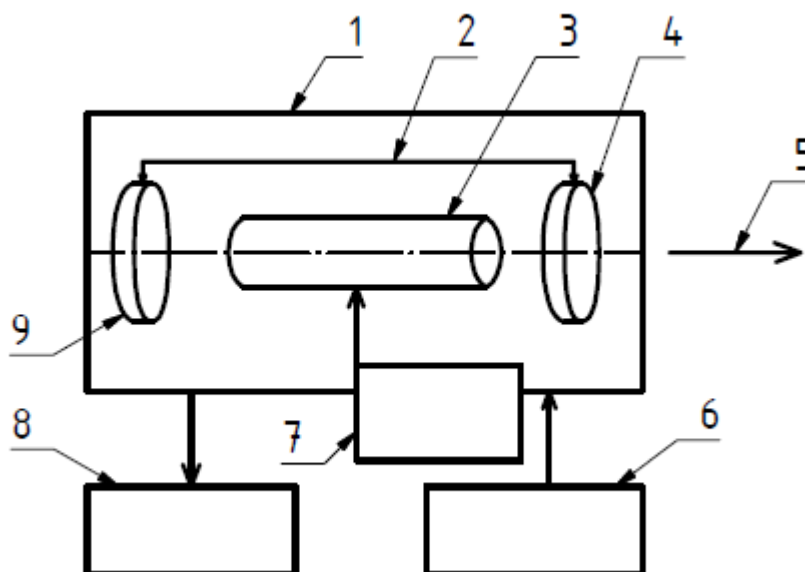
Chladící zařízení plní funkci chlazení laseru, a zároveň zajišťuje ochranu probíhajícího procesu. Další činností chladícího zařízení je odvést nevyužitou energii, která se nepřeměňuje v záření, ale v energii tepelnou. Součástí chladícího kruhu jsou dvě větve, první větev, označována jako vnitřní větev, používá deionizovanou vodu, druhá větev nazývaná jako vnější větev používá vodu z vodovodní sítě, ve výjimečných případech vodu ze speciálního zásobníku s čerpadlem.

## Budící zařízení

Budící zařízení má hlavní vliv na pracovní režim laseru, kdy způsob buzení je dán médiem laseru.

## Zdroj energie buzení

Zdroj energie buzení poskytuje elektronům energii v aktivním prostředí, aby měla možnost se přesouvat z nižší energetické hladiny na vyšší energetické hladiny.



**Obrázek 1 Konstrukční schéma laseru**

(Kvietková, 2015)

- 1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserové medium, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – výstupní záření, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budící zařízení, 8 – chladící zařízení  
9 – nepropustné zrcadlo

### 3.1.5 Typy laserů dle aktivního prostředí

Je nám známo více druhů laserů, tudíž si je rozdělíme a následně charakterizujeme. Základní dělení je dle skupenství materiálu, kam patří:

- Pevnolátkové lasery
- Kapalinové lasery
- Polovodičové lasery
- Plynové lasery

#### 1) Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery s obsahem izolantů a příměsí iontů, jejichž charakteristickým a zároveň výhodným znakem jsou malé nároky na údržbu a jejich stabilitu. Nejvýznamnějším představitelem pevnolátkových laserů je rubínový laser, první typ laseru, který byl fyzicky konstruován. Nejrozšířenějším laserem z tohoto druhu je neodymový laser, označuje se anglickou zkratkou ND:YAG, znamenající „yttrium aluminum garnet“. Tento typ laseru může být zdrojem infračerveného záření o výkonu až 1kW, zároveň je schopný v pulzním režimu vysílat krátké a silné záblesky záření. V tomto režimu je schopný dosáhnout výkonu  $10^6$  MW za  $10^{-12}$  sekund, proto je tento typ laseru považován za zdroj laserového vybuzení termionukleární reakce (<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>, 12.1.2018).

#### 2) Kapalinové lasery

Kapalinové lasery se poprvé objevují již v roce 1963. Obvykle aktivním prostředím těchto laserů jsou roztoky různých organických barviv, zároveň laserujícím prostředím je látka, která je za pokojové teploty kapalná. Tento typ laserů označujeme jako barvivové lasery, nejvíce využívané v informační technice a spektroskopii. Výhodou těchto laserů je jejich schopnost plynule měnit vlnovou délku laserové záření, zároveň jsou přeladitelné. Nevýhodou a značným problémem je životnost barviv, kdy klesá jejich účinnost, zejména při UV čerpání, většina barviv je toxických a karcinogenních.

### 3) Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou hlavním zdrojem optického záření, kdy zdrojem záření je laserová dioda, a dochází zde k přeměně elektrické energie na světlo. Funkce laserové diody je založena na procesu stimulované emise, kdy hlavním principem je, že elektrony v atomu mohou být umístěny v různých energetických hladinách, a platí, že čím dále jsou od jádra, tím mají vyšší energii. Stejně jako u ostatních typů laserů je i zde třeba optického rezonátoru, kdy dochází k zesílení světelného záření díky právě zmíněné stimulované emisi. Velikou výhodou tohoto typu laseru je, že soustřeďuje svůj světelný paprsek do velmi úzkého intervalu svých vlnových délek, dále se také vyznačují vysokou účinností. Naopak nevýhodou u polovodičových laserů je rozbíhavost paprsku (<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.html>, 26.1.2018).

### 4) Plynové lasery

Plynové lasery se ukazují jako velmi perspektivní a kvalitní zdroje infračerveného záření i ultrafialového záření. Velké uplatnění se jim v dnešní době dostává v technice a technologii, důvodem je, že objem plynu je možno dle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možno dodávat stále nové aktivní prostředí, a je možno je čerpat nejrůznějšími mechanismy (chemicky, elektricky, ...). Plynové lasery mají vyšší účinnost, jelikož přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Díky tomu pracují plynové lasery v nepřetržitém režimu, ale jejich trvalý výkon není moc veliký. K nejrozšířenějším typům plynových laserů patří např. helium – neonový laser, v průmyslu a medicíně se nejvíce používá infračervený laser CO<sub>2</sub>. Zvláštním typem jsou lasery excimerové, u kterých jsou aktivním prostředím molekuly, vznikající spojením dvou atomů různých vzácných plynů (fluor – krypton, krypton – fluor) působením svazku elektronů (Kvietková, 2015).

## **Laserové řezání**

Tato technologie dělení materiálu je velmi rozšířená, nejen v dřevoprůmyslu, ale také v mnoha dalších odvětvích, nejvíce ve strojírenství, a to z toho důvodu, že při řezu dochází k vysoce přesnému řezu bez ostřin. Během laserového řezání se neklade důraz na tvrdost materiálu, nýbrž hlavní roli zastupují optické a tepelné vlastnosti. Veliký vliv na množství absorbované energie má kvalita povrchu, což znamená, že hrubý povrch je schopný absorbovat

více energie než povrch leštěný. Laserové řezání je velmi univerzální, tudíž existuje široká škála materiálů, sloužící k dělení touto technologií. Dřevo je jedním z materiálů, které se odděluje právě laserovým řezáním, patří sem dřevěné plošné materiály, jako jsou překližky, MDF a další. Řezání dřeva laserem je velice přesné a časově efektivní, díky čemuž lze vyřezávat i složitější tvary a části výrobků.

Nejrozšířenějším materiálem používaným při řezání jsou kovové, ale i nekovové materiály, jako je např. keramika. U řezání kovových materiálů se přivede do místa řezu plyn, nejčastěji jím bývá kyslík, jelikož zvětšuje tepelné účinky a urychluje proces řezání. Pro řezání nekovových materiálů se přivádí do místa řezání inertní plyn, který plní funkci odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu (Dušek, 2013, Kvietková, 2015).

Mezi hlavní přednosti laserového řezání patří přesnost dávkování energie, přesnost tvarů a kvalita řezných hran, možnost řezat i složitější tvary, ekonomičnost při malých výrobních dávkách, šířka řezu je velmi malá, stejně jako velikost tepelně ovlivněné oblasti (<http://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-rezani/>, 28. 3. 2018).

Procesy při řezání laserem:

1. substituční řezání

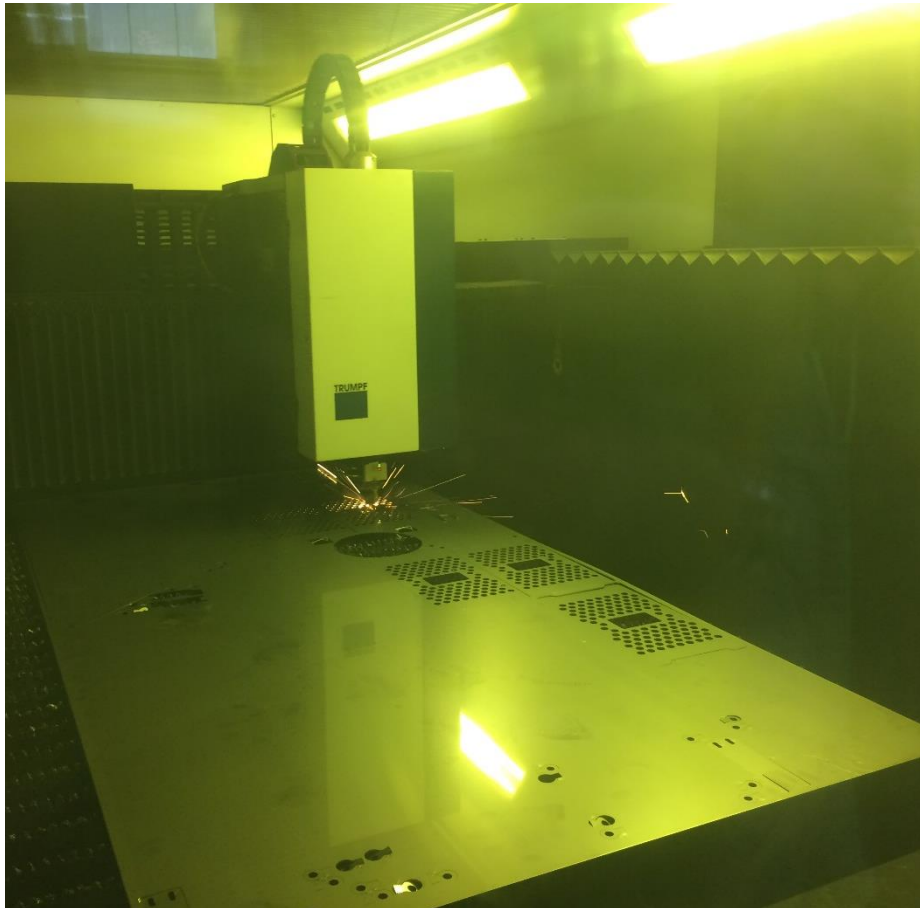
- a. povrch materiálu je ohříván laserovým paprskem odpařování materiálu z místa řezu,
- b. vysoká kvalita řezu, povrch je hladký a bez otřepů,
- c. pomocný plyn odstraňuje páru na čele řezu,

2. tavné řezání

- a. v místě řezu dochází k roztavení materiálu,
- b. nepodílí se na vlastním procesu řezání,
- c. nevýhodou je, že na spodní straně řezu se tvoří tuhnoucí kapky řezaného materiálu,

3. oxidační řezání

- a. řezání za pomoci aktivního plynu, konkrétně kyslíku,
- b. vzniká exotermická reakce, která ohřeje materiál, což usnadní tavení a odfukování materiálu,
- c. nevhodný pro řezání geometricky složitých tvarů ( Kvietková, 2015).



*Obrázek 2 Laserové řezání*

### **3.1.6 Gravírování laserem**

Gravírování do dřeva se řadí mezi velmi časté a efektivní aplikaci, kdy svoji hlavní funkci plní CO<sub>2</sub> laser. Během laserového gravírování dochází k bezkontaktnímu ohřevu materiálu laserovým paprskem. Laserový paprsek odpařuje tenkou vrstvu materiálu, díky čemuž dochází k vypalování tmavé textury do povrchu předmětu. Tmavá textura je z velké míry ovlivněna tvrdostí a strukturou gravírovaného materiálu – dřeva. Odstín gravůry je možné částečně ovlivnit, a to díky intenzitě regulace paprsku, který dokáže odpařit více či méně materiálu. Rozmanitost povrchu dřeva zajistí to, že každý kus dřeva je díky svému odstínu jedinečný (<http://www.gravoservis.cz/gravirovani-dreva/>, 2. 4. 2018).

Velikou výhodou laserového gravírování je možnost vedení celého procesu pomocí počítače. Řízení počítačem se vyznačuje svou velikou flexibilitou, reprodukovatelností, a prakticky umožňuje, aby nedocházelo k žádným omezením z hlediska výsledného motivu. Mezi další výhody patří rychlost výroby; laserový paprsek pracuje neomylně, tudíž se

vyznačuje velkou přesností; díky bezdotykovosti laser nezatěžuje mechanický předmět, a především plní funkci estetickou, kdy vypálený profil vypadá čistě a neotřele (Kvietková, 2015).



***Obrázek 3 Laserové gravírování do dřeva***

*(<http://gravura-laser.afacerist.ro/Constanta/>, 5.3.2018)*

### **3.1.7 Laserové vrtání**

Vrtání laserem slouží na principu odstraňování materiálu za pomoci odpařování. Teplo, které je potřebné k odpařování materiálu, dodává dostatečný fokusovaný laserový paprsek. Nejčastěji používanými lasery k vrtání do dřeva jsou pevnolátkové lasery. Velikou výhodou laserového vrtání je možnost vytváření malých otvorů o průměru od 10 nanometrů do 100 mm.

Výjimečností obrábění touto metodou je, že malé otvory se dají vytvořit i v místech, kde je to pro ostatní metody nemožné. Otvory lze vrtat také do nekovových materiálů.

### **4.1.8 3D řezání**

Zdroj laserového 3D řezání vysílá paprsek koherentního záření o průměru okolo 3 mm, který je pomocí soustavy zrcátek veden k obrobku. Díky náležitému umístění zrcátek dochází k vzájemnému pohybu v ose x a ose y, přičemž neklesá přesnost řezu. Paprsek prochází před dopadem zaostřovací čočkou, která ho usměrní přesně tak, aby jeho ohnisko bylo na povrchu řezaného materiálu. Laserová hlava se nachází na přírubě poslední osy robota. 3D řezání má mnoho výhod, mezi které patří například to, že za pomoci vláknových laserů se stává prostorové řezání mnohem jednodušší. Další výhodou je to, že laserový paprsek působí do místa řezání

optickým vláknem, tudíž usnadňuje integraci laseru na robota. Tato metoda umožňuje umístění řezací hlavy do autonomního souřadnicového X – Y polohovadla, díky kterému se při zastavení robota v dané poloze docílí vyřezání přesných otvorů ve 3D.



**Obrázek 4 Výrobek ze 3D řezání**

([www.gravirovani-laserem.com/architektonicke-modely.php](http://www.gravirovani-laserem.com/architektonicke-modely.php), 10.2.2018)

#### **4.1.9 CO<sub>2</sub> laser**

Jak již vyplývá z názvu, tento typ laseru patří mezi plynové lasery, jejichž součástí aktivního prostředí jsou molekuly oxidu uhličitého neboli CO<sub>2</sub>. Aktivní prostředí je buzené elektrickým výbojem. Záření produkované tímto laserem se člení do oblasti infračerveného záření, u kterého se vlnová délka pohybuje okolo 1,06 nanometrů. Chladicí médium, což bývá nejčastěji voda, odvádí teplotu ze systému. Chlazení musí dosahovat takových účinků, aby teplota nepřesahovala 400 K. Plyn procházející trubicí, může být po přechodu v okruhu opakovaně používán. V průběhu procesu se struktura plynu mění a znehodnocuje, čímž se CO<sub>2</sub> rozkládá na CO a O<sub>2</sub>. Rozpad struktury plynu má za příčinu snížení výkonu laseru. Dále je tento typ laseru charakteristický poměrně vysokou účinností, obvykle 8 až 10 %. Veliký rozptyl výstupních výkonů, dosahujících od 1 až 30 kW, dává za důvod to, že tyto lasery patří k nejrozšířenějším laserům. Lasery s nízkými výkony jsou typické velkou životností a malými rozměry, kam patří lasery o výkonech v desítkách watt. Lasery o vyšších výkonech, ve stovkách watt, reprodukuje systémy s několika metry dlouhými trubkami, chlazenými vodou, kde proudí aktivní plyn. Nejvýkonnější lasery o velikosti desítek kilowatt se získávají v systémech, ve

kterých jsou průtok plynu a výboj navzájem kolmé k ose rezonátoru.

Mezi výhody CO<sub>2</sub> laseru řadíme např. široký rozsah výkonu, vysokou kvalitu paprsku, volitelný režim – nepřetržitá nebo impulsní vlna, spolehlivost procesů díky vysoké stálosti výkonu, díky vysoké kvantové optice dochází k nízké spotřebě energie, stabilní intenzita distribuce laserového paprsku, snadná integrace CO<sub>2</sub>, tento typ laseru oplývá ve stávajících koncepcích strojů svou kompaktní konstrukcí (file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI\_Laserbearbeitung\_CO2-Laser\_2016\_02\_T195de.pdf,1.4.2018).

Naopak nevýhodami tohoto typu laseru jsou vlnová délka, CO<sub>2</sub> laser není příliš vhodný pro přesné obrábění, vysokovýkonné laserové systémy jsou mnohem složitější a těžší, tudíž není zařízení mobilní. Zároveň zařízení požaduje neustálou kontrolu a údržbu.

### **Mechanismus excitace CO<sub>2</sub> laseru**

Tento typ laseru se vyznačuje tím, že CO<sub>2</sub> molekuly laseru emitují laserové světlo. Molekula CO<sub>2</sub> se skládá z jednoho atomu uhlíku a dvou atomů kyslíku, tvořící vzájemně řetězec, ve kterém je atom uhlíku umístěn mezi atomy kyslíku. Poté, co dojde k vybuzení molekuly, začíná oscilace. Různorodost oscilačních forem odpovídá různým tvarům energetických úrovní. Hladina čerpadla a vrchní úroveň laseru jsou vzdáleny velmi blízko od sebe. Laserový plyn se však neskládá pouze z CO<sub>2</sub> plynu, je směsí hélia, dusíku a oxidu uhličitého. Hélium a dusík zde figurují jako pomocné plyny, kdy mají za funkci podporovat skutečnost laserového procesu v CO<sub>2</sub> molekule. Detailnější popis excitace říká, že při vysokém střídavém napětí vznikají v plynové směsi volné elektrony, které excitují za pomoci kolize molekuly dusíku. Následně začínají molekuly dusíku oscilovat, a přenášet svou energii na CO<sub>2</sub> molekuly, kdy je zvedají ze základního stavu do vrchní úrovně laseru – dojde k oscilaci, což znamená, že se všechny tři atomy molekuly dostávají do pohybu (file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI\_Laser\_Processing\_CO2-Laser\_2016\_02\_T195en.pdf, 26.2.2018).

### **Princip a koncepce CO<sub>2</sub> laserů**

Existují dvě základní koncepce CO<sub>2</sub> laserů. První systém tvořící pevnou optiku se zakládá na pohybujícím se stole spolu s řezaným materiálem, přičemž pohyb laserové hlavy je pouze ve svislé ose. Tento systém je upřednostňován z hlediska stacionárních zrcadel a konstantní délce optické dráhy. Způsob uspořádání tímto způsobem umožňuje zachovat konstantní průměr svazku v průběhu technologického obrábění, což slouží ke stálosti určených parametrů. Velikou ztrátu zde zastává nutnost pohybu obrobku, což při velkém objemu dílů, a tedy i vysokých hladin setrvačných sil, výrazně zvyšuje nároky na zařízení. Dalším, tedy



druhým systémem, je tzv. mobilní optika, kdy je tabule plechu ve stacionární poloze a laserová hlava zajišťuje 3D pohyb. Velikou nevýhodou tohoto systému je nestabilní délka dráhy paprsku a pohyb odrazných zrcadel, důsledkem čehož máme možnost sledovat jiné parametry paprsku v odlišných místech pracovního prostoru laseru. Výhodným, a v praxi poněkud často používaným bývá kompromis těchto dvou variant, tudíž vznik kombinace obou systémů, kdy posuvný stůl opatří pohyb plechu v jedné ose, a pohyb v ostatních dvou osách je nahrazen řezací hlavou.

Hlavním významem výše uvedených způsobů při dosažení relativního pohybu z hlediska kvality mezi řezací hlavou a tabulí plechu spočívá v udržení konstantního, neměnného průměru svazku po celé ploše pracovního, laserového prostoru. Průměr svazku má totiž velmi důležité opodstatnění z hlediska ovlivňování vlastnosti svazku v ohnisku, a mimo jiné také výslednou rychlost řezání a kvalitu řezu.

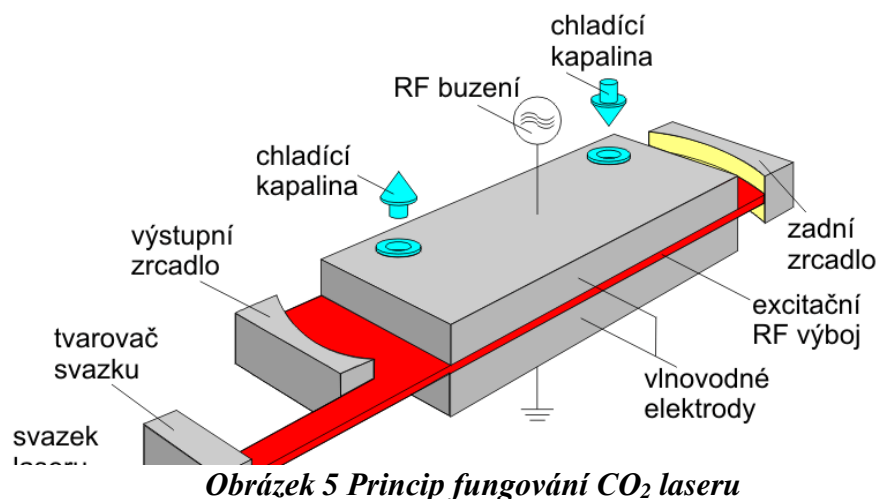
Délka optické dráhy, a především její konstantnost, je klíčovým faktorem pro kvalitu prostředí, ve kterém je svazek šířen. Klasickým způsobem rozvedení svazku v CO<sub>2</sub> laserech je mezi odraznými zrcadly vně trubice. Trubice plní ochrannou funkci svazku, který musí čelit negativním vlivům okolního prostředí. Vysokoenergetický svazek je zachovávan v konstantní podobě pouze v případě, že není ovlivňován odrazy od částic – prachové částice, a má neměnné, homogenní chemické složení a teplotu. Pro takové prostředí je zajištěna ochranná atmosféra, která je dováděna do trubice. Existují různé možnosti ochrany, jakými jsou například ochrana pomocí stlačeného vzduchu z kompresoru nebo profukování optické dráhy dusíkem. Ochrana pomocí stlačeného vzduchu z kompresoru se vyznačuje filtrací mechanických nečistot a vlhkosti, zároveň se snaží udržet konstantní teplotu. Metoda ochrany za pomocí profukování optické dráhy dusíkem je využita spíše pro výkonnější lasery (cca nad 4 kW), jejíž velikou výhodou je nastavení polohy a čistota odrazných zrcadel. Čistota zrcadel se odvíjí od kvality prostředí, tudíž jakákoliv zachycená nečistota působí komplikace a absorbuje část energie svazku, který na ni dopadá, díky čemuž je ovlivněno rozdělení energie ve svazku. Z tohoto důvodu je velmi důležité dbát na pravidelnou údržbu, aby nedocházelo, k již zmíněné absorpci, jelikož zvyšuje tepelné zatížení odrazného zrcadla, které posléze vede ke snížení jeho životnosti (Dahotre,2008)

Velmi důležitou součástí celého systému tvoří výstupní čočka, jejíž úkolem je upravování svazku na výstupu laseru tak, aby jeho finální parametry mohly dokázat zvládnout určitou operaci (hloubka ostrosti, koncentrace energie). Obdobně jako u odrazných zrcadel je nutné dbát o čočky a udržovat je v čistotě, jelikož zanedbání a znečištění může vést k trvalému poškození čočky, což má za příčinu snížení kvality řezu. Výměna čočky patří mezi běžné

operace, přičemž po jakékoliv manipulaci s ní musí být přezkoumána souosost svazku s tryskou (Šulc, 2004).

Podle tloušťky materiálu rozlišujeme různé průměry výstupních plynových trysek, jejíž úkolem je usměrnit proud asistenčního plynu do místa řezu. Průměr trysky je odvozen od tloušťky řezaného materiálu, neboť čím větší je řezaná tloušťka, tím větších rozměrů dosahuje i průměr otvoru. Nejčastěji se průměr trysky v praxi pohybuje od 0,8 do 3 mm.

Velikou nevýhodou zde sehrává tlak a průměr trysky, neboť se zvyšujícím se tlakem a průměrem trysky dochází k vyššímu čerpání asistenčního plynu. Při zvyšování průměru svazku v místě jeho dopadu na povrch materiálu klesá hustota energie v dopadové ploše. Pokud klesne hustota energie pod kritickou hodnotu, neproběhne řez materiálu.



**Obrázek 5 Princip fungování CO<sub>2</sub> laseru**

(<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>)

#### 4.1.10 a nevýhody laseru

#### Výhody

#### Výhody použití laseru v oblasti dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva

Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů.

- Malá šířka řezu - ideální pro vytváření řezů s malými poloměry.
- Vysoká rychlost řezu související s vysokou produktivitou práce.

- Velká přesnost řezu - přesnost většiny laserů dostupných na trhu odpovídá 1600 Dpi.
- Vysoká kvalita řezu = hladký povrch řezu = odpadá nutnost dalšího opracování.
- Nízký teplotní vliv na materiál- platí pouze při vysoké řezné rychlosti a vysokém výkonu laseru.
- Možnost regulace výstupního výkonu – umožňuje volit mezi režimem řezání či gravírování.

#### **Nevýhody použití laseru v oblasti dřevěných materiálů a materiálů na bázi dřeva**

- Při nižších řezných rychlostech dochází k vyššímu přenosu tepelné energie laseru na obrobek. Může tak docházet k opalování hran.
- Malá hloubka řezu – u běžně dostupných laserových zařízení nepřesahuje 50 mm.
- Vysoké pořizovací náklady (Kvietková, 2015).

## **4.2 Metoda obrábění dřeva vodním paprskem**

### **4.2.1 Historie vodního paprsku**

Historie metody obrábění vodním paprskem sahá již do daleké minulosti. Skutečný začátek aplikace řezání vodním paprskem sahá do 19. století, kdy kalifornští zlatokopové využívali této metody k odstranění nánosů písku a vrstev kamení.

Dvacátá léta 19. století jsou označována jako začátek používání vodních trysek k odstranění písku a horniny během stavebních prací. Tyto trysky dosahovaly velkých rychlostí toku s tlakovou úrovní několik desítek až stovek barů. První patent na použití vodního paprsku byl v Rusku, kde se využíval k vrtání děr v baňském průmyslu. O rozvoj metody a jejím následným uplatněním se zasloužil Petr Tupitsyn, který pracoval v Doněcku na Ukrajině v uhelných dolech. V roce 1936 použil vodní paprsek k řezání děr uhelných slojí. Mezi lety 1950 až 1960 vznikla touha těžít uran, vodní paprsek eliminoval riziko záření, které je k těžbě

uranu přidružno. Tímto se oživil zájem o použití vody jako řezného prostředku s tryskami o vysokém tlaku (<http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html>, 18.2.2018).

I přesto, že rozvoj řezání vodním paprskem propukl v polovině 20. století, tak širokého uplatnění tato technologie obrábění dosáhla až v osmdesátých letech, kdy se do vodního paprsku začala přidávat abraziva (syntetické hmoty využívané k řezání, vrtání, broušení). První osobou, studující použití velmi vysokého tlaku (UHP – Ultrahigh – Pressure) vody jako řezného nástroje, byl v padesátých letech Dr. Norman Franz, inženýr lesního hospodářství. Podmínka vysokého tlaku vody je definována tlakem větším než 30000 liber na čtvereční palec, tudíž je Dr. Norman Franz považován za otce vodního paprsku.

První komerční aplikace dorazila na svět v roce 1971. Technologie řezání vodním paprskem postoupila v sedmdesátých letech, kdy Dr. Mohamed Hashish vytvořil techniku přidávání abraziva k vodnímu proudu, a tím bylo umožněno využití vodního paprsku i pro řezání materiálů s vyšší pevností a větší tloušťkou. V současnosti jsou stroje pro tvarové řezání vodou vybaveny naklápěcím systémem řezné hlavy, což umožňuje tzv. 3D řez (řezání pod úhlem až 60°). Díky tomu je dnes na strojích pro tvarové řezání vodním paprskem dosahováno téměř dokonalého kolmého řezu.

#### **4.2.2 Charakteristika obrábění vodním paprskem**

Obrábění vodním paprskem se někdy označuje jako hydrodynamické obrábění. Využívá se převážně pro řezání různých materiálů, kdy řezným nástrojem je vodní paprsek o vysokém tlaku a rychlosti. V praxi se nejčastěji využívá řezání čistým vodním paprskem, v menší míře řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí. V dřevařské technologii označujeme řezání čistým vodním paprskem jako beztržkové obrábění a řezání abrazivním vodním paprskem za tržkové obrábění dřeva. Zařízení pro řezání čistým vodním paprskem se používá zejména pro řezání nekovových materiálů, jako jsou grafitové kompozity, lamináty, gumotextil či sklotextil. Rychlost tohoto řezání se pohybuje okolo 5m.min<sup>-1</sup> (lamináty) ÷ 400 m.min<sup>-1</sup> (papír, lepenky).

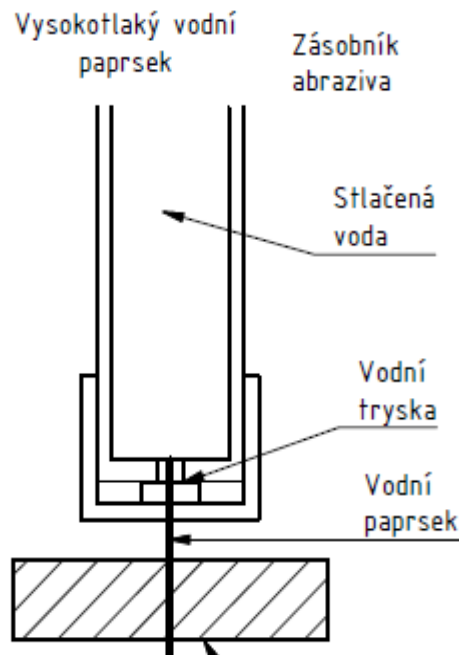
Zařízení pro řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí, sloužící převážně pro řezání tvrdých a velmi tvrdých materiálů rychlostmi od 10m.min<sup>-1</sup> (titan, kobalt) až do 2500 m.min<sup>-1</sup> (sklo, kompozity, hliník) (Barcík a kol., 2012).

### 4.2.3 Princip řezání vodním paprskem

Hlavní podstatou řezání vodním paprskem je obrušování děleného materiálu tlakem vodního paprsku. Tento proces probíhá v podstatě stejným způsobem jako vodní eroze, rozdílem je pouze to, že je značně zrychlený a soustředěný pouze do jednoho místa. V případě řezání vodním paprskem, je důležité se pozastavit nad tím, že se paprsek kapaliny pohybuje dvojnásobnou až čtyřnásobnou rychlostí zvuku, tudíž ho lze z fyzikálního hlediska jeho účinků považovat za pevné těleso. Proces řezání probíhá ve dvou fázích. V první fázi vzniká kvůli působení tlaku prohlubeň, která se postupně mění v otvor. V druhé fázi dochází k prohlubování, které vede k vytváření řezné spáry. Při nárazu paprsku kapaliny na obrobek dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše, čímž dochází v řezaném materiálu k rázovým vlnám, rychlé destrukci materiálu obrobku na hranici zrn a ke vzniku mikrotrhlin (<http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>, 5. 3. 2018).

V důsledku dynamického zatížení dochází k rychlému šíření mikrotrhlin, díky němuž se narušuje obráběný materiál. Další komplikace, které mohou vést k destrukci materiálu, způsobuje turbulentní proudění kapaliny ve spáře s účinkem kavitačních bublin.

Technologie obrábění materiálu pomocí vysokoenergetického kapalinového paprsku, označovaná také jako hydroabrazivní obrábění, si díky svým mimořádným vlastnostem vybudovala významné postavení a uplatnění v kosmickém a leteckém průmyslu. Daná metoda obrábění dřeva se nejčastěji využívá ve dvou podobách, a to řezání čistým vodním paprskem, a řezání vodním paprskem s abrazivní příměsí (<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>, 17.3.2018)



**Obrázek 6 Princip řezání vodním paprskem**

(Kvietková, 2015)

#### **4.2.4 Řezání čistým vodním paprskem**

Při obrábění čistým vodním paprskem se využívá skutečnosti, že kapalina vystupující z trysky malého průměru (cca. 0,3 mm), pod vysokým tlakem (cca 350 – 400 MPa) je nositelem velké kinetické energie (rychlost pohybu kapalinového paprsku cca  $885 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (Kvietková, 2015). Jak již bylo zmíněno u principu vodního paprsku, kapalinový paprsek můžeme považovat až za „tuhé“ těleso, v tomto případě z pohledu účinku kinetické energie. Paprsek se v případě této metody vytváří až v řezací hlavě. Voda, která je stlačována na vysoký tlak, prochází skrz trysku s malým otvorem, a mění se na tenký vodní paprsek s velkou kinetickou energií a velkou rychlostí.

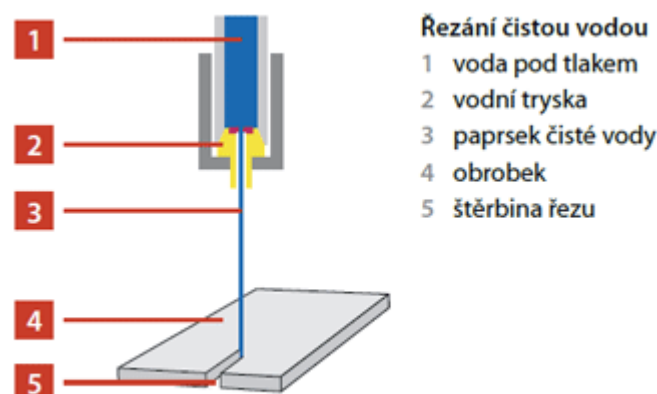
Poté paprsek dopadá na obráběný materiál, kde po dopadu dochází ke zbrzdění paprsku kvůli tření mezi paprskem a povrchem materiálu. Mimo jiné klesá kinetická energie a paprsek se vychyluje (<https://core.ac.uk/download/pdf/30294311.pdf>, 21.2.2018).

Při kontaktu kapalinového paprsku s povrchem rozrušovaného materiálu se naakumulovaná kinetická energie v kapalinovém paprsku uvolní a dojde k jejímu působení na materiál. Projeví se to prudkým nárůstem napětí v kontaktní zóně, při kterém dojde až k porušení jeho celistvosti. Rozsah porušení materiálu je závislý na jeho mechanických

vlastnostech a velikosti působícího napětí (Krajný, 1998).

Nejvýraznější vliv a dopad na narušení materiálu má již zmíněná plastická deformace, při které dochází k porušení soudružnosti. Plastická deformace je důsledkem působení kinetické energie, která dosahuje vysokých hodnot, a působí na malou plochu obráběného materiálu. Mezi základní druhy, kdy dochází k rozrušení materiálu, patří: poškození následkem plastické deformace, příčného roztékání proudu a pronikání kapaliny do nitra materiálu mezi jeho strukturu, šíření napěťových vln. Působením jednoho nebo více zmíněných mechanismů dochází nejdříve k poškození, posléze k odnosu materiálu, na který kapalina působila (Barčík a kol., 2012).

Technologie čistého vodního paprsku je vhodná pro řezání měkkých materiálů o malé tloušťce, nejčastěji se jedná o nekovové materiály. Dále může posloužit i při dělení plastových materiálů, gumy, pěnových materiálů. Díky své univerzálnosti a přesnosti řezu nachází významné uplatnění v potravinářském a medicinském průmyslu. V neposlední řadě bych zmínila, že se dá čistý vodní paprsek využít k čištění výrobků a zařízení.



**Obrázek 7 Princip řezání čistým vodním paprskem**

([https://theses.cz/id/z94h7f/zaverecna\\_prace.txt](https://theses.cz/id/z94h7f/zaverecna_prace.txt), 10.3.2018)

#### **4.2.5 Výhody řezání čistým vodním paprskem**

- Studený řez – nedochází k ohřevu řezaného materiálu, ani ke změně struktury.
- Díky minimálnímu silovému působení paprsku na řezaný materiál nedochází ke vzniku mikrotrhlin.
- Univerzálnost – jakost opracované plochy je kvalitní i při vícenásobných řezech.

- Možnost vícesměrného řezání s nulovým poloměrem zaoblení.
- Před opracováním tvaru není předem nutné provádět vyvrtání díry.
- Řezání vodním paprskem je příznivou technologií k životnímu prostředí - při řezání se netvoří prach.
- Při řezání nevznikají žádné ekologicky škodné zplodiny.
- Spotřeba vody při řezání je velmi nízká - z odpadních vod se při sedimentaci vylučují veškeré nečistoty.
- Tento systém řezání je dobře začlenitelný do automatizovaných systémů.

### **Nevýhody řezání čistým vodním paprskem**

- Kontakt s vodou způsobuje změnu barvy, znečištění, u nasákavých materiálů delší dobu vysoušení.
- Možnost vzniku koroze při obrábění.
- Během provozu se šíří značný hluk.
- Opoždění paprsku.
- Vysoké náklady na provoz, které ovlivňují celkovou cenu.
- Delší doba trvání vysoušení u nasákavých materiálů.
- Limitovaná možnost výroby rozměrově malých dílců (cca 3 – 5 cm).
- Nezbytně nutná recyklace odpadní vody-
- Zhoršení kvality stupních řezů může mít za příčinu deformaci kontury řezu.

### **4.2.6 Řezání vodním paprskem s příměsí abraziva**

Metody s abrazivní příměsí jsou vývojově mladší než metody čistého vodního paprsku, prvního průmyslového využití se jim dostalo již v roce 1983 (<https://core.ac.uk/download/pdf/30294311.pdf>, 10.3.2018).

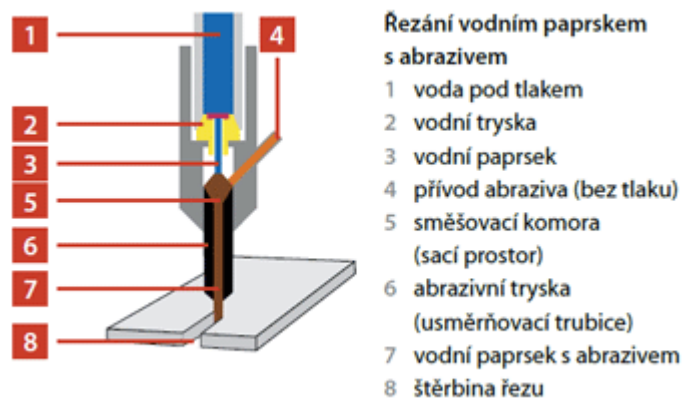
Rozdíl mezi čistým vodním paprskem a abrazivním paprskem je v přidávání jemného brusiva vody, ke kterému dochází ve směšovací komoře (Kvietková, 2015).

Jemným brusivem může být např. granát, olivín, karbid křemíku, korundový prášek, ocelová drť a další, které zlepšují řeznou schopnost. Tyto abrazivní příměsi jsou nevhodné k recyklaci.

Nejčastěji je vodní paprsek s abrazivní příměsí používán k řezání velmi tvrdých



materiálů, mezi které patří např. keramika, kámen, kovy, atd (<http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/reusing-waterjetcutting-abrasive>, 18.3.2018).



**Obrázek 8 Princip řezání abrazivním vodním paprskem**

(<http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>, 23.1.2018)

### **Výhody řezání abrazivním vodním paprskem**

- Objemná všestrannost.
- Snadné programování během pořezu.
- Přesnost geometrie řezu.
- Velmi nízké řezné síly, díky kterým nedochází k tvorbě mikrotrhlin.
- Při řezání lze použít na ráz více hlav.
- Při pořezu nedochází skoro k žádným ztrátám materiálu.
- Řez je bez mechanického pnutí, je zde i možnost řezu ve vrstvách.

### **Nevýhody řezání abrazivním vodním paprskem**

- Cena abraziva je poněkud vysoká, což ovlivňuje celkové náklady.
- Komplikace během navlhčení boční plochy materiálu vodou.
- Rozstříkujícím se vodním paprskem dochází ke zvlhčení vrchní plochy materiálu.
- Odstříkující znečištěná voda z pohlcovací nádrže způsobuje zvlhčení spodní plochy materiálu.

- Získání pouze rovné plochy na straně řezné hrany (Reisner 2004, Barčík 2007).

#### 4.2.7 Konstrukční zařízení vodního paprsku

Části zařízení vodního paprsku se skládá několika částí, mezi které patří:

- a. Příprava vody
- b. Plunžrové čerpadlo
- c. Hydraulické čerpadlo
- d. Hydraulické rozvody
- e. Akumulátor
- f. Multiplikátor
- g. Řezací hlava
- h. Vodní trysky
- i. Abrazivní trysky
- j. Recyklace abraziva

#### Příprava vody

Před vstupem vody do součástí zařízení je nezbytně nutné připravit vodu tak, aby byla vhodná k použití a bez jakýchkoliv znečištění. Veškeré části zařízení vodního paprsku musí být preventivně chráněny, aby byly schopné zabránit nečistotám a dalším příměsím, které způsobují běžné komplikace ve vodě. Díky malému průměru trysky je zapotřebí udržovat vodu stále čistou a vyvarovat se usazování příměsí. Mezi metody, sloužící k přípravě vody, patří filtrace, deionizace a změkčování vody (Maňková, 2000).

**Filtrace** spočívá na principu mechanického uchycení pevných látek na filtru, proto je tato metoda nazývána jako separační. Při obrábění vodním paprskem je používá tzv. hluboký filtr, který je schopen zachytit částice nad 10 um. Tento zmiňovaný hluboký filtr používá čtyři vrstvy. Seshora dolů se stává každá vrstva těžší a jemnější, a je specifická svojí vysokou hmotností. Vrchní vrstva zachycuje z materiálu velké částice. Se snižováním vrstev dochází zároveň ke snižování velikosti částic, tudíž druhá vrstva zachycuje již menší částice, a poslední vrstva ty nejmenší (Krajný, 1998).

Filtr je generován v určitém časovém úseku nebo během měření odlišnosti tlaků tzv. zpětným proplachem, který slouží k vyplavení usazených částic ve filtru. Další filtrací může být zmíněna uhlíková filtrace, která vyžaduje ke své aplikaci vodu bez jakéhokoliv zápachu a

chuti. Na vysoký obsah nečistot ve vodě, jako jsou například zbytky železa nebo manganu, je aplikována tzv. zeleně písková filtrace (Kvietková, 2015).

**Změkčování** se označuje jako přípravný krok pouze v případě, pokud chceme provést deionizaci nebo zpětnou osmozu. Obsah vápníku a hořčíku způsobuje tvrdost vody. Pokud chceme provádět vyhodnocení tvrdosti vody, poslouží nám různé tabulky. Voda prochází skrz zařízení na změkčování iontovou výměnou, skládající se z nádržky s pryskyřicí. Na pryskyřicová zrnka je vázán hořčík a vápník, a tím odchází změkčená voda. Využívají se kationtové a aniontové pryskyřice, které jsou umístěné zvlášť ve dvoukomorové nádržce. Napříč oběma komorami prochází voda, nejprve přes první, následně do druhé komory. (Valíček, 2008, Krajný 1998).

**Deionizace** se tolik neliší od procesu změkčování, pouze je o trochu složitější. Snahou je docílit toho, aby voda opouštěla komory a celé zařízení zbavená veškerých nečistot.

**Zpětná (reverzní) osmóza** je jednoduchým procesem, kdy se produkuje vysoce kvalitní voda. Voda je vysokým tlakem stlačena přes polopropustnou membránu, ve které jsou zachycovány veškeré nečistoty a rozpustné částice. Polopropustná membrána odplavuje rozpustné částice do odtoku, čímž dochází k oddělování vody. Účinnost reverzní osmozy bývá na úrovni 95%, a stejně tak vysoká je i téměř u všech bakterií a mikroorganismů. (Krajný, 1998).

## **Plunžrové čerpadlo**

Plunžrové čerpadlo, nazývané také jako pístové, je složeno z několika částí, ale mezi nejpřednější patří píst a válec. V případě, že se posouvá píst k dolní úvrati a spolu s tím je otevřen sací ventil, dochází k sání vody, a zároveň se zvyšuje objem válce. Na zpátečním pohybu pístu dojde ke stlačování vody, a ve válci stoupá tlak. Tím se sací ventil uzavře a vysokotlaká voda je do potrubí vytlačována díky otevřeným výtlačným ventilům. Nevýhodou plunžrového čerpadla je vznik pulzující tlakové vody, jelikož maximálního průtoku vody je docíleno pouze v reverzním pohybu, jinak je průtok nulový. Tudíž bývá přínosem používat více čerpadel pracujících na odlišných frekvencích, aby měly možnost se navzájem doplňovat. Využitím vyššího počtu plunžrových čerpadel není zapotřebí použít akumulátor tlakového rázu. (Kulekci, 2002).

## **Hydraulické čerpadlo**

Pohonem hydraulického čerpadla je elektromotor s vysokým výkonem. Olej je čerpadlem stlačován na maximální tlak 21 MPa, a poté je zasílán do multiplikátoru. Právě díky vysokému tlaku produkuje hydraulické čerpadlo objemné množství vodní energie, přičemž užití množství vody je naopak malé. Hlavními přednostmi hydraulického čerpadla jsou kompaktní rozměry, odolnost konstrukce, nízká hmotnost, a především nízká spotřeba vody, díky které se stává hydraulické čerpadlo nízkonákladovým zařízením (www.flowwaterjet.com, 19.3.2018, Maňková, 2000).

## **Hydraulické rozvody**

Potrubí hydraulických rozvodů obsahuje ventily, které se dělí na jednocestné a dvoucestné ventily. Jednocestné ventily jsou používány u multiplikátoru na sací větvi, kde zamezují návratu pracovní kapaliny zpět do sacího ústrojí. Zbylé dva jsou na výtlačné větvi, kde zabraňují návratu natlakované kapaliny zpátky do multiplikátoru. Dvoucestný ventil plní funkci regulace řezacího procesu, kdy ventil má za úkol otevírat a zavírat přívod pracovní kapaliny. Nejvhodnějším materiálem pro výrobu hydraulických rozvodů bývá korozivzdorná ocel, a to z důvodu, že při přepravě kapaliny musí vysokotlaká část zařízení zabránit dynamické zátěži a vysokému tlaku (Valíček, 2008).

## **Akumulátor**

Hlavní funkcí akumulátoru je vyrovnání kolísání tlaku v systému, ke kterému dochází kvůli pohybu pístu v multiplikátoru. Mezi vedlejší funkce patří tlumení rázů od multiplikátoru. Veliký ohlas si akumulátor získal tím, že udržuje rovnoměrný tlak a rychlost vody, tudíž patří k nezbytně nutné součásti systému, zabezpečující jeho spolehlivost a životnost. Díky použití akumulátoru se systém dokáže vyvarovat tvorbě rýh, které vznikají nepravidelností dodávky vody. Z tohoto důvodu stoupá celková kvalita řezu (www.wardjet.com, 15.3.2018, Kulekci, 2002).

## **Multiplikátor**

Multiplikátor zabezpečuje převod tlaku oleje čerpadla na vysoký tlak vody. K tomu, aby došlo ke zvýšení tlaku, musí být využity různé rozměry pracovní plochy pístu. Multiplikátor se sestává ze dvou okruhů, kterými jsou primární okruh (nízkotlaký) a sekundární okruh (vysokotlaký). Do prvního okruhu je přiváděn olej do oblasti pístu na první plochu, zatímco u druhého okruhu je voda dopravena na druhou stranu pístu s druhou plochou.

V případě, že na píst 1 působí tlak  $P_1$ , pak Pascalův zákon tvrdí, že tlak  $P_2$  bude tolikrát větší, kolikrát je menší plocha  $S_2$  ku ploše  $S_1$  (Barcík a kol., 2012).

$P_1$  – tlak na píst s menší plochou

$P_2$  – tlak na píst s větší plochou

$S_1$  – plocha menšího pístu

$S_2$  – plocha většího pístu

Pro zajištění kontinuálního proudu vysokotlaké kapaliny jsou využívány především dvoučinné multiplikátory. Poté platí pro tlak  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

Pro zesílení tlaku na tlak  $P_2$  je zavedena tzv. multiplikační konstanta, pomocí které vyjádříme vztahem:

$$i = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \quad [-] \quad (2)$$

$i$  – *multiplikační konstanta* (koeficient zesílení tlaku).

Ztráty multiplikátoru musí být zohledněny ve výpočtu vyvíjeného tlaku pomocí mechanické účinnosti, jejíž hodnota se pohybuje okolo  $\eta_m = 0,95$ . Tyto ztráty mohou být způsobené např. třením, netěsnostmi nebo hydrodynamické.

$$P_2 = \frac{S_1 - S_2}{S_2} \cdot P_1 \cdot \eta_m \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$\eta_m$  = *mechanická účinnost multiplikátoru* (Krajný, 1998).

## **Řezací hlava**

Řezací hlava patří mezi nedílnou součást zařízení pro obrábění vodním paprskem. Funkce řezací hlavy spočívá v převádění vysokotlaké kapaliny na řezný nástroj, jehož úkolem je vytvořit vysokorychlostní a tenký vodní paprsek. Díky této části zařízení – řezací hlavě získáváme finální typ paprsku s jeho veškerými charakteristickými vlastnostmi. Veliký význam, co se týče vlastností, zde tvoří tvar, přesnost řezu a kvalita. Rozlišujeme různé druhy řezacích hlav dle způsobu řezání: prvním druhem je řezací hlava pro řezání čistým vodním

paprskem, druhým, a zároveň třetím druhem je řezací hlava pro řezání abrazivním vodním paprskem, kdy hlavním rozdílem mezi těmito druhy je přívod abraziva. Přívod abraziva na řezací hlavu může být buď s radiálním přívodem abraziva, nebo s axiálním přívodem abraziva. Hlavní princip řezací hlavy s radiálním přívodem abraziva se zakládá na strhávání abrazivních částic, které přivádí radiálně vodní paprsek (<http://www.sciencedirect.com>. [ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S089069550200069X](http://ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S089069550200069X), 21.3.2018).

Úkolem řezací hlavy s axiálním přívodem je dovést abrazivo do směšovací komory, kde je následně abrazivo míseno s radiálně přiváděnou vysokotlakou vodou. Princip řezací hlavy s axiálním přívodem je více složitější než princip řezací hlavy s radiálním přívodem abraziva, ale z hlediska konstrukce je výhodnější, jelikož díky axiálně přiváděnému abrazivu nedochází k výraznému opotřebování vnitřní stěny trysky, tím pádem je zvýšena i její životnost. V dnešní době jsou konstrukce řezacích hlav od výrobců neustále vylepšovány, a to z důvodu dosažení co nejkvalitnějších výsledků a vlastností vodního paprsku, a především docílení delší životnosti trysek. Tento vývoj dosažení lepších vlastností bývá zdlouhavý a poněkud složitý, a to proto, že je zapříčiněn náročností sledování daného paprsku.

Umístění řezací hlavy bývá na pohyblivém mechanismu souřadnicového stolu, který je řízen pomocí CNC počítačem. Pohyb řezací hlavy je nejčastěji řízen dvěma osami nad obráběným materiálem, přičemž třetí osa nám umožňuje nastavit vzdálenost mezi tryskou a řezaným materiálem (Kocman, 2011).

#### **4.2.8 Vodní trysky**

Vodní tryska tvoří nejvýznamnější část řezací hlavy. Schopnost vodní trysky spočívá v zajištění přetvoření vysokotlaké vody na úzký vodní paprsek, jehož rychlost je velmi vysoká. Dle kvality této přeměny (transformace) zjistíme celkovou účinnost řezání.

Materiál vodní trysky je vybírán podle hodnoty tlaku, díky které je dělíme na trysky pro nízké tlaky, trysky pro střední tlaky a trysky pro vyšší tlaky. U trysek pro nízký tlak, který se pohybuje do 150 MPa, bývá volen za materiál tvrdokov nebo korozivzdorná ocel. Trysky pro střední tlak, který bývá obvykle do 250 MPa, jsou vyráběny ze slinutého karbidu a keramiky. Trysky pro vyšší tlak, dosahující hodnot nad 250 MPa, se nejčastěji vyrábějí z rubínu, safíru nebo syntetického diamantu. Životnost safírových trysek, pohybující se okolo 200 řezacích hodin, je významně ovlivněna nečistotami a usazeninami způsobenými uvnitř trysky. Nej kvalitnější materiálem oplývá diamantová tryska, u které je životnost až desetinásobně delší, ale zároveň také finančně náročnější (Kulekci, 2002).

#### **4.2.9 Abrazivní trysky**

Schopností abrazivní trysky je udávat finální tvar vodnímu paprsku, vystupující z řezací hlavy. Důležitá je u abrazivních trysek zvýšená otěruvzdornost, která zajišťuje delší životnost a trvanlivost trysky, což kladně ovlivňuje postup řezacího procesu. Použití abraziva může během průchodu tryskou narušovat vnitřní povrch trysky, důsledkem čehož se mění tvar výstupního otvoru, a tím pádem dochází ke zhoršení kvality řezu – řez bývá obvykle nepřesný. Mimo jiné vzniká při tomto jevu tření, při kterém se ztrácí energie paprsku (Valíček Jan, Hloch Sergej, 2008).

#### **4. 2. 10 Recyklace abraziva**

Patří mezi nedílnou součást procesu, která by neměla být během konstrukčního zařízení opomenuta. Recyklace abraziva je nutná z hlediska toho, že při řezání abrazivním vodním paprskem je do lapače vody z trysky přiváděno veliké množství abrazivních částic, kdy většina částic zůstává nevyužita. Vhodný výběr abraziva hraje v tomto případě velkou roli, jelikož může výrazně ovlivnit celkovou cenu, a tím pádem zvýšit i konečnou cenu řezu.

Hlavní princip fungování recyklační jednotky probíhá na základě odsávání abraziva s vodou z lapače. Tato směs je pročištěna skrz síta vibračního separátoru, zajišťující propadnutí rozdrčeného a křehkého abraziva, jehož opakovatelnost použití již není vhodná. Nevhodná směs abraziva je odstraněna do odpadní nádoby. Abrazivo, vhodné pro další použití, se přesouvá ze síta do sušičky, kde je ze směsi odváděna voda. Tento proces je ještě jednou opakován, a posléze přečerpán vzduchovým dopravníkem do zásobníku, kde jsou připraveny příznivé podmínky pro znovupoužití abraziva (Kulekci, 2002).

Konstrukční zařízení pro recyklaci abraziva má jednu velkou nevýhodu, a to, že jeho používání a celková reže procesu je velmi nákladná. Recyklace abraziva je pro provozovatele výhodná pouze v případě, že je měsíčně využito vysoké množství abraziva, kdy hranice rentability se pohybuje okolo 30 tun abraziva / měsíc. Z tohoto důvodu mnozí provozovatelé, mající menší spotřebu, mohou vyhledat pomoc některé specializované firmy, která se postará o recyklaci abraziva pomocí svých dostupných prostředků za ně (<https://www.flowwaterjet.com/>, 13.1.2018).



*Obrázek 9 Obrábění vodním paprskem DEMA Zvolen*



*Obrázek 10 Stroj pro obrábění vodním paprskem DEMA Zvolen*



## Využití technologie čistého vodního paprsku a abrazivního vodního paprsku

- *Dřevařský průmysl* – jedná se o technologii řezání vodním paprskem, která byla poprvé představena americkou firmou FLOW začátkem 50.let 20.století, kdy se prováděly různé experimenty za cílem dosažení a využití síly vodního paprsku při řezání dřeva. Zároveň firma FLOW vyvinula multiplikátor, zajišťující zesilování tlaku, a spolu s dalšími důležitými zařízení si získaly široké uplatnění i v jiných průmyslových oborech, mezi které patří kupříkladu letecký, papírenský nebo kosmický průmysl. (<http://www.rezeme-vodou.cz/napsali/stavitel.pdf>, 8.4.2018, Kvietková 2015).
- *Strojírenský průmysl* – největší uplatnění získává obrábění vodním paprskem ve strojírenském průmyslu, kde je nejvíce využíván k řezání kovových i nekovových materiálů, a slouží pro tvarové řezání a dělení různých druhů materiálů s rozdílnou pevností. Obrábění je zaměřeno spíše na abrazivní vodní paprsek, který umožňuje obrábět vysokopevnostní slitiny, horniny, a k ultratenkému mletí a dezintegraci geomateriálů.
- *Stavebnictví* – velikého zájmu se dostalo řezání vodním paprskem ve stavebnictví, kde nachází největší uplatnění při dělení izolačních materiálů, keramiky, skla, ale i dřeva nebo betonu.
- *Potravinářský průmysl* – podstatnou úlohu zastává vodní paprsek i v tomto odvětví, kde zajišťují krájení nebo další dělení potravin jako jsou například maso, ovoce, zelenina, sýry, a to jak v klasickém, tak i mraženém stavu.
- *Chemický průmysl* – v tomto oboru je vodní paprsek používán na řezání a dělení výbušných látek jako jsou např. dynamit nebo tuhá paliva raketových motorů., dále také plastických hmot, kompozitu nebo těžkoobrobitelných materiálů.
- *Jaderný průmysl* – výskyt vodního paprsku v tomto průmyslu není příliš častý, ale i přesto si zde získal význam při odstraňování železobetonových vrstev a jejich dekontaminace (zbavování nečistot) v zařízeních pro jaderné elektrárny.
- *Elektrotechnický průmysl* – v elektrotechnice může vodní paprsek nabídnout řez skla, amorfních látek, ale především řezání desek tištěných spojů a permanentních magnetů.
- *Textilní průmysl* – v tomto průmyslu slouží vodní paprsek k řezání a dělení kůže.
- Vodní paprsek si získal oblibu i v jiných odvětvích lidské činnosti, nýbrž v menším rozsahu. Jedná se například o řezání nebo matování skla nebo také k těžbě a třídění hornin.

Nejpozoruhodnějších výsledků dosahuje vodní paprsek v medicíně. V dnešní době působí vodní paprsek na klinikách, kde zastupuje a silně konkuruje skalpelu. Je to především z toho důvodu, že vodní paprsek dokáže usměrnit sílu řezu, čímž tato síla má daleko lepší funkce než ostré nože. Vodní paprsek je využíván dále v chirurgii, kde díky němu nedochází k objemným ztrátám krve. Vzhledem k tomu je složitost operací méně náročná, a tím pádem i přizpůsobivá a méně komplikovaná směrem k pacientům. Zároveň vodní paprsek hraje významnou roli při odstraňování tetování, barva tetování se vyplaví a nezpůsobí trvalé následky ani jizvy.

Díky postupnému vývoji obrábění vodním paprskem získává tato metoda daleko větší rozšíření v mnoha odvětvích, a to především pro svou přesnost výroby. Z tohoto důvodu zastává vodní paprsek významnou roli i v oborech, kde to bylo v minulosti nemožné a nerealizovatelné.

## 5 Ekonomické vyhodnocení metody obrábění dřeva laserem a vodním paprskem a jejich vzájemné porovnání

Ekonomického hodnocení se docílí srovnáváním hodinových sazeb dílčích zařízení. Materiál, v našem případě dřevo, je velmi různorodé, proto je příznivější postupovat způsobem určení průměrné strojní sazby za hodinu než zjišťovat celkové náklady na výrobu série určitého dílu.

$$\text{PHS (průměrná hodinová sazba) [Kč / hod]} = \frac{\text{Náklady na pracoviště [Kč/rok]}}{\text{Časový fond pracoviště [Hod/rok]}}$$

### 5.1 Ekonomické zhodnocení obrábění laserem

Technologii obrábění laserem můžeme zprvu považovat jako velmi nákladnou, ale zdání klame. Z důvodu minimálních přířezů stoupá množství technologického odpadu. Vedle těchto zmíněných negativ se nachází také spousta pozitivních vlastností, kterými se může laserová technologie charakterizovat. Patří mezi ně například možnost operativního řízení, vysoká kvalita řezu materiálem, okamžité reakce na nároky zákazníků při malosériových či kusových výrobcích, a především lze dosáhnout tvarově složitých výrobků, u kterých by bylo jinak nutné nákladnějšího nástroje. Velmi důležitou roli během procesu obrábění sehrávají vlastnosti obráběného materiálu, chemické složení a reakce, vznikající při kontaktu s laserovým svazkem, absorpcí a průnikem skrz materiál. Významně se podílí na ekonomickém zhodnocení nastavené parametry řezání a paprsku, které jsou udávány pomocí výkonu rezonátoru, optikou laseru, zvolenou tryskou, aktivním médiem, a závěrem výběr provozu laseru a jeho nastavením.

Výše užitné hodnoty při obrábění laserem široce souvisí s pořizovacími náklady. Pořizovací náklady se odvíjejí od výkonu laseru, a dají se vyjádřit vztahem, že navyšováním laserového výkonu, se zároveň zvyšují pořizovací náklady. Díky tomu se tato technologie stává poněkud nákladnou.

Z pohledu kvalitativní stránky lze pomocí laseru docílit takových výsledků na obráběném materiálu, že nebude následně zapotřebí jiných finálních úprav či operací. Tím pádem se to může považovat jako další výhoda, jelikož je díky tomu časově úspornější, současně se snižují výrobní náklady, a dochází k hospodárnějšímu využití lidských zdrojů.

## 5.2 Ekonomické zhodnocení obrábění vodním paprskem

Vodní paprsek, fungující jako řezný nástroj, si ve světě v rámci vývoje technologie vybudoval postavení téměř ve 2000 různorodých alternativách. Z tohoto hlediska se dá usoudit, že se rozvoj obrábění vodním paprskem neustále vyvíjí a posouvá tuto technologii kupředu. Vysoký zájem o vodní paprsek zaznamenávají převážně firmy, které přijímají každým rokem navyšující se množství zakázek, a zároveň zvyšující se objem prodaných strojů pro tuto technologii.

Důsledkem vyššího objemu zakázek a prodeje narůstá i spotřeba abraziva, které je nutné po jejich použití ekologicky zlikvidovat, což výrazně ovlivňuje a zvyšuje finanční stránku výrobního procesu. Nynější doba umožňuje použité abrazivo recyklovat, a upravit takovým způsobem, aby posloužilo i pro opakovatelné využití. Volba zařazení recyklace abraziva do výrobního procesu je vhodná právě pro společnosti, přesahující hranici spotřebovaného abraziva. Recyklací abraziva se docílí ke snížení nákladů, jelikož není zapotřebí nákup nového abraziva, společně s čímž souvisí i nižší poplatky za ekologickou likvidaci. Vlivem klesající ceny amerického dolaru docházelo ve světových trzích současně k poklesu ceny abraziva.

Pořizovací náklady celého konstrukčního zařízení pro obrábění vodním paprskem se díky vývoji značně změnily. Hodnota kompletního pracoviště pro obrábění vodním paprskem, o rozměrech pracovní plochy stolu 3000 x 2000 mm, jehož součástí je také software, řídicí systém, vysokotlaké čerpadlo o výkonu 40 kW, maximální pracovní tlak 390 MPa, dosahovalo přibližně ceny 2 960 000 nebo-li 1 170 000 eur. Nynější hodnota obdobného pracovního zařízení se stejně kvalitnímu rozměry a funkcemi, je již nižší. Příčinou poklesu ceny na trhu může být posilující koruna, vliv ostatních konkurenčních nabídek, především z hlediska rozvojově kvalitnějších a vyspělejších zařízení pro řezání pomocí vodního paprsku. Je nutné zmínit, že cenová relace celkového nákladu se může lišit, a to v případě, kdy bude zapotřebí výměna nebo doplňkový nákup jakékoliv části zařízení. Názorným příkladem nám může posloužit výměna trysky (safírové trysky), která často podléhá opotřebení, a jejíž pořizovací cena před deseti lety se pohybovala okolo 3 000 Kč. Hodnota safírové trysky bývá s ohledem na inflaci v posledních letech neměnná.

Další ekonomické údaje, vyžadující se pro tuto technologii obrábění dřeva, bývají závislé na mnoha důležitých faktorech. Nejvyšších rozdílů se zaznamenává u ceny, která je nejčastěji proměnlivá z důvodu tvarové náročnosti obráběných částí, s čímž souvisí i jejich tloušťka. Důsledkem růstu ceny vstupních zdrojů, se očekává, že z hlediska provozních nákladů

bude nabývat i výše celkové ceny, kam se zahrnují např. poplatky za energie, nároky na zvyšování platů.

#### **5.4 Porovnání metody laseru a vodního paprsku**

Obě dvě metody se řadí do metod nekonvenčních, a zároveň se dají považovat za moderní a neustále dostupné technologie při obrábění dřeva. V této části práci se objevují převážně finanční náklady potřebné na provoz jednotlivých metod, a také srovnání ze strany kvality. Pořizovací náklady obou dvou metod jsou navzájem od sebe velmi odlišné, viz. Tabulka 1, nacházející se pod textem. Metoda obrábění dřeva abrazivním vodním paprskem je z finančního hlediska znevýhodněna abrazivem, které je velmi nákladné, a může představovat až 75 % provozních nákladů celého stroje. Při použití abraziva je zapotřebí snížit tlak během obrábění, což působí velmi nepříznivě na energetickou náročnost výroby, která se díky tomu značně snižuje. Řešením by mohlo být zvýšení tlaku, jelikož zvyšující tlak umožní částicím daleko větší výkon řezu a dynamiku, čímž se zintenzivní a zvětší posuvová rychlost. Ve zkratce řečeno, je vyrobeno větší množství polotovarů za kratší časový interval. Tyto skutečnosti podnítily vznik nových druhů čerpadel, které by měly posloužit k hospodárnějšímu režimu, a tím ušetřit až okolo 50% nákladů na řezání. Technologie vodním paprskem oplývá mnoha výhodami, mezi které můžeme zařadit vysokou energetickou účinnost, teplota při obrábění dosahuje hodnot kolem 50 °C, na řezu se nevyskytují otřepy. Hlavní nevýhodou je značný hluk, objevující se při provozu určitého stroje.

Velikou roli při hodnocení finančních nákladů při obrábění laserem hraje druh plynu, kterého využívá laser při jeho obrábění, spotřeba elektrické energie, jejíž hodnota bývá daleko vyšší než u vodního paprsku. Stejně tak jako u vodního paprsku nesmí být opomenuty náklady na mzdy zaměstnanců a provoz stroje, s čímž souvisí veškeré náklady potřebné pro jeho celistvost. Náklady na plyn se pohybují okolo 30%, náklady na elektrickou energii bývají do 10%, téměř neměnnou hodnotu mívají stálé (fixní) náklady, a to zhruba 60% (Foldyna, 2009).

Z hlediska rozměrové přesnosti jsme došli k závěru, že metoda obrábění dřeva laserem se jeví vůči vodnímu paprsku jako přesnější metoda. U laseru se nachází přesnějších rozměrů na ose x, zatímco u vodního paprsku je to na ose y. Přesnost výrobků se odvíjí od růstu tloušťky materiálu, u vodního paprsku je pravidlem, že s rostoucí tloušťkou materiálu se zvyšuje přesnost obráběných polotovarů, kdežto u laseru je to opakem, s rostoucí tloušťkou materiálu se snižuje přesnost výrobků (<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/node1.html>, 12.2.2018)

**Tabulka 1 Celkové náklady jednotlivých metod**

		<i>Laser Trumpf Trulaser 3030</i>	<i>Vodní paprsek PTV Cobra</i>
<i>Celkové investiční náklady</i>	Kč	15 880 000	4 388 000
<i>Odpisové období</i>	rok	5	5
<i>Roční odpis</i>	Kč / rok	3 176 000	877 600
<i>Náklady na: el. energii</i>	Kč / rok	525 000	490 000
<i>Spotřební díly</i>	Kč / rok	50 000	60 000
<i>Abrazivo / Technický plyn</i>	Kč / rok	500 000	360 000
<i>Mzdy</i>	Kč / rok	1 300 000	1 300 000
<i>Údržba</i>	Kč / rok	65 000	65 000
<i>Náklady pracoviště</i>	Kč / rok	5 635 000	3 142 300
<i>Časový fond pracoviště</i>	Kč / rok	4 000	4 000
<i>Směnnost výroby</i>	Kč / rok	2	2
<i>Průměrná sazba za hodinu</i>	Kč / rok	1 409	786

Během zjišťování výpočtu se vycházelo z průměrných hodnot nákladů daných položek, průměrné spotřeby materiálů přispívajících k provozu a energií. Určení ceny vychází z tabulek nabídkových cen. V případě mzdových nákladů se postupuje následujícím způsobem, a to, že mzda jednoho pracovníka připravujícího plány pro proces řezání a dvou pracovníků zajišťující obsluhu stroje.

**Tabulka 2 Přepočet ceny řezání odvíjející se od času řezání**

<i>Tloušťka (mm)</i>	<i>Laser</i>		<i>Vodní paprsek</i>	
	<i>Čas (min)</i>	<i>Cena (Kč)</i>	<i>Čas (min)</i>	<i>Cena (Kč)</i>
2	0,093	2,14	1,02	13,64
5	0,153	3,63	1,87	24,12
8	0,206	4,85	2,96	38,16
12	0,315	7,32	4,44	58,27
15	0,387	9,01	6,70	87,41
20	0,624	14,58	8,39	108,98

Tabulka 2 nám ukazuje, jakých cenových hodnot se dosahuje v jednotlivých časových úsecích. Díky těmto údajům se jednoduše určí, která z metod je výhodnější a cenově úspornější. Z tabulky lze vyčíst, že metoda obrábění dřeva vodním paprskem je ve srovnání s laserem výrazně náročnější.

## **5.3 Kvalitativní údaje jednotlivých metod v procesu řezání**

### **5.3.1 Laser**

Paprsek laseru může posloužit různými způsoby v procesu obrábění, a zároveň je vhodný na různé druhy obráběných materiálů. V případě zvolení nevyhovujícího materiálu s nesprávnými parametry nemusí kvalita obráběného materiálu dosáhnout tak vysokých hodnot, díky čemuž je obrobek znehodnocen. Vlivem nevhodně zvoleného materiálu vznikají během procesu časové ztráty, které následně způsobují delší plynulost výroby.

Proto je důležité vytvořit opatření, zamezující vzniku těchto nežádoucích stavů, kupříkladu mít operátory strojů způsobilé pro danou problematiku, kvalifikované programátory, kteří se zabývají řešením případných problémů.

Mezi žádoucí vlastnosti a parametry patří ohnisková vzdálenost čočky, průměr trysky, výkon laseru, zvolení plynu, mezera řezu, volba režimu provozu. Díky těmto vhodně navoleným parametrům lze snadněji docílit vyšší kvality výsledků, tudíž zůstává obrobek bez jakýchkoliv dalších úprav a nutnosti následného obrábění materiálu nebo dokončovacích operací. To přináší veliký výhody z pohledu klesání výrobních nákladů. Růstem rychlosti řezání dochází k poklesu kvality plochy obráběného materiálu. Při řezání CO<sub>2</sub> laserem hraje velikou roli dobře zvolený druh plynu, kdy materiály na bázi dřeva si vyžadují použití dusíku nebo argonu, jelikož nesmí dojít k jakékoliv reakci mezi plynem a obrobkem.

Nejvyššího uplatnění laser nachází při řezání, vrtání či tvarování materiálů, kdy je převážně využíván pro velkovýrobu sérií.

### **5.3.2 Vodní paprsek**

Technologie obrábění pomocí vodního paprsku je široce rozsáhlá v několika průmyslových odvětvích, a to především díky vývoji této technologie, který posouvá vodní paprsek o krok kupředu. Vývoj je také poněkud závislý na inovacích obráběných materiálů, které zvyšují možnosti využití. Poslední krok ke zdokonalení celkového rozvoje obrábění vodním paprskem umožňují nové alternativy softwaru, jež zintenzivní užití této technologie obrábění.

Během řezání vzorků vodním paprskem je měnitelná posuvová rychlost, která nám poskytuje pozorování, jak se s navyšující rychlostí snižuje kvalitativní stránka řezaného

obrobku. Zvyšující rychlost tedy způsobuje opoždění paprsku, jenž bývá nepříznivý pro výslednou kvalitu řezu. Toto negativum vodního paprsku se nejvíce projevuje na zaoblení, kde není omezena a zároveň snížena rychlost řezací hlavy jako u ostrých hran, což významně ovlivňuje a zhoršuje kvalitu povrchu, a ve výsledku dochází k neúplnému proříznutí obráběného materiálu. Vzorčky s nejvyšší posuvovou rychlostí způsobují mnoho neproříznutých oblastí, objevujících se na obrobku, což může značně omezit vyjmutí vzorku z řezaného polotovaru. Nepatrné proříznutí nemusí být podmíněno pouze u vyšší posuvové rychlosti, ale zřídka se objevuje také u nižších rychlostí, které jsou na rozdíl od vyšších rychlostí zvýhodněné tím, že vyjmutí dílů probíhá bez jakýchkoliv komplikací (Barcík, 2007).

Za kvalitu řezného procesu se považuje výsledek činnosti nástroje jako celku na celkové kvalitě produktu, odvozené od tří způsobů míry přesnosti: rozměrové, tvarové a povrchové míře drsnosti. Komplikace oproti ostatním technologiím nastávají v případě abrazivního vodního paprsku, že nástrojem je v tomto případě kapalinový paprsek s přídavkem abraziva.

Přesnost kompletního mechanismu řezání strojem může ovlivnit přesnost tvaru a rozměrů obrobku. Při pohledu na rovinu řezání se v případě menších a středních tloušťek zaznamenává přesnost jednotlivých rozměrů řádově v desetinách mm, u širších tloušťek se pohybuje v mm (Valíček Jan, Hloch Sergej, 2008).



## 6 Závěr

Tato bakalářská práce se podrobně zabývá rešerší metody obrábění dřeva laserem a vodním paprskem. Díky rešerši jsem měla možnost poznat obě metody blíže a seznámit se s jejich technologií, jež je v obou případech velmi rozmanitá. V jednotlivých částech práce jsou popsány hlavní principy obrábění, kterých dosahují obě dvě metody, a jež tvoří nedílnou součást celkového procesu obrábění. Stejně důležitou roli, ne z hlediska obsahu, zde zastává historický vývoj, jelikož, jak metoda obrábění dřeva laserem, tak i metoda obrábění vodním paprskem, zaznamenává ve vývoji důležitých pokroků, a to i z pohledu jejich použití v praxi. Neustále dochází k významným a novým inovacím, které přispívají těmto metodám k různorodosti a zvýšené konkurenceschopnosti. Vznikají různé modifikace stávajících typů, které vylepšují parametry obrábění, a díky nimž dochází k neustálému rozvoji technologií i zařízení.

Jak už z názvu vyplývá, první část bakalářské práce obsahuje základní charakteristiku nekonvenčních metod, kam patří námi zmíněné metody obrábění dřeva laserem a vodním paprskem. Velikou výhodou nekonvenčních metod v porovnání s konvenčními metodami, je kvalita struktury řezu a obráběného povrchu materiálu, které dosahují značně vyšších hodnot a finálních výsledků.

Není možné určit, jaká z těchto dvou metod obrábění je výhodnější a kvalitnější, poněvadž každá z technologií má své výhody a nevýhody, které jsou současně začleněny do obsahu bakalářské práce. Zároveň obě metody obrábění mají své světlé stránky, ve kterých dominují, a kde se nedají jinými technologiemi nahradit. Laserové řezání se vyznačuje svou vysokou přesností, se kterou naneštěstí souvisí nepříznivě vysoké provozní náklady. Z pohledu druhů laserů je velmi důležité zmínit CO<sub>2</sub> laser, který značně přispívá této technologii k dosaženým a bohatým výsledkům. V dnešní době je laser zařazen spíše pro kusovou a malosériovou výrobu.

Obrábění dřeva vodním paprskem si neustále získává na svoji stranu mnoho příznivců, jejichž zájem o tuto technologii každým rokem roste, a to především pro její vysokou univerzálnost, efektivnost, a převážně neustále se rozvíjející škálu obráběných materiálů.

## 7 Použitá literatura

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vydanie. Košice: Vienala, 2000. 275 s. ISBN 80-7099-430-4
2. KVIETKOVÁ, M. (2015). *Obrábění dřeva*, 1. vyd. Česká zemědělská univerzita v Praze, 295 s. ISBN 978-80-213-2604-0
3. KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi - WJM*. Bratislava: 1998. 195s. ISBN 80-8057-091-4
4. OSIČKA, Karel a KALIVODA, Milan. *Nekonvenční technologie obrábění. vzdělávací a tréninkový modul*. Brno : OPUS- vzdělanostní síť k výrobním technologiím, 30.11.2012. 96 s. reg.č. CZ.1.0/2.4.00/12.0029
5. *Fyzikální technologie obrábění*. In: [online] [citace 2018-2-21]. Dostupné z: <http://www.strojnylyceum.wz.cz/maturita/tep/tep5.pdf>
6. KACHTÍK, Lukáš. *Úvod do světa laserů* [online] [citace 2018-1-12]. Dostupné z : <http://lasery.wz.cz/uvod.html>
7. KUSALA, Jaroslav. *Aplikace laseru* [online]. Lasery kolem nás [citace 2018-2-2]. Dostupné z : <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.html>
8. ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. Datum vydání, 13 července 2004, [2018-3-4]. Dostupné z : <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
9. ŠINOR, Milan. *Aplikace laserů: Lasery v průmyslu* [online]. vega.fjfi.cvut.cz. České vysoké učení technické v Praze, 2002 [citace 2018-2-12]. Dostupné z : <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/node1.html>
10. DAHOTRE, Narendra B.; HARIMKAR, Sandip P. *Laser Fabrication and Machining of Materials*. New York: Springer Science + Business Media, LLC, 2008. 558 s. ISBN 978-0-387-72343-3.
11. VALÍČEK, Jan a Sergej HLOCH. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením*. vyd. 1. Ostrava: Ámos Mgr. Zdeňka Pustinová, 2008. 127 s. ISBN 978-80-254-3588-5.
12. KULEKCI, Mustafa Kemal. *Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2002, [citace 2018-3-21]. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S089069550200069X>

13. BISHOP, Michael. *The Fabricator.com* [online] [citace 2018-03-18]. *Reusing waterjet cutting abrasive*.  
Dostupné z : <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/reusing-waterjetcutting-abrasive>
14. BARCÍK, Š., KVIETKOVÁ, M., KMINIAK, R., ZEIDLER, A., 2012. *Řezání dřeva a dřevěných kompozitních materiálů abrazivním vodním paprskem*. Praha, Powerprint, 240 s. ISBN 80-87415-60-3.
15. BARCÍK, Š., 2007. *Progresívna metóda obrábania dreva vodným lúčom*. In Siklienka a kol. *Drevorezné nástroje a obrábanie dreva*. Zvolen, Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 80-228-1822-3, s. 3–11
16. KOČMAN, K., 2011. *Technologické procesy obrábění*. Brno, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 329 s. ISBN 80-7204-722-2
17. Ing. ŘASA, J., CSc., Ing. KEREČANINOVÁ, Z. In: [online] [citace 2018-03-17].  
Dostupný z : <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
18. Ing. ŘASA, J., CSc., Ing. KEREČANINOVÁ, Z. In: [online] [citace 2018-03-17].  
Dostupný z : <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil.html>
19. *Princip CO<sub>2</sub> laseru při obrábění dřeva*: In: [online] [citace 2018-04-4].  
Dostupné z:  
[file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI\\_Laserbearbeitung\\_CO2-Laser\\_2016\\_02\\_T195de.pdf](file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI_Laserbearbeitung_CO2-Laser_2016_02_T195de.pdf)
20. *Proces řezání CO<sub>2</sub> laserem při obrábění dřeva*: In: [online] [citace 2018-02-26]  
Dostupné z:  
[file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI\\_Laser\\_Processing\\_CO2-Laser\\_2016\\_02\\_T195en.pdf](file:///C:/Users/mark%C3%A9tka/Downloads/TI_Laser_Processing_CO2-Laser_2016_02_T195en.pdf)
21. *Flow International Corporation* [online]. [cit. 2015-02-13]. Flow International Corporation. Dostupné z : <https://www.flowwaterjet.com/> [citace 2018-01-13]
22. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2009. 152 s. ISBN 978-80-248-2107-8
23. FOLDYNA, Josef, et al. *Rozvoj technologie pulsujících vodních paprsků*. Vodní paprsek 2009 – výzkum, vývoj, aplikace. 2009

24. *Vodní paprsek a jeho procesy obrábění* [online] [citace 2018-02-18]

<http://www.vodnipaprsek.com/clanky/o-vodnim-paprsku.html>

25. *Laser a jeho využití v praxi* [online] [citace 2018-01-26]

Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.html>