



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH VÝROBY DESIGNOVÉ LAMPY NEKONVENČNÍMI METODAMI

DRAFT OF PRODUCTION OF CREATIVE DESIGNE LAMP BY UNCONVENTIONAL METHODS

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kamila Mecová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

BRNO 2017

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Kamila Mecová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Návrh výroby designové lampy nekonvenčními metodami

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnutí modelu lampy a porovnání výroby jednotlivých částí vybranými nekonvenčními technologiemi.

#### Cíle bakalářské práce:

1. Návrh 3D modelu výrobku.
2. Teoretický rozbor výroby vybrané součásti nekonvenčními technologiemi.
3. Návrh jednotlivých variant výroby.
4. Experimentální ověření výroby.
5. Diskuze výsledků.

#### Seznam literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 75 s. ISBN 80-709-9430-4.

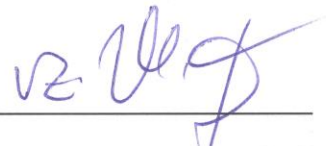
SADÍLEK, Marek. Nekonenční metody brábění I. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 2. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

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

## ABSTRAKT

Cílem závěrečné práce je zaměřen na návrh a výrobu dekoračního tělesa lampy vytvořeného nekonvenčními technologiemi. Práce se skládá z několika částí. V první jsou podrobněji popsány jednotlivé metody, kterými je dekorační těleso zpracováno, a dále jsou tyto metody porovnány. Další část závěrečné práce se zabývá návrhem 3D modelu a jeho postupnými úpravami, které bylo nutno provést kvůli celkovému sestavení lampy. Poslední část práce je věnována experimentální výrobě dekoračního tělesa. Výsledně jsou zhotovené součásti porovnány z hlediska drsnosti řezu, výrobního času a cenové kalkulace. Výstupem této práce jsou dvě lampy jedna stolní a jedna závěsná, z nichž každá obsahuje dekorační těleso, které je řezáno rozdílnou nekonvenční metodou a to buď laserem, nebo vodním paprskem.

### Klíčová slova

Nekonvenční metody obrábění, vodní paprsek, laser, stínítko, lampa

## ABSTRACT

This thesis aims to present a design and production of a decorative body of a lamp made by using unconventional technologies. The work is divided into several parts. The first part presents the individual methods of producing the decorative body design in details; these methods are then compared. The following part deals with a 3D model design and its gradual modifications which had to be implemented due to feasibility of the lamp assembly. The final part of the work is dedicated to an experimental production of the decorative body. As a result, the produced parts are assessed in terms of cutting roughness, production time, and pricing. The output of this work is two lamps; a table lamp and a pendant lamp, both of which include a decorative body which is cut using unconventional methods, namely by a laser or a water jet.

### Key words

Unconventional methods of machining, water jet, laser, shade, lamp

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MECOVÁ, Kamila. *Návrh výroby designové lampy nekonvenčními metodami*. Brno 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 44 s. 10 příloh. Vedoucí práce Ing. Jaromír Dvořák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh výroby designové lampy nekonvenčními metodami** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Kamila Mecová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Jaromíru Dvořákovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

Dále chci poděkovat firmám DANE-ZAM s.r.o. a AWAC, spol. s r.o. za jejich spolupráci při praktické části provedení závěrečné práce a za cenné informace.

V neposlední řadě chci poděkovat všem zaměstnancům Ústavu strojírenské technologie, kteří mi pomohli k dokončení praktické části práce a také své rodině a přátelům za jejich podporu.

---

**OBSAH**

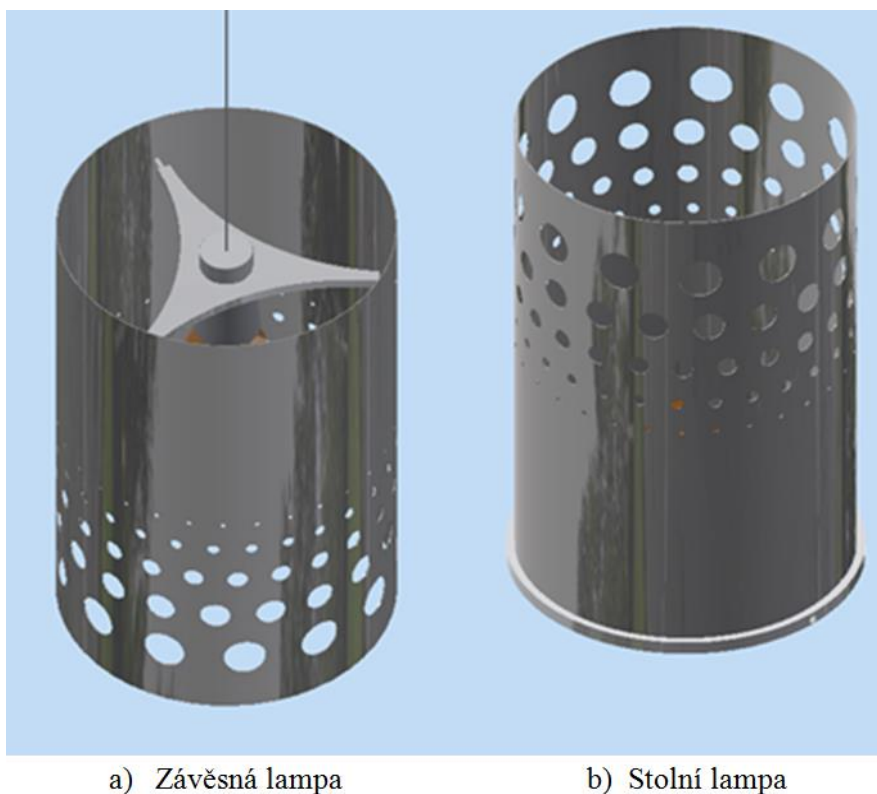
<b>Abstrakt</b> .....	<b>4</b>
<b>Prohlášení</b> .....	<b>5</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>6</b>
<b>Obsah</b> .....	<b>7</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Nekonvenční technologie obrábění</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Přehled nekonvenčních technologií obrábění</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Obrábění laserem</b> .....	<b>11</b>
2.1.1 Princip laseru.....	11
2.1.2 Vznik Laserového paprsku.....	12
2.1.3 Druhy laseru.....	13
2.1.4 Využití laseru.....	15
2.1.5 Technologické využití laseru.....	16
<b>2.2 Vodní paprsek</b> .....	<b>19</b>
2.2.1 Druhy vodního paprsku.....	20
2.2.2 Aplikace vodního paprsku.....	23
2.2.3 Technologické využití vodního paprsku.....	24
2.2.4 Výhody a nevýhody vodního paprsku.....	25
<b>3 Návrh jednotlivých variant výroby</b> .....	<b>27</b>
<b>4 Návrh 3D modelu výrobku</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1 Popis konstrukce závěsné lampy a jejich změn</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2 Popis konstrukce stolní lampy a jejich změn</b> .....	<b>30</b>
<b>5 Experimentální ověření výroby</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1 Výroba stínítka laserem</b> .....	<b>33</b>
<b>5.2 Výroba stínítka vodním paprskem</b> .....	<b>35</b>
<b>6 Diskuze výsledků</b> .....	<b>36</b>
<b>6.1 Porovnání drsností pomocí drsnoměru</b> .....	<b>37</b>
<b>6.2 Cenová kalkulace</b> .....	<b>38</b>
<b>Závěry</b> .....	<b>39</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b> .....	<b>41</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>42</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>44</b>

## ÚVOD

Strojírenský průmysl má v České republice velký význam. Vychází to již ze samotné historie, kdy Čechy byly za světových válek ve středu dění a proto se na našem území rozvíjel především těžký průmysl. V dnešní době se na našem území rozmáhá především automobilový průmysl, ale také i letecký či motocyklový průmysl a další. V těchto odvětvích průmyslu se všemi technologiemi snažíme získat co nejpřesnější tvary, které není třeba dále upravovat. To je jednou z mnoha výhod nekonvenčních metod. Jednou z hlavních nevýhod nekonvenčních technologií je vysoká pořizovací cena strojního zařízení i vysoká cena provozu, proto je nadále pro nás výhodnější používat klasické třískové obrábění a to i v mnoha oblastech, kde je využití nekonvenčních technologií efektivnější.

Strojírenství se v dnešní době ovšem nezabývá pouze výrobou automobilů nebo jiných strojů používaných například v těžkém průmyslu, ale zabývá se také estetikou a ergonomií. Prakticky všechny domácí spotřebiče jsou dílem konstruktérů nebo designérů, kteří se snaží produkty uživatelsky přiblížit svým spotřebitelům.

V této práci je spojeno strojírenství s estetickým prvkem a to v podobě návrhu a výroby designových lamp (obr. 1) za pomoci užití nekonvenčních technologií obrábění.



a) Závěsná lampa

b) Stolní lampa

**Obr. 1 3D modely navrhovaných lamp.**



## 1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční technologie obrábění nebo také fyzikální metody obrábění či progresivní metody obrábění se na rozdíl od klasických konvenčních metod třískového obrábění (frézování, vrtání, soustružení, atd.) liší tím, že nepoužívají ve větší míře mechanické práce pro úběr materiálu a tím nevytvářejí klasickou třísku. U nekonvenčních metod nejsou používány klasické řezné nástroje, které bývají definovány pracovními částmi, jako jsou např. čelo, hřbet, ostří, břit a další. Při těchto metodách se využívají různé druhy elektrod, trysek, drátků apod. Tyto metody jsou založeny na principu úběru materiálu fyzikální nebo fyzikálně-chemickou cestou v menší míře se pak využívá i cesta mechanická (metody abrazivní). Můžeme také využívat kombinaci těchto cest. Při tomto způsobu obrábění je využíváno minimum síly a i obrobek je minimálně tepelně zatížen [3, 5].

Důvodem proč se fyzikální technologie obrábění využívají, je ten, že klasický způsob obrábění u výroby dané součásti je buď příliš obtížný, nebo i nemožný a to z důvodu špatné obrobitelnosti nebo složitosti součásti. U klasických třískových metod je obrobitelnost daného materiálu limitována různými vlastnostmi např.: pevností, tvrdostí, houževnatostí, odolností proti opotřebení, křehkostí, žárupevností, nehomogenní strukturou apod. Tyto těžce obrobitelné materiály vznikají díky vysoce technicky složitým vynálezům poslední doby a to jak v leteckém, automobilovém tak i kosmickém průmyslu. Mezi těžce obrobitelné materiály patří např.: slinuté karbidy, titanové slitiny, superslitiny, monolitní či kompozitní keramika, vysoce trvanlivé polymery apod. U některých nekonvenčních metod obrobitelnost limitují převážně fyzikální vlastnosti materiálu, jimiž jsou tepelná vodivost, elektrická vodivost, elektroerozivní odolnost či teplota tavení a další. Dalším důvodem používání fyzikálních metod je při obrábění tvarově velmi složitých či miniaturních součástí jako jsou např.: vyšetřovací sondy v medicíně [2, 4, 5].

Další výhodou je zavedení plné mechanizace a automatizace což zapříčiňuje jednoduché začlenění dané operace do výrobní linky. Celý proces výroby se tímto může urychlit a přitom se současně omezuje výroba zmetků a zlepšuje se kvalita vyrobených součástí, též se sníží pracnost daných operací a případně lze poměrně rychle změnit výrobní program. Některé nekonvenční obráběcí metody dávají možnost řízené změně vlastností povrchové vrstvy, převážně zvýšení únavové pevnosti, zvýšení odolnosti proti korozi a další [2,5].

Hlavním nedostatkem nekonvenční technologie obrábění je, že i přes velice rychlé, přesné a složité obrábění některých těžkoobrobitelných součástí vysoká energetická náročnost a také značně vysoká pořizovací cena a údržba obráběcích nástrojů [4,5].

## 2 PŘEHLED NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ

Nejčastějším dělením nekonvenčních technologií, je rozdělení do tří základních skupin na základě fyzikálních principů, čímž je myšleno, jaká forma energie je využívána pro obráběcí proces

### a) Oddělování materiálu tepelným účinkem [3, 5]:

- elektroerozivní obrábění (Electro Discharge Machining - EDM),
- obrábění paprskem plazmy (Plasma Beam Machining - PBM),
- obrábění paprskem laseru (Laser Beam Machining - LBM),
- obrábění paprskem iontů (Ion Beam Machining – IBM),
- obrábění paprskem elektronů (Electron Beam Machining - EBM).

Tyto metody jsou založeny na principu odtavování a odpařování mikroobjemu materiálu zahřátého na vysokou teplotu, z čehož plyne, že na velmi malé ploše obrobku dochází ke koncentraci značného množství energie [3, 5].

### b) Oddělování materiálu elektrochemickým nebo chemickým účinkem [5]:

- elektrochemické obrábění (Electro Chemical Machining - ECM),
- chemické obrábění (Chemical Machining - CM, CHM).

Metoda tohoto obrábění je založená na řízeném elektrolytickém rozpouštění materiálu. Výběrem vhodné kyseliny či elektrolytu je z obrobku odleptán určitý kus materiálu, který jsme chtěli odstranit. Ostatní části obrobku, které odstranit nechceme, se lakují, aby se chránili před naleptáním v případě chemického obrábění. Tyto laky se nazývají masky [5].

### c) Oddělování materiálu mechanickým účinkem [3, 5]:

- ultrazvukové obrábění (Ultrasonic Machining - USM),
- obrábění paprskem vody (Water Jet Machining – WJM),
- obrábění hydroabrazivním paprskem (Abrasive Water Jet Machining-AWJM),
- obrábění paprskem brusiva (Abrasive Jet Machining – AJM),
- obrábění proudem brusiva (Abrasive Flow Machining – AFM).

### Mezi další typ dělení patří dělení podle přítomnosti nástroje:

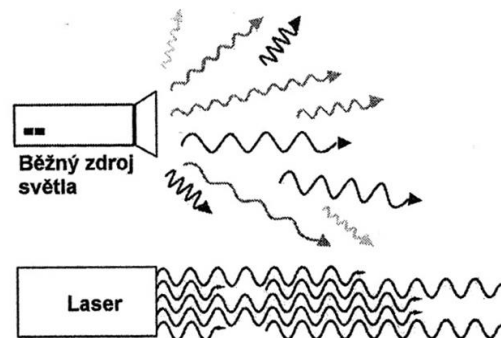
a) Nástroj při obrábění není přítomen jako tuhé geometrické těleso. Příkladem tohoto nástroje je třeba laser nebo elektronový paprsek.

b) Nástroj při obrábění je přítomen jako tuhé těleso, ale na rozdíl od klasického třískového obrábění není v přímém kontaktu s obrobkem, avšak i přesto podléhá opotřebením. S těmito nástroji se setkáváme při obrábění ultrazvukem nebo při elektrochemickém či elektrojiskrovém obrábění [4].

Dále se práce bude zabývat pouze obráběním pomocí laseru a vodního paprsku a jejich srovnáním.

## 2.1 Obrábění laserem

Již samotný název LASER skrývá samotnou podstatu metody. Vychází z anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, v češtině přeloženo jako zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Rozdíl mezi běžným a laserovým zářením je ten, že běžné světelné záření se šíří všemi směry, zatímco laserové záření se šíří jedním směrem a je tzv.: monochromatické, což znamená, že laserový paprsek má prakticky pouze jednu vlnovou délku (obr. 2). Další vlastnosti laserového záření jsou např.: minimální rozbíhavost, vysoká výstupní výkonová hustota  $I$  [ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ ], která není limitována zákony souvisejícími se zářením absolutně černého tělesa nebo vysoký stupeň prostorové a časové koherence, kde v prostorovém koherenčním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku, v časovém koherenčním paprsku se pouze mění směr, na směr šíření paprsku [4, 6].



Obr. 2 Záření běžného zdroje světla a laseru [2].

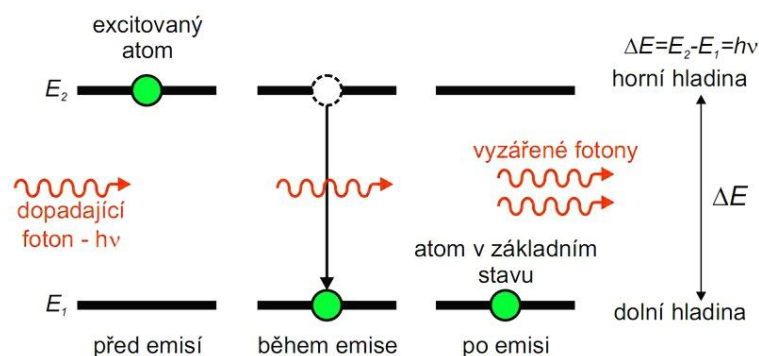
### 2.1.1 Princip laseru

Laser je založen na principu vynucené, jinak řečeno stimulované, emise záření. Laserové světlo vznikne, když se prostředí určitého vynuceného elektromagnetického záření potlačí samovolná (spontánní) emise na úkor emise vynucené (obr. 3). Samovolná emise záření vznikne v případě, když se vybuzené atomy s vyšší energetickou hladinou  $E_2$  snaží zaujmout hladinu s nižší energií  $E_1$  a přitom vyzařují velké množství světelného záření s frekvencí  $\nu$ , která je určena rovnicí [1,3]:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (1)$$

kde  $h$  představuje Planckovu konstantu o hodnotě  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s.

Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž se excituje nový atom se stejnou frekvencí, jako měl předešlý atom. Tento způsob vyzařování se nazývá vynucená emise záření. v důsledku rozdílu energií těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové nebo světelné záření [1].

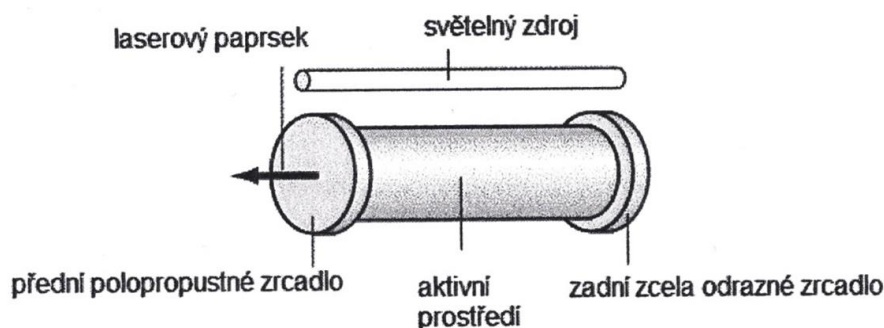


Obr. 3 Podmínky stimulované emise [7].

## 2.1.2 Vznik Laserového paprsku

Laserový paprsek vzniká a je zesilován v optickém rezonátoru (obr. 4), což je dutý, převážně válcový prostor, ve kterém se nachází aktivní prostředí. Tento prostor je z čelních stran ohraničen dvěma zrcadly, která jsou na sebe vzájemně rovnoběžná. Důležité je, že jedno zrcadlo je částečně propustné a druhé je skoro dokonale odrazivé. Odrazivé zrcadlo bývá také nejčastěji dielektrické, což znamená, že je tvořeno izolačních materiálů odrážejících jen jisté spektrum elektromagnetického vlnění. U některých typů rezonátorů bývá dielektrické zrcadlo nahrazováno leštěnými kovy, jako je například měď nebo stříbro [3].

Částečně propustné zrcadlo bývá pokryto velmi tenkou vrstvou kovu o tloušťce pouhých pár atomů. Toto polopropustné zrcadlo však odráží světlo pouze do určité intenzity záření. Po překročení dané meze únosnosti, projde světlo zrcadlem ve formě laserového paprsku. Zrcadla rezonátoru mohou být jak rovinná, tak i konvexní či konkávní. Ať je tvar zrcadel jakýkoliv, musí být zajištěno, že fotony procházející aktivním prostředím se budou odrážet ze zrcadla na zrcadlo a nebudou unikat stěnami dutého prostoru. Zakřivení a průměr zrcadel také ovlivňuje rozbíhavost paprsku a tzv. mód [3].



Obr. 4 Schéma rezonátoru [3].

Jednou z nepostradatelných částí rezonátoru pro vznik laserového paprsku je aktivní prostředí, protože v něm vzniká samotný paprsek. Je nezbytné, aby aktivní prostředí obsahovalo prvky, které zahrnují alespoň jednu metastabilní energetickou hladinu a taky jiné oddělené energetické hladiny. Zjednodušeně si můžeme představit tři hladiny a to tak, že metastabilní hladina leží mezi nejvyšší a nejnižší energetickou hladinou. Po těchto hladinách se pohybují elektrony. Když se elektron při samovolném sestupu z vyšší hladiny dostane na metastabilní hladinu, uvolní přitom foton, který odletí náhodným směrem. Hlavní rozdíl mezi metastabilní hladinou a jakoukoliv jinou vyšší hladinou je ten, že se elektron na ni udrží mnoho násobně déle. Tím je zajištěno, že elektron „počká“ na další foton, kterým bude stimulován [3, 8].

Dalším krokem je tzv. inverze populace. Ta nastává, když je na metastabilní hladině více elektronů než na hladině základní. v tu chvíli stačí, aby „přiletěl“ odkudkoliv stimulující foton a ten donutí všechny elektrony sestoupit na základní hladinu a taky je donutí, aby každý z nich vypustil jeden foton. Všechny tyto fotony včetně toho stimulujícího se spojí v jednu vlnu s mnohem větší amplitudou. Tímto dochází k zesílení světla vynucenou emisí záření. Avšak tato vlna nemusí mít správný směr, udržuje totiž směr, ze kterého přiletěl stimulující foton. Nutno podotknout, že takto vzniká zároveň velké množství vln. Tyto vlny, které mají různé směry, se mohou odrazit od již výše zmíněných zrcadel a nastávají dvě možnosti. Buď špatně letící fotony zaniknou, nebo se budou odrážet od zrcadel a jejich množství se bude zvětšovat až za únosnou mez a paprsek bude vypuštěn částečně propustným zrcadlem [8].

Aktivní prostředí musí být chemicky i opticky stabilní a daný laserový přístroj musí mít vhodně zvolený vnější zdroj energie, kterým je možno vyvolat aktivní plynné prostředí [3].

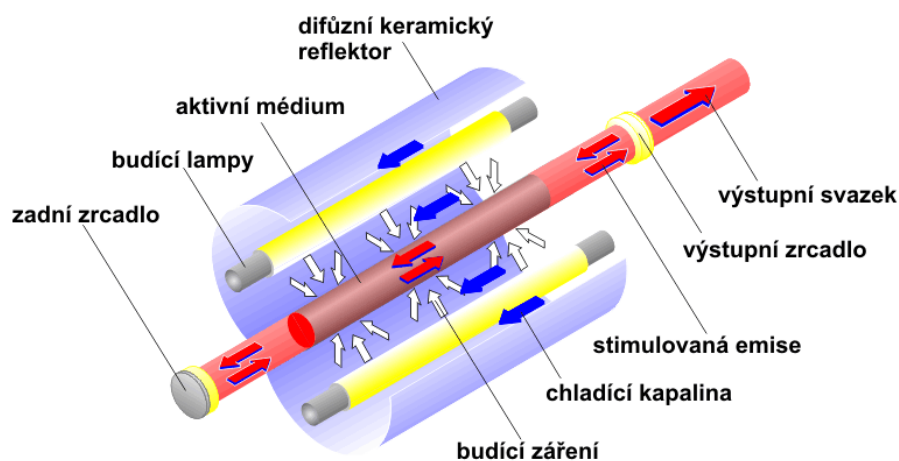
### 2.1.3 Druhy laseru

Druhy laserů můžeme dělit podle několika kritérií např.: podle vlnové délky optického prostředí, režimu paprsku (různé časově rozdílné režimy provozu laseru), výkonu, konstrukce laserového zařízení, typu kvantových přechodů, typu buzení, či délky generovaného pulzu avšak nejčastěji druhy laserů dělíme podle určitého aktivního prostředí:

#### a) Pevnolátkové, laserovým médiem je vybroušený krystal

Aktivním prostředím je obvykle amorfni nebo krystalický izolant s příměsí iontů, což je pevná a opticky propustná látka. Základní materiál určující převážnou část technických vlastností určitého krystalu, je matrice, která musí být opticky homogenní, průzračná a musí existovat technologický způsob, jak ji uměle vyrobit. v současné době se ve strojírenství začíná nejvíce využívat technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru tzv.: vláknový laser též fiber laser. Hojně využívaný typ je také diodový laser, mezi méně využívané typy patří pak laser tyčový a diskový. Existují tyto druhy [3, 9]:

- Rubínové ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) – první laser z roku 1963,
- Nd-YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) – nejrozšířenější druh laseru, aktivní materiál je krystal Yttrium Aluminium Granátu zásobovaný ionty neodymu, který vyzařuje infračervené záření (obr. 5). Využívá se hojně v medicíně,
- Er:YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) – aktivní materiál je krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný prvky vzácných zemin erbiumem, chladí se pouze vzduchem, používá v medicíně a v laserových dálkoměrech,
- Nd-sklo – využití např.: pro velké termionukleární systémy,
- Alexandrit.



Obr. 5 Schéma Nd-YAG laseru [10].

#### b) Plynové

Aktivním prostředím jsou molekuly, atomy nebo ionty plynu. Většina těchto laserů pracuje v kontinuálním režimu, o trochu méně jich pak pracuje v režimu pulzním. Plynové lasery je možno budit převážně elektrickým výbojem, fotodisociací, chemickou reakcí, průchodem svazku rychlých elektronů, rychlou expanzí plynu nebo opticky. Dále jsou takto děleny [3, 9]:

- $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2+\text{He}$  – velmi výkonný a konstrukčně poměrně jednoduchý, nejrozšířenější je v průmyslu (řezání, vrtání, svařování, nanášení povlaků, popisování součástí a tepelné zpracování),
- He-Ne – červeně zářící laser používaný v medicíně, měřicí technice, holografii a geodézii,
- Ar – zeleně až modře zářící laser používaný při světelných show,
- Excimerové – aktivní prostředí je složeno z excimerů, což jsou speciální nestabilní molekuly, jejichž jedna složka je v excitovaném stavu. Bývá buzeno elektrickým výbojem, který vytváří ultrafialové záření v důsledku spojení dvou inertních plynů. Příklady excimerových laserů ArCl, XeCl, XeF, KrF. Využívá se ve fotolitografii v polovodičovém průmyslu, v selektivní laserové fotochemii, v medicíně, při technologických aplikacích (vrtání, popisování součástí) a ve fyzikálním a biologickém výzkumu.

### c) Kapalinové

Aktivním prostředím kapalinových laserů bývají roztoky různých organických barviv nebo také speciálně připravované kapaliny, dopované ionty vzácných zemin. Pro buzení těchto laserů se používají optická zařízení. Zásadou kombinací několika různých druhů barviv a metod je možné dosáhnout širokého spektra vlnových délek, čehož se využívá ve spektroskopii k bezkontaktnímu nedestruktivnímu rozboru látek. Díky přesnému naladění vlnové délky se mohou ničit rakovinotvorné buňky, nádor je předem napuštěn speciálním organickým barvivem, barvivo vystavené záření se rozpadá a nevázaný generovaný kyslík ničí rakovinotvorné buňky. Nevýhodou kapalinových laserů je krátká životnost aktivního prostředí, které se rozpadá působením světla a tepla [3, 4, 9].

### d) Polovodičové

Aktivním prostředím je polovodičový materiál, jehož aktivními částicemi jsou volné nosiče náboje (nerovnovážné elektrony a díry), které mohou být injektovány. V dnešní době jsou polovodičové lasery nejrozšířenější skupinou laserů používaných v oblasti spotřební a výpočetní elektroniky. Používají se jako čtečky kódů, laserové tiskárny, laserová ukazovátka nebo CD či Blu-ray přehrávače. Ve strojírenství se pak užívají k popisování součástí, k tepelnému svařování, řezání nebo též v technologiích Rapid Prototyping [3, 4, 9].

Mezi hlavní výhody těchto laserů patří jejich kompaktnost, vysoká účinnost (až 50 %) a možnost měnit výkon změnou elektrického proudu u laserové diody, což je zdroj záření. Další výhodou je nízká cena, která zapříčinila masové rozšíření tohoto laseru do spotřební elektroniky. Velkou nevýhodou polovodičových laserů je rozbíhavost generovaného paprsku, což znamená, že je méně kvalitní než jiné typy laserů. Další nevýhodou je velká závislost vytvořeného záření na teplotě aktivního prostředí. Polovodičové lasery jsou dále děleny [3, 4, 9]:

- Diodový laser – též polovodičový laser buzený svazkem elektronů, elektrickým polem nebo fotony. Aktivním prostředím je blok polovodičů. Patří zde galiumarsenidový (GaAs), kadmiumsulfidový (CdS) a kadmiumselenidový (CdSe) polovodičový laser,
- Injekční polovodičové lasery – aktivním prostředím je materiál složený z polovodiče, ve kterém se nachází tzv. P-N přechod. Buzení záření v tomto

případě vzniká přiblížením elektrického pole k přechodu P-N. Nejznámějším injekčním polovodičový laserem je GaAs laser.

**Tab. 1 Rozdělení laserů [1].**

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblasti aplikace
Pevný	Rubín	$\text{Cr}^{3+}$	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd-YAG	$\text{Nd}^{3+}$	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1 200 W	Strojní průmysl
	Nd-sklo	$\text{Nd}^{3+}$	1,064	pulzní	2 mW	
	alexandrit		0,7–0,818	pulzní	10 W	
Polovodičový	GaAs		0,8–0,9	pulzní	2–10 mW	Informační technologie Optoelektronika
Plynový	$\text{CO}_2(\text{N}_2+\text{He})$	$\text{CO}_2$	10,6	kontinuální pulzní	500 až 15 000 W	Strojní průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20 mW	Metrologie Geodézie Holografie
	Ar	$\text{Ar}^+$	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální pulzní	1–5 000 W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,17	pulzní	20–250 W	Fotolitografie
	(XeCl)		0,308			Laserová chirurgie
(XeF)		0,351			Strojní průmysl	
(KrF)		0,248				
Kapalinový	Barvivo Rhodamine 6	Etanol Metanol	0,34–1,175	pulzní	100 W	Fotochemie Spektroskopie

#### 2.1.4 Využití laseru

Způsoby využití laseru zahrnují širokou škálu nejen technických oborů, ale i medicínu či zábavní průmysl. Laser má široké využití hlavně díky jeho mnoha vlastnostem, jako je odraz, intenzita, rychlost paprsku či nerozbíhavost [8, 9].

##### a) Medicína

Laser se začal v medicíně uplatňovat již na počátku 60. let 20. století. Nejprve se začaly lasery využívat při operacích očí a v kožním lékařství při odstraňování pigmentových skvrn. Lékaři začali využívat laser jako skalpel, jeho výhodou byl

přesný tenký řez a díky zamezení styku nástroje s operovanou tkání se zamezilo infekcím. Postupně se laser rozšiřoval i do dalších odvětví medicíny a to do gynekologie, stomatologie, plastické chirurgie, laserové terapie a dalších.

**b) Astronomie a geodézie**

Laser je využíván jako radar, převážně se využívá k měření astronomických vzdáleností např.: objektem na Zemi a družicí nebo Měsícem. Konkrétně se měří doba letu daného impulzu až po odraz a následné vrácení na místo vyslání impulzu.

**c) Vojenství**

Laser ve vojenství se valnou měrou využívá k zaměřování a označování cílů. Zaměřovače bývají umístěny přímo na zbraních, laserové dálkoměry pak slouží k přesnému zaměření polohy cíle a jeho vzdálenosti.

**d) Ekologie a meteorologie**

Speciální laserové radary nazývané Lidary, se využívají k měření částic v ovzduší. Vysílaný paprsek laseru se v atmosféře částečně odrazí a částečně se rozptýlí molekulami a aerosoly (dým, mlha atd.).

**e) Zábavní průmysl**

Laser se využívá také pro potěchu oka v podobě nejrůznější laser show. Dnes se s ním setkáváme také v akční hře laser game.

**f) Využití laseru v běžném životě:**

- laserový metr – vyměřování místností a menších vzdáleností, od 0,1 m do 70 m,
- čtečka čárového kódu – funguje na principu, že černé pruhy pohlcují záření na rozdíl od bílých, které záření odrazí zpět do čtečky,
- laserové ukazovátko,
- laserová tiskárna a další.

## 2.1.5 Technologické využití laseru

Velmi rozšířeným a pro nás stěžejním využitím laseru je využití laseru v průmyslu, to již začalo v druhé polovině 60. let. Základním požadavkem pro obrábění laserem je pohltivost, odrazivost, odpařování, tepelná vodivost a tavení povrchové vrstvy obráběného materiálu.

### 2.1.5.1 Laserové řezání

Jeden z nejvyužívanějších procesů laserového obrábění je laserové řezání. Běžně se využívá u materiálů s malou tepelnou vodivostí. v zásadě se používají dvě metody pro dělení materiálu laserem. Prvním je provedení řezu a druhým je utvoření drážky na povrchu materiálu a jeho následný kontrolovaný lom, čehož se využívá pro křehké materiály jako je keramika a sklo. Obecně dělíme způsoby řezání do tří skupin [3, 4]:

- a) Sublimační řezání** – materiál je převážně odstraňován odpařováním, přivedený inertní plyn odstraňuje páry odpařeného materiálu. Výstupem je úzký vysoce kvalitní řez. Nevýhodou je, že se touto metodou dají řezat pouze materiály s malou tloušťkou. v současné době se této metody už moc nevyužívá [3, 4, 8].



- b) Tavné řezání** – materiál je ohříván pouze na teplotu tavení, silný proud inertního plynu pak odvede natavený materiál z místa řezu. Není potřeba tak vysoká energie jako u sublimačního řezání, ale je snížena jakost řezu. Dalšími nevýhodami je menší řezná rychlost a to, že kapky nataveného materiálu tuhnou na spodní hraně řezu i přesto však nejsou nutné dodatečné úpravy [3, 4].
- c) Řezání pálením** – materiál je ohříván na zápalnou teplotu a s přiváděným reaktivním plynem pak následně shoří v exotermické reakci. Z místa řezu je pak odstraněn asistenčním plynem. Plyn vyvolávající exotermickou reakci je kyslík. Při exotermické reakci se zvýší rychlost ohřevu, tím je pak možno též zvýšit rychlost řezání při zachování kvality povrchu řezu [3, 4].

Laserem je možné řezat kovové materiály a při použití CO<sub>2</sub> laseru se řezou materiály o standardní tloušťce do 20 mm. Neželezné kovy jako titan, měď, hliník, nikl a další jsou vhodné pro řezání CO<sub>2</sub> laserem avšak jsou určitým způsobem omezeny. Mají totiž silný sklon k oxidaci, proto je někdy nutné využít i vakuovou atmosféru. Laserem je ovšem možné řezat i nekovové materiály jako je např.: keramika, sklo, plast, papír, dřevo, různé kompozitní materiály a další [4].

#### 2.1.5.2 Laserové značení a popisování

Laser se hojně využívá také ke značení a popisování. Rozlišujeme pět základních mechanismů [3]:

- a) Gravírování** – nejznámější způsob značení, vhodný pro kalené ocele. Gravírování funguje na principu lokálního natavení nebo odpaření povrchu materiálu, běžná hloubka natavení či odparu je 0,1 mm. Kontrast je zapříčiněn odlišnými optickými vlastnostmi gravírovaného povrchu a neovlivněné oblasti.
- b) Pěnění a tvorba mikrotrhlin** – probíhá za nízkých teplot, kdy laser o nízké intenzitě vyvolá v materiálu pěnění. Bubliny vzniklé v materiálu se s rostoucí teplotou posouvají blíž k povrchu, čím blíže povrchu jsou, tím lze lépe vidět kontrast značení. Této metody se hojně využívá ke značení polymerů.
- c) Odbarvení** – dochází k němu, když energii z paprsku absorbuje značený materiál, tímto se však ohřívá na teplotu způsobující tepelnou degradaci. Černý povrch bývá obvykle výsledkem při odbarvování polymerů a dřeva.
- d) Bělení** – při použití dostatečně krátkých vln (excimerový laser), lze fotochemickou reakcí, změnit trvale barvu speciálních polymerů s barevnými pigmenty.
- e) Odstraňování povrchových vrstev materiálu** – probíhá za vysokých teplot. Materiál musí být ohřát nad teplotu odpařování a je tak odstraněn s velmi malým narušením okolního materiálu.

Pro značení kovů se nejčastěji používá Nd:YAG nebo excimerový laser, protože infračervené světlo CO<sub>2</sub> laseru se velmi dobře odráží od povrchu kovů a jejich slitin. Nejčastěji se jako značení u kovů používá gravírování, odstraňování materiálu nebo odbarvování. Jistou alternativou značení je nanesení povlaku na povrch kovu, povlak se pak nataví, čímž přilne ke kovu. Zbytek povlaku se opláchne [3].

### 2.1.5.3 Vrtání laserem

Při laserovém vrtání paprsek laseru má vysokou teplotu a ohřívá povrch materiálu rychlostí 1010 °C/s. Materiál se následně odpařuje a umožňuje paprsku se dostat hlouběji do povrchu. Během vrtání se natavený materiál akumuluje v otvoru a rozprostírá se na stěnách vrtu. v celém vrtu je velmi vysoký tlak (až 104 MPa) a ten způsobí, že natavený materiál proudí ven z otvoru rychlostí, která se blíží rychlosti ultrazvuku [3].

Vrtání laserem se obecně využívá pro vrtání v těžce dostupných místech a také proto, že je možné vrtat velmi úzké otvory řádově v setinách milimetru. Uplatňuje se však jen pro menší hloubky. Používáme Nd:YAG, CO<sub>2</sub> a excimerový laser. Nejčastěji jej využíváme pro vrtání děr do diamantových průvlaků, keramiky, safírů, palivových filtrů, karburátorových dýz, nekovových materiálů, plastů, atd. [4, 8].

### 2.1.5.4 Mikroobrábění laserem

Pro mikroobrábění se využívaly dříve jen elektrojiskrové či ultrazvukové technologie. Přesto, že se nástroje těchto dvou metod nedotýkají přímo obrobku, tak dochází k jejich opotřebením, což má špatný vliv na jejich přesnost, proto se dostaly do popředí lasery. v porovnání s těmito dvěma metodami má laser vyšší rychlost procesu a je možno vytvořit různé tvary bez potřeby výměny nástroje [4].

Pro mikroobrábění se používá Nd:YAG nebo excimerový laser. Hojně se této metody využívá při opracování elektronických součástek (drážky do keramických podkladů), na označování dílců výrobními číslicemi a na renovaci a opravu poruch na masce integrovaných obvodů [3, 4].

### 2.1.5.5 Soustružení laserem

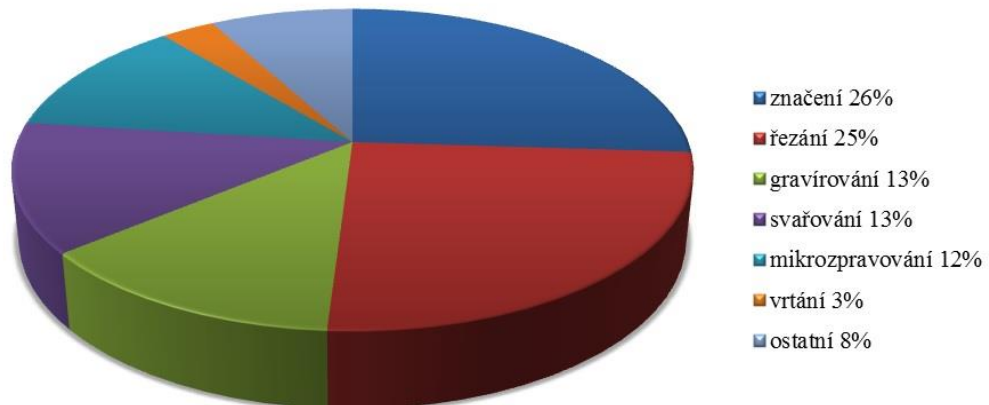
Postupem času našel laser uplatnění i v oblasti soustružení. Výhodou je, že eliminují problémy s chvěním obráběcího stroje a také s opotřebením nástroje. Hlavním kladem laserového soustružení je přesné obrábění těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou kalené oceli či keramika. Na druhé straně je nevýhodou nízká intenzita úběru materiálu oproti klasickému soustružení. U soustružení laserem rozlišujeme tři metody [3]:

- a) **Odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky** – dva na sobě nezávislé paprsky laseru jsou navzájem k sobě nakloněny pod určitým úhlem. Oba paprsky jsou k obrobku nakloněny pod úhlem jiným než je 90°, pak jde o princip šroubovicového úběru materiálu nebo jeden paprsek jde kolmo na obrobek a druhý jde z čela, takže jejich vzájemný úhel je 90°, jde pak o prstencový úběr materiálu [3, 4].
- b) **Odtavování materiálu z povrchu obrobku** – funguje na principu intenzivního přívodu tepla na povrch obrobku otáčejícího se proti paprsku laseru. Nastává odtavování a prostřednictvím asistenčního plynu je roztavený materiál odveden z místa obrábění [3].
- c) **Obrábění s předehřevem** – používá se jak pro soustružení, tak pro frézování. Zjistilo se, že s rostoucí teplotou obrobku se mění i jeho mechanické vlastnosti jako je snížení tvrdosti a pevnosti, a tím následné zlepšení obrobitelnosti atd.). Při předehřevu na dostačující teplotu (800-1000°C), se změní mechanické vlastnosti tak, že je možné použít konvenční metody obrábění a to bez použití procesních kapalin a emulzí. v praxi to vypadá tak, že paprsek laseru nasměrován na obráběnou plochu těsně před

řezným nástrojem a to pod určitým úhlem. Pro předehřev materiálu před samotným obráběním můžeme využít všechny druhy laserů [3].

#### 2.1.5.6 Dokončování povrchů laserem

K dokončování povrchů dochází při tangenciálním působení paprsku na rotující obrobek. Konkrétně tak dochází k zahlazování mikronerovností po předešlém obrábění. Obrábí se takto povrchy do hloubky maximálně 100  $\mu\text{m}$ . Nejčastěji se užívá při dokončování povrchů plastů a keramiky [3, 4].



Obr. 6 Podíl rozdělení jednotlivých technologií použití laseru [9].

## 2.2 Vodní paprsek

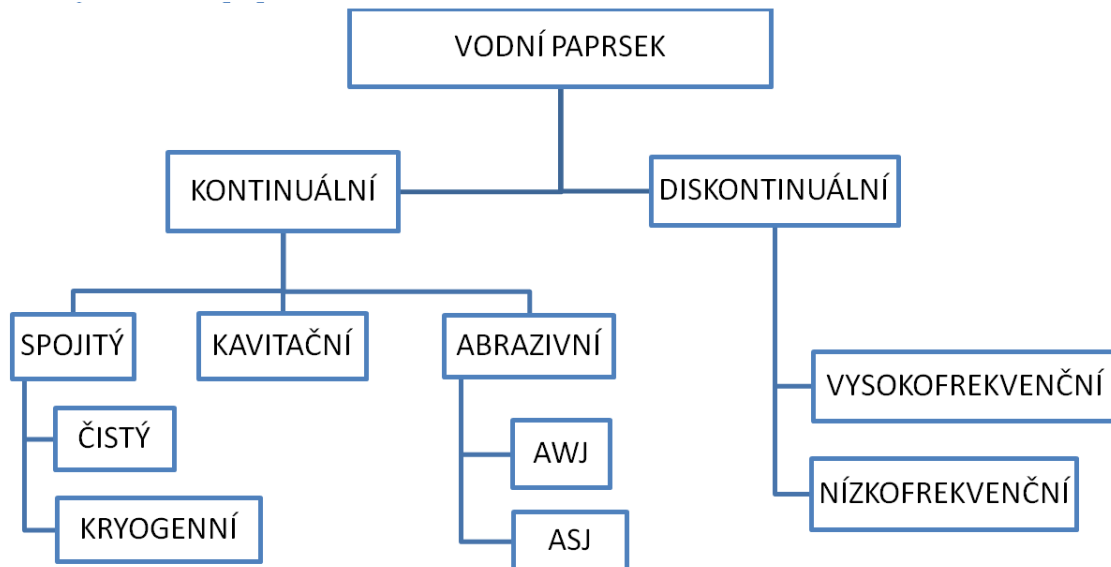
Technologie obrábění vodním paprskem je technologií poměrně novou. První prokazatelný pokus použití vodního paprsku pro dělení materiálů byl zaznamenán v 50. letech 20. století, kdy Dr. Norman Franz řezal dřevo pomocí vysokorychlostního proudu vody. Na konci sedmdesátých let předešlého století Dr. Mohamed Hashish přišel na to, že přidáním abraziva do vodního paprsku rapidně stoupne účinnost a výkon této metody. Začátkem osmdesátých let se začala tato technologie využívat i komerčně [3].

Metoda obrábění vodním paprskem využívá kinetickou energii úzkého vysokotlakého a vysokorychlostního proudu vody, který pracuje jako řezný nástroj. Díky přidání abrazivních částic je možné opracovávat nejenom měkké nekovové materiály (dřevo, plasty, papír, potraviny atd.), ale i tvrdé a křehké nekovové materiály (keramika, sklo, beton, kompozitní materiály atd.) a také materiály kovové (litiny, nástrojové oceli, antikoroční oceli, hliník, měď, titan a další) [1].

Z hlediska použitého pracovního média rozlišujeme dvě základní metody [3]:

- **obrábění paprskem vody** - WJM - Water Jet Machining – obrábění proudem čisté vody bez přísad,
- **obrábění hydroabrazivním paprskem** - AWJM - Abrasive Water Jet Machining – do proudu vody je přidáno jemné brusivo.

## 2.2.1 Druhy vodního paprsku



Obr. 7 Schéma druhů vodního paprsku [4].

### 2.2.1.1 Princip technologie WJM

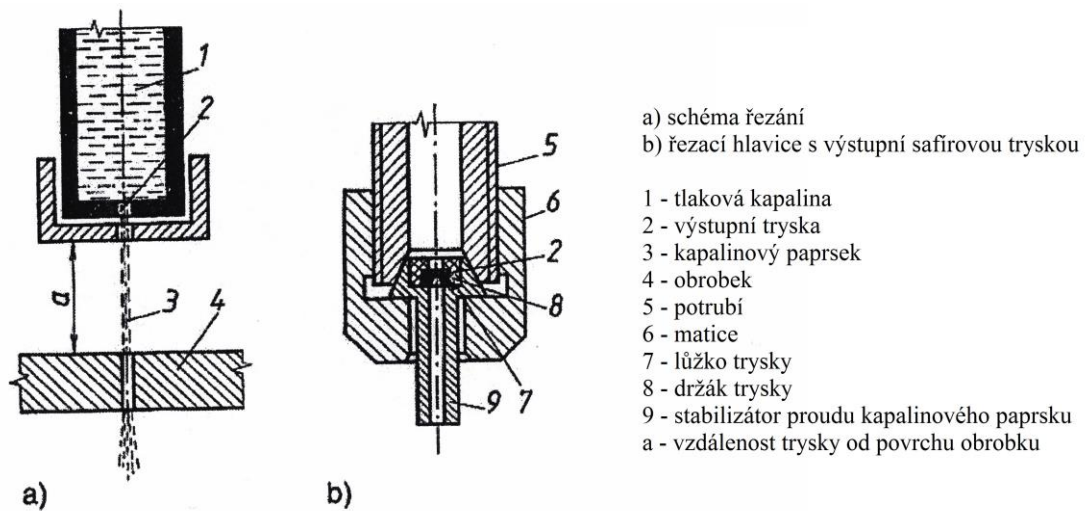
Jak už z názvu vyplývá, tento systém využívá čistou vodu bez přísad. Při této technologii je pracovní kapalinou voda, která se kvůli zvýšení produktivity a zvýšení životnosti dýz a samotného zařízení ještě dále upravuje. Konkrétně se filtruje, změkčuje nebo těž ionizuje [4].

Celý systém plně využívá vlastnosti vody, která je pod vysokým tlakem. Obvyklý průměr vodního paprsku je mezi 0,1 mm až 0,2 mm a je nutné dosáhnout co největší vzdálenosti od obrobku aniž by paprsek ztratil svou soudržnost. Běžná vzdálenost mezi obrobkem a koncem dýzy je 10 mm až 15 mm, pak řezná schopnost prudce klesá. Ideální vzdálenosti můžeme dosáhnout vhodným tvarem dýzy (obr. 8). Vodní paprsek bývá nepříznivě ovlivněn prouděním okolního vzduchu a poměrně rychle ztrácí svou řeznou schopnost, ale poradí s měkkými a pórovitými látkami, jako jsou například pěnové gumy nebo sklovláknité látky do tloušťky 250 mm. Se zvyšováním řezné rychlosti se snižuje kvalita obráběného povrchu, dá se jí zamezit nasměrováním dvou paprsků vody do jednoho bodu [4].

Proud čisté vody nemusí být používán pouze jako řezný nástroj, bývá používán i jako pomocný nástroj, při užívání jiných či konvenčních metod, který odstraňuje špony, napomáhá řezání, může snižovat výbušnost prostředí nebo jeho prašnost, také nahrazuje chlazení či mazání a může též celkově zvýšit životnost používaného nástroje [4].

Nevýhodou čistého vodního paprsku je, že ve směru síly proudu v místě výstupu z řezaného materiálu může paprsek tento materiál poškodit, což zapříčiňuje vznik trhlin. Dalším nedostatkem je omezená stabilita paprsku ve směru kolmém na osu paprsku, což znamená, že se paprsek může snadno deformovat [4].

Obecně se čistý vodní paprsek používá k dělení materiálu s nižší pevností, jako např.: textil, papír, dřevo, kůže, guma, potraviny, mražené výrobky, ale též na řezání vozovek či azbestu [4].



Obr. 8 Řezací hlavice pro čistý kapalinový paprsek [3].

### 2.2.1.2 Princip technologie IJM

Tato technologie se nazývá Ice Jet Machining v překladu obrábění ledovým vodním paprskem jinak řečeno též kryogenní paprsek. Protože čistý vodní paprsek nemá dostatečně dobré řezné schopnosti, vznikla jeho modifikace a to tak, že se do paprsku vody přidávají krystalky ledu ve tvaru kuliček, čímž se výrazně zlepší efektivnost řezání. Ledové kuličky jsou kalibrované a jsou vyráběné buď z vody nebo z pevného stlačeného CO<sub>2</sub>. Tato metoda byla vyvinuta v New Jersey v USA [3, 4].

Technologie IJM je méně účinná než metoda AJWM, protože ledové krystaly mají menší tvrdost než částice abraziva, avšak mají i mnohé výhody. První z nich je velké snížení nákladů na proces, u AJWM jsou náklady na brusivo procentuálně nejvyšší položkou. Dalším kladem obrábění ledovým paprskem je ochrana životního prostředí, která zahrnuje eliminaci hluku či kontaminaci produktů a odpadu [4].

Obrábění ledovým vodním paprskem se především využívá v potravinářství a medicíně, a to kvůli eliminaci destruktivních sil abrazního paprsku a k eliminaci znečištění řezu abrazivem. v medicíně se používá k řezání biomateriálů, například kostí, kde čistý vodní paprsek nedosahuje požadované účinnosti [4].

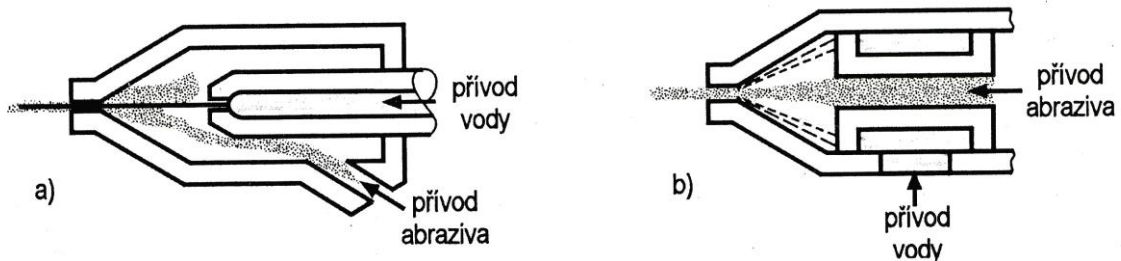
### 2.2.1.3 Princip kavitačního vodního paprsku

Tato metoda funguje na principu jevu, při kterém může destrukční síla kavitačních bublin vyvolat lokalizované porušení materiálu. Jedná se o technologii se stálým množstvím energie. Průměr kavitačních bublin by neměl přesáhnout 1 milimetr. Teplota vody by se měla pohybovat mezi 26,7 °C až 37,8 °C. Zvýšená rychlost eroze je vyvolána lokálními vysokými rázy tlaku generujících se kavitačních bublin na materiál. Pro dosažení tvorby kavitačních bublin požadovaných velikostí, používáme různé druhy dýz. Tento princip vodního paprsku patří mezi méně užívaný, protože je pouze malé množství dýz, které by uměly produkovat kavitaci ve vzduchu, a také použití kavitačního paprsku vody je omezeno na krátké pracovní vzdálenosti [4].

### 2.2.1.4 Princip technologie AWJM

Podstata této technologie spočívá v přirozené erozi materiálu, která je uměle vyvolaná vysokoenergetickým hydroabrazivním paprskem. Tento paprsek je vytvořen vysokotlakým vodním čerpadlem, jehož podstata spočívá v převádění nízkého tlaku oleje na vysoký tlak vody. Z čerpadla je proud vody odváděn potrubím do řezací hlavice (obr. 10), kde se utváří rovnoměrný vodní paprsek, k němuž je dále přimícháno abrazivo ve směšovací komoře. Existují dva způsoby přidávání abraziva do proudu vody (obr. 9) [5]:

- a) Částičky abraziva putují ze zásobníku do směšovací komory, kde jsou strhávány vysokou rychlostí proudící vody. Celá směs je urychlována abrazivní dýzou jinak zvanou kolimátor. Tato metoda se označuje jako Abrasiv Water Jet (AWJ). Pracovní tlaky systému se pohybují od 7 do 400 MPa a množství přidaného abraziva se pohybuje v rozpětí od  $0,5 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$  do  $20 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$  [4].
- b) Systém s přímým vstřikováním abraziva do vysokotlaké vody nazývaný jako Direct Injection Abrasiv Jet (DIAJET) nebo též Abrasiv Suspension Jet (ASJ). Abrazivum je smícháno s vodou v tlakové nádobě a stlačená směs je přivedena do speciálně konstruované dýzy [3, 4].



Obr. 9 Princip AWJM [1].

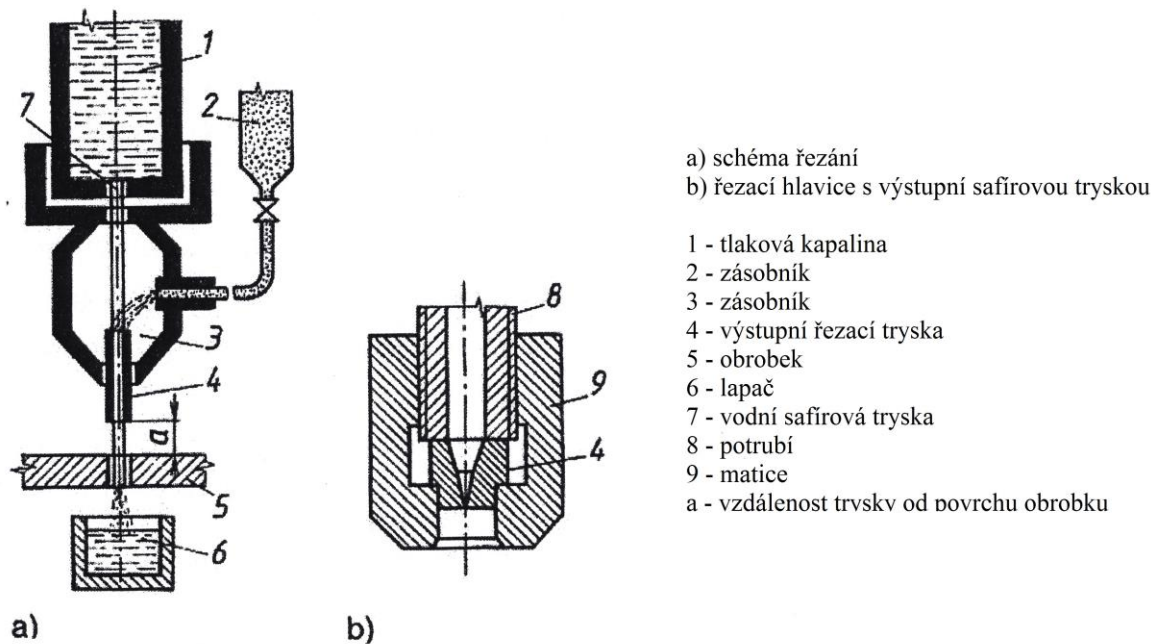
#### 2.2.1.4.1 Abraziva

Proces dělení je výrazně ovlivněn hustotou, tvrdostí a pevností abrazivního materiálu. Podle hustoty je dělíme na těžké (granát, ocelové piliny) a lehké (křemičitý písek, měděné piliny). Důležitý je poměr tvrdosti abraziva a tvrdosti řezaného materiálu. Čím vyšší je tvrdost abraziva, tím vyšší řeznou rychlost můžeme použít, avšak se také zvyšuje opotřebení směšovací dýzy. Proto ideální hodnota poměru tvrdostí se pohybuje mezi 0,8 až 1,5. Mezi běžně používaná abraziva patří [3, 4]:

- Granát  $5\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$  nebo  $[\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)]_3$  – nejčastěji používaný, dražší, větší účinek, vyšší opotřebení trysky, nevhodný pro recyklaci,
- Oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- Olivín  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2[\text{SiO}_4]$ ,
- Křemičitý písek – nízká cena, menší účinek a opotřebení trysky, není příliš vhodný pro recyklaci,
- Ocelová drť nebo broky.

Velikost použitého zrna závisí hlavně na tvrdosti řezaného materiálu, čím je obráběný materiál tvrdší, tím menší velikost zrn můžeme použít a naopak. Tvar a velikost zrna má rozhodující vliv na dosahovanou hloubku řezu. Při menším hmotnostním průtoku a menší velikosti zrna se dosahuje lepší hloubky řezu. Velikost částic abraziva výrazně nepůsobí na řeznou rychlost, ale výrazně ovlivní drsnost povrchu v místě řezu [4].





Obr. 10 Řezací hlavice pro hydroabrazivní paprsek [3].

### 2.2.1.5 Princip diskontinuálního vodního paprsku

Problematikou diskontinuálního nebo též pulzujícího paprsku se vědci začali více zabírat v 70. letech 20. století. Již dávno věděli o erozivních účincích vody, teď však řešili tento problém v oblasti vývoje turbín, v letectví a v kosmonautice. Když vysokorychlostní letadla či rakety prolétávaly bouřkou, v přeneseném slova smyslu docházelo k obrábění vodou, jenom pohyby byly opačné. Kapka vody stála a obrobek (letadlo) vysokou rychlostí do ní narážel. Na základě rozboru povrchu rozrušovaného materiálu se zjistilo, že nárazový tlak vytvořený sloupцем vody je mnohem vyšší než tlak vody generovaný kontinuálním vodním paprskem, čehož se začalo využívat ve strojírenství. Díky opakovanému generovanému nárazovému tlaku se dosahuje vyššího výkonu a potenciálu na rozrušování povrchů materiálů, než u kontinuálního paprsku. Používá se pro řezání, vrtání, lámání a drcení hornin [3, 4].

### 2.2.2 Aplikace vodního paprsku

Vodní paprsek našel uplatnění snad ve všech oblastech průmyslu. Nejčastěji je používán jako nástroj na řezání, ale dokáže také vrtat, soustružit, frézovat, řezat závity atd. Konkrétní příklady aplikace vodního paprsku [3, 4]:

- **automobilový průmysl** – používá se na řezání 3D součástek, jako jsou například celé karoserie, nárazníky, přístrojové desky, čalounění a interiérové materiály a další,
- **elektronický a elektrotechnický průmysl** – řezání keramiky, feritů, elektroizolačních materiálů, skla, amorfních látek, desek tištěných spojů, permanentních magnetů,
- **gumárenský průmysl** – řezání plastů, kevlarových vláken a gum,
- **chemický průmysl** – dělení výbušných látek jako je dynamit či tuhá paliva do raketových motorů, a dále dělení plastických hmot a těžkoobrobitelných materiálů,
- **jaderná energetika** – používá se pro dekontaminaci a likvidaci ochranných železobetonových vrstev uvnitř zařízení pracujících pro jaderné elektrárny, také se využívá pro čištění a likvidaci usazenin,

- **letecký a kosmický průmysl** – jedna z prvních aplikací vodního paprsku, konkrétně dělení keramických izolačních či kompozitních materiálů,
- **medicína a zdravotnictví** – řezání biomateriálů (kosti), použití při operacích slinivky břišní, nádorů či zubů,
- **metalurgický průmysl** – řezání teplých a žhavých materiálů, má své využití také při metalografických rozborech nebo při abrazivním čištění odlitků,
- **obuvnický a galanterický průmysl** – dělení pravých i umělých kůží a plastických hmot,
- **papírenská průmysl** – řezání fólií, papíru, buničiny, ale pouze na bezprašných pracovištích, kde nehrozí elektrostatické výboje,
- **potravinářský průmysl** – dělení potravin a to jak syrovém tak ve zmraženém stavu (maso, zelenina, ovoce, sýry, čokoláda, oplatky, sendviče, turecký med, dorty),
- **sklářský průmysl** – řezání všech druhů skel do tloušťky 200 mm, vrtání a matování skla, tvarové řezy,
- **stavební průmysl** – dělení střešních azbestovo-cementových krytin a tvarovek, izolačních materiálů jako jsou polystyreny a polyuretany, skelné vaty, keramiky, plastbetonu a dlaždic,
- **strojný průmysl** – řezání titanu, wolframu, niklu, kobaltu, uranu, tantalu, molybdenu, těžkoobrobitelných a tvrdých materiálů (superslitiny na bázi niklu nebo kobaltu, slinuté karbidy), slitin s rozdílnou tepelnou vodivostí, vláknitých materiálů, výroba tvarově velmi složitých součástí (díly a lopatky raketových a proudových motorů, kompresorů a turbín).

### 2.2.3 Technologické využití vodního paprsku

Pro technologické využití se především využívá abrazivní vodní paprsek. Jeho účinek na obráběný materiál je závislý na tlaku a průměru vodního paprsku, rychlosti posuvu, úhlu dopadu, délky abrazivní trysky, hmotnostního průtoku abraziva, druhu použitého abraziva, velikosti a tvaru abrazivního zrna [4].

#### 2.2.3.1 Řezání vodním paprskem

Řezání je asi nejvyužívanější technologií vodního paprsku. Při řezání vodním paprskem není materiál tepelně poškozován, protože v zóně řezu vzniká pouze malé tření nízkoviskózní kapalinou, která má dobrou tepelnou vodivost a nízkou tepelnou kapacitu [4].

- **Řezání kovů**

Příčinou porušování povrchu řezaného materiálu je narušení hranic zrn tvořících překážku šíření proudu kapaliny v příčném směru. Drobné otvory na povrchu se stávají koncentrátory lokálního napětí, které se dále šíří a dochází k odtrhnutí části materiálu. Proces řezání je obecně založený na principu rozrušování povrchu, vzniku únavových mikrotrhlin, přičemž jejich další šíření způsobuje dělení materiálu. Deformace se u kovů neprojevuje v takové míře, jako například u křehkých materiálů [4].



- **Řezání křehkých materiálů**

U křehkých materiálů vznikají trhliny při nárazu kapky překračující kritickou rychlost porušení. Kritickými místy, kde často vzniká porušení, jsou místa přítomnosti povrchových trhlin nebo místa, ve kterých se koncentruje povrchové napětí. Působení jednotlivých vln, kde amplituda převyšuje dynamické hranice soudržnosti řezaného materiálu, způsobuje jeho rozrušení [4].

- **Řezání plastů**

V plastových obrobkách proniká kapalina do struktury samotného materiálu a tím zapříčiňuje oddělení nebo vytrhnutí jednotlivých částic. Je však nutné rozlišovat různé typy plastů a jejich odlišné reakce na vodní paprsek [4].

### **2.2.3.2 Soustružení vodním paprskem**

U soustružení vodním paprskem jsou zachovány stejné pohyby jako u klasického třískového soustružení. Hlavní rotační pohyb koná obrobek a abrazivní vodní paprsek koná pohyb ve směru osy obrobku. Úběr materiálu je zajištěn radiálním posuvem vodního paprsku do požadované hloubky řezu [3].

### **2.2.3.3 Vrtání vodním paprskem**

Vodním paprskem se vrtají těžkoobrobitelné materiály jako je sklo, keramika, či niklové slitiny používané na výrobu plynových turbín. Jednotlivé druhy vrtání se dělí podle charakteristického vzájemného pohybu vodního paprsku a obrobku. Nejčastěji se používá se stacionární paprsek a obrobek, vrtání rotujícím vodním paprskem nebo vibrující paprsek se stacionárním obrobkem [4].

### **2.2.3.4 Frézování vodním paprskem**

Frézování vodním paprskem se používá pro tvarově složité součásti. Jde v podstatě o řezání, ale nedojde k úplnému prořezání materiálu. Při tomto procesu paprsek několikrát přechází po obráběné ploše a postupně vytváří tvar blížící se konečnému tvaru [4].

## **2.2.4 Výhody a nevýhody vodního paprsku**

Vodní paprsek má velmi mnoho kladů, ale i pár záporů, které jsou zde shrnuty:

**Výhody** [3, 4]:

- velmi široké využití snad ve všech odvětvích průmyslu,
- poměrně studený řez, díky němuž můžeme řezat materiály citlivé na teplo,
- na obrobených hranách není známka tepelné ani mechanické deformace,
- velmi vysoká energetická účinnost až 80 % a to při nízké energetické náročnosti v porovnání laserem,
- ekonomická úspora na nástrojích, kovech a energiích a malá spotřeba mechanicky neupravované vody,

- řez je plně bezprašný, nevznikají při něm žádné páry nebo plyny,
- žádný výskyt mikrotrhlin a zbytkového napětí v řezu,
- malé materiálové ztráty díky úzkému řezu,
- možnost řezání pod vodou,
- možnost řezat materiály citlivé na oxidaci,
- schopnost řezat výbušné hmoty i řezat ve výbušných prostředích,
- díky malé citlivosti na změnu vzdálenosti konce trysky od povrchu materiálu, můžeme řezat různé vlnité materiály (střešní krytiny atd.),
- možnost řezání vrstvených materiálů s různými fyzikálními vlastnostmi, malých otvorů, tvrdých a křehkých materiálů,
- možnost řezat ve všech směrech, obrysech, tvarech, polohách nebo úkosech,
- vysoká přizpůsobivost složité geometrii výřezu,
- možnost leštění a čištění povrchů,
- není potřebné upínat obrobky,
- jeden zdroj (vysokotlaké čerpadlo) může současně napájet desítky dýz (až 70 trysek bez použití abraziva nebo 8 trysek s abrazivem),
- výrazné zkvalitnění pracovního prostředí a hygieny práce,
- neobvyklá provozní spolehlivost a jednoduchost,
- schopnost CNC řízení a další.

**Nevýhody [3]:**

- nemožnost řezání kaleného skla nebo nezpracované hrnčířské hlíny,
- zaoblování vnitřních rohů je dáno průměrem paprsku,
- řezaný materiál musí odolávat přímému kontaktu s vodou, nesmí být vodou znehodnocen.

### 3 NÁVRH JEDNOTLIVÝCH VARIANT VÝROBY

Tato kapitola bude blíže popisovat především porovnání mezi zvolenými nekonvenčními metodami laserem a paprskem vody.

Tab. 2 Porovnání zvolených metod [3].

Metoda	Laser	Vodní paprsek
Dělené materiály	Všechny druhy, kromě materiálů s vysokou světelnou odrazivostí a kompozitů	Všechny materiály
Teplota řezu	Tepelný řez	Studený řez
Vliv teploty řezu na materiál	Malý	Není
Změna struktury materiálu v místě řezu	Malé	Žádné
Kolmost řezu	Mírný odklon	
Drsnost povrchu obráběné plochy	Nízká drsnost	Lze dosáhnout nízké drsnosti (závislé na podmínkách)
Výronek v řezné spáře	Většinou bez výronku	Vždy bez výronku
Tvrдость řezaného materiálu	Nemá vliv na rychlost řezání	Mírně ovlivňuje rychlost řezání
Řezání plastů	Problematické = toxicita	Je možné
Řezání kompozitů	Je možné, pokud mají složky stejnou teplotu tavení	Je velmi vhodné
Řezání keramiky, skla, kamene	Velmi omezené	Je velmi vhodné (s výjimkou kalených skel)
Reliéfní obrábění	Je možné	Výjimečně
Velikost dílce	Malé i velké dílce	
Tloušťka materiálu	Malá a střední	Široký rozsah
Složitost tvaru	Komplikované tvary	
Průstřel	Je možný	
Vznik plyných emisí	Malé množství	Nevznikají, nebo jen při průstřelu
Vznik oxidických povlaků	Pouze při řezání kyslíkem	Pouze u materiálů korodujících při styku s vodou
Energetická účinnost	Až 10%	Až 80%

Tab. 3 Obecná charakteristika účinků vybraných NMO s KMO [3].

Charakteristika	Nekonenční metody obrábění		Konvenční metody obrábění	
	tepelný účinek	Mech. Účinek	Frézování	Soustružení
	Laser	Vodní paprsek		
Úběr materiálu	D	C	A	B
Přesnost rozměrů <sup>1)</sup>	A	B	B	A
Drsnost povrchu <sup>1)</sup>	B	A	B-C	A
1) týká se obrobené plochy, A - vynikající, B - dobré, C - uspokojivé, D - špatné				

Tab. 4 Dosahované parametry jednotlivých metod [3].

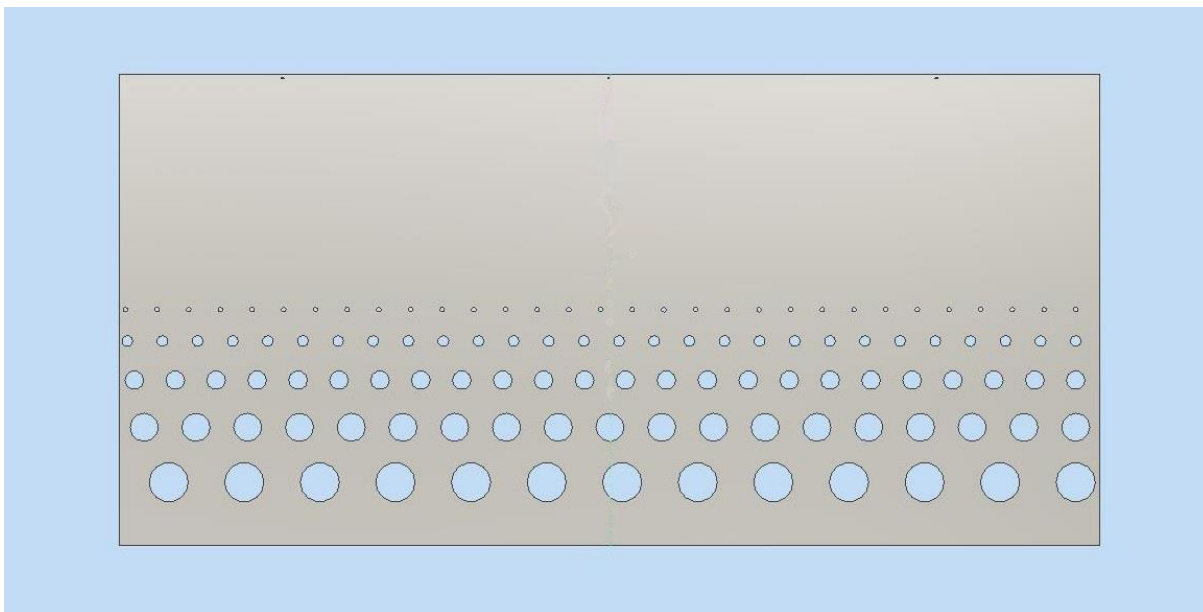
Technologie obrábění	Parametr drsnosti povrchu	Přesnost rozměrů	Hloubka ovlivněné vrstvy
	Ra	-	h <sub>0</sub>
	[μm]	[mm]	[μm]
Laser	3÷6	-	100
Vodní paprsek	2,5÷12	± (0,5÷1)	0

Tab. 5 Využívání principů NMO v technologiích zpracování materiálů [3].

princip	laser	vodní paprsek
dělení materiálů	ok	ok
spojování materiálů	ok	x
slévání	x	x
tváření	ok	x
prášková metalurgie	?	x
řezání	ok	ok
broušení	ok	ok
fyz.-chem. působení	ok	x
tepelné zpracování	ok	x
rozměrové opracování	ok	?
změna stavu povrchu	ok	x
ok-obvyklý proces, ?-omezené využívání, x-nepoužívané nebo nevhodné		

## 4 NÁVRH 3D MODELU VÝROBKU

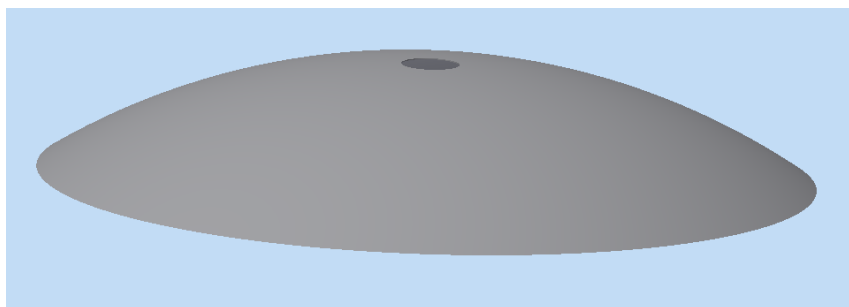
Lampy byly navrženy tak, aby měly stejnou, alespoň jednu součást, která je řezána v jednom případě laserem a v druhém případě vodním paprskem. Tyto dvě metody jsou níže rozepsány a porovnány. Tato stejná součást, dále nazývaná jako stínítko (obr. 11), je vyrobena tak, aby působila esteticky. Jsou zde použity matematické řady a to jak v počtu vyřezaných děr, v jejich velikosti, tak i v jejich rozstupech. Všechny komponenty závěsné a stolní lampy byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional 2016.



Obr. 11 Model stínítka v rozvinu.

### 4.1 Popis konstrukce závěsné lampy a jejich změn

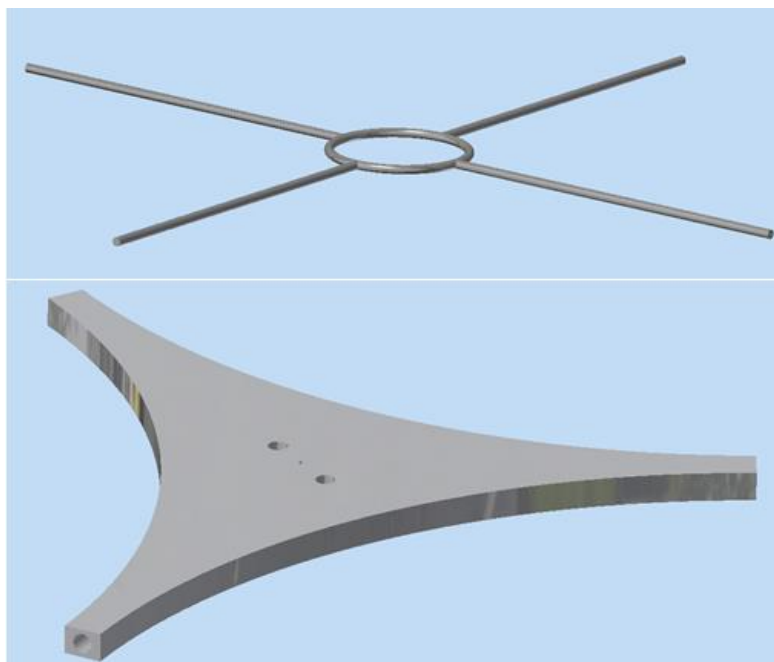
Původní návrh modelu závěsné lampy měl tvar kulového vrchlíku (obr. 12). S ohledem na vybrané technologie výroby a taky na vyšší náklady, které by se z důvodu použití 3D laseru a vodního paprsku navýšily, bylo nutné provést změny také v konstrukčním řešení lampy. Proto bylo stínítko navrženo jako rovný plech, který se po vyřezání, danou metodou a dalšími drobnými úpravami, pouze zakrouží. Jeho samotné rozměry byly postupně měněny z důvodu změn technologií, kterými bude zakroužené stínítko spojeno.



Obr. 12 Původní návrh stínítka.

V návrhu závěsné lampy byl pozměněn díl základového tělesa. V původní verzi držel celé stínítko pouze drát (obr. 13 nahoře) a to z důvodu vyšší prostupnosti světla v horní části lampy. Nevýhody pro použití drátu však předčily výhody. Hlavní důvody změny základového tělesa jsou následující: drát by se špatně vkládal do celkové sestavy závěsné lampy, musely by být vyvrtány další čtyři díry do stínítka, nebyla by zaručena opakovatelnost, z důvodu ohybu

drátu, a také z designového hlediska nevypadal drát esteticky. Proto bylo navrženo základové těleso hvězdicového tvaru (obr. 13 dole), které sice nemá tak vysokou prostupnost světla v horní části lampy, ale s touto přeměnou přichází i mnoho výhod. Jednou z hlavních výhod je, že do stínítka budou vyvrtány pouze tři díry, zvýší se stabilita a celkový vzhled lampy je mnohem estetičtější.

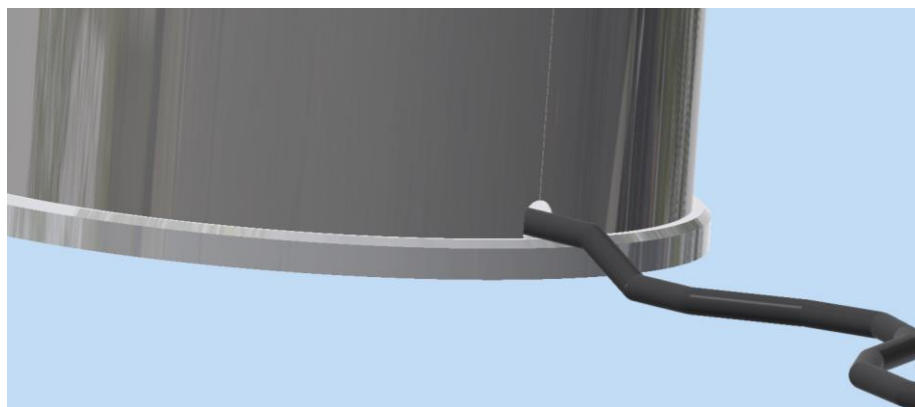


**Obr. 13** Vzhled základového tělesa, původní (horní obr.), aktuální (spodní obr.).

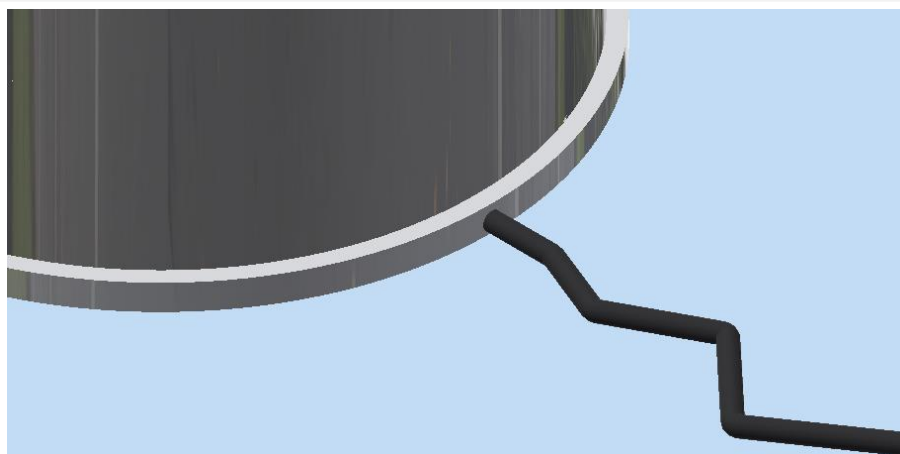
Další drobné úpravy byly provedeny po konzultacích s firmami, které nebyly schopny pomocí svých nekonvenčních technologií vytvořit některé původně požadované malé díry. Další menší změny byly provedeny na spojovacích součástkách z důvodu změny tloušťky plechu stínítka. Tloušťka plechu byla upravena kvůli omezenému sortimentu materiálů daných firem.

## 4.2 Popis konstrukce stolní lampy a jejich změn

Prvotní návrh stolní lampy byl založen na vyříznutí díry do těla stínítka pro vyvedení napájecího kabelu (obr. 14). Aby však byl zachován co nejbližší tvar obou stínítek, bylo od tohoto návrhu upuštěno a nyní je kabel veden tělem podstavce (obr. 15). Kabel je také veden podstavcem, aby esteticky nenarušoval celkový dojem ze stolní lampy.

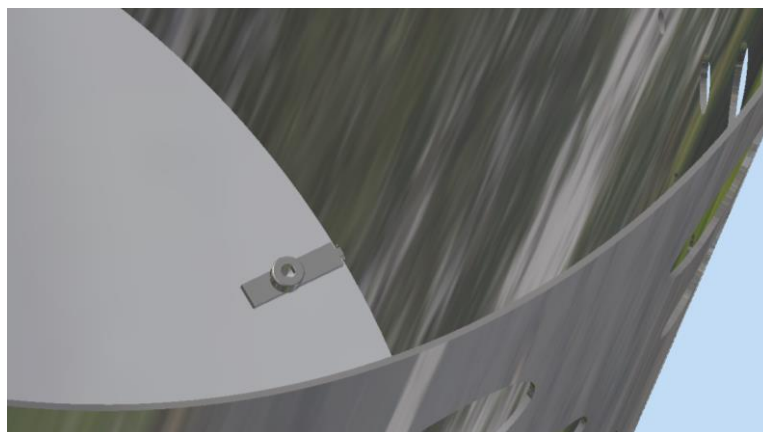


**Obr. 14** Původní vývod kabelu tělem stínítka.



**Obr. 15** Aktuální vzhled vývodu kabelu z podstavce.

Následně bylo řešeno uchycení plechu k podstavci. Jako vhodným řešením byla zvolena drážka v podstavci, do které se stínítko zaklene. Protože by samotné zaklenutí k udržení stínítka v podstavci nestačilo, byly do stínítka a do podstavce vyvrtány tři malé díry, mezi kterými je přišroubovaná malá plechová úchytka (obr. 16). Těmito úchytkami se tak zamezí vysunutí stínítka z drážky a zároveň posouvání stínítka v těle podstavce.



**Obr. 16** Uchycení stínítka pomocí úchytek.

Jednou z posledních zásadnějších úprav stolní lampy bylo ztenčení plechu podstavce z deseti milimetrů na osm a současná výměna voleného materiálu z nerezové oceli na dural. K úpravě došlo z důvodu snížení celkových nákladů a také snížení celkové hmotnosti lampy.

V obou lampách došlo ještě k řadě menších změn, které však nijak neovlivnili celkovou funkčnost lamp.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VÝROBY

Experimentální část závěrečné práce je založena na porovnání řezu stínítka lampy vybranými nekonvenčními metodami. Tyto metody byly zvoleny na základě podobnosti v technologiích zpracování materiálů, především v oblasti řezání a broušení. Nerezová ocel byla zvolena z důvodu menší potřeby dokončovacích operací a její tloušťka 0,8 mm byla zvolena, tak aby výsledná hmotnost lampy nebyla příliš vysoká a přitom se viditelně projeví rozdíly v řezech na obou stínítkách.

První část experimentu byla provedena u firmy DANE-ZAM s.r.o., která se specializuje na ohýbání plechů a trubek, vrtání a vyvrtávání, svařování ale především na řezání plechů pomocí laseru. Firma programuje v softwarech JET/CAM nebo TruTops, který navíc ručí za maximální využití plochy z tabule plechu [11].

Další část experimentu zaštitila firma AWAC, spol. s r.o. jejíž specializací je řezání vodním paprskem ve 2D i ve 3D. V této firmě byly též vyřezány mimo stínítka, dva hrubé rysy součástí podstavce (obr. 17) a základového tělesa (obr. 18). Tato firma využívá řídicí systém iMSNC, což je universální řídicí systém pro všechny řezací stroje firmy MicroStep, spol. s.r.o., která tyto systémy dodává [13].



Obr. 17 Řezání podstavce hydroabrazivním paprskem.



Obr. 18 Řezání základového tělesa hydroabrazivním paprskem.



## 5.1 Výroba stínítka laserem

Stěžejní součástí celé lampy je stínítka, které bylo v případě laserového řezání řezáno na stroji TC LY 2500 ve firmě DANE-ZAM s.r.o. Tento stroj používá Nd:YAG laser o výkonu 800 W, ale je také možné do něj zabudovat také 400 W laser. Světlovodný kabel laseru má průměr 0,3 mm. Pracovní prostor stroje je 2500 x 1250 mm a maximální zdvih je 105 mm, proto lze do laseru umístit polotovary o maximální tloušťce 10 mm. Hmotnost takového obrobku nesmí pak překročit 250 kg. Odchylka polohy řezací trysky je  $\pm 0,1$  mm a maximální rychlost pohybů ve vodorovných osách je 60 m/min [12].

Tento stroj patří ke starším modelům laserů, kdy při řezání polotovarů je pracovní plocha zcela zakryta zahrnovacím měchem (obr. 19). Dnes již většina laserů je zakrytována kovovou konstrukcí, které většinou mají průzor do pracovního prostoru.



Obr. 19 Laser TC LY 2500 za chodu.

Základní konstrukční skupiny stroje TC LY 2500 jsou ovládací pult (obr. 20), laserový generátor (obr. 21), odsávací a filtrační systém, světlovodný kabel, rozvaděč, řezná hlavice, zahrnovací měch, rám stroje a odsávací vana. Mezi další přídavná zařízení patří chladicí jednotka a stanoviště s plynovými bombami. Tento stroj je určen pouze pro obrábění rovinných obrobků.

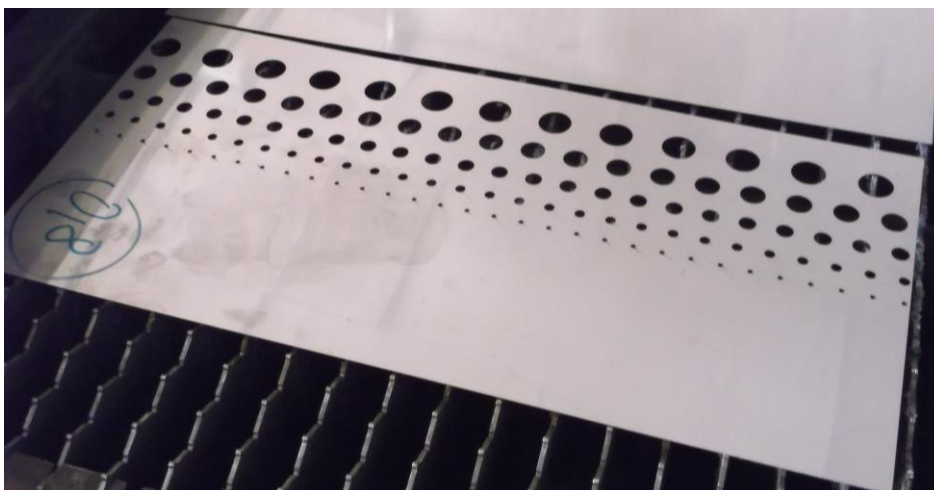


Obr. 20 Ovládací pult.



**Obr. 21 Laserový generátor.**

Firmou používaný laserový plyn je kombinace kyslíku a dusíku, stínítko však bylo řezáno pouze laserovým plynem kyslíkem, který zanechává na okrajích řezu oxidické povlaky. Proto bylo následně leštěno leštícím kotoučem Wolker coated abrasives grit 180. Jako poslední technologií provedenou ve firmě bylo samotné zakružení na tříválcové asymetrické zakružovačce.



**Obr. 22 Stínítko po řezání laserem.**

## 5.2 Výroba stínítka vodním paprskem

Stínítka pro druhou lampu bylo vyrobeno CNC řízeným strojem AquaCut 1501.20 WW (obr. 23) ve firmě AWAC, spol. s.r.o. pracovní prostor tohoto stroje je 1500 x 1500 mm a pracovní zdvih je do 200 mm pro 2D a do 250 mm pro 3D. Vedení po osách je vždy lineární. Pohyby jsou ve vodorovných osách přenášeny ozubeným hřebenem a pastorkem se šikmými zuby. V ose zdvihu je pohyb přenášen kuličkovým šroubem. Rychlost polohování nepřekračuje 50 m/min [13].



Obr. 23 Stroj AquaCut 1501.20 WW.

K tomuto stroji je připojeno vysokotlaké čerpadlo AccuStream, které má provozní tlak 4000 bar. Firma AWAC, spol. s.r.o. používá jedno z nejrozšířenějších druhů abraziv, Garnet MASH 80, což je přírodní materiál se specifickou vysokou vahou, která se projevuje zejména při rychlosti tryskání. Proto toto abrazivum nabízí ideální poměr mezi přesností hran a řeznou rychlostí.



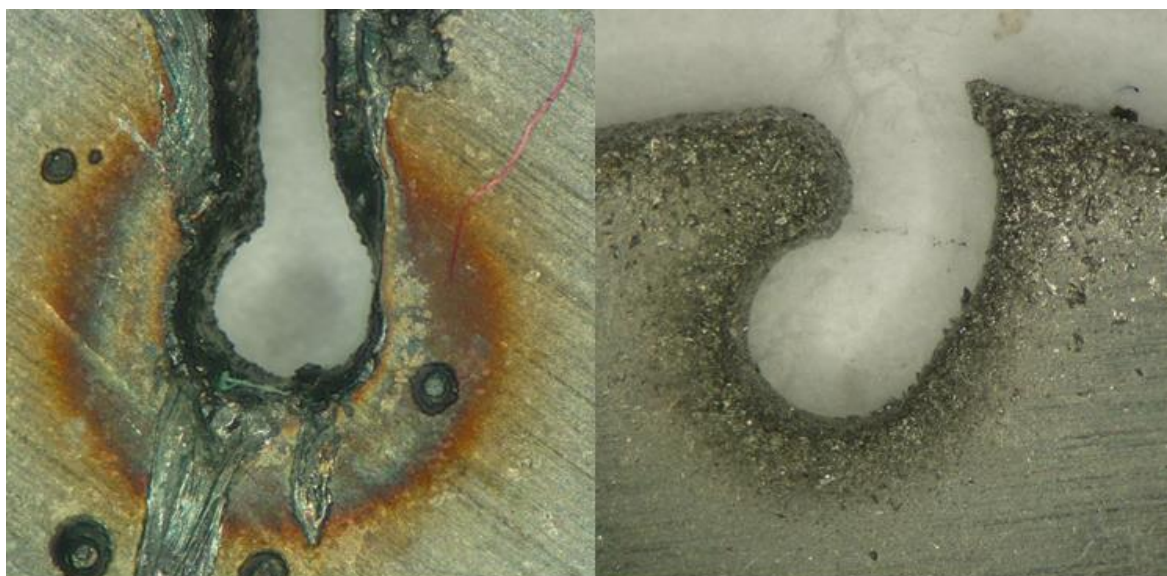
Obr. 24 Řezání stínítka hydroabrazivním paprskem.



## 6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou podrobněji porovnány použité metody ze skutečných výsledků řezání stínítka.

V experimentu se prokázalo, že obě metody jsou vhodné pro zhotovení stínítka, každá z nich má však i své klady a zápory. Největší výhodou laseru je především celková doba zpracování, která je výrazně kratší než u vodního paprsku. Hlavní výhodou řezání vodním paprskem je, že povrch řezaného materiálu není nijak tepelně ovlivněn. Na obr. 25a lze dobře vidět relativně širokou tepelně ovlivněnou oblast v místě vpichu o šířce kolem 0,6 mm, v místech řezu je pak tepelně ovlivněná oblast okolo 0,1 mm.



a) Laser

b) Vodní paprsek

Obr. 25 Místo vpichu.

Důležité porovnávací parametry zjištěné ze skutečného měření jsou blíže popsány v následující tabulce:

Tab. 6 Porovnání základních parametrů při výrobě stínítka.

	Laser	Vodní paprsek
Rozměry stínítka:	625,5x300 mm	625,5x300 mm
Plocha:	172 423,75 mm <sup>2</sup>	172 423,75 mm <sup>2</sup>
Doba zpracování:	8:55 min	11:03 min
Řezná délka:	6 336,1 mm	6 336,1 mm
Hmotnost:	1,104 kg	1,104 kg
Počet vpichovacích bodů:	116	116
Doba zapichování:	81,20 s	139,2 s
Doba jedno zápichu:	0,7 s	1,2 s
Velikost řezné spáry:	0,3 mm	1 mm
Přesnost řezu:	± 0,1 mm	± 0,3 mm
Tepelné ovlivnění:	Ano	Ne

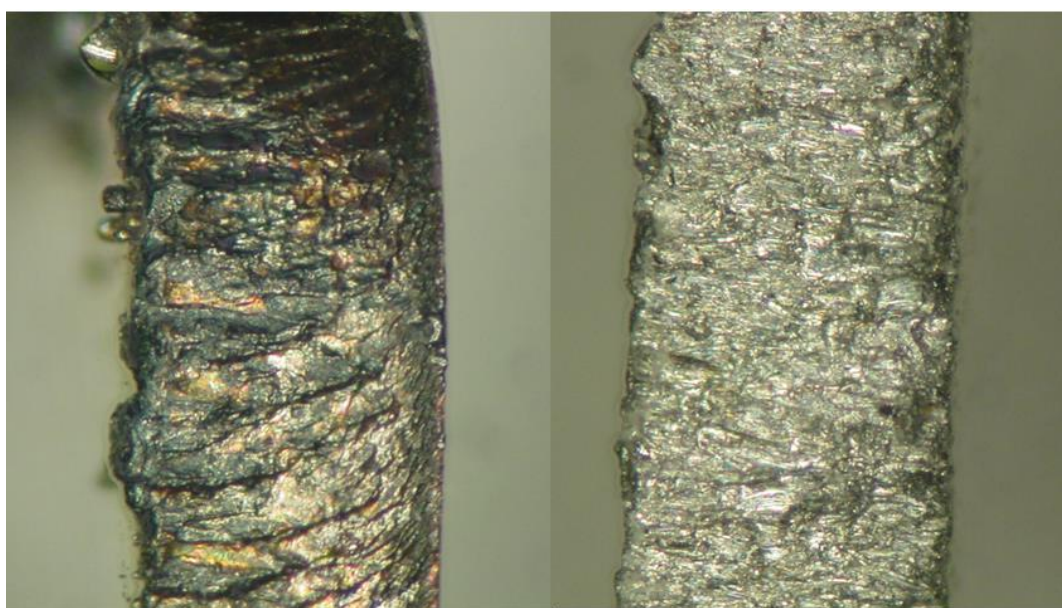
## 6.1 Porovnání drsností pomocí drsnoměru

Měření drsnosti na obou stínítkách bylo provedeno v laboratoři ústavu strojírenské technologie za pomoci přístroje TR100 Surface Roughness Tester. Toto měření proběhlo na obvodové hraně stínítka. Výstupem tohoto měření je tab. 7. Hodnotícím parametrem je Ra.

**Tab. 7** Hodnoty naměřené drsnoměrem.

	Ra
	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Laser</b>	4,3
<b>Vodní paprsek</b>	4,37

Z hlediska drsnosti povrchu řezu po měření vychází o něco lépe řezání laserem. Otřepy vzniklé, vyfukováním nataveného materiálu procesním plynem ve směru působení paprsku v případě laseru a působením hydroabrazivního paprsku, je potřeba dále odstranit, aby nedošlo ke zranění osob, které budou s výslednými produkty manipulovat.



a) Laser

b) Vodní paprsek

**Obr. 26** Vizuální porovnání drsnosti povrchu řezu.

Z obr. 26 lze vidět, že laser značně tepelně ovlivnil místo řezu, ale zároveň toto natavení zapříčinilo jeho hladší povrch. Otřepy po laserovém řezání jsou sice více členité, ale celkově jsou mnohem menší než po řezání vodním paprskem. Řez vodního paprsku je hmatatelně mnohem ostřejší a drsnější. Otřepy vodního paprsku mají tloušťku přibližně 0,2 mm.

## 6.2 Cenová kalkulace

Po konzultacích s danými firmami, byla předložena cenová kalkulace níže popsána v následující tabulce:

**Tab. 8 Porovnání cen řezání stínítka.**

Cenová kalkulace	Laser	Vodní paprsek
celková plocha stínítka:	187 651 mm <sup>2</sup>	187 651 mm <sup>2</sup>
cena plechu:	284 ,-	284 ,-
cena 1 m řezu:	40,4 ,-	53 ,-
Řezná délka:	6 336,1 mm	6 336,1 mm
celková cena řezu:	266 ,-	336 ,-
celková cena stínítka:	540 ,-	620 ,-

V tab. 8 lze vidět, že cenově je výhodnější řezat laserem, tyto hodnoty však platí pouze pro dané firmy. Jiné firmy mohou mít rozdílné ceny.

Po součtu celkových nákladů za použitý materiál a za práci zhotovenou firmami vychází, že stolní lampa stojí 1 131 Kč a cena závěsné lampy je 903 Kč. V těchto cenách nejsou zahrnuty žárovky a dokončovací práce, které byly provedeny v laboratořích Ústavu strojírenské technologie.

## ZÁVĚRY

Cílem této závěrečné práce bylo navrhnout vhodné technologie pro výrobu nerezového stínítka, popis jednotlivých nekonvenčních metod, jejich teoretické porovnání a následné experimentální vyhotovení a zkompletování celé lampy.

V experimentální části je uvedena podrobně výroba stínítka. Na základě experimentu vyplývá, že je pro výrobu vhodnější technologie řezání laserem a to zejména z důvodu kratší doby zpracování, hladšího povrchu řezu s menšími ořepy a také na základě výrobní ceny. Výhodou vodního paprsku je, že tepelné neovlivňuje oblast řezu, čímž byl potvrzen předpoklad, a z ekologického hlediska nijak neznečišťuje životní prostředí. Vodní paprsek je lépe používat při řezání tlustších materiálů. Tedy pro kusovou nebo malosériovou výrobu by bylo vhodné použít laser, pro velkosériovou výrobu by bylo vhodné použít konvenční metodu stříhání.

Finálním výstupem této práce je sestavení funkčních lamp (obr. 27 a obr. 28). Do sestavy stolní lampy vstupují součástky: stínítko (řezáno vodním paprskem), úchytky plechu, podstavec (řezán vodním paprskem) a zbylé součástky byly dokoupeny. Do sestavy závěsné lampy vstupují součástky: stínítko (řezáno laserem), čepy, základové těleso (řezáno vodním paprskem), krytka šroubů (vyrobena pomocí metody RP - 3D tisku z ABS plastu), zbylé součástky byly dokoupeny.



Obr. 27 Výsledný model stolní lampy.



**Obr. 28** Výsledný model závěsné lampy.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. Vyd. Košice: Vienala, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.
2. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. Vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
3. SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční technologie obrábění II: Obrábění laserem, plazmou, ultrazvukem, elektronovým, iontovým a vodním paprskem*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2016, 120 s. ISBN 978-80-248-3944-8.
4. MIČIETOVÁ, Anna, Ildikó MAŇKOVÁ a Karol VELÍŠEK. *Top trendy v obrábění V. část: Fyzikálne technológie obrábania*. Žilina: MEDIA/ST, 2007, 240 s. ISBN 978-80-968954-7-2.
5. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s.: il.; 30 cm. ISBN 978-80-214-4025-8
6. HUMÁR, Anton. *Technologie I., technologie obrábění – 3. Část*. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005, s. 57 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci\\_a\\_nekonvencni\\_metody\\_obrabeni/TI\\_TO-3.cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf)
7. Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao.cz* [online]. Praha, 2011 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
8. Princip laseru. *Lasery.wz.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/princip.html>
9. Nekonvenční metody obrábění 4 díl. *Mmspektrum.com* [online]. Praha, 2017 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
10. Hlavní typy laseru používaných v průmyslu. *Mega-blog.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
11. Služby. *DANE-ZAM s.r.o* [online]. Velká Polom, 2010 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.danezam.cz/sluzby/>
12. TRUMPF GmbH + Co. *Prevádskový manuál TC LY 2500: Trumf*. Vyd. 11. Ditzingen, 1995
13. Prodej a servis CNC dělicích strojů. *AWAC* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.awac.cz/cz/3-Prodej-a-servis-br-CNC-delicich-stroju/7-Prodej-delicich-stroju/10-Vodni-paprsek/13>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AFM	Abrasive Flow Machining – obrábění proudem brusiva
AJM	Abrasive Jet Machining – obrábění paprskem brusiva
Ar	Argon
ASJ	Abrasive Suspenssion Jet
AWJ	Abrasive Water Jet – abrazivní vodní paprsek
AWJM	Abrasive Water Jet Machining – obrábění hydroabrazivním paprskem
CAM	Computer-aided manufacturing – počítačová výroba
CD	Compact Disk
CM/CHM	Chemical Machining – chemické obrábění
CNC	Computer numeric control – počítačové numerické ovládání
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DIAJET	Direct Injection Abrasive Jet – systém s přímým vstřikováním abraziva do vysokotlaké vody
Dr	Doktor
EBM	Electron Beam Machining – obrábění paprskem elektronů
ECM	Electro Chemical Machining - elektrochemické obrábění
EDM	Electro Discharge Machining – elektroerozivní obrábění
Er:YAG	Krystal Yttrium Aluminium Granátu dopovaný prvky vzácných zemin erbiumem
He	Helium
IBM	Ion Beam Machining – obrábění paprskem iontů
IJM	Ice Jet Machining – obrábění ledovým vodním paprskem
KMO	Konvenční metody obrábění
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení světla pomocí vybuzené emise záření
LBM	Laser Beam Machining – obrábění paprskem laseru

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

N <sub>2</sub>	Dusík
Nd-YAG	Krystal Yttrium Aluminium Granátu zásobovaný ionty neodymu
Ne	Neon
NMO	Nekonvenční metody obrábění
O <sub>2</sub>	Kyslík
PBM	Plasma Beam Machining – obrábění paprskem plazmy
RP	Rapid Prototyping
USA	United States of America – Spojené státy americké
USM	Ultrasonic Machining – ultrazvukové obrábění
WJM	Water Jet Machining – obrábění paprsek vody
2D	Dvoudimenzionální prostor
3D	Třídimenzionální prostor

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
E1	[J]	Hladina s nižší energií
E2	[J]	Hladina s vyšší energií
h	[J.s]	Planckova konstanta
h <sub>0</sub>	[μm]	Hloubka ovlivněné vrstvy
I	[W.cm <sup>-2</sup> ]	Výkonová hustota
Ra	[μm]	Střední aritmetická odchylka profilu
v	[Hz]	Frekvence
Ø	[mm]	Průměr

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Výkres sestavy závěsné lampy
- Příloha 2 Výkres stínítka závěsné lampy
- Příloha 3 Výkres čepu
- Příloha 4 Výkres základového tělesa
- Příloha 5 Výkres krytky šroubů
- Příloha 6 Výkres sestavy stolní lampy
- Příloha 7 Výkres stínítka stolní lampy
- Příloha 8 Výkres úchytky plechu
- Příloha 9 Výkres podstavy
- Příloha 10 Výkres izolace