

# Hodnocení vlivu optiky CO<sub>2</sub> laseru na vlastnosti obrobené plochy

Bc. Roman Hein

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Roman Hein**

Osobní číslo: **T12432**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Hodnocení vlivu optiky CO2 laseru na vlastnosti  
obrobené plochy**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Vytvořte vzorky z různých materiálů na laseru ILS pro experiment
3. Provedte experiment
4. Provedte vyhodnocení experimentu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jana Knedlová**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce:

**12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně .....

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělků jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělků dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá hodnocením vlivu optiky CO<sub>2</sub> laseru ILS 3NM na vlastnosti obrobené plochy na vzorcích z materiálu PMMA gravírováním za použití čoček 1,5“; 2,5“; 4“ při výkonu 20 W a řezných rychlostí 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 % a 100 % z 1524 mm.s<sup>-1</sup> použitého zařízení. Měření drsnosti povrchu materiálu bylo provedeno na drsnoměru Talysurf CLI 500 a měření hloubky na Úchylkoměru ID H0530. Naměřené hodnoty byly zpracovány statisticky v programu Excel.

Klíčová slova: laser, optika, čočka, gravírování, drsnost, řezné podmínky, PMMA

## **ABSTRACT**

The master's thesis deals with the evaluation of the influence CO<sub>2</sub> optic laser ILS 3NM on surface characteristics of tooled pieces of the PMMA material that are engraved by laser lens of the sizes 1,5“; 2,5“; 4“ with working power 20 W and with used speed of incision 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 100 % of 1524 mm.s<sup>-1</sup> of the machinery. The Measurement of surface roughness was made on Talysurf CLI 500 surface roughness machine and the measurement of the depth was made on Digimatic indicator ID H0530. Measured results were worked statistically in the Excel.

Keywords: laser, optic, optic lens, engraving, roughness, conditions of incision, PMMA

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Janě Knedlové, za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytovala v průběhu vypracování diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, 7. 5. 2014

.....

Bc. Roman Hein

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VLASTNOSTI A PRINCIP LASERU</b> .....	<b>12</b>
1.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP LASERU .....	12
1.2 KONSTRUKČNÍ PRINCIP LASERU .....	14
1.3 VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU .....	15
1.4 ÚČINEK LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁL .....	17
<b>2 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ LASERU</b> .....	<b>20</b>
2.1 PLYNOVÉ LASERY .....	22
2.1.1 Laser CO <sub>2</sub> .....	24
2.1.2 Helium-neonový laser .....	26
2.1.3 Dusíkový laser .....	28
2.2 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY .....	29
2.2.1 Rubínový laser.....	29
2.2.2 Nd – YAG Laser.....	31
2.3 KAPALINOVÉ LASERY .....	32
2.4 POLOVODIČOVÉ LASERY .....	33
<b>3 PŘEHLED LASERŮ</b> .....	<b>34</b>
3.1 PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY LASERŮ .....	35
3.2 KRITÉRIA HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM .....	36
<b>4 VLASTNOSTI MATERIÁLU PMMA</b> .....	<b>39</b>
<b>5 DRSNOST POVRCHU</b> .....	<b>40</b>
<b>6 SOUHRN TEORETICKÉ PRÁCE</b> .....	<b>42</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>43</b>
<b>7 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>44</b>
<b>8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ LASER ILS 3NM</b> .....	<b>45</b>
8.1 OBSLUHA LASERU .....	46
<b>9 VÝROBA VZORKU NA ZAŘÍZENÍ ILS 3NM</b> .....	<b>47</b>



9.1	VYTVOŘENÍ SOUBORU .....	47
9.2	ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	48
9.3	BAREVNÉ ROZLIŠENÍ VZORKOVNÍKU .....	49
9.4	NASTAVENÍ REŽIMŮ .....	49
9.5	TISK EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ .....	50
9.6	PŘÍPRAVA LASERU (FOKUSACE).....	51
9.7	EXPERIMENTÁLNÍ VZORKY .....	54
<b>10</b>	<b>MĚŘENÍ.....</b>	<b>56</b>
10.1	POUŽITÁ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ.....	56
10.1.1	Postup měření drsnosti povrchu .....	57
10.1.2	Postup měření hloubky vzorkovníku.....	59
10.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ DRSNOSTÍ .....	60
10.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ HLOUBEK.....	69
<b>11</b>	<b>VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....</b>	<b>73</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>81</b>

## ÚVOD

Laser je vynález dvacátého století a za krátkou dobu své existence se stal důležitým vynálezem našeho života. Setkáváme se s ním v mnoha případech běžného života. Předměty, které jsou vyrobeny pomocí laserového paprsku, vidíme téměř denně. Laser se využívá převážně v medicíně a průmyslu.

Laser je opticky zdroj elektromagnetického záření, tj. zesilování světla. Pomocí paprsku lze soustředit na malé ploše velké množství energie. Díky tomu se využívá především v průmyslu pro obrábění tvrdých materiálů, řezání, svařování. Je také využíván v technologiích optických záznamových medií (CD, DVD), také i pro měřicí aplikace. Tedy hlavní předností laseru je rychlost, přesnost a efektivnost.

Cílem této diplomové práce je vyrobit vzorky z PMMA, které budou vyrobeny na laseru ILS 3NM. Výroba vzorků probíhala při třech různých tloušťkách čočky 1,5“; 2,5“; 4“ a při různých rychlostech posuvu. Následně pak naměření drsností a hloubek jednotlivých ploch zkušebních vzorků.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

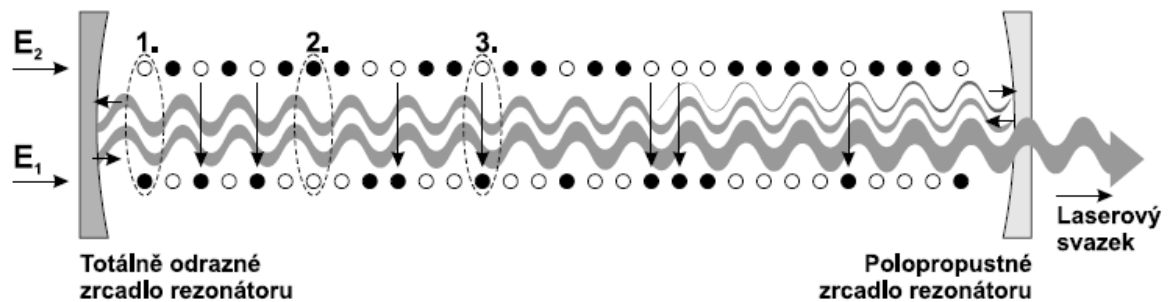
## 1 VLASTNOSTI A PRINCIP LASERU

Zkratka LASER je složeninou ze začátečních písmen anglických slov popisujících jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což by se dalo přeložit jako: Světlo zesílené stimulovanou (vynucenou) emisí záření. [1]

LASER má několik velmi významných vlastností, pro které je velmi hojně využíván. Tou nejdůležitější je **koherence** (uspořádanost) paprsku. Laserové světlo se šíří jen v úzkém paprsku, a je **monochromatické** (jednobarevné) - obsahuje jen jednu barvu podle použitého druhu aktivního prostředí, ve kterém Laserový paprsek vzniká. [1]

Aktivním prostředím se myslí látka plynná, pevná, či kapalná, která je nasycena více atomy na vyšších energetických hladinách. Tyto atomy pak mohou emitovat dvojnásobnou světelnou energii. Atom má určitou energii. Tato energie je neměnná, dokud atom nepohlí, nebo nevyzáří kvantum elektromagnetického záření. [1]

Jestliže je aktivní prostředí uzavřeno v optickém rezonátoru, zpětná vazba laserového záření umožní vznik generátoru elektromagnetických kmitů. Přeskočí-li zesílení světla v aktivním prostředí při průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření na vlnové délce charakteristické pro dané aktivní laserové prostředí. Aby bylo možné vyvést laserový paprsek z rezonátoru, je jedno ze zrcadel částečně propustné. [2]



Obr. 1 Aktivní prostředí v optickém rezonátoru [2]

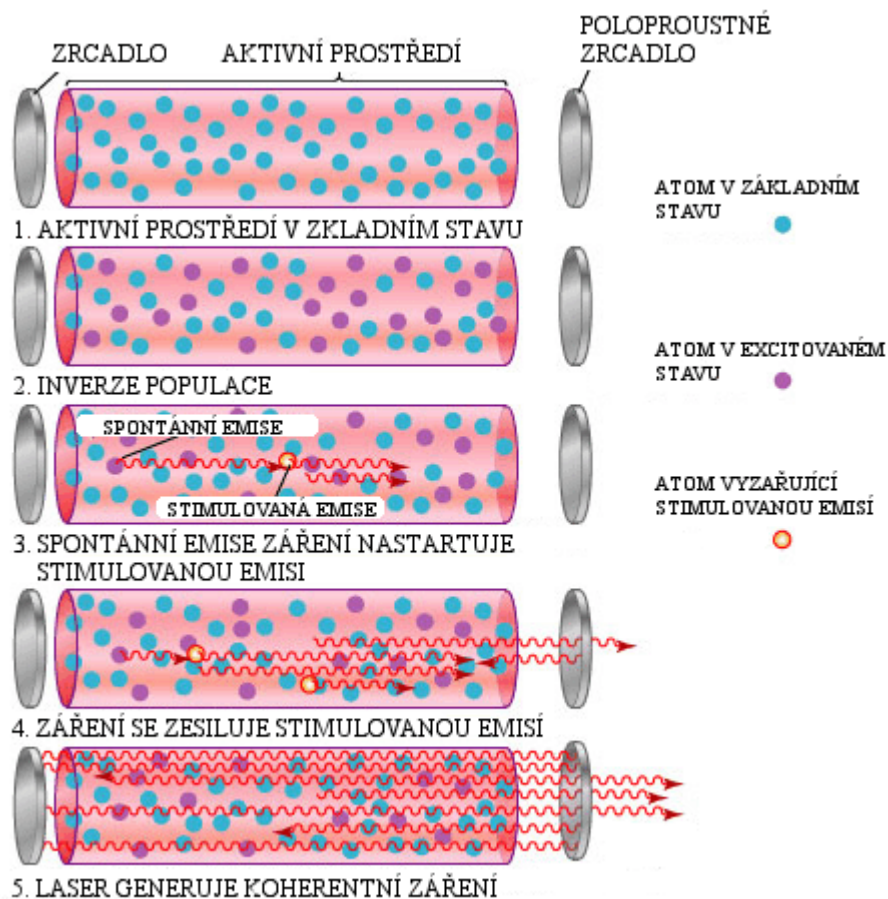
Na obrázku jsou vyznačeny: energetické hladiny  $E_1$ ,  $E_2$ . Stimulovaná emise (3.), kvantové soustavy v základním (1.) a v excitovaném (2.) stavu.

### 1.1 Fyzikální princip laseru

V aktivním prostředí laseru se kumuluje energie vybuzená z budícího zdroje. Po načerpání této energie, aktivní prostředí samovolně emituje přebytečnou energii ve formě fotonů.

Fotony mají odlišné frekvence, směr pohybu, fázi a polarizaci. Tyto odlišnosti odstraní optický rezonátor, který propustí jen frekvenci shodnou s jeho vlastní rezonanční frekvencí. Fotony se pohybují obvykle rovnoběžně s osou optického rezonátoru a dopadají kolmo na zrcadla. Od nepropustného zrcadla se odrazí zpět přes aktivní látku na polopropustné zrcadlo. Přes polopropustné zrcadlo prochází fotony jako koherentní laserový paprsek. [4]

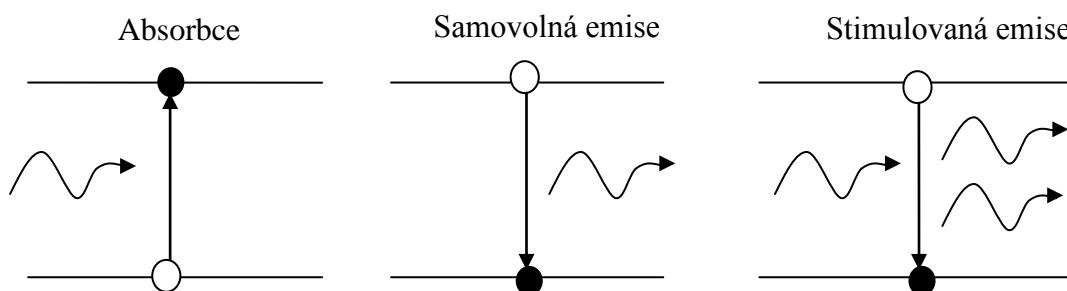
Energii dodanou aktivnímu prostředí můžeme přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise. Jedná se o lavinovitý efekt, kdy nám foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu. Jak fotony putují rezonátorem, od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet rapidně vzrůstá a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů (svazek laseru) [6]



Obr. 2 Proud fotonů [6]

Přechod elektronu ze základní energetické hladiny E1 na vyšší energetickou hladinu E2 se nazývá absorpcí a zpětný přechod z hladiny vyšší na hladinu nižší se nazývá emisí.

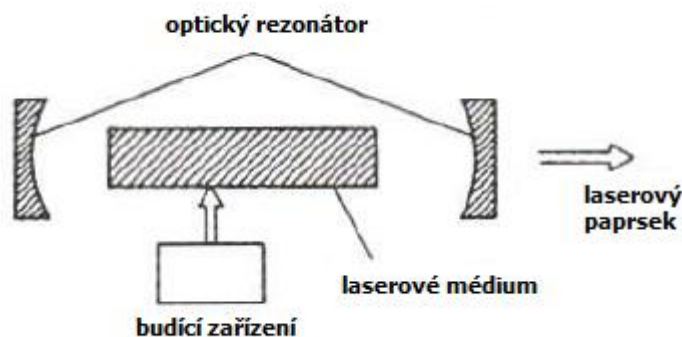
Emise může být buď spontánní (samovolná), nebo stimulovaná (též indukovaná či nucená). U **spontánní emise** dříve nebo později atom vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum, učíní tak sám od sebe. U **stimulované emise** dopadá na atom kvantum elektromagnetického záření. Zastihne-li ho na spodní energetické hladině, může být atomem pohlceno a atom přeskóčí na horní energetickou hladinu, hovoříme tak o absorpci. Setká-li se naopak záření s atomem na horní energetické hladině, může ho donutit vyzářit další kvantum energie (elektromagnetického záření) a přejít na spodní hladinu, hovoříme o stimulované emisi, tedy o fyzikálním jevu, na kterém je založena činnost laserů. [3]



Obr. 3 Přechod elektronu [3]

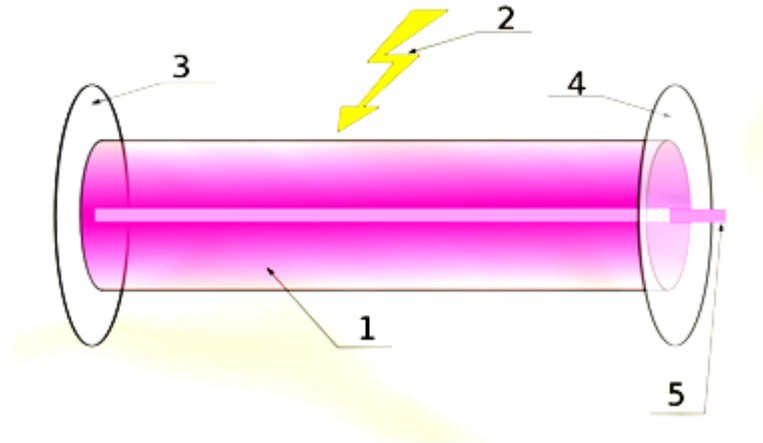
## 1.2 Konstrukční princip laseru

Základem laseru je aktivní prostředí, které je nějakým způsobem buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením dodáváme do laseru energii, která je potom právě pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového paprsku. K tomu je zapotřebí ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly. [6]



Obr. 4 Konstrukce laseru [11]

Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím. To dále podporuje stimulovanou emisi, a tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný světelný paprsek pak opouští tělo laseru průchodem skrze polopropustné zrcadlo. [5]



Obr. 5 Rezonátor [5]

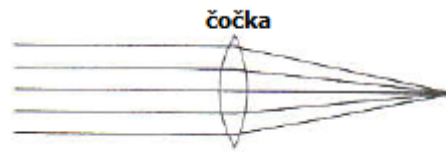
Kde: (1) Aktivní prostředí, (2) zdroj záření, (3) odrazné zrcadlo, (4) polopropustné zrcadlo, (5) laserový paprsek

**Aktivní prostředí** je látka, ve které se elektrony nebo molekuly dají vhodným čerpáním (přívodem excitační energie) vybudit na požadovanou pracovní hladinu, ze které pak můžou emitovat záření. Aktivní prostředí je jedna z nejdůležitějších částí laseru. Vzniká v něm stimulovaná emise. Pracovní látkou v aktivním prostředí může být plyn, kapalina, polovodič nebo plazma. [3]

### 1.3 Vlastnosti laserového paprsku

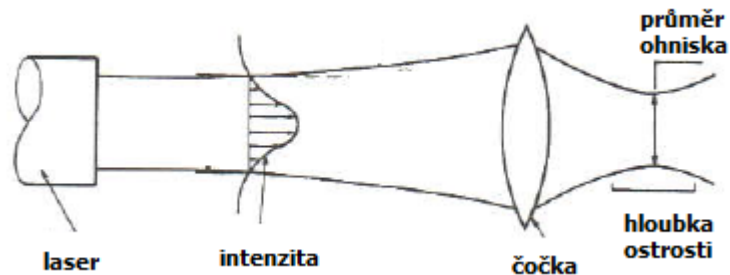
Laser je kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má tyto vlastnosti:

- Je monochromatický – světlo v laserovém paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku. Je rovnoběžné, proto ho je možné soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku. [11]



Obr. 6 Laserový paprsek [11]

- Má vysoký stupeň prostorové a časové koherence. V prostorově koherenčním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření se paprsku. V časově koherenčním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření se paprsku. [11]



Obr. 7 Rorbíhavost a prostorový profil laserového paprsku [11]

- Má minimální rozbíhavost, která vystupuje z rovinného laseru.
- Má módovou strukturu (TEM), v příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu (základní mód), nebo složitější obrazce kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfigurací (mód) v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Mód určuje jeho vhodnost pro typ obrábění (např. řezání, sváření, vrtání) [11]



	průřez A kolmý na směr paprsku	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
1				TEM <sub>00</sub> (řezání)
2				TEM <sub>01</sub> (sváření, kalení)
3				TEM <sub>21</sub>
4				TEM <sub>32</sub>
5				multimód (řezání)
6				multimód (nevhodné pro řezání)

Obr. 8 Módová struktura laserů, jejich TEM označení a použití [11]

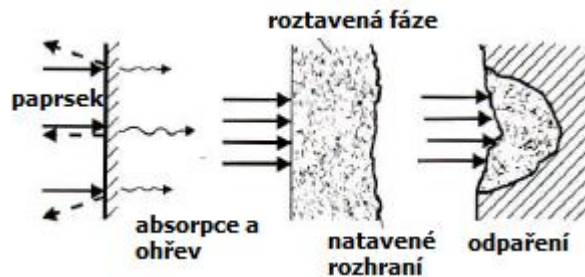
Uvedené vlastnosti laserového paprsku umožňují při jeho fokusaci soustředit do malého bodu mimořádně vysokou hustotu energie v místě dopadu paprsku. Následkem je roztavení a odpaření materiálu, tím se dosahuje požadovaný efekt obrábění. [11]

#### 1.4 Účinek laserového paprsku na materiál

Při styku laserového paprsku s materiálem, dochází k jejich vzájemné interakci a efektu, které jsou závislé od vlastností materiálů a jejich schopnosti pohlcovat a odrážet laserové záření. Faktory důležité pro použití laserového paprsku jsou: [11]

- Reflektivita – odrazivost povrchu
- Absorpce – pohlcování laserového záření
- Tepelná vodivost
- Tavení povrchové vrstvy
- Odpařování

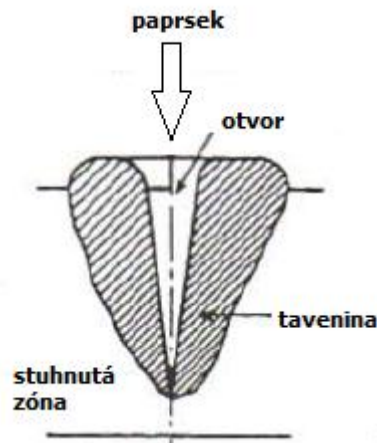
Po dopadení na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje a část projde materiálem. Absorbovaný paprsek ohřeje materiál, který se ohřevem nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti. [11]



Obr. 9 Účinek laserového paprsku [11]

Pokud laserový paprsek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, absorbované paprsky lokálně ohřejí částice materiálu až na teplotu tavení. Povrch natavené oblasti se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením paprsku začne odpařovat. V natavené zóně při odpařování částic materiálu vznikají vysoké tlaky a tavenina je přemísťována a vytlačována z otvoru. V místě dopadu paprsku se následkem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do otvoru. [11]

V závislosti od použité technologie obrábění (řezání, vrtání), je tepelně ovlivněná zóna buď dvoj, nebo trojrozměrná. Řezání laserem se charakterizuje jako ustálený proces, při kterém se tepelně ovlivněná zóna tvoří jenom na stěnách zářezu. Vrtání se charakterizuje jako proces nestacionární, protože čelo eroze se pohybuje s ohledem na pevný laserový paprsek a tepelně ovlivněná zóna se tvoří na stěnách otvoru. [11]



Obr. 10 Působení paprsku na materiál [11]

Tepelně ovlivněná zóna (HAZ) je různá pro rozdílné materiály a závisí od posuvu paprsku, vlnové délky a absorpčních vlastností materiálu. Čím je vyšší rychlost posuvu paprsku, tím menší je hloubka ovlivněné zóny. Intenzita absorpce laserových paprsků do materiálu se zvyšuje podle velikosti vlnové délky záření. Šířka tepelně ovlivněné zóny je okolo 0,05mm. Průměr laserové hlavičky a vzdálenost mezi povrchem má vliv na průměru hloubky HAZ. [11]

Tab. 1 Hodnoty tepelně ovlivněné zóny [11]

Materiál	tloušťka mat.(mm)	rychlost (m/min)	HAZ (mm)	Výkon (kW)
Papír	0,2	>600	0,13	0,4
Sklotextil	1,5	3,0	0,25	0,4
Překližka	25	1,5	1,5	8,0
Nástrojová ocel	3,0	1,7	0,2	0,4
Korozivzdorná ocel	1,2	4,6	0,2	0,4
	4,7	1,27	2,0	20,0
Titan	1,0	7,5	0,5	0,6

## 2 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ LASERU

Existuje mnoho různých tříd laserů, jejich základní princip je stejný, ale liší se výrazně konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Dělení laserů do jednotlivých skupin probíhá podle několika kritérií. [2]

### Podle skupenství aktivního prostředí:

- Plynné
- Pevnolátkové
- Kapalinové
- Polovodičové
- Plazmatické

Tab. 2 Rozdělení laserů [11]

Druh Laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblasti aplikace
Pevný	Rubín	Cr <sup>3+</sup>	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd-YAG	Nd <sup>3+</sup>	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200 W	Strojní průmysl
	Nd-sklo	Nd <sup>3+</sup>	1,064	pulzní	2 mW	
	alexandrit		0,7-0,818	pulzní	10 W	
Polovodičový	GaAs		0,80-0,90	pulzní	2 až 10 mW	Informační technologie
Plynný	CO <sub>2</sub> (N <sub>2</sub> + He)	CO <sub>2</sub>	10,6	kontinuální nebo pulzní	500 až 1500 W	Strojní průmysl
	He - Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20mW	Metrologie, Holografie
	Ar		0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální nebo pulzní	1 až 5 000 W	Chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,17	pulzní	20 až 250 W	Fotolitografie, Chirurgie, Strojnictví
	(XeCl)		0,308			
	(XeF)		0,351			
	(KrF)		0,248			
Kapalinový	Barvivo Rhodamine 6	Etanol, metanol	0,34 - 1,175	pulzní	100 W	Fotochemie, spektroskopie

**Podle způsobu čerpání energie (buzení) lze lasery rozdělit:**

- Opticky (výbojkou, slunečním světlem a radioaktivním zářením) pro pevnolátkové a kapalinové
- Elektrickým výbojem (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic) pro plynové
- Chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy)
- Termodynamicky – tepelnými změnami (zahřátí a ochlazení plynu)
- Jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem)
- Elektronovým svazkem
- Injekcí nosičů nábojů

**Z hlediska režimu práce mohou lasery pracovat:**

- Kontinuálně (nepřetržitě) pro plynové lasery
- Impulzně (dlouhé, krátké, velmi krátké)
- Pulzně

V kontinuálním provozu pracují převážně plynové lasery. V plynu je kontinuální záření vyvoláno pomocí srážek s elektrony. Tento způsob buzení je realizovatelný elektrickým výbojem v plynu, při kterém vznikají ionty a volné elektrony. Volné elektrony přebírají energii zdroje a předávají ji atomům při srážkách. Získání kontinuálního provozu v pevnolátkových laserech je obtížné, je nutné použít dostatečně silný zdroj energie a odvádět velké množství vzniklého tepla. [8]

Pulzní provoz umožňuje dosáhnout velké hustoty energie pro zvýšení absorpce záření v materiálech s velkou odrazivostí, snížení objemového ohřevu materiálu v důsledku krátké doby interakce paprsku s materiálem a provedení řady vysokorychlostních operací při schopnosti rychlého zažhání a zhasínání paprsku. [7]

**Podle vyzařované vlnové délky:**

- Infračervené
- V oblasti viditelného světla
- Ultrafialové
- Rentgenové

Používají se lasery s vlnovou délkou v intervalu 0,4-10,6  $\mu\text{m}$ . Vlivem soustředění energie do průměru 0,05-0,25 mm je hustota energie větší než  $10^8 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  a teplota v místě dopadu dosahuje hodnoty až  $25\cdot 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Podle energetických hladin na kvantovém přechodu:**

- Elektronové
- Molekulární (rotační, vibrační)

**Rozdělení laseru podle použití:**

- Výzkumné
- Měřicí
- Lékařské
- Technologické
- Energetické
- Vojenské

**2.1 Plynové lasery**

Aktivní prostředí je v plynné fázi. Plynové lasery je možné budit elektrickým výbojem, chemickou reakcí, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů. Pracovním prostředím plynného laseru bývá směs atomů (He-Ne laser, měděný laser, jodový laser) různých plynů či je tvořeno molekulami ( $\text{CO}_2$  laser, vodíkový laser, dusíkový laser) nebo ionty (Ar laser, Helium-kadmiový laser). Objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí. Plynové lasery

mají vyšší účinnost (CO<sub>2</sub> laser okolo 40 %). Plynové lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu.

Tab. 3 Přehled plynových laserů [13]

Aktivní prostředí	Vlnová délka (μm)	Buzení	Režim
Cu páry	0,51	el. výboj	impulsní
(He) Ne	1,15	el. výboj	kontinuální
I	1,315	fotodisociace	impulsní
(He) Cd <sup>+</sup>	0,325 a 0,442	el. výboj	kontinuální
Ar <sup>+</sup>	0,488 a 0,514	el. výboj	kontinuální
H <sub>2</sub>	0,116	el. výboj	impulsní
N <sub>2</sub>	0,337	el. výboj	impulsní
ArF	0,193	el. výboj	impulsní
KrF	0,249	svazek elektronů	impulsní
XeCl	0,308	svazek elektronů	impulsní
HF	2,7	chemické	kontinuální impulsní
DF	4,3	chemické	kontinuální impulsní
CO	5,5	el. výboj	kontinuální impulsní
CO <sub>2</sub>	10,6	el. Výboj; chem.; expanze plynu	kontinuální impulsní
H <sub>2</sub> O	118,6 a 220,2	rezonanční	impulsní
HCN	331 a 337	optické	impulsní

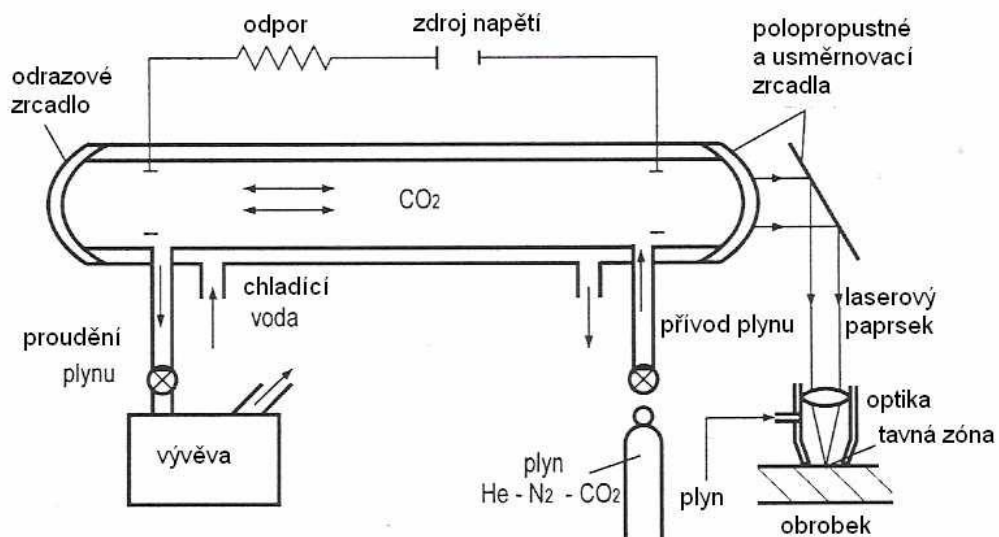
### 2.1.1 Laser CO<sub>2</sub>

Laser CO<sub>2</sub> na vznik stimulované emise záření využívá kvantové – energetické přechody související s oscilací molekul CO<sub>2</sub> a dusíku (N<sub>2</sub>).

Hlavní součástí laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a hélia (He). Energie potřebná pro excitaci je vytvářena ve formě doutnavého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí. [11]

V doutnavém výboji jsou molekuli dusíku N<sub>2</sub> srážkami s elektrony excitované ze svého základního energetického stavu E<sub>0</sub> do prvního vibračního stavu na určité energetické hladině E<sub>1</sub>, která se blíží k energii asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého E<sub>2</sub>. Proto se může nepružnými srážkami excitovaných molekul N<sub>2</sub> s molekulami CO<sub>2</sub> velmi rychle a účelně měnit vibrační energie molekul. Molekuly CO<sub>2</sub> přecházejí ze svých asymetrických vibrací na symetrické vibrace energetickým přeskokem z energetické hladiny E<sub>2</sub> na nižší hladinu, které je provázené vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm. [11]

Aby byla v CO<sub>2</sub> laseru trvale zajištěná inverze populace na horní hladině E<sub>2</sub>, je potřebné jí neustále doplňovat (čerpat do systému energii ve formě doutnavého výboje) a jednak je potřebné účinně doplňovat dolní laserovou úroveň, které je zajišťované srážkami s molekulami helia, kdy přijatou energii odvádí do systému ve formě tepla. [11]



Obr. 11 Princip laseru CO<sub>2</sub> [11]

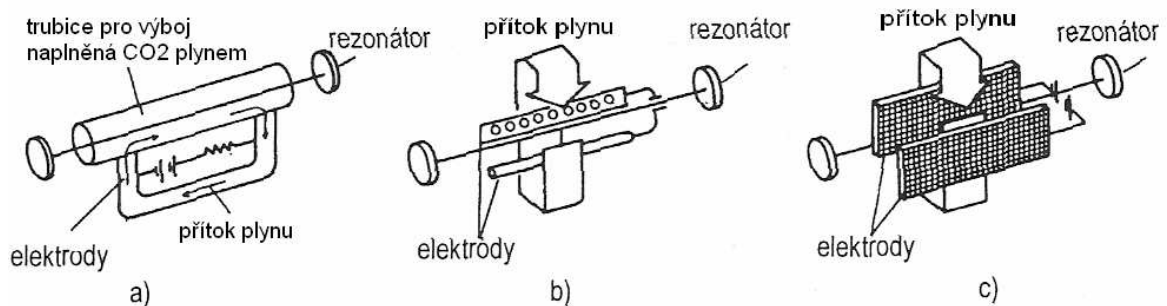


Teplo je ze systému odváděno chladícím médiem (vodou), pomocí chladícího agregátu. Chlazení musí být přítom natolik účinné, aby teplota v dutině nepřekročila asi  $400^{\circ}\text{K}$ . Po-  
třebný nízký tlak plynu zaručující vznik doutnavého výboje v laserové trubici je udržovaný pomocí vývěvy. [11]

Plyn může být po přechodu trubicí vedený na regeneraci a případně znovu používaný v okruhu. Plyn se totiž v průběhu procesu v laserové dutině znehodnocuje, tím že  $\text{CO}_2$  se částečně rozkládá na CO (oxid uhelnatý) a kyslík ( $\text{O}_2$ ), což vede k poklesu výkonu laseru.  $\text{CO}_2$  lasery se podle uspořádání toku plynu vzhledem k optické ose dělí na:

- axiální - plyn proudí kolmo ve směru optické osy laseru, nejpoužívanější používaný typ
- transverzální - plyn proudí kolmo na směr optické osy a většinou kolmo na směr elektrického výboje v dutině, tento druh oscilátorů se dělí na dvojsový a trojosový podle vztahu mezi přítokem plynu a výbojem mezi elektrodami, dosahují se vyšší výkony na jednotku objemu dutiny. [11]

Výkon axiálních laserů je dán délkou laserové trubice (obvyčně 60 až 70 W na 1m délky), vysoko-výkonové axiální lasery mají délku trubice až 10 m.



Obr. 12 Typy oscilátorů pro lasery  $\text{CO}_2$ :

a) axiální b) transverzální dvojsový c) transverzální trojosový [11]

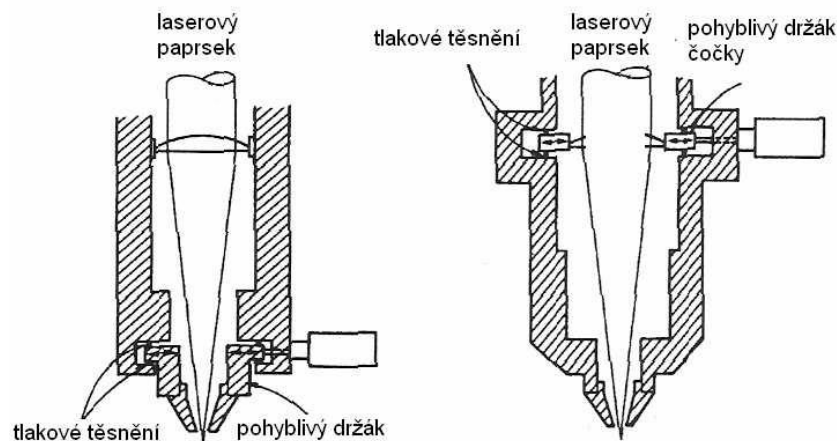
Generovaný laserový paprsek vystupuje z rezonátoru polopropustným zrcadlem a do laserové hlavičky je přiváděný systémem zrcadel. V hlavičce se nachází fokusační čočka. Čočka je chlazená chladícím prstencem. Optika těchto laserů je upravována různými příměsemi jako ZnSe, GaAs, Ge, NaCl. [11]

Do laserové hlavičky je zaváděn také pomocný plyn, který z něj vystupuje spolu s fokusovaným paprskem.

Pomocný plyn má následující funkce:

- chránit optiku před produkty rozkladu materiálu opracovaného laserem,
- může vytvářet v dopadu laserového paprsku na materiál ochranou, anebo naopak oxidační, či jinak vhodně agresivní atmosféru,
- odstraňuje z obráběného materiálu ohřevem vznikající taveninu, a nebo páry, čímž

přispívá k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování materiálu. Někdy je tento účinek ještě zesilovaný vakuovým odsáváním produktů interakce laserového paprsku s materiálem. Pro řezání pomocí laseru se využívá laserová hlavička, jejímž hlavním účelem je přivádět pomocný plyn do zóny řezání. Laserová hlavička má různou konstrukci podle uspořádání a uložení dýzy na přívod stlačeného plynu.

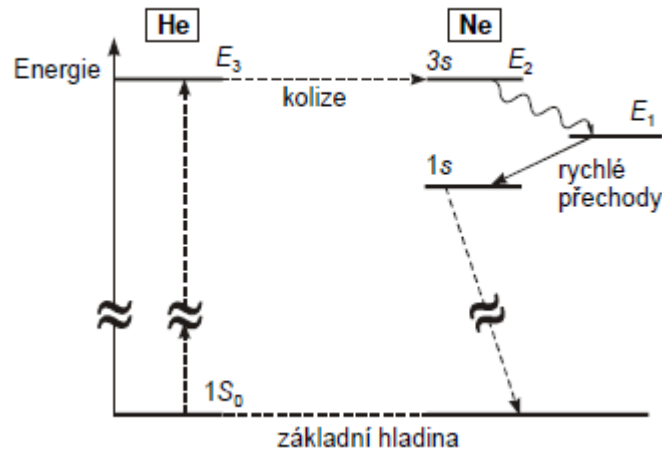


Obr. 13 Uspořádání laserové hlavy [11]

### 2.1.2 Helium-neonový laser

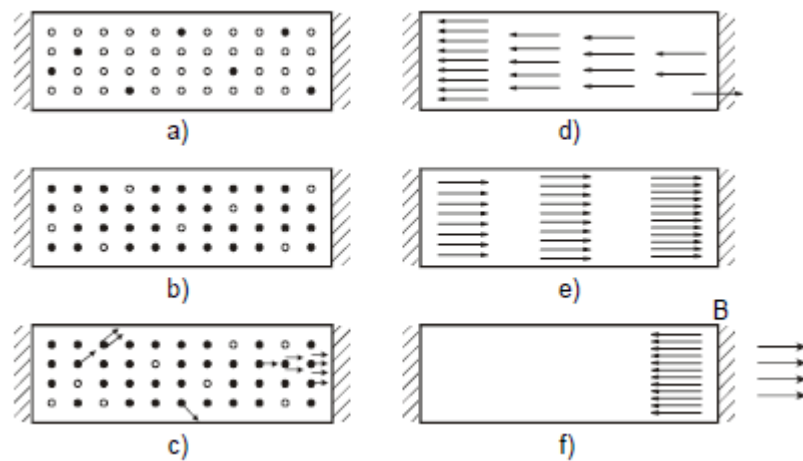
Aktivní prostředí tohoto laseru je tvořeno směsí hélia a neonu v poměru 10:1. Hladina s nejnižší energií se označuje jako základní hladina, hladiny s vyšší energií jsou hladiny excitované. V procesu pumpování laseru je převedeno aktivní prostředí z rovnovážného stavu do stavu inverzní populace. V případě He-Ne laseru je elektrickým výbojem dodávána energie atomům He, které jsou tak převedeny do vyšších excitovaných energetických hladin, z nichž nezářivými přechody přejdou do hladiny, která je na (obr. 9) označena jako  $E_3$ . Srážkami je tato energie předána atomům Ne. Hladina  $E_2$  neonu se označuje jako hladina metastabilní, protože pravděpodobnost přechodu na nižší hladinu označenou  $E_1$  je malá. Hladina  $E_2$  má tak dostatečně dlouhou dobu života, aby mohla být vytvořena větší populace

této hladiny v porovnání s populací hladiny  $E_1$ . Dále je požadováno, aby pravděpodobnosti přechodů z hladiny  $E_1$  na nižší hladiny byly velké. [12]



Obr. 14 Energetické hladiny v He-Ne laseru [12]

Schematicky jsou jednotlivé fáze činnosti laseru znázorněny na Obr. 15. Rovnovážný stav je charakterizován vyšší populací nižšího energetického stavu (Obr. 15a). Při buzení laseru vzniká inverzní populace (Obr. 15b). Náhodný foton, který dopadne na uvažovaný systém, vyvolá obecně absorpci a stimulovanou emisi. Jestliže je mezi hladinami vytvořena inverzní populace, je počet přechodů z vyšší na nižší hladinu větší než počet přechodů z nižší hladiny na vyšší a stimulovaná emise tak převládá nad absorpcí. Výsledkem jednoho aktu stimulované emise je vznik dvou koherentních fotonů majících stejnou frekvenci, polarizaci a šířících se stejným směrem (Obr. 15c). Tyto dva fotony vyvolají další dvě stimulované emise za vzniku čtyř koherentních fotonů. Stimulovaná emise se významně lavinovitě šíří podél osy trubice (Obr. 15d). Zrcadla na koncích rezonátoru navíc prodlužují účinnou dráhu, na které dochází k pokračování tohoto procesu. Zrcadlo v místě B rezonátoru je částečně propustné, takže část fotonů, které chceme činností laseru získat, tudy vystupují (Obr. 15f). [12]



Obr. 15 Rezonátor laseru a šíření stimulované emise [12]

Kde: a) rovnovážný stav aktivního prostředí, b) inverzní populace, c) stimulovaná emise vyvolaná dopadem náhodného fotonu, (d-f) lavinovité šíření stimulované emise podél osy rezonátoru, f) výstup části fotonů. Prázdný kroužek znázorňuje částici ve stavu s energií  $E_1$ , plný kroužek částici ve stavu s energií  $E_2$ . [12]

### 2.1.3 Dusíkový laser

Dusíkový laser (molekulární laser) může generovat záření v UV, viditelné i infračervené záření. Nejvíce se využívá pro generaci UV záření s vlnovou délkou 337 nm. Laser pracuje v pulzním režimu. [13]

Doba života molekuly dusíku na spodní laserové hladině je větší, než doba života na dolní hladině. Při laserové činnosti proto dochází k rychlému nasycení přechodu a zániku inverze populace hladin. Proto buzení musí být rychlé. Provádí se příčným elektrickým výbojem.

Dosahované zesílení je veliké. Výhoda je, že laser může pracovat bez optického rezonátoru v režimu zesílené spontánní emise. [13]

## 2.2 Pevnolátkové lasery

Aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Pevnolátkové lasery jsou opticky čerpané pevnolátkové iontové lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří matrice krystalické nebo amorf-ní (sklo, keramika) izolanty, dopovaná příměsí vhodných iontů. Pevnolátkové lasery pracu-jí především v pulzním režimu.

U pevnolátkových laserů se téměř výlučně používá optické buzení. Při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje, kterým je obvykle výbojka, vyvolá změna v obsazení energie-tických hladin. Tyto lasery mohou pracovat v různých režimech a také za různých provoz-ních podmínek, jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu. Jejich záření je v oblasti infra-červeného a viditelného světla. [3]

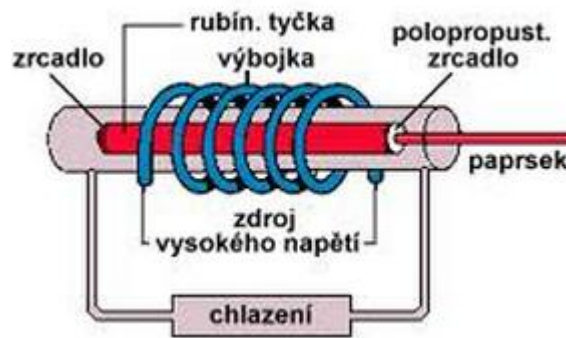
### 2.2.1 Rubínový laser

Rubínový LASER využívá za aktivní prostředí rubín. V němž jsou rovnoměrně rozptýleny trojmocné ionty chrómu  $\text{Cr}^{+3}$  v koncentraci asi 0,05%. Tyto ionty patří do skupiny materi-álů, v nichž je možné dosáhnout inverze populace v tříhladinové soustavě kvantových pře-chodů. Jedná se o váleček, od deseti milimetrů, až do délky dvaceti centimetrů. Na obou koncích dokonale zaříznutý do úhlu 90 stupňů. Na tyto plošky se také v některých přípa-dech napařují kovy, které vytváří na jedné straně 100 procentně odrazovou plochu, a na druhé polopropustnou plochu (zrcadlo). Excitačními atomy jsou v tomto případě atomy Chrómu ( $\text{Cr}^{+3}$ ). [1]

Celý váleček rubínu je tedy pak považován za aktivní prostředí. Zrcadla potom slouží jako rezonátor. Celé zařízení je většinou umístěno do tak zvané eliptické odrazové dutiny a z venčí je vybavena chladičem. Zde je pak umístěn rubínový váleček a výbojová trubice s dostatečným výkonem. V ní se používá za náplň nejčastěji Krypton (Kr) nebo Xenon (Xe) pod tlakem 0.2 - 0.4 MPa. Výbojka i krystal se musí umístit do ohniskové přímky. Která zajišťuje světelné záření, které vstupuje do aktivního prostředí rubínu. [1]

Každý takovýto vstup světla vybudí obrovské množství atomů, které jsou na vyšší energetické hladině, a to způsobí zesílení světla. Horní energetická hladina, z níž dochází k přeskokům elektronů na základní hladinu, je rozštěpena na dvě navzájem blízké energetic-ké úrovně, je generováno světlo dvou blízkých vlnových délek v oblasti červené barvy s vlnovými délkami 692.9 a 694.3 nm. Rubínový laser pracuje obvykle v impulsním režimu. Doba trvání výstupního impulsu by měla být co možná nejkratší, aby se dosáhlo co největší

časové koncentrace energie. Bez zvláštní konstrukční úpravy laseru trvá výstupní impuls přibližně jednu milisekundu. Výstupní impuls začíná se zpožděním za počátkem budicího impulsu, v okamžiku, kdy se dosáhne inverze populace a dostatečně se zvýší stimulovaná emise. Laser za této situace pracuje v režimu relaxačního vyzařování. Výstupní impulsy jsou široké a hustota zářivého toku je malá. [1]



Obr. 16 Rubínový laser

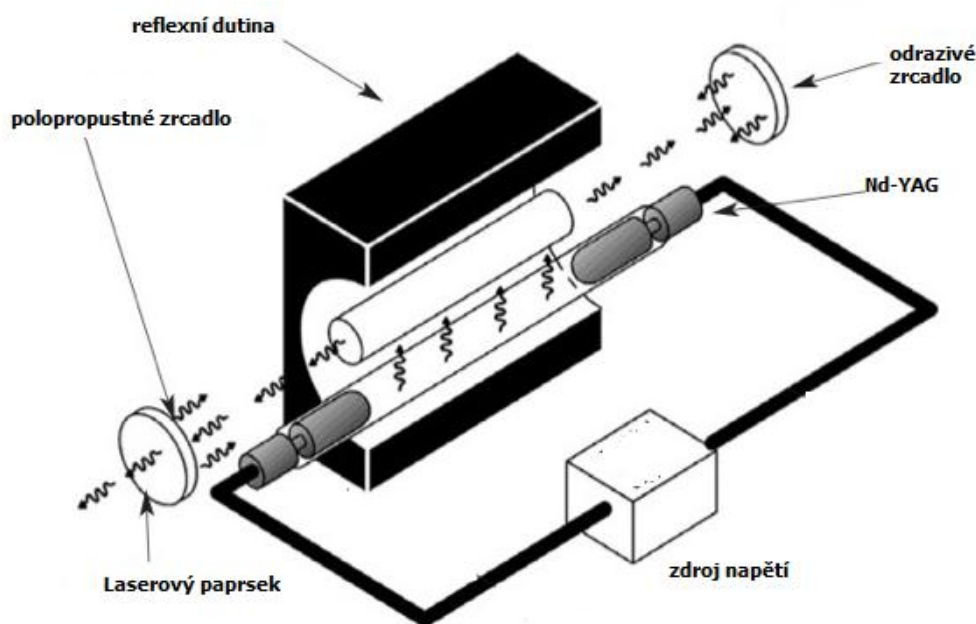
Lepších výsledků se dosáhne následující úpravou: Čelní stěny krystalu nejsou opatřeny odrazivou vrstvou, ale jsou zabroušeny do rovin, svírajících s podélnou osou krystalu určitý úhel. Za těchto podmínek se světlo procházející ve směru podélné osy krystalu na rozhraní mezi krystalem a okolím neodráží ani nelomí. Mezi krystal a jedno ze zrcadel se vloží vrstva vhodné látky. Tím se dosáhne zpoždění okamžiku, kdy vznikne lavinový proces nárůstu stimulované emise v důsledku mnohonásobných odrazů světla v rezonátoru. (Modulační prvek po určitou dobu zvyšuje ztráty v rezonátoru, takže nepřevládá zesílení). Během tohoto času však probíhá proces buzení, excitace dalších a dalších kvantových soustav. Dochází k nahromadění počtu excitovaných kvantových soustav. Po překonání určitého stavu modulačního prvku náhle ztráty v rezonátoru klesnou, převládne zesílení a dojde k prudkému vzrůstu stimulované emise. Výstupní světelný impuls je pak velmi krátký. Záření má obrovskou hustotu, odpovídající okamžitému výkonu  $10^9$ W. Střední hodnota výkonu rubínových laserů je však malá. Celková účinnost je pouze několik procent. Při kontinuálním provozu je nutné účinné chlazení celého zařízení. Výkon rubínového laseru je velmi malý. [1]

### 2.2.2 Nd – YAG Laser

Nd-YAG laser je z pevného  $Y_3Al_5O_{12}$  (ytrium, hliník, kyslík) izotermického krystalu, který obsahuje asi 1% iontů neodymů ( $Nd^{3+}$ ). Ionty ( $Nd^{3+}$ ) tvoří aktivní prostředí. Výkonná hlava laseru je několik stovek Wattů. Pracuje v pulzním režimu s energií impulzů 1 až 50 J, nebo v kontinuálním režimu 1 až 5 mJ s rychlostí spínání od 1 do 50 kHz. [11]

Trvání impulzů v pulzním režimu pro průmyslové využití je 0,6 ms, ale pro oblast mikroobrábění se využívají velmi krátko trvající impulzy v ns a v ps s vysokou výkonovou hustotou ( $5 \times 10^{12} W/cm^2$ ) s fokusovaného paprsku s průměrem 10  $\mu m$ . [11]

Zdrojem buzení (optického čerpadla) je světelný impulz z obloukové lampy. Světlo odražen od rezonátoru aktivuje oscilační médium. Odrazový rezonátor má zpravidla tvar dutiny cylindrického anebo eliptického průřezu, je vyrobený z kovů, které mají vysokou tepelnou vodivost jako Cu nebo W. Povrch rezonátoru je dokončován leštěním nebo obráběním diamantovým nástrojem a je povlakovaný tenkou vrstvou zlata nebo stříbra. Koeficient odrazivosti těchto kovů je vysoký 98 až 99%. [11]



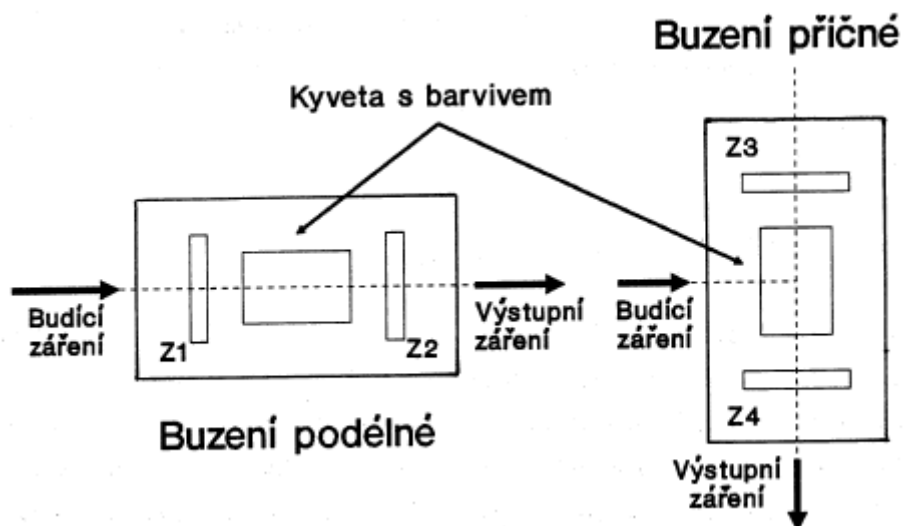
Obr. 17 Nd-YAG laser

### 2.3 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dodávající ionty vzácných zemin. Speciální kapaliny jsou zpravidla roztoky metalo-grafických sloučenin, např. vodní roztoky solí s aktivními ionty. Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy. [14]

Organická barviva tvoří velkou část aktivního prostředí. Jsou to ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech (např.: voda, etylalkohol, toluen, benzen, aceton ...). Organická barviva jsou komplexy organických sloučenin majících široká absorpční pásma ve viditelné a blízké ultra fialové oblasti spektra. Chemická struktura organických barviv je charakterizována kombinací několika organických jader. [14]

Pro buzení barvivových laserů se užívá optického záření. Optické buzení těchto laserů je příčné nebo podélné. Při příčném buzení se budící zařízení šíří kolmo ke směru podélné osy otevřeného rezonátoru barvivového laseru, zatímco při podélném buzení jsou směry záření budícího a generovaného stejné. [14]



Obr. 18 Podélné a příčné koherentní buzení barvivového laseru [14]

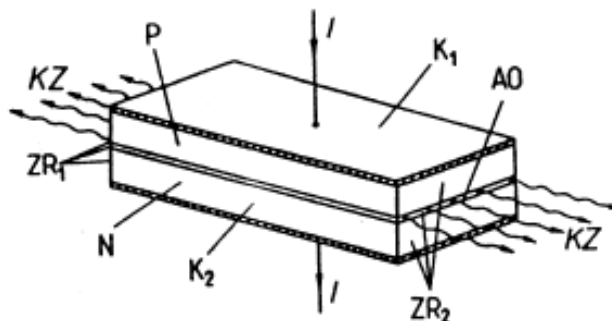


## 2.4 Polovodičové lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Na rozdíl od ostatních laserů pracovní přechod v polovodiči neexistuje mezi energetickými hladinami, ale mezi energetickými pásy. V polovodičovém aktivním prostředí je možné dosáhnout velkého optického zesílení (až  $10^4 \text{ cm}^{-1}$ ). Proto jsou rozměry aktivního elementu polovodičového laseru mnohem menší než u ostatních laserů. [14]

Pro generaci koherentního záření je zapotřebí zajistit, aby se v aktivním prostředí laseru dosáhlo inverze populace a dále, aby vznikla kladná zpětná vazba. Inverze populace se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje přechodem P-N. [14]

Kladná zpětná vazba se vytvoří obvykle úpravou struktury polovodičového laseru do tvaru otevřeného planparalelního rezonátoru ohraničeného dvěma polopropustnými zrcadly. Vzhledem k rozdílu lomu na rozhraní krystal-vzduch je zajištěn dostatečný činitel odrazu takto vytvořených zrcadel rezonátoru. [14]



Obr. 19 Schéma uspořádání polovodičového laseru [14]

Kde: N-polovodič s vodivostí N; P-polovodič s vodivostí P;  $K_{1,2}$ - kontakty; I-protékající proud; AO-aktivní oblast; KZ-koherentní záření;  $ZR_{1,2}$ - rovinné čelní plochy s opticky lesklým povrchem.

Aktivní materiál polovodičových laserů je složen z polovodiče typu P a N. Polovodiče vytvářejí tzv. P-N přechod. Buzení je prováděno přiložením elektrického pole k polovodičovému přechodu. Nejznámějším je GaAs polovodičový čip. Oblast typu N je dosažena dopováním galia telurem, zatím co stupeň degenerace P oblasti je dosažen dopováním materiálu zinkem. [14]

### 3 PŘEHLED LASERŮ

Každý z těchto laserů si našel uplatnění v jiné oblasti použití. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám v širokém spektru použití. Každý laser vyniká něčím jiným a je vhodný k určitému odvětví. Postupem času se jednotlivé typy zdokonalovaly a vylepšovaly se tak jejich parametry. [3]

Tab. 4 Přehled laserů [10]

Název	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Barva paprsku	Použití
Rubínový laser	rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	neodym, YAG	1064 nm	IR	chirurgie, strojírenství, spektroskopie
He-Ne laser	hélium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořské komunikace
CO <sub>2</sub> laser	oxid uhličitý	10,6 μm	IR	svařování, řezání
Ga-As laser	gallium, arsen	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová tiskárna, ukazovátka
Ga-Al-As laser	gallium, hliník, arsen	670 - 830 nm	červená	CD přehrávače, telekomunikace
Al-Ga-In-P laser	hliník, gallium, indium, fosfor	650 nm	červená	DVD přehrávače
Ga-N laser	gallium, dusík	504 nm	modrá	blu-ray přehrávače
Ga-N laser	gallium, dusík	504 nm	modrá	blu-ray přehrávače

### 3.1 Provozní charakteristiky laserů

Charakteristiky jsou závislé od typu laseru a liší se podle používané technologie (sváření, vrtání, řezání). Obrábění laserem je erozivní tvarování otvorů, dutin, zářezů, drážek, řezání a vrtání. Obvykle se pro metody obrábění udávají kvantifikované údaje:

- Výkon laseru
- Šířka zářezu
- Řezná rychlost
- Ohnisková vzdálenost
- Tepelně ovlivněná vrstva HAZ
- Reflektivita materiálu

Tab. 5 Rozsahy doporučených výkonů [11]

CO2 laser						
Výkon (kW)	0,2 - 0,3	0,3 - 0,5	0,5 - 0,8	0,8 - 1,5	1,5 - 3,0	>3,0
bodové sváření max. průřez (mm)	0,75	1,3	2	3,2	6,4	19
řezání max. hloubka (mm)	1,5	5	9,5	12,7	19	<25
žihání	-	-	Ano	Ano	Ano	Ano
Nd - YAG laser						
Výkon (W)	<100		150 - 200		200 - 400	
označování	Ano		-		-	
bodové svařování max. průřez (mm)	-		1,3		2	
řezání max. hloubka (mm)	-		5		38	
vrtání max. hloubka (mm)	-		5		38	

Vybrané charakteristiky řezání a vrtání laseru [11]:

- Průměr fokusačního paprsku pro jednotlivé druhy laseru - rubínový 0,013 mm; CO<sub>2</sub> 0,076 mm
- Minimální průměr vrtání 0,005 mm, hloubka otvoru 23 mm v závislosti od vrtaného materiálu
- Průměrná rychlost úběru materiálu 8,2 mm<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>
- Šířka zářezu se udává v závislosti od hloubky materiálu v rozsahu 0,64-0,54mm; pro materiály tenčí jako 1,6 mm zářez může být 0,13mm, takový to úzký zářez se tvoří vyššími rychlostmi
- Rychlost řezání závisí od druhu laseru a jeho výkonu a také od hloubky řezaného materiálu, běžně používaná rychlost posuvu pro ocel hloubky 2 mm je okolo 6m.min<sup>-1</sup>, pro polyakrylát 12 m.min<sup>-1</sup>.

### 3.2 Kritéria hodnocení kvality povrchu po obrábění laserovým paprskem

Podobně jako při řezání nástrojem s určitou geometrií, při hodnocení kvality řezání, a vrtání laserem je potřebné brát do úvahy množství vlivů, které se můžou rozdělit do tří skupin [11]:

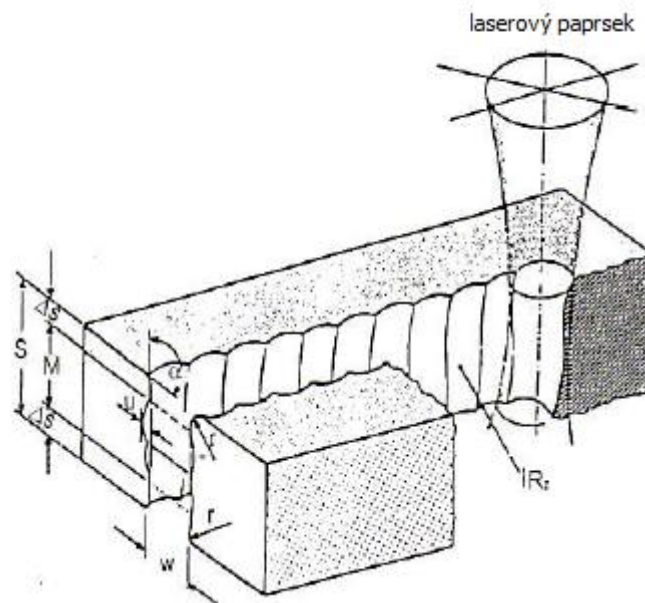
- 1) Parametry procesu při řezání zahrnují:
  - Výkon paprsku
  - Rychlost posuvu paprsku
  - Šířka vytvořeného zářezu
  - Druh paprsku a jeho mód
  - Ohnisková vzdálenost
  - Úhel vychýlení paprsku
  - Přídavný plyn (tlak plynu, druh plynu)

2) Parametry materiálu obrobku:

- Fyzikální-chemické vlastnosti materiálu
- Typem materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit...)
- Termofyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce)
- Geometrií obrobku

3) Při posuzování kvality řezu je potřebné brát do úvahy parametry zóny řezání laserem:

- Šířka řezu
- Nepravidelnost hrany
- Šířka tepelně ovlivněné vrstvy
- Tvoření trhlin
- Zbytkové napětí
- Změny struktury povrchu materiálu
- Kuželovitost řezaného otvoru



Obr. 20 Kritéria pro hodnocení povrchu [11]

Kde: Rz – Výška nerovností; u – nepravidelnost škáry;  $\alpha$  – úhel vychýlení paprsku; r - zaoblení vlivem řezání; w - šířka řezu; S – hloubka materiálu;  $\Delta s$  – náběhová a výběhová oblast při řezání (0,1 – 0,2 mm); M – měřená oblast pro určení Rz, u,  $\alpha$ .

Kvalita řezu je tedy určena ve spojitosti s třemi základními parametry a to s **řeznou rychlostí**, která by měla být co nejvyšší, **šířkou zářezu** s požadavkem, aby byla co nejužší a nakonec **kvalitou povrchu**, po řezání určenou parametry drsnosti ( Rz a Ra). [11]

Při řezání CO<sub>2</sub> laserem přídavný plyn O<sub>2</sub> urychluje oxidační proces při nižších rychlostech posuvu. Avšak se zvyšováním rychlostí proudění přídavného plynu (vyšší tlaky) se drsnost povrchu tvořením výrazného ryhování zhoršuje. Naopak, jak se zvyšuje rychlost posuvu paprsku, ohřev posuvu je plynulejší a dosahuje se hladší povrch. Proto rychlost posuvu paprsku a tlak přídavného plynu jsou významnými určujícími ukazateli drsnosti povrchu. [11]

#### 4 VLASTNOSTI MATERIÁLU PMMA

Polyethylmethakrylát je sklovitě čirý polymer. Vyrábí se polymerací methylmethakrylátu (metyl-esteru kyseliny metakrylové), který je kapalinou zvláštního zápachu. Polymerace probíhá v polymeračních kotlích opatřených vhodnými míchadly a přívody pro suroviny. Polymerace probíhá při teplotě 80 - 130 °C. Po ochlazení se granule promývají a suší. Polyethyltakrylát je křehký materiál. Směšováním nebo roubovací polymerací s polybutadiénem nebo jinými elastomery lze tuto vlastnost potlačit a vyrobit houževnaté materiály. Bohužel tím se ztrácí kvalitní optické vlastnosti a takový PMMA se stává mléčně zakaleným. Je částečně propouštějící UV záření, tvarovatelný při 130 - 140 °C, odolný vůči povětrnostnímu stárnutí, má velkou tepelnou roztažnost. Také se vykazuje vynikající tvarovou pamětí, projevující se vrácením tvarové desky do původního stavu po zahřátí na  $T_m$  (teplotu tání). Do 80 °C se dobře mechanicky obrábí. Další základní vlastnosti PMMA jsou uvedeny v následující tabulce: [20]

Tab. 6 Základní vlastnosti PMMA [20]

vlastnost	hodnota
měrná hmotnost	1180 kg.m <sup>-3</sup>
pevnost v tahu	65-70 Mpa
pevnost v tlaku	120-140 Mpa
tažnost	2,50%
modul pružnosti	1,4.10 <sup>3</sup> MPa
teplota skelného přechodu $T_g$	100 °C
rozsah teploty při použití	-60 až 100 °C

Zpracovává se vstřikováním, vytlačováním, tvarováním při 170 - 220 °C. Obrábění PMMA je zapotřebí volit tak, aby nedocházelo k natavování materiálu, pro řezání lze s výhodou použít například paprsek laseru. [20]

## 5 DRSNOST POVRCHU

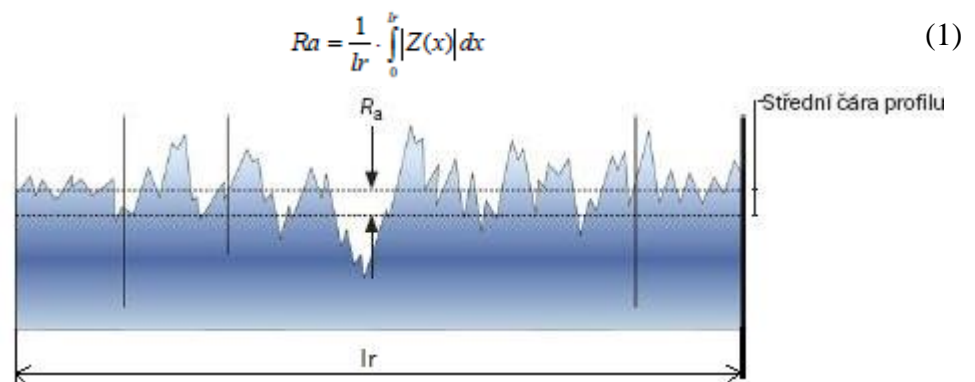
Drsnost povrchu je jakost obráběného povrchu a důležitým činitelem pro dynamicky namáhané součásti. Obrobená plocha není v žádném případě ideálně hladká. Vykazuje vždy určitý stupeň drsnosti, který je určen mikronerovnostmi vzniklými při obrábění. [17]

Drsnost obrobené plochy je způsobená stopami, které na ní zanechá nástroj. Druh a stupeň drsnosti závisí na způsobu obrábění, na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, na jakosti, tvaru a geometrii břitu, na řezných podmínkách, zejména na velikosti posuvu a na řezné rychlosti. Drsnost povrchu obrobené plochy je zpravidla různá v příčném a v podélném směru. Příčný směr je kolmý ke směru řezného pohybu, podélný je s řezným pohybem rovnoběžný. [17]

Při měření jakosti povrchu se vyhodnocení provádí na předepsané délce. Pokud není délka určena na výkrese součásti, tak délku určí osoba provádějící měření jakosti povrchu. [16]

Základní vyhodnocované parametry drsnosti:

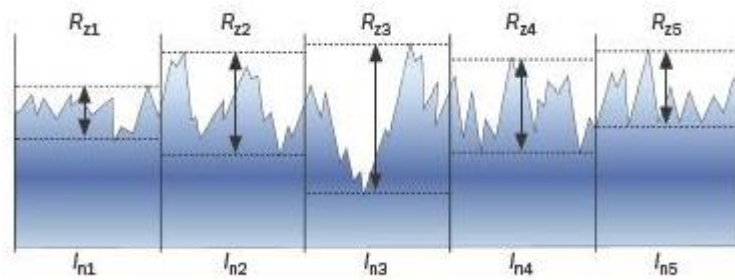
- **$R_a$  průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu** - je střední hodnota všech odchylek od střední čáry profilu na vyhodnocované délce. [16]



Obr. 21  $R_a$  průměrná aritmetická úchylka profilu [16]

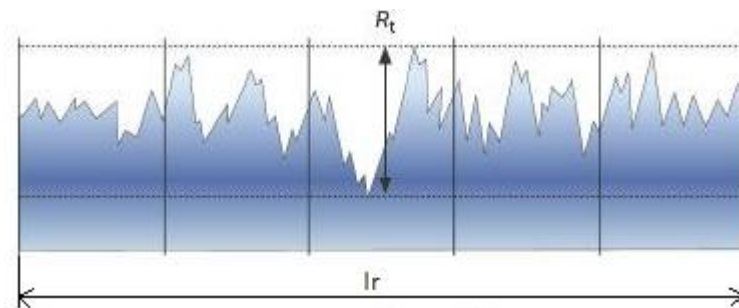
- **$R_z$  Maximální výška profilu (průměrná)** - Největší výška profilu je průměrná hodnota jednotlivých výšek profilu,  $R_z$ , stanovených z největší výšky výstupku a největší hloubky prohlubně profilu na základních délkách, ze kterých se skládá vyhodnocovaná délka. Obvykle se jedná o pět základních délek, ale jejich počet se u moderních měřicích přístrojů může lišit. [16]





Obr. 22  $R_z$  maximální výška profilu [16]

- **$R_t$  Celková výška profil** - Celková výška profilu je součtem výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu na vyhodnocované délce. Hodnota  $R_t$  představuje jeden z nejpřísnějších požadavků profilu. [16]



Obr. 23  $R_t$  celková výška profilu [16]

Odpovídající normy zabývající se hodnocením kvality povrchu:

- **ČSN EN ISO 4287: 1998** - Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu  
Tato mezinárodní norma stanoví termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnoti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. [18]
- **ČSN EN ISO 4288: 1998** - Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu  
Tato mezinárodní norma stanoví pravidla, pro porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu. [19]

## 6 SOUHRN TEORETICKÉ PRÁCE

Cílem literární studie této práce bylo seznámení se s vlastnostmi a principem laseru, především jeho fyzikální vlastnosti a konstrukce laseru. Základní rozdělení druhů laseru (např. plynové, pevnolátkové, kapalinové...) a jejich přednosti a charakteristiky. Část teoretické práce pojednává o kritériích hodnocení kvality povrchu po obrábění laserovým paprskem. Dále seznámení se z materiálem PMMA a závěrem základní vyhodnocované parametry drsností a jejich normy.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 STANOVENÍ CÍLŮ PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavní cíle této experimentální diplomové práce je:

- Vypálení zkušebních vzorků z PMMA na CO<sub>2</sub> Laseru ILS 3NM
- Vypálení vzorku bude probíhat pro tři různé čočky (1,5“; 2,5“; 4“)
- Následné měření drsnosti a hloubky vypáleného povrchu vzorků
- Hodnocení vlivu optiky, zpracování naměřených hodnot

## 8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ LASER ILS 3NM

Vzorky pro měření drsnosti byly vyrobeny z materiálu PMMA pomocí zařízení ISL 3NM. Při jejich vyhotovení byly použity čočky tloušťky (1,5“; 2,5“; 4“). Na každém z těchto vzorků jsou vypáleny obdélníky s přiřazeným výkonem a rychlostí laseru.

Technické parametry:

*Tab. 7 Technické parametry [15]*

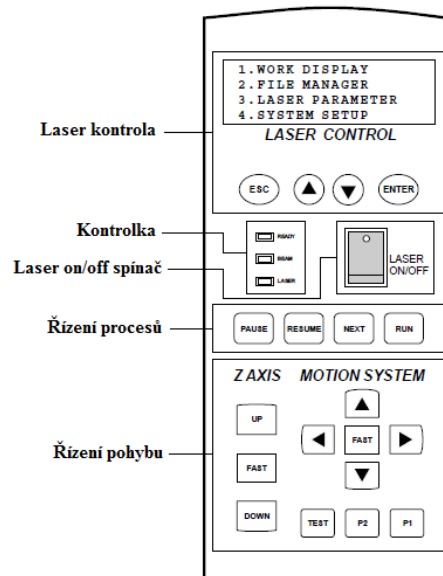
Model	ILS NM3
Zdroj laseru	CO <sub>2</sub> laser, chlazený vzduchem
Výkon	100W
Rychlost	1524 mm/sec.
Rozlišení	Max 1000 DPI
Pracovní plocha	660 mm x 495 mm
Osa Z	210 mm
Zobrazovací panel	LCD displej zobrazující název aktuálního souboru, výkon laseru, nastavení a diagnostické menu.
Software	kompatibilní s většinou softwaru Windows
Operační módy	Rastrové gravírování, vektorové řezání
Paměť	64MB (až 99 souborů)



*Obr. 24 Laser ILS 3NM*

## 8.1 Obsluha laseru

K obsluze laseru ILS 3NM slouží ovládací panel. Ovládací panel laseru se nachází na pravé straně dole. Zahrnuje LCD display, spínač On a Off laseru, tlačítka k řízení procesu a pohybu laseru.



Obr. 25 Ovládací panel [15]

### Laserové zobrazení ovládání

LCD zobrazení na horní straně ovládacího panelu poskytuje přístup k práci, informace o souboru a parametry laseru. Zobrazí se následující možnosti:



Obr. 26 Zobrazení ovládání

## 9 VÝROBA VZORKU NA ZAŘÍZENÍ ILS 3NM

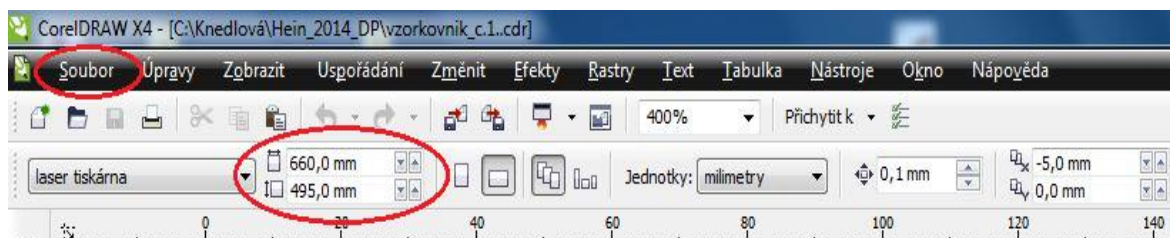
K výrobě vzorku byl použit materiál PMMA. Tento materiál je definován výrobcem zařízení ILS 3NM jako vhodný pro gravírování. Byly vyzkoušeny i jiné druhy materiálů, ale ukázalo se, že nejsou vhodné pro naše experimenty. Například u dřeva a PC docházelo k zahoření povrchu a nebylo by možné změřit jejich vlastnosti obrobene plochy.

### 9.1 Vytvoření souboru

K vytvoření vzorku byl použit program Corel DRAW, ve kterém lze pracovat s vektorovými obrázky, tak i vytvářet samotnou grafiku.

Postup pro vytvoření souboru vzorku:

- Vytvoření nového souboru provedeme kliknutím na panel **Soubor** → **Nový** a zadáme rozměry pracovní plochy (660mm x 495mm). Následně se otevře nový soubor, do kterého můžeme kreslit.



Obr. 27 nový soubor

- nadefinování počátku - souřadnice počátku pracovní plochy je výhodné si volit v bodu [0;0], pro lepší přehlednost a přesnost vytváření souboru. Bod vytvoříme přetažením ikony na pracovní plochu.
- narýsování vzorkovníku - byl narýsován vzorkovník (obr. 30), který se skládá z šesti obdélníků a přiřazených čísel. Z panelu nástrojů vybereme Obdélník a tažením myši nakreslíme požadované tvary obdélníků. Následně v panelu vybereme Text a přiřadíme k danému obdélníku požadované hodnoty.

## 9.2 Řezné podmínky

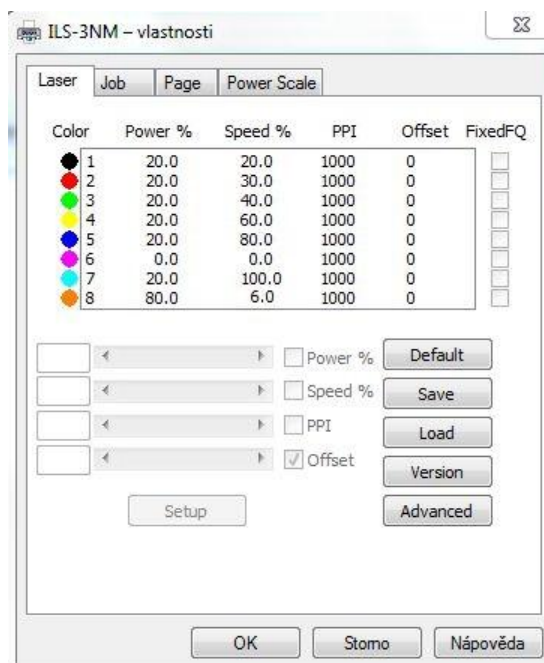
Před samotným odesláním souboru do laserového zařízení k vypálení je nutné nastavit řezné podmínky. Kliknutím na panelu nabídka **Soubor** → **Tisk** → **Vlastnosti** se nám otevře okno (Obr. 28), kde je v nabídce osm barev k nadefinování řezných podmínek.

Laser ISL 3NM má možnost pracovat v hladinách:

- Černá
- Červená
- Zelená
- Žlutá
- Modrá
- Purpurová
- Azurová
- Oranžová

V grafickém programu lze použít pouze tyto barvy, protože ostatní druhy barev není laser schopen přečíst. Tisk probíhá v předdefinovaném pořadí barev.

K těmto barvám byly přiřazeny následující řezné podmínky:



Obr. 28 Řezné podmínky



### 9.3 Barevné rozlišení vzorkovníku

Po tomto nastavení řezných podmínek je nutné přizpůsobit dané barvy narýsovanému souboru vzorkovníku. Obdélníky a přiřazený text se bude gravírovat, je třeba vyplnit objekt jednotnou barvou. Klikneme v nabídce na **Výplň** → **Jednotná výplň**. Křivka při gravírování musí být uzavřená.

K procesu řezání slouží ikona **Vlasového obrysu**, tímto příkazem bude laser pálit obrys nakresleného objektu. Vybereme objekt, který se bude řezat. Po té klikneme na ikonu **Obrysové pero** → **Vlasový obrys** a přiřadíme danou barvu (v našem případě oranžovou), ke které máme přiřazené řezné podmínky, (viz. Obr. 30).

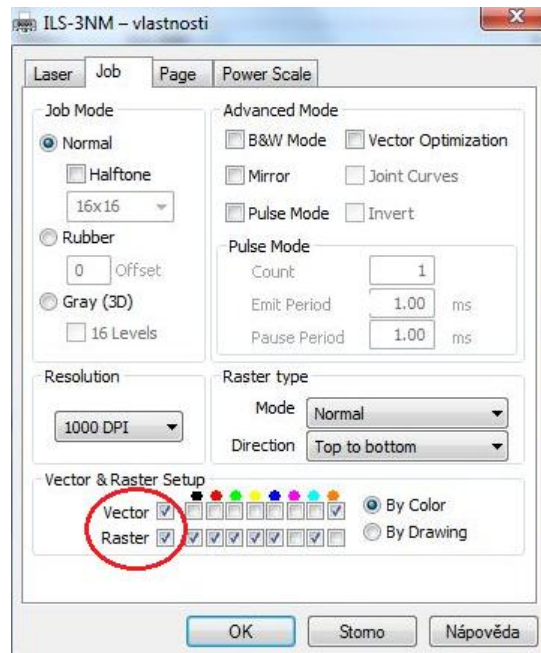
### 9.4 Nastavení režimů

Laserový tisk se provádí ve dvou režimech:

- 1) Rastrový – používá se pro gravírování, chceme-li vytvořit plochu obdélníku, laser přejíždí v ose x po pracovní ploše. Sepíná pouze pokud je přítomná grafická oblast.
- 2) Vektorový – ve vektorovém režimu laser pálí konkrétní nadefinovaný objekt v grafickém programu. Laser pálí pouze trajektorii obrysu.

Při tisku laseru je rastrová grafika vytvořena jako první a pak teprve vektorová.

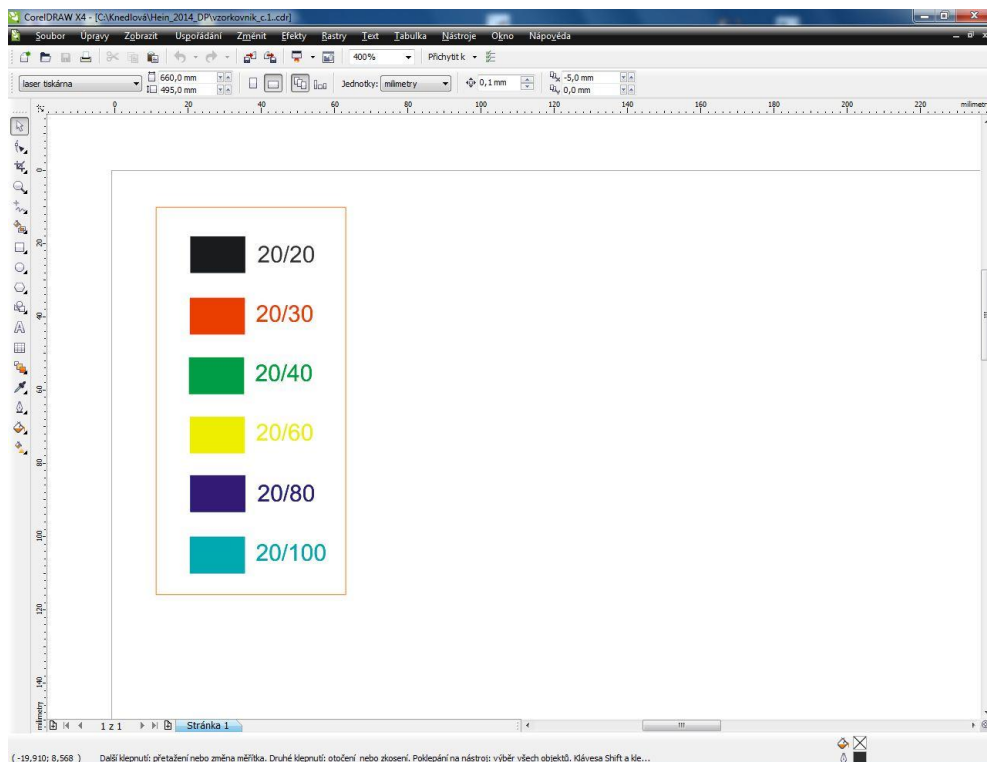
Kliknutím na panelu nabídka **Soubor** → **Tisk** → **Vlastnosti** se nám otevře okno, kde v záložce **Job** (Obr. 29) nadefinujeme k přiřazeným barvám požadovaný úkon, který potřebujeme provést.



Obr. 29 Nastavení vektoru rastru

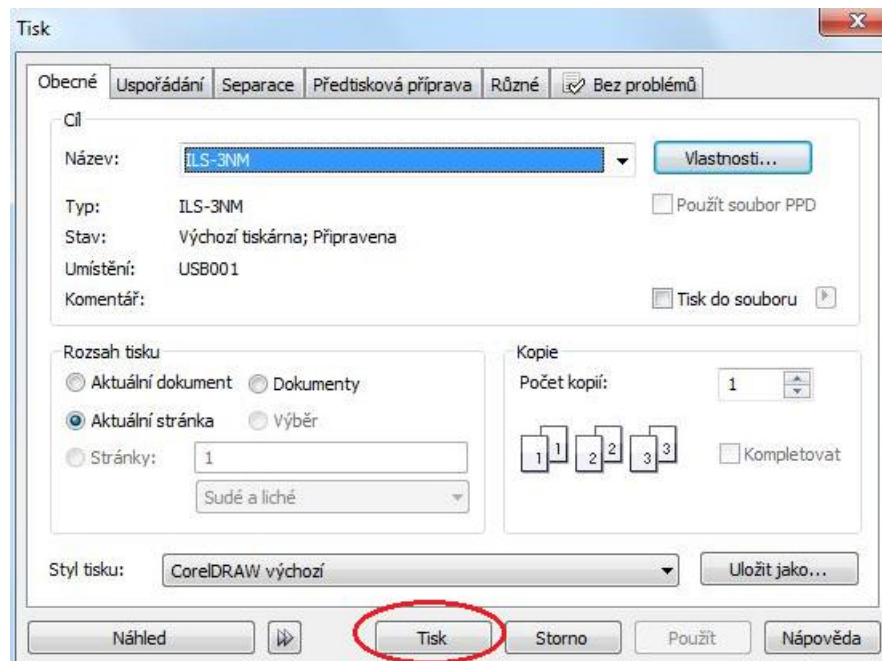
## 9.5 Tisk experimentálních vzorků

Po nadefinování všech pracovních podmínek je soubor (v programu Corel DRAW) vzorovníku připraven k tisku (Obr. 30).



Obr. 30 Soubor připravený k tisku

Odeslání souboru do paměti zařízení laseru ISL 3NM je konečnou fází přípravy vzorků. Připravený soubor byl odeslán do laseru kliknutím na panelu **Soubor** → **Tisk** otevře se nám okno, kde můžeme daný soubor poslat do paměti laseru. Jakmile se soubor načte do paměti laseru (ohlásí se zvukovým signálem).

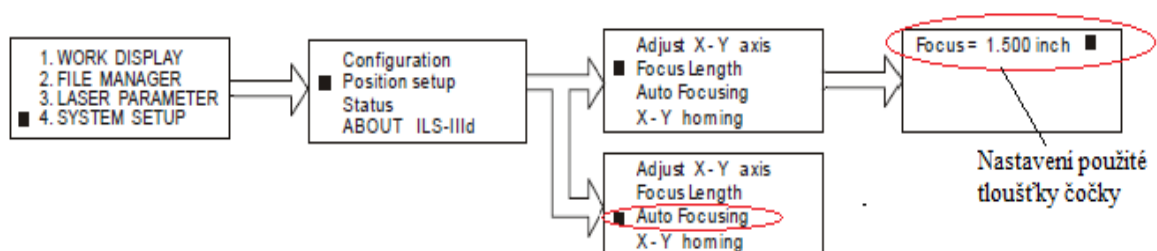


Obr. 31 Odeslání souboru do ILS 3NM

## 9.6 Příprava laseru (fokusace)

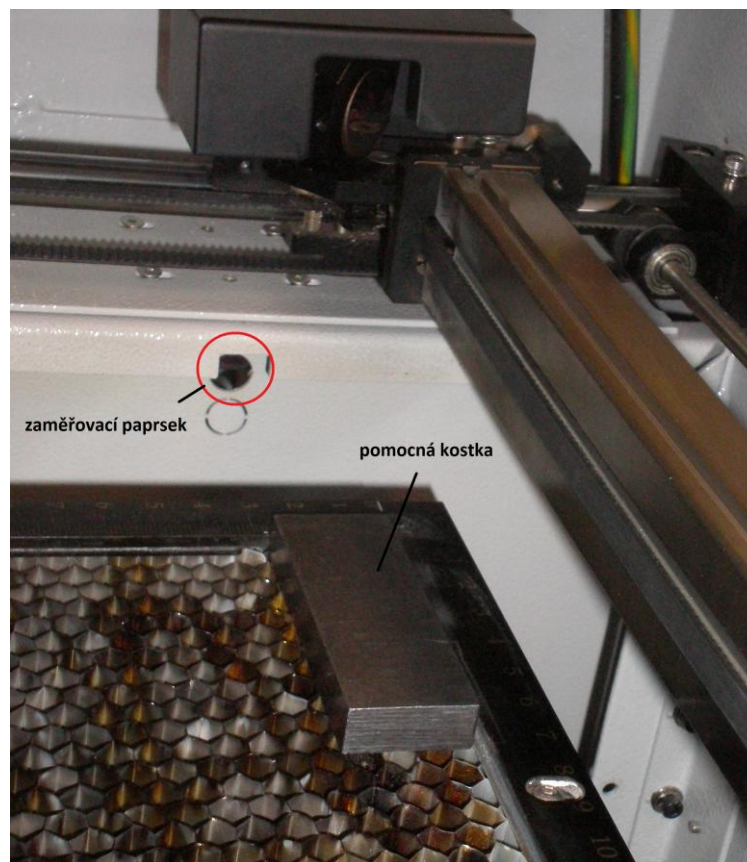
Celkem byly vypáleny 3 vzorky a každý z nich různou tloušťkou čočky. Byly použity čočky o rozměrech 1,5“, 2,5“ a 4“. S použitím jiné tloušťky čočky se liší vzdálenost pracovního stolu od řezací hlavy laseru a tím i zaostření laseru. To znamená, že při každé změně čočky je nutné provést fokusaci laseru.

Fokusace se provede nastavením na ovládacím panelu laseru kde:



Obr. 32 Nastavení fokusace

Výměna čočky probíhá v řezací hlavě laseru. Pokud máme vloženou čočku například 1,5“ musíme jí také nastavit správně na LCD displeji (obr. 32). Do levého horního rohu pracovního stolu byla vložena pomocná kostka, která sloužila pro auto fokusaci jako bod pro zaměření paprsku. Materiál PMMA je průhledný a tloušťka polotovaru pro vyhotovení vzorku nepřesahovala přes okraj pracovního stolu. Zaměřování paprsku pomocí autofokuse by nebylo možné použít (Obr 33).



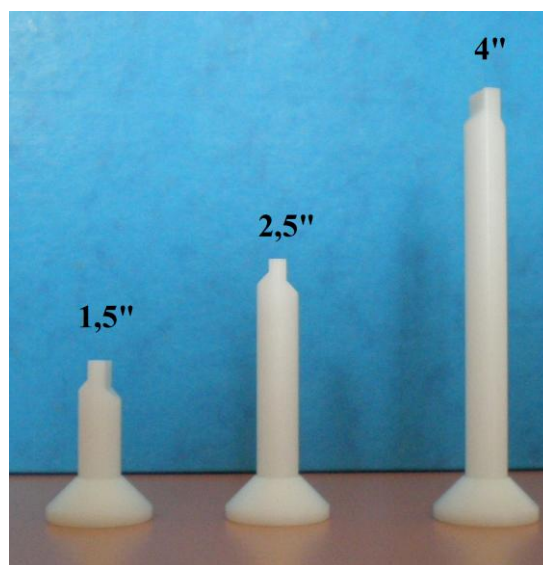
*Obr. 33 Pomocná kostka*

Po provedení **Auto fokusace** (Obr 32), je pracovní stůl nastaven pro danou čočku na materiál o tloušťce 10 mm. Díky přiložené pomocné kostce, která má rozměr tloušťky 10 mm. Proto bylo nutné ještě upravit pracovní stůl na tloušťku našeho materiálu, která je 3 mm. Úprava stolu proběhla vysunutím v ose Z nahoru o 7 mm na LCD displeji laseru (Obr. 34). Výšku stolu ve směru osy Z se nastavila pomocí tlačítka UP na ovládacím panelu.



*Obr. 34 Vysunutí stolu v ose Z*

Nastavení vzdálenosti pracovního stolu od řezací hlavy bylo ověřeno pomocí fokusačních tělísek (Obr. 35). Jakmile umístíme materiál na pracovní stůl, můžeme přiložit fokusační tělísko na materiál a nižší ryska se musí dotýkat s hranou hlavy laseru (Obr. 36).



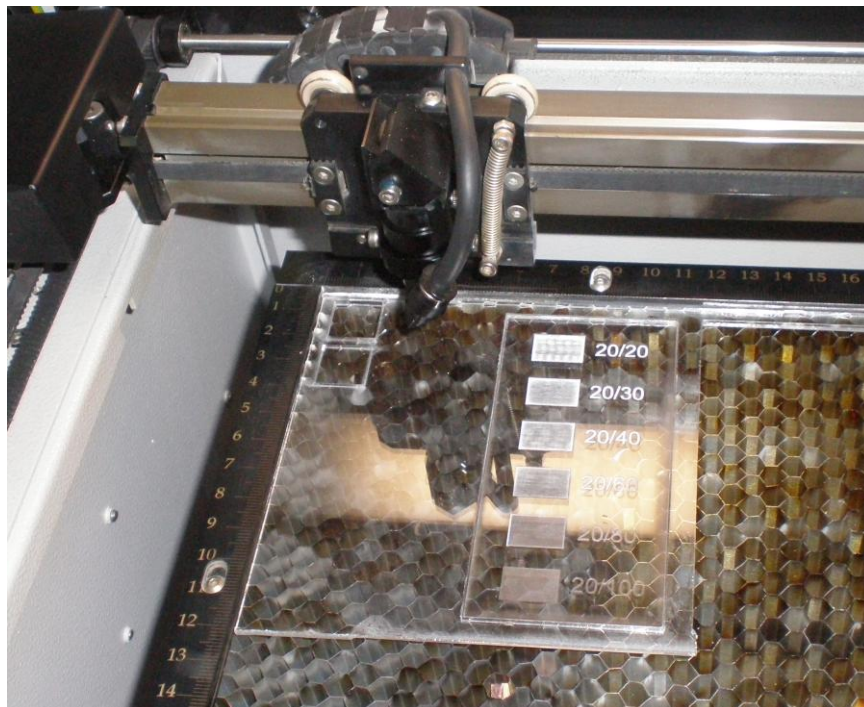
*Obr. 35 Fokusační tělíska*



*Obr. 36 Přiložené fokusační tělísko*

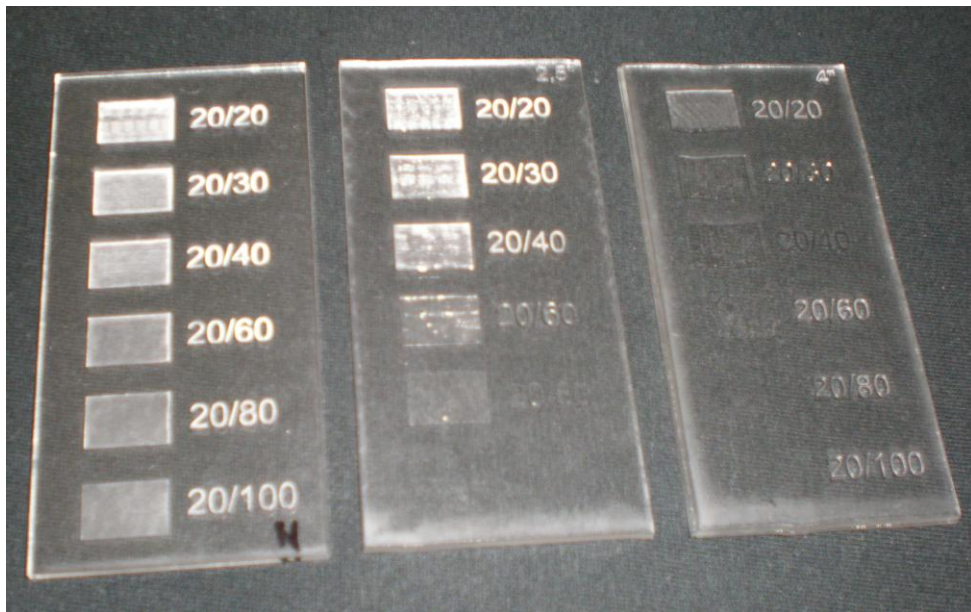
## 9.7 Experimentální vzorky

Po správném nastavení fokusace můžeme zahájit tisk (Obr 37). Zkušební vzorky pro experiment byly vyrobeny z PMMA (Obr. 38). Pro vyhodnocení změny vlivu optiky na vlastnosti a kvalitu obrobene plochy bylo vypáleno šest polí 15 mm x 10 mm, kdy každé z těchto polí je obrobena za jiných řezných podmínek.



*Obr. 37 Práce na laseru*

Ke každému z polí jsou přiřazeny jiné hodnoty, které určují například při hodnotě 20/60, kde první číslo určuje 20% výkonu  $P$  [W] a druhé 60% rychlosti posuvu  $f$  [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ] laseru. U obou veličin jsou jednotky uváděny v procentech, protože hodnoty na laseru ILS 3NM jsou zadávány v procentech.



Obr. 38 Vzorky

Pro případný převod posuvu rychlostí je uvedena Tab. 8. Výkon byl u každého s polí konstantní 20% tedy 20W.

Tab. 8 Převodní tabulka jednotek posuvu  $f$

Posuv $f$	
[%]	[ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
20	304,8
30	457,2
40	609,6
60	914,4
80	1219,2
100	1524

## 10 MĚŘENÍ

Při obrábění materiálu PMMA laserem vznikají na obráběné ploše drážky ve směru pohybu paprsku a při změně řezných podmínek se mění drsnost i hloubka obrobené plochy. V této diplomové práci byla měřena příčná drsnost a hloubka vygravírovaných polí materiálu. Pomocí drsnoměru **Talysurf CLI 500** byly naměřeny drsnosti. **Úchylkoměrem ID H0530** byly změřeny hloubky. Naměřené hodnoty byly zpracovány a vyhodnoceny v programu Excel.

### 10.1 Použitá měřící zařízení

Na přístroji **TAYLOR HOBSON Talysurf CLI 500** bylo provedeno bezkontaktní měření drsnosti povrchů. Je určen pro měření malých součástí (měřicí prostor 50x50x50 mm, délka posuvu 50 mm) charakterizované ekonomickou a prostorovou efektivností. Základem přístrojového vybavení je firemní program **Talymap**. Program pro analýzu dat, zahrnuje vyhodnocení struktury povrchu 2D a 3D.



*Obr. 39 Talysurf CLI 500 s příslušenstvím*

K měření hloubky vygravírovaných drážek byl použit **Úchylkoměr ID – H0530** od firmy MITUTOYO:

- Vysoká přesnost



- Zvedací mechanismus nad 30 mm drátovou spouští (volitelná)
- Analogové zobrazení
- Možnost externího předání dat



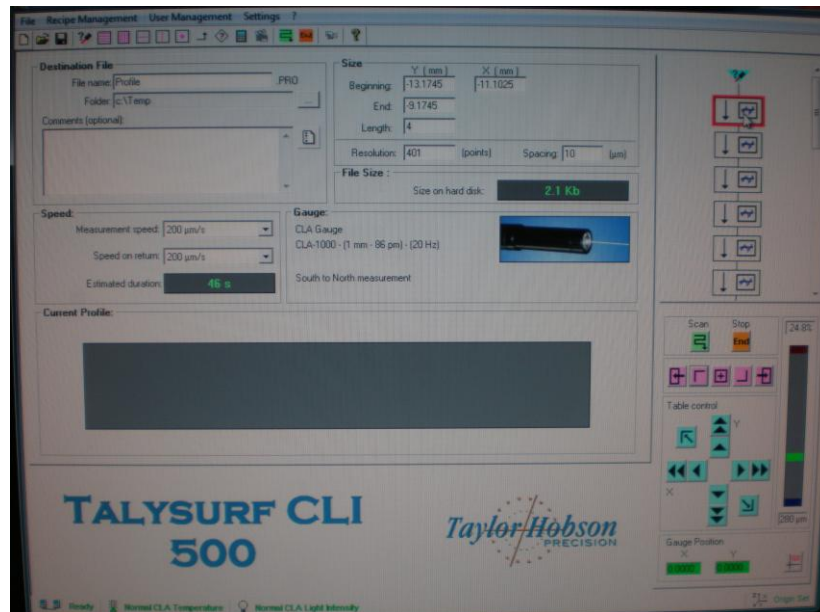
Obr. 40 Úchylkoměr ID – HO530

### 10.1.1 Postup měření drsnosti povrchu



Obr. 41 Měření drsnosti

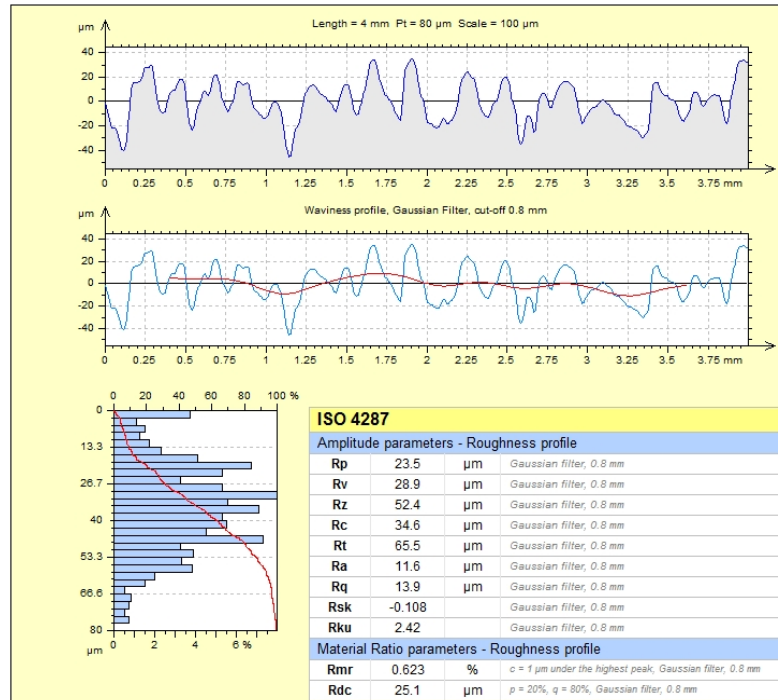
Vzorek byl připraven na stavitelnou plochu přístroje (Obr. 41) a byl vytvořen program v softwaru Talymap (Obr. 42). Vzorkovací frekvence byla 20 Hz, následně rychlost měření byla  $200 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a vyhodnocovaná délka 4 mm a zbývající nastavení pro postup hodnocení dle normy ČSN EN ISO 4287. Celkem toto měření na jedné plošce provedeme 15krát v rozmezí 0,5 mm.



Obr. 42 Zadávání parametrů do softwaru Talymap

Před spuštěním měření je nutné nastavit odrazivost. Odrazivost na měřeném vzorku by měla být nejlépe 40% a více.

Na obrázku (Obr. 43) je ukázka změřených výsledků drsností povrchu. Přístroj vyhodnotil křivku profilu povrchu a hodnoty drsností. Hodnocení parametrů bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 4288. Všechna naměřená data pro jednotlivé drsnosti jsou uvedena v příloze.



Obr. 43 Vyhodnocené výsledky měření

### 10.1.2 Postup měření hloubky vzorkovníku

Vzorek byl postaven na měřicí plochu přístroje, kde nastavíme nulový bod na neobrobené ploše. Měření bylo provedeno na každém vygravírovaném poli celkem 15krát. Průběžné hodnoty naměřených výsledků byly zpracovány pomocí PC do programu MINITAB.



Obr. 44 Měření hloubky

## 10.2 Výsledky měření drsností

Veličiny charakterizující kvalitu povrchu obrobené plochy jsem zvolil jako nejvhodnější a nejpoužívanější parametry  $R_z$ ,  $R_t$  a  $R_a$ . Při měření drsností, byla každá hodnota z důvodů snahy o minimalizaci možné chyby naměřena 15krát. Následně byly tyto parametry statisticky vyhodnoceny v programu Excel, z těchto parametrů byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka, aby byla zjištěna přesnost měření.

Vztah pro aritmetický průměr:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Vztah pro směrodatnou odchylku:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Kde:

$s$  – směrodatná odchylka

$s^2$  – rozptyl výběru

$n$  – počet naměřených veličin

$x$  – aritmetický průměr

$x_i$  –  $i$ -tá hodnota měřené veličiny

Všechny vzorky byly vypáleny za konstantního výkonu 20%. Měnila se rychlost posuvu a čočka laseru.

### 1. Vzorek 1,5“

V následujících tabulkách (Tab. 9, 10 a 11) jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností, které byly vygravírovány čočkou 1,5“. Následně z těchto hodnot byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka.

Při posuvu 20% nejsou uvedeny žádné hodnoty, protože na vygravírovaném povrchu vznikaly trhlinky po pálení laserem a nedalo se přesně tyto hodnoty drsnosti změřit na drsnoměru. Hodnoty  $R_z$ ,  $R_a$ ,  $R_t$  ukazovaly velké rozptyly, proto měření při posuvu 20% nebylo zahrnuto do vyhodnocení.

Tab. 9 Rz v závislosti na posuvu, čočka 1,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]
1		52,4	63,7	22,4	25,7	19,2
2		57,3	63,1	30,0	22,5	21,2
3		81,0	65,5	32,4	22,9	21,2
4		80,5	57,1	27,8	22,6	19,4
5		82,3	58,7	26,3	24,9	19,8
6		76,9	38,3	30,5	24,7	19,9
7		68,3	40,6	31,0	25,2	18,7
8		62,8	43,7	30,8	26,2	20,5
9		54,1	60,8	27,8	23,6	22,8
10		76,9	62,9	28,9	22,9	21,5
11		63,0	62,0	27,1	25,5	25,9
12		54,2	64,7	25,5	22,0	20,5
13		71,3	70,9	29,6	23,6	19,4
14		78,9	57,4	28,5	24,7	17,5
15		67,4	45,5	28,2	25,4	17,9
průměr	-	68,49	56,99	28,45	24,16	20,36
sm. odchylka	-	10,35	9,70	2,43	1,31	2,00

Tab. 10 Rt v závislosti na posuvu, čočka 1,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]
1		65,5	76,8	25,9	28,9	22,3
2		65,5	78,1	32,2	28,6	26,5
3		108,0	73,4	36,7	28,6	28,6
4		111,0	90,5	34,6	27,3	24,7
5		94,2	75,5	33,8	32,6	25,2
6		106,0	40,3	38,5	29,5	22,8
7		94,2	50,0	45,4	32,0	23,1
8		82,7	54,5	38,4	32,0	28,3
9		103,0	71,0	32,5	30,1	31,0
10		99,2	71,2	34,5	28,5	29,8
11		91,4	72,9	33,0	33,0	30,5
12		68,5	83,1	30,8	28,1	23,4
13		64,4	85,1	32,3	27,8	23,0
14		104,0	73,9	35,3	29,4	23,7
15		62,6	59,3	35,0	28,9	23,4
průměr	-	88,01	70,37	34,59	29,69	25,75
sm. odchylka	-	17,46	13,25	4,16	1,77	2,98

Tab. 11 Ra v závislosti na posuvu, čočka 1,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]
1		11,6	13,3	5,85	4,63	3,72
2		12,5	12,9	4,93	4,55	3,94
3		14,1	14,3	6,18	4,43	3,59
4		15,5	12	5,48	4,24	3,81
5		18,1	10,8	5,83	5,35	3,91
6		16,5	7,8	6,77	4,53	4,03
7		13,0	7,1	6,21	4,88	3,23
8		11,5	8,5	6,21	4,92	4,4
9		15,1	9,8	5,39	4,39	4,21
10		15,1	11,3	5,74	4,79	4,24
11		12,5	11	5,1	4,15	4,58
12		11,5	11,8	5,56	4,20	4,4
13		15,1	12,4	6,08	4,43	3,58
14		14,7	11,1	5,66	4,78	4,15
15		14,6	7,2	5,87	4,57	3,42
průměr	-	14,60	11,10	5,83	4,55	3,94
sm. odchylka	-	1,89	2,16	0,45	0,31	0,38

## 2. Vzorek 2,5“

V následujících tabulkách (Tab. 12, 13 a 14) jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností, které byly vygravírovány čočkou 2,5“. Následně z těchto hodnot byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka.

Tab. 12 Rz v závislosti na posuvu, čočka 2,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rz[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]	Rz[ $\mu$ m]
1	49,7	42,8	23,3	23	8,05	4,64
2	64,2	53,5	23	26	12,1	4,89
3	42,1	29,6	34,6	20,6	11,4	3,45
4	38,3	55,9	23,8	20,4	12,4	3,72
5	49,1	67,5	29	19,4	13,7	4,04
6	75	73,4	25,1	24,9	16,4	3,76
7	78,7	63,4	24,3	20,5	15,1	3,23
8	62	63,2	23,2	18,5	15,2	2,93
9	40,5	36,9	22,7	22,6	13,1	3,75
10	72,9	37,2	21,5	21,4	10,9	4,72
11	55,6	70,7	23,5	29,5	12,4	3,57
12	44,3	74	21,7	15,9	9,29	3,19
13	69,4	66,4	23,4	19,4	10,2	4,01
14	57,4	68,4	23,5	19,1	8,79	2,82
15	52,7	71,5	24,5	22,1	9,21	3,24
průměr	56,79	58,29	24,47	21,55	11,88	3,73
sm. odchylka	12,70	14,38	3,18	3,24	2,44	0,62

Tab. 13 Rt v závislosti na posuvu, čočka 2,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rt[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]	Rt[ $\mu$ m]
1	80,1	51,7	27,7	26,8	10,8	6,23
2	77,5	60,6	26	34,3	17,3	6,99
3	54,3	41,4	42,6	27,9	15	5,35
4	49,8	73,8	29,8	31,7	17,3	5,79
5	70,9	87,1	40,3	37,3	15,6	5,26
6	90,9	85,2	38,7	37,6	20,5	5,1
7	106	80,2	42,3	38,4	20,6	4,17
8	79,9	68,1	28,2	28,6	17,6	4,08
9	68,4	47,2	29,9	29,6	18,2	4,93
10	87,7	40,8	30,1	28,6	16,6	7
11	68,3	77,8	30,2	29	21,5	5,23
12	50,1	86,1	28,2	27,8	11,5	5,35
13	105	81,7	27,5	27,6	18,3	5,47
14	70,6	76	30,9	30,5	13,3	3,34
15	82,6	81,3	34	28,4	10,9	4,21
průměr	76,14	69,27	32,43	30,94	16,33	5,23
sm. odchylka	16,69	16,07	5,50	3,85	3,35	0,99

Tab. 14 Ra v závislosti na posuvu, čočka 2,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]	Ra[ $\mu\text{m}$ ]
1	10,3	9,71	5,01	4,51	1,53	0,796
2	13,5	10,2	4,48	4,42	2,34	0,85
3	9,32	6,38	5,66	3,94	2,2	0,602
4	8,65	12,7	5,31	4,13	2,24	0,585
5	9,72	16,1	5,23	4,41	2,76	0,725
6	17	17,2	6,04	4,11	3,26	0,756
7	16,6	14,3	4,84	4,14	2,72	0,547
8	12,4	14,3	4,92	3,6	2,4	0,538
9	9,98	8,47	5,26	4,99	1,81	0,733
10	14,7	7,99	5,3	5	2,09	0,769
11	10,4	16,1	5,08	3,75	2,31	0,554
12	9,46	18,9	3,86	3,65	1,95	0,52
13	13,5	16,3	4,1	3,69	1,78	0,707
14	11,4	15,7	4,95	3,84	1,82	0,573
15	10,6	15,9	4,86	4,43	1,86	0,578
průměr	10,60	14,30	5,01	4,13	2,20	0,60
sm. odchylka	2,58	3,72	0,53	0,43	0,44	0,11

### 3. Vzorek 4“

V následujících tabulkách (Tab. 15, 16 a 17) jsou uvedeny naměřené hodnoty drsností, které byly vygravírovány čočkou 4“. Následně z těchto hodnot byl vypočítán průměr a směrodatná odchylka.

Při rychlostech posuvu 80% a 100%

Gravírování čočkou 4“ byla řezací hlava nejvýše od pracovního stolu a při rychlostech posuvu 80% a 100% už laserové zařízení nedělalo žádné viditelné stopy po gravírování. Naměřené hodnoty drsností už jsou příliš nízké a budou se rovnat drsnostem materiálu vzorku.



Tab. 15 Rz v závislosti na posuvu, čočka 4“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]	Rz[ $\mu\text{m}$ ]
1	26,7	11,4	7,1	3,93	0,822	0,785
2	20,6	13,1	6,49	7,03	1,32	0,659
3	13,1	13,7	4,67	4,81	0,717	0,519
4	27,5	13,3	9,96	7,04	1,33	0,853
5	19,5	10,8	7,84	5,38	0,926	0,402
6	19,5	7,65	7,84	3,5	1,29	0,205
7	24,6	10,4	7,65	5,62	0,874	0,359
8	20,7	7,81	5,68	4,57	0,895	0,675
9	14,5	10,8	8,85	6,91	0,837	0,41
10	15,7	11,7	7,07	5,32	1,33	0,655
11	21,8	10,6	4,84	9,67	0,968	0,809
12	24,5	9,66	7,15	8,15	0,746	0,4
13	25	9,13	7,84	8,02	1,29	0,41
14	19	12,8	6,77	3,05	0,825	0,412
15	20	12,5	6,73	5,12	0,928	0,587
průměr	20,85	11,02	7,10	5,87	1,01	0,54
sm. odchylka	4,15	1,83	1,34	1,81	0,23	0,18

Tab. 16 Rt v závislosti na posuvu, čočka 4“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]	Rt[ $\mu\text{m}$ ]
1	28,8	17,8	8,6	5,33	1,58	1,94
2	26,1	17,2	8,5	11,8	1,78	0,999
3	34,3	20,3	6,5	10	1,13	0,79
4	41,1	18,4	12,2	13,8	1,95	1,68
5	22,8	16,6	10,8	6,6	1,48	0,605
6	24,4	10,7	10,8	10,3	2,09	0,814
7	30,6	13,1	10,1	7,55	1,26	0,664
8	27,6	13,2	8,9	9,24	1,2	1,58
9	18,5	13,5	11	9,43	1,15	0,558
10	19,9	16,4	9,07	7,5	1,75	0,741
11	25,6	13	8,29	10,9	1,6	1,41
12	30,6	13,4	9,76	10,5	1,07	0,77
13	35,4	11,4	9,81	10,2	1,58	0,58
14	30,8	19,5	9,2	5,57	1,35	0,598
15	27,1	19,7	7,81	7,26	1,41	0,768
průměr	28,24	15,61	9,42	9,07	1,49	0,97
sm. odchylka	5,74	3,06	1,39	2,30	0,30	0,44

Tab. 17 Ra v závislosti na posuvu, čočka 4“

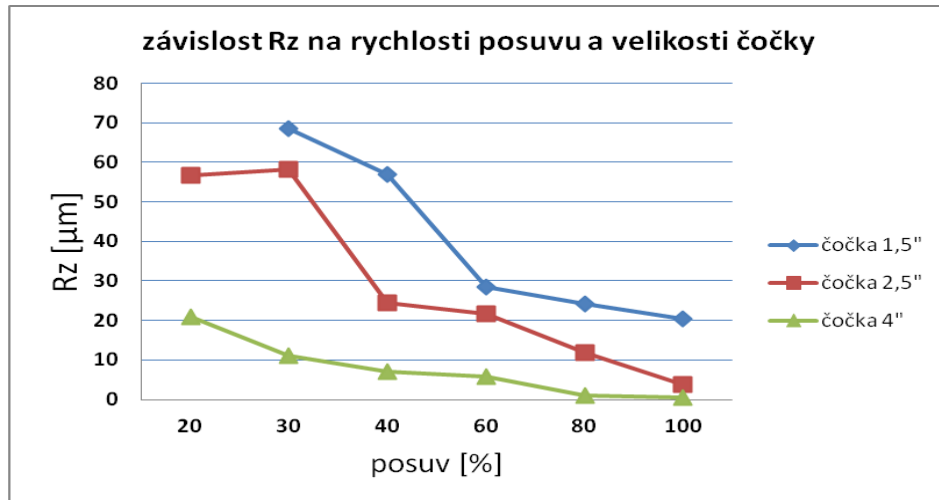
	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č.měření	Ra[ $\mu$ m]	Ra[ $\mu$ m]	Ra[ $\mu$ m]	Ra[ $\mu$ m]	Ra[ $\mu$ m]	Ra[ $\mu$ m]
1	5,6	2,4	1,73	0,736	0,134	0,0685
2	4,96	2,97	1,37	1,13	0,168	0,0789
3	2,82	3,23	1,07	0,854	0,134	0,0714
4	4,88	3,2	2,02	0,912	0,195	0,0709
5	4,69	2,55	1,71	1,07	0,184	0,0564
6	4,56	1,63	1,61	0,851	0,234	0,04
7	5,35	1,96	1,72	0,891	0,146	0,0499
8	4,42	1,75	1,52	0,96	0,165	0,0667
9	3,56	2,73	1,76	1,62	0,12	0,0535
10	3,59	2,88	1,49	1,11	0,122	0,077
11	5,06	2,33	1,27	1,5	0,124	0,0719
12	5,6	2,18	1,58	1,23	0,123	0,0566
13	5,09	2,06	1,73	1,2	0,134	0,0438
14	5,23	2,83	1,75	0,488	0,133	0,0624
15	4,8	2,6	1,55	0,889	0,141	0,0606
průměr	4,68	2,49	1,59	1,03	0,15	0,06
sm. odchylka	0,77	0,48	0,22	0,28	0,03	0,01

Dále byly vyhotoveny tabulky pro jednotlivé čočky, ve kterých jsou aritmetické průměry naměřených hodnot drsností Rz, Rt, Ra (Tab. 18, 19, 20), při různých rychlostech posuvu. A následně z nich sestrojeny grafy.

Tab. 18 Rz v závislosti na posuvu a velikosti čočky

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
	Rz [ $\mu$ m]					
čočka 1,5"		68,49	56,99	28,45	24,16	20,36
čočka 2,5"	56,79	58,29	24,47	21,55	11,88	3,73
čočka 4"	20,85	11,02	7,1	5,87	1,01	0,54

Z předchozí tabulky (Tab. 18) byl sestrojen graf, závislost Rz na rychlost posuvu pro jednotlivé čočky.

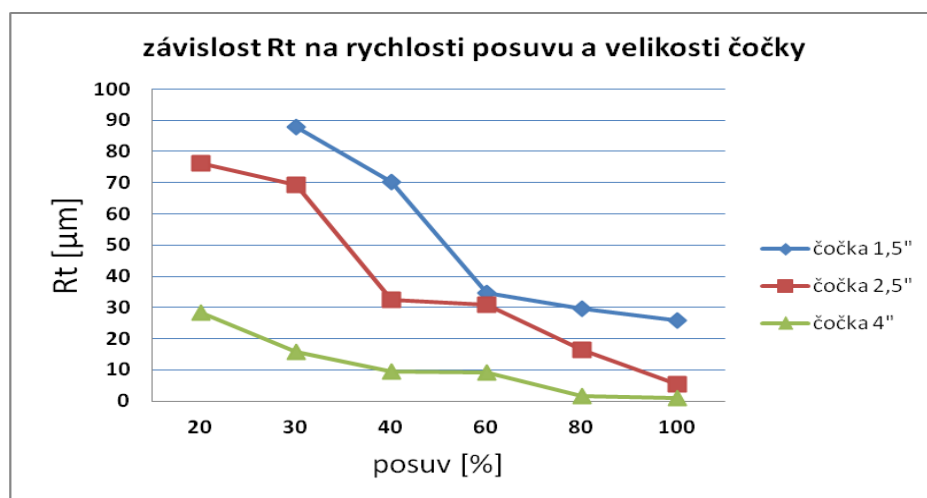


Obr. 45 Graf v závislosti Rz na rychlosti posuvu a velikosti čočky

Tab. 19 Rt v závislosti na posuvu a velikosti čočky

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
	Rt [μm]					
čočka 1,5"		88,01	70,37	34,59	29,69	25,75
čočka 2,5"	76,14	69,27	32,43	30,94	16,33	5,23
čočka 4"	28,24	15,61	9,42	9,07	1,49	0,97

Z předchozí tabulky (Tab. 19) byl sestrojen graf, závislost Rt na rychlost posuvu pro jednotlivé čočky.

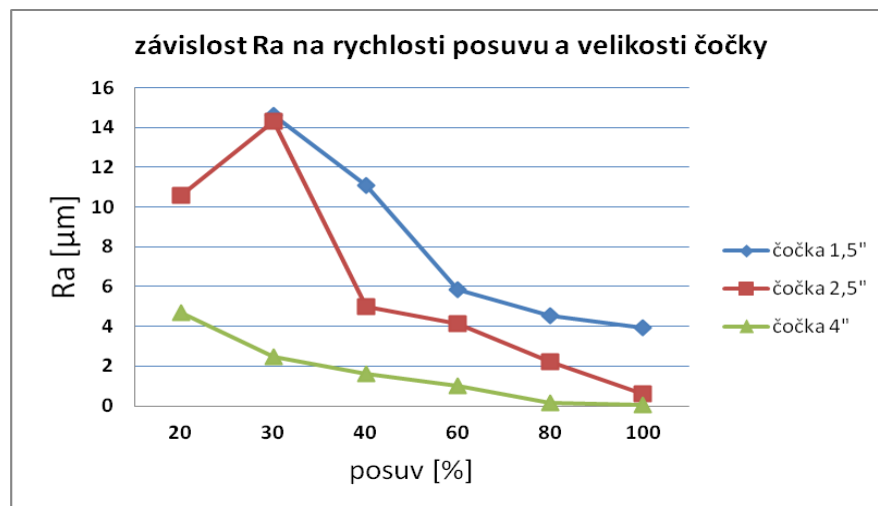


Obr. 46 Graf v závislosti Rt na rychlosti posuvu a velikosti čočky

Tab. 20 Ra v závislosti na posuvu a velikosti čočky

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]					
čočka 1,5"		14,60	11,10	5,83	4,55	3,94
čočka 2,5"	10,60	14,30	5,01	4,13	2,20	0,60
čočka 4"	4,68	2,49	1,59	1,03	0,15	0,06

Z předchozí tabulky (Tab. 20) byl sestrojen graf, závislost Ra na rychlost posuvu pro jednotlivé čočky.



Obr. 47 Graf v závislosti Ra na rychlosti posuvu a velikosti čočky

V předchozích grafech (Obr. 45, 46, 47) je zřejmé, že při zvyšování rychlosti posuvu klesá hodnota drsností. A stejně tomu je tak i při použití různé tloušťky čočky, čím je čočka tlustší, tím je hodnota drsnosti povrchu nižší. Pouze u čočky 2,5" při posuvu 30% dochází k nepatrnému narušení trendu.

### 10.3 Výsledky měření hloubek

Jak již bylo uvedeno dříve, hloubka vygravírovaného povrchu byla naměřena úchylkoměrem ID – H0530, každá hodnota z důvodů snahy o minimalizaci možné chyby byla naměřena 15krát. Následně byly tyto parametry statisticky vyhodnoceny v programu Excel, z těchto parametrů jako tomu bylo u drsností, byl vypočítán průměr ze vztahu (2) a směrodatná odchylka ze vztahu (3, 4), aby byla zjištěna přesnost měření.

#### 1. Vzorek 1,5“

V následující tabulce (Tab. 21) jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubek, které byly vygravírovány čočkou 1,5“.

Tab. 21 Hloubka  $h$  v závislosti na posuvu, čočka 1,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č. měření	h [mm]					
1	0,724	0,528	0,370	0,208	0,116	0,104
2	0,752	0,509	0,375	0,206	0,117	0,114
3	0,724	0,504	0,363	0,200	0,112	0,118
4	0,726	0,506	0,366	0,225	0,131	0,109
5	0,729	0,488	0,386	0,225	0,132	0,118
6	0,659	0,494	0,373	0,214	0,137	0,120
7	0,731	0,503	0,366	0,241	0,135	0,102
8	0,728	0,489	0,379	0,234	0,137	0,107
9	0,665	0,503	0,362	0,234	0,143	0,115
10	0,743	0,492	0,368	0,226	0,145	0,103
11	0,718	0,510	0,371	0,222	0,135	0,098
12	0,683	0,513	0,364	0,222	0,136	0,104
13	0,709	0,515	0,363	0,240	0,142	0,089
14	0,738	0,510	0,340	0,227	0,133	0,087
15	0,806	0,506	0,350	0,216	0,120	0,092
průměr	0,722	0,505	0,366	0,223	0,131	0,105
sm. odchylka	0,0344	0,0103	0,0107	0,0117	0,0100	0,0102

## 2. Vzorek 2,5“

V následující tabulce (Tab. 22) jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubek, které byly vygravírovány čočkou 2,5“.

Tab. 22 Hloubka  $h$  v závislosti na posuvu, čočka 2,5“

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č. měření	h [mm]					
1	0,519	0,310	0,211	0,066	0,012	0,003
2	0,519	0,268	0,211	0,074	0,020	0,001
3	0,480	0,306	0,222	0,071	0,015	0,002
4	0,466	0,334	0,191	0,086	0,010	0,003
5	0,452	0,303	0,202	0,076	0,009	0,002
6	0,481	0,301	0,200	0,069	0,011	0,001
7	0,464	0,300	0,210	0,084	0,008	0,003
8	0,436	0,305	0,205	0,060	0,022	0,001
9	0,448	0,260	0,197	0,075	0,017	0,001
10	0,473	0,269	0,203	0,074	0,013	0,001
11	0,452	0,275	0,199	0,071	0,005	0,003
12	0,439	0,294	0,211	0,076	0,010	0,004
13	0,511	0,304	0,205	0,080	0,025	0,002
14	0,406	0,284	0,207	0,077	0,007	0,003
15	0,473	0,305	0,210	0,078	0,013	0,003
průměr	0,468	0,295	0,206	0,074	0,013	0,002
sm. odchylka	0,0306	0,0190	0,0072	0,0064	0,0055	0,0010

### 3. Vzorek 4“

V následující tabulce (Tab. 23) jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubek, které byly vygravírovány čočkou 4“. Gravírování čočkou 4“ při rychlostech posuvu 80% a 100% už laserové zařízení nedělalo žádné viditelné stopy po gravírování, proto nejsou při těchto posuvech žádné naměřené hodnoty hloubek.

Tab. 23 Hloubka  $h$  v závislosti na posuvu, čočka 4“

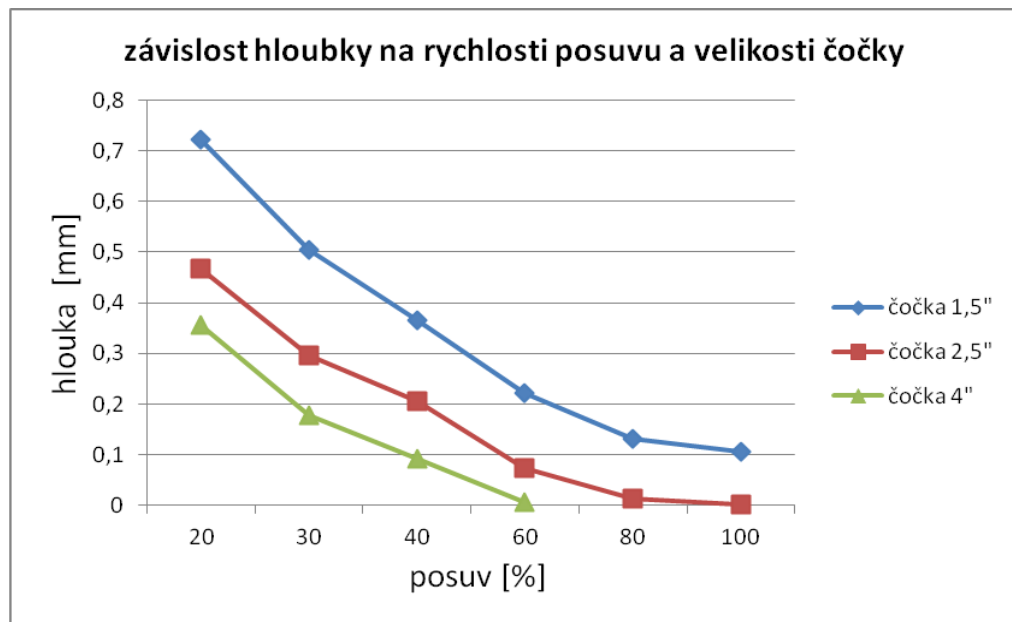
	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
č. měření	h [mm]					
1	0,340	0,170	0,094	0,008		
2	0,346	0,176	0,106	0,005		
3	0,355	0,181	0,095	0,003		
4	0,356	0,179	0,074	0,008		
5	0,374	0,176	0,094	0,007		
6	0,342	0,176	0,101	0,011		
7	0,354	0,193	0,087	0,004		
8	0,358	0,179	0,093	0,006		
9	0,332	0,165	0,090	0,005		
10	0,313	0,185	0,086	0,007		
11	0,384	0,172	0,080	0,005		
12	0,362	0,179	0,110	0,005		
13	0,333	0,163	0,093	0,007		
14	0,410	0,189	0,080	0,006		
15	0,381	0,176	0,091	0,006		
průměr	0,356	0,177	0,092	0,006	-	-
sm. Odchylka	0,0234	0,0078	0,0093	0,0019	-	-

Dále byla udělána tabulka (Tab. 24) pro jednotlivé čočky, ve kterých jsou aritmetické průměry naměřených hodnot hloubek, při různých rychlostech posuvu.

Tab. 24 Hloubky v závislosti na posuvu a velikosti čočky

	posuv [%]					
	20	30	40	60	80	100
	h [mm]					
čočka 1,5"	0,722	0,505	0,366	0,223	0,131	0,105
čočka 2,5"	0,468	0,295	0,206	0,074	0,013	0,002
čočka 4"	0,356	0,177	0,092	0,006		

Z předchozí tabulky (Tab. 24) byl sestrojen graf, závislost hloubky na rychlost posuvu pro jednotlivé čočky.



Obr. 48 Graf závislost hloubky na posuvu a velikosti čočky

V předchozím grafu (Obr. 48) je zřejmé, že při zvyšování rychlosti posuvu klesá hodnota hloubky. A stejně tomu je tak i při rozdílné velikosti čočky, čím je velikost čočky větší, tím je hodnota hloubky povrchu nižší.



## 11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Experimentální část měření prokázala, že vliv změny optiky má na vlastnosti obrobené plochy zkušebních vzorků značný vliv. Ale také při změně řezných podmínek, konkrétně při různých rychlostech posuvu dochází ke značné změně nejen drsnosti povrchu, ale taky dochází ke změně hloubky vygravírovaného povrchu obrobené plochy.

Výsledky měření drsností ukazují na to, že při změně tloušťky čočky od nejmenší po největší a zvyšující se rychlosti posuvu laserového paprsku hodnota drsnosti povrchu klesá. Stejně tomu je tak i při výsledcích naměřených hloubek. Tedy čím větší čočka a rychlost posuvu, tím nižší hodnota hloubky. Z toho plyne, že požadovanou hloubku vygravírované drážky a hodnotu drsnosti povrchu lze regulovat změnou čočky a rychlosti posuvu.

Vliv čočky a posuvu, na hodnoty drsností  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $R_a$  a hloubek, můžeme sledovat z uvedených grafů (Obr. 45 až 48), kde lze vyhodnocené výsledky shrnout tímto tvrzením. Tedy s větší rychlostí posuvu a tloušťkou čočky klesají maximální výšky profilů a hloubky vygravírované plochy.

Za zmínku stojí poukázat na krajní hodnoty vygravírovaných povrchů, kde u gravírování při čočce 1,5“ a rychlosti posuvu 20%, nebyly hodnoty drsností naměřeny, protože na vygravírovaném povrchu vznikly trhlinky, docházelo ke spálení materiálu a nedalo se přesně změřit tyto hodnoty na drsnoměru. Naměřené hodnoty drsností, ukazovali velké rozptyly a tím by byly výsledky neobjektivní.

Naopak i zajímavým druhým krajním výsledkem je u gravírování při použití čočky 4“, rychlostech posuvu 80% a 100%, vše při jednotném výkonu 20%. Laserové zařízení nezpůsobilo výrazné okem viditelné stopy po gravírování. Proto při této čočce a posuvech nebyly měřeny žádné hloubky. Byly měřeny pouze hodnoty drsnosti, ale ty už jsou téměř zanedbatelné. Z toho plyne, že by bylo vhodné vyrobit další vzorky na laseru ILS 3NM při použití čočky 4“, při výkonu větším než 20%.

Lze tedy říct, že pomocí vhodného nastavení čočky a velikosti posuvu, případně i výkonu, laserového paprsku je možné dosáhnout požadované výsledné drsnosti povrchu a hloubky vygravírovaného povrchu.

## ZÁVĚR

V této diplomové práci byl zkoumán vliv optiky CO<sub>2</sub> laseru na vlastnosti obrobené plochy.

V teoretické části této práce bylo provedeno seznámení se s vlastnostmi a principem laseru, především jeho fyzikální vlastnosti a konstrukcí. Dále část teoretické práce pojednává o kritériích hodnocení kvality povrchu po obrábění laserovým paprskem. A závěrem teoretické části bylo seznámení se základními vyhodnocovanými parametry drsností a jejich normy.

Cílem praktické části bylo vyrobit vzorky z různých materiálů na laseru ILS 3NM pro experiment. Z důvodů vhodnosti pro gravírování na laseru byl vybrán materiál PMMA, protože nedocházelo k výraznému poškození povrchu jako například u dřeva nebo PC a bylo možné na těchto vzorcích provádět experimentální měření. Výroba vzorků probíhala při třech různých velikostech čočky 1,5“; 2,5“; 4“ a při různých rychlostech posuvu. Dále pak vyhodnocení drsností a hloubek jednotlivých ploch zkušebních vzorků.

Vyhodnocení naměřených výsledků ukázalo, že při změně čočky a různých rychlostech posuvu dochází ke změně drsnosti a hloubky obrobené plochy. Při velikosti čočky od nejmenší po největší a zvyšující se rychlosti posuvu laserového paprsku hodnota drsnosti povrchu klesá. Stejně tomu je tak i při výsledcích naměřených hloubek. Tedy čím větší čočka a rychlost posuvu, tím nižší hodnota hloubky.

Výsledky tedy prokázaly, že by bylo možné vyhovět zákazníkovi, pokud by si danou hloubku nebo drsnost zadával. Bylo by možné mu doporučit, při jaké rychlosti posuvu nebo tloušťce čočky by těchto jeho požadavků mohl docílit.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] VOJTA, Filip. *Princip laseru* [online]. [cit. 2013-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.pf.jcu.cz/struka/tedry/fyzika/profSvadlenkova/Princip%20laseru.pdf>>
- [2] *Lasery a jejich aplikace* [online]. 2002 [cit. 2013-11-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>
- [3] BRIMUS, Jan. *Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály*. Zlín, 2007. 197 s. Diplomová práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [4] TÁBORSKÝ, Vojtěch. *Výzkum vlivu laserového paprsku na vlastnosti výrobků*. Zlín, 2011. 77 s. Diplomová práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [5] *Činnost laseru* [online]. [cit. 2013-11-16]. Dostupné z WWW: <http://www.prezfyz.unas.cz/fyzpre13.pps>
- [6] *Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. [cit. 2013-11-16]. Dostupné z WWW:<<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>>
- [7] MORÁVEK M.: *Nekonvenční metody obrábění* : 2.vyd.. ZČU Plzeň, 1999.
- [8] SUKUP, M.: *Mikroobrábění polymerních materiálů na CO<sub>2</sub> laseru* – Diplomová práce FT UTB, Zlín 2006
- [9] *Nekonvenční metody obrábění* [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z WWW: <[www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil)>
- [10] *Přehled laseru* [online]. [cit. 2013-11-23]. Dostupné z WWW: <<http://lasery.wz.cz/prehled.html>>
- [11] MAŇKOVÁ I.: *Progresivné Technológie*, Katedra technológií a mateiálov. Strojnícká fakulta TU Košice, 2000. 275s
- [12] HOFMANN J., URBANOVÁ M.: *Fyzika I*. Verze 1.0. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2005
- [13] KORANDA P.: *Plynové lasery* [online]. [cit. 2013-12-7]. Dostupné z WWW: <[http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/10\\_plynove\\_lasery.pdf](http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/10_plynove_lasery.pdf)>

- [14] VRBOVÁ M.: *Úvod do laserové techniky*, Vydavatelství ČVUT. 1998. 178s
- [15] Intelligent Laser Systém III-NM. *Operation Manual VERSION 1.6*; 2007
- [16] *Měření jakosti povrchu* [online]. [cit. 2014-4-18]. Dostupné z WWW:  
<[http://www.sandvik.coromant.com/cs.cz/knowledge/materials/measuring\\_surfaces/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs.cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx)>
- [17] *Drsnost obrobeného povrchu* [online]. [cit. 2014-4-18]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>>
- [18] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999. vyd.
- [19] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1999.vyd.
- [20] ZÁMORSKÝ, Z.: *Nauka o polymerech*, VUT, Brno 1980

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PMMA	Polymethylmethakrylát
TEM	Transverse Electromagnetic Mode (mód laserového paprsku)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
HAZ	Heat Affected Zone (tepelně ovlivněná zóna)
$E_1, E_2$	Energetické hladiny
Nd:YAG	Neodymem dopovaný yttrito-hlinitým granátem
ms	Milisekunda
$\mu\text{m}$	Mikrometr
mm	Milimetr
W	Watt
ILS	Inteligent laser systém
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
He	Helium
Ne	Neon
Al	Hliník
As	Arsen
Ga	Galium
PC	Polykarbonát
ČSN	Česká státní norma
$R_z$	Maximální výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_t$	Celková výška profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_a$	Aritmetická úchylka profilu [ $\mu\text{m}$ ]
P	Výkon [W], [%]
f	Rychlost posuvu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ], [%]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Aktivní prostředí v optickém rezonátoru [2]</i> .....	12
<i>Obr. 2 Proud fotonů [6]</i> .....	13
<i>Obr. 3 Přechod elektronu [3]</i> .....	14
<i>Obr. 4 Konstrukce laseru [11]</i> .....	14
<i>Obr. 5 Rezonátor [5]</i> .....	15
<i>Obr. 6 Laserový paprsek [11]</i> .....	16
<i>Obr. 7 Rorbíhavost a prostorový profil laserového paprsku [11]</i> .....	16
<i>Obr. 8 Módová struktura laserů, jejich TEM označení a použití [11]</i> .....	17
<i>Obr. 9 Účinek laserového paprsku [11]</i> .....	18
<i>Obr. 10 Působení paprsku na materiál [11]</i> .....	19
<i>Obr. 11 Princip laseru CO<sub>2</sub> [11]</i> .....	24
<i>Obr. 12 Typy oscilátorů pro lasery CO<sub>2</sub>: .....</i>	25
<i>Obr. 13 Uspořádání laserové hlavy [11]</i> .....	26
<i>Obr. 14 Energetické hladiny v He-Ne laseru [12]</i> .....	27
<i>Obr. 15 Rezonátor laseru a šíření stimulované emise [12]</i> .....	28
<i>Obr. 16 Rubínový laser</i> .....	30
<i>Obr. 17 Nd-YAG laser</i> .....	31
<i>Obr. 18 Podélné a příčné koherentní buzení barvivového laseru [14]</i> .....	32
<i>Obr. 19 Schéma uspořádání polovodičového laseru [14]</i> .....	33
<i>Obr. 20 Kritéria pro hodnocení povrchu [11]</i> .....	37
<i>Obr. 21 R<sub>a</sub> průměrná aritmetická úchylka profilu [16]</i> .....	40
<i>Obr. 22 Rz maximální výška profilu [16]</i> .....	41
<i>Obr. 23 Rt celková výška profilu [16]</i> .....	41
<i>Obr. 24 Laser ILS 3NM</i> .....	45
<i>Obr. 25 Ovládací panel [15]</i> .....	46
<i>Obr. 26 Zobrazení ovládání</i> .....	46
<i>Obr. 27 nový soubor</i> .....	47
<i>Obr. 28 Řezné podmínky</i> .....	48
<i>Obr. 29 Nastavení vektoru rastru</i> .....	50
<i>Obr. 30 Soubor připravený k tisku</i> .....	50
<i>Obr. 31 Odeslání souboru do ILS 3NM</i> .....	51

---

<i>Obr. 32 Nastavení fokusace .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 33 Pomocná kostka.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34 Vysunutí stolu v ose Z.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 35 Fokusační tělíska .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 Přiložené fokusační tělísko .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Práce na laseru .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 38 Vzorky.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 Talysurf CLI 500 s příslušenstvím.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 40 Úchylkoměr ID – HO530.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 41 Měření drsností.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 42 Zadávání parametrů do softwaru Talymap .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 43 Vyhodnocené výsledky měření .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 44 Měření hloubky.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 45 Graf v závislosti Rz na rychlosti posuvu a velikosti čočky .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 46 Graf v závislosti Rt na rychlosti posuvu a velikosti čočky.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 47 Graf v závislosti Ra na rychlosti posuvu a velikosti čočky.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 48 Graf závislost hloubky na posuvu a velikosti čočky .....</i>	<i>72</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1</i> Hodnoty tepelně ovlivněné zóny [11] .....	19
<i>Tab. 2</i> Rozdělení laserů [11] .....	20
<i>Tab. 3</i> Přehled plynových laserů [13] .....	23
<i>Tab. 4</i> Přehled laserů [10] .....	34
<i>Tab. 5</i> Rozsahy doporučených výkonů [11] .....	35
<i>Tab. 6</i> Základní vlastnosti PMMA [20] .....	39
<i>Tab. 7</i> Technické parametry [15] .....	45
<i>Tab. 8</i> Převodní tabulka jednotek posuvu $f$ .....	55
<i>Tab. 9</i> Rz v závislosti na posuvu, čočka 1,5“ .....	61
<i>Tab. 10</i> Rt v závislosti na posuvu, čočka 1,5“ .....	61
<i>Tab. 11</i> Ra v závislosti na posuvu, čočka 1,5“ .....	62
<i>Tab. 12</i> Rz v závislosti na posuvu, čočka 2,5“ .....	63
<i>Tab. 13</i> Rt v závislosti na posuvu, čočka 2,5“ .....	63
<i>Tab. 14</i> Ra v závislosti na posuvu, čočka 2,5“ .....	64
<i>Tab. 15</i> Rz v závislosti na posuvu, čočka 4“ .....	65
<i>Tab. 16</i> Rt v závislosti na posuvu, čočka 4“ .....	65
<i>Tab. 17</i> Ra v závislosti na posuvu, čočka 4“ .....	66
<i>Tab. 18</i> Rz v závislosti na posuvu a velikosti čočky .....	66
<i>Tab. 19</i> Rt v závislosti na posuvu a velikosti čočky .....	67
<i>Tab. 20</i> Ra v závislosti na posuvu a velikosti čočky .....	68
<i>Tab. 21</i> Hloubka $h$ v závislosti na posuvu, čočka 1,5“ .....	69
<i>Tab. 22</i> Hloubka $h$ v závislosti na posuvu, čočka 2,5“ .....	70
<i>Tab. 23</i> Hloubka $h$ v závislosti na posuvu, čočka 4“ .....	71
<i>Tab. 24</i> Hloubky v závislosti na posuvu a velikosti čočky .....	72



## SEZNAM PŘÍLOH

- PI** Všechna naměřená data v praktické části jsou uvedena v elektronické podobě  
(na CD)