

Laserové obrábění přírodního materiálu s použitím rotační osy

Michal Kratochvíl

Bakalářská práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Kratochvíl**
Osobní číslo: **T16690**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Laserové obrábění přírodního materiálu s použitím rotační osy**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Popište metodiku práce pomocí zařízení Laseru ILS 3NM
3. Navrhněte vzorky
4. Navrhněte pracovní podmínky pro gravírování součástí přírodního materiálu pomocí rotační osy

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. MAŇKOVÁ I: **Progresivné Technológie. Katedra technológií a materiálov. Strojnícká fakulta TU Košice, 2000. 275s**
2. MORÁVEK, R. **Nekonvenční metody obrábění. Plzeň, 1994. 102 s. ISBN: 80-7082-161-2**
3. LAPČANSKÁ, Hana. **Laserové technologie v praxi. In: Laserové technologie v praxi (elektronická skripta). 2010 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>**
4. DŘEVO centrum. **Dřevo centrum- komplexní informace o dřevu a jeho použití [on drevo. Celyden.cz [vid 5. Dubna 2013].**
5. **Dřevo. Základní rozdělení dřeva [online]. SPIBI. cz [vid 5. Dubna 2013]. Dostupné z: <http://prace-se-drevem. Spibi.cz/Drevo-Rozdeleni.html>**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Knedlová, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 18. února 2019

L.S.

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ 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 ³⁾ 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 19. 5. 2019

.....

¹⁾ 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 nevydávalečně 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.

²⁾ 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).

³⁾ 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 výdělku 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 přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

V dnešní době se nekonvenční technologie obrábění dostávají do popředí. Běžné konvenční technologie jsou čím dál více nahrazovány těmi nekonvenčními. Pro tyto technologie je důležité znát vhodné pracovní podmínky pro obrábění daných materiálů. Cílem práce je navržení optimálních pracovních podmínek pro laserové obrábění přírodního materiálu pomocí rotační osy. Zaměřil jsem se na bukové dřevo, které patří mezi tvrdé dřeviny, pro které jsem vytvořil přehled, jakého povrchu lze dosáhnout při rastrovém gravírování nebo vektorovém řezání, při různém nastavení pracovních podmínek laserového zařízení ILS 3-NM. Experimentem získané informace jsem využil pro vytvoření folklorního vzoru na obrobek rotačního tvaru pomocí rotační osy.

Klíčová slova: laserové zařízení ILS 3-NM, rastrové gravírování, vektorové řezání, pracovní podmínky, rotační osa.

ABSTRACT

Nowadays the unconventional machine technologies are getting in front. Usual conventional technology is much more replaced by unconventional. For this type of technology is important to know working conditions for machining these materials. The purpose of my work is proposed optimal working conditions for laser machining natural materials by rotary axis. I focused on beech wood, which belongs to hardwood, I created overview which show us what type of surface properties can be reach by gravitational or vector cutting, at different working conditions laser machine ILS 3-NM. The information getting from this experiment I used to create folklore model rotational shape by rotary axis.

Keywords: laser machine ILS 3-NM, raster engraving, vector cutting, working conditions, rotary axis.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Janě Knedlové, Ph.D. za cenné rady a připomínky, ale především za ochotu a vstřícnost, při vypracovávání mé práce. Další dík patří doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za technickou pomoc při měření. V neposlední řadě patří dík mé rodině, které ve studiu plně podporuje.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	12
1.1 VÝZNAMNÉ VLASTNOSTI NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ	12
1.2 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	14
2 PRINCIP LASERU	16
2.1 BUZENÍ PAPRSKU.....	16
2.2 POPIS LASERU.....	18
3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ LASERŮ	21
3.1 PLYNNÝ CO ₂ LASER	23
4 VYUŽITÍ LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ	24
4.1 SVAŘOVÁNÍ POMOCÍ LASERU.....	25
4.2 VRTÁNÍ POMOCÍ LASERU	26
4.3 ŘEZÁNÍ POMOCÍ LASERU	26
4.4 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ZA POMOCI LASERU	27
4.5 NANÁŠENÍ POVLAKŮ ZA POMOCI LASERU	28
5 LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ A POPISOVÁNÍ	30
5.1 LASEROVÉ POPISOVÁNÍ	30
5.2 LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ.....	32
6 DŘEVO	33
6.1 STRUKTURA DŘEVA.....	33
6.2 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI DŘEVA	35
6.3 DRUHY DŘEVA	36
6.4 PARAMETRY ŘEZÁNÍ DŘEVA.....	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
7 CÍLE PRÁCE	39
8 PŘÍPRAVA VZORKŮ	40
8.1 POPIS LASEROVÉHO ZAŘÍZENÍ ILS 3 - NM.....	40
8.2 ZHOTOVENÍ VZORKŮ	42
9 MĚŘENÍ HLOUBKY VYGRAVÍROVANÝCH VZORKŮ	49
9.1 POPIS LINEÁRNÍHO VÝŠKOMĚRU LH-600E/EG	49
9.1.1 Postup měření.....	50
9.2 NAMĚŘENÉ HLOUBKY VYGRAVÍROVANÝCH VZORKŮ	51
10 POROVNÁNÍ POVRCHŮ VZORKŮ	60

10.1	MIKROSKOP CARL ZEISS	60
10.1.1	Postup snímání povrchů vzorků	60
10.2	NASNÍMANÉ POVRCHY JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ.....	61
11	MĚŘENÍ ŠÍŘKY A HLOUBKY ŘEZŮ	65
11.1	POSTUP MĚŘENÍ ŠÍŘKY A HLOUBKY ŘEZŮ	65
11.2	NAMĚŘENÉ HODNOTY ŠÍŘKY ŘEZŮ	67
11.3	NAMĚŘENÉ HODNOTY HLOUBKY ŘEZŮ	75
12	VOLBA VHODNÝCH PRACOVNÍCH PODMÍNEK PRO ROTAČNÍ VÝROBEK.....	79
12.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO PRÁCI NA ROTAČNÍ OSE.....	79
12.2	NAVRŽENÍ VHODNÝCH PRACOVNÍCH PODMÍNEK	80
13	ROTAČNÍ OSA.....	81
13.1	MONTÁŽ A NASTAVENÍ ROTAČNÍ OSY	81
14	VÝSLEDNÝ VÝROBEK.....	85
14.1	VÝROBA VZORU NA VÁLEČKU	85
15	VYHODNOCENÍ	87
15.1	HLOUBKA VYGRAVÍROVANÉ PLOCHY	87
15.2	POVRCH VYGRAVÍROVANÉ PLOCHY.....	89
15.3	ŠÍŘKA ŘEZŮ	89
15.4	HLOUBKA ŘEZU.....	92
15.5	POVRCH ROTAČNÍHO OBROBKU	94
	ZÁVĚR	95
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	98
	SEZNAM OBRÁZKŮ	99
	SEZNAM TABULEK.....	102
	SEZNAM PŘÍLOH.....	103

ÚVOD

Jsme svědkem doby, kdy se laserové technologie dostávají téměř do všech odvětví průmyslu, především do strojírenského. Důvodem je nejen rychlý rozvoj těchto technologií, ale také snižující se cena laserů.

Základy pro vývoj laserového paprsku položil Albert Einstein, který objevil základy vynucených emisí záření. Na principu stimulované emise záření vznikly zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření. První projekt takového zařízení, vytvořili pánové C. H. Towns a A. L. Shawlow v roce 1958. Tento projekt byl o dva roky později zrealizován a uveden do chodu panem T. H. Maimanem. Jednalo se o první rubínový laser. Na bázi pevných, kapalných a plyných aktivních látek byly následně realizovány další laserové zařízení. V roce 1964 byly prováděny experimenty s laserem, který v dnešní době získal nejširší uplatnění, a to s laserem plynovým CO₂ laserem. Na vzniku tohoto typu laseru se podílel C. H. Patel. První praktické využití laseru uvedl Epperson a jednalo se o vrtání otvorů do kalibrů z diamantu pomocí rubínového laseru.

Dnes laserové aplikace mnohdy překračují lidskou fantazii a dosud známé fyzikální jevy. Laserového světlo se stalo běžnou součástí reflektorů u automobilů, reprodukčních a přenosových systémů, osvětlení průmyslových, veřejných i obytných prostor. Své uplatnění našlo také v metrologii např. jaké délkoměry. Stalo se také nedílnou součástí polovodičového průmyslu pro výrobu procesorů, mobilů a displejů. Z ekonomického hlediska není možné v automobilovém průmyslu realizovat masovou výrobu jinak než za pomoci laserů pro svařování, řezání a tvarování. Dnes běžnou součástí medicíny se stali foto-diagnostické, fotodynamické a foto-stimulační metody, které vedli už k řadě úspěšných vyléčení onkologických onemocnění. A řada nových technologií, které mohou být příznivé pro náš život, čekali a čekají jenom na zdroje světla, které budou mít dostatečný výkon nebo intenzitu.

Tato bakalářská práce popisuje studii nekonvenčních technologií obrábění, konkrétně obrábění pomocí laseru. Hlavní naplní je problematika laserového obrábění dřeva pomocí rotační osy a stanovení vhodně obrobeneho povrchu v závislosti na technologických parametrech laseru. Tyto zjištěné informace budou složité jako návod a přehled pro další práce na laserovém zařízení ILS 3-NM.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Jako nekonvenční metody obrábění označujeme takové technologie, které pro odebrání materiálu používají spojení mechanické energie a jiné formy energie ve formě částic pro oko neviditelných. Během tvarování povrchu materiálu nedochází k přímému kontaktu s nástrojem, ale využívají tepelné, chemické nebo i elektrické působení fyzikálních jevů. Tepelné a erozivní působení vysoce energetických paprsků na povrch jsou převažujícím způsobem obrábění. Podle dělení těchto technologií sem patří i chemické, elektrochemické rozpouštění materiálu a také účinek volného brusiva při obrábění ultrazvukovém a obrábění proudem abraziva.

Nekonvenční metody obrábění patří mezi novodobé technologie a přináší nové možnosti v různých odvětvích průmyslu, zejména ve strojírenském. Řeší problematiku, která se týká nejen opotřebení nástrojů, ale také zvyšujících se požadavků na kvalitu výrobků, složitost tvarů, na dokončovací operace povrchu, ale i nárůst těžkoobrobitelných konstrukčních materiálů, což přináší nové požadavky na jejich zpracování.

1.1 Významné vlastnosti nekonvenčních technologií

Prvotně se nekonvenční metody obrábění používaly jako alternativa klasického třískového obrábění. S postupem času se tyto technologie stali běžným a někdy i jediným vhodným způsobem obrábění. S jejich používáním přichází také řada výhod, mezi které patří:

- obrobitelnost materiálů
- dosažení tvarově náročnějších výrobků
- usnadnění automatizace výroby
- povrchová integrita a vysoká přesnost
- miniaturizace dílců

Obrobitelnost materiálů

Tato vlastnost je typická spíše pro broušení a řezání materiálů, pracujících na mechanických vlastnostech materiálů jako je tvrdost, houževnatost, pevnost. Pro nekonvenční technologie se stává do jisté míry bezvýznamnou. Důležitou roli mají vlastnosti jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, atomové číslo, lomové vlastnosti apod.

Náročnost tvaru výrobků

Narůstající požadavky na tvarovou náročnost výrobků mají za následek zavádění nových technologií odebrání materiálu. Například vrtání kruhového otvoru konvenčním způsobem je snadné, ale jiný nekruhový tvar lze vrtat běžným způsobem jen velmi obtížně, nebo vůbec. Ovšem pro nekonvenční metody jako je elektrojiskrové a elektrochemické obrábění to problém není.

Automatizace výroby

Automatizace a informační tok ve výrobním procesu snižuje výrobní čas, náklady na výrobu, zásoby apod. Tento jev působí účinně při zavádění NC a CNC strojů a následně CAD/CAM systémů do výroby. Nekonvenční metody obrábění v porovnání s konvenčními jsou jednodušší při zavádění automatizovaných výrobních systémů.

Povrchová integrita a vysoká přesnost výroby

Povrchy, které jsou opracované broušením nebo řezáním zachycují stopy velkého mechanického působení (napětí na povrchu, zpevnění, drobné nerovnosti apod.), které mají na užité vlastnosti obroběných povrchů mnohdy nepříznivé účinky. Z jiného hlediska řezání a broušení materiálů jako jsou keramické materiály a vláknové kompozity přichází nové problémy s vlastnostmi obráběného povrchu. Zde přichází vhod nekonvenční metody obrábění, které jsou alternativním řešením pro obrábění povrchů s požadovanými vlastnostmi.

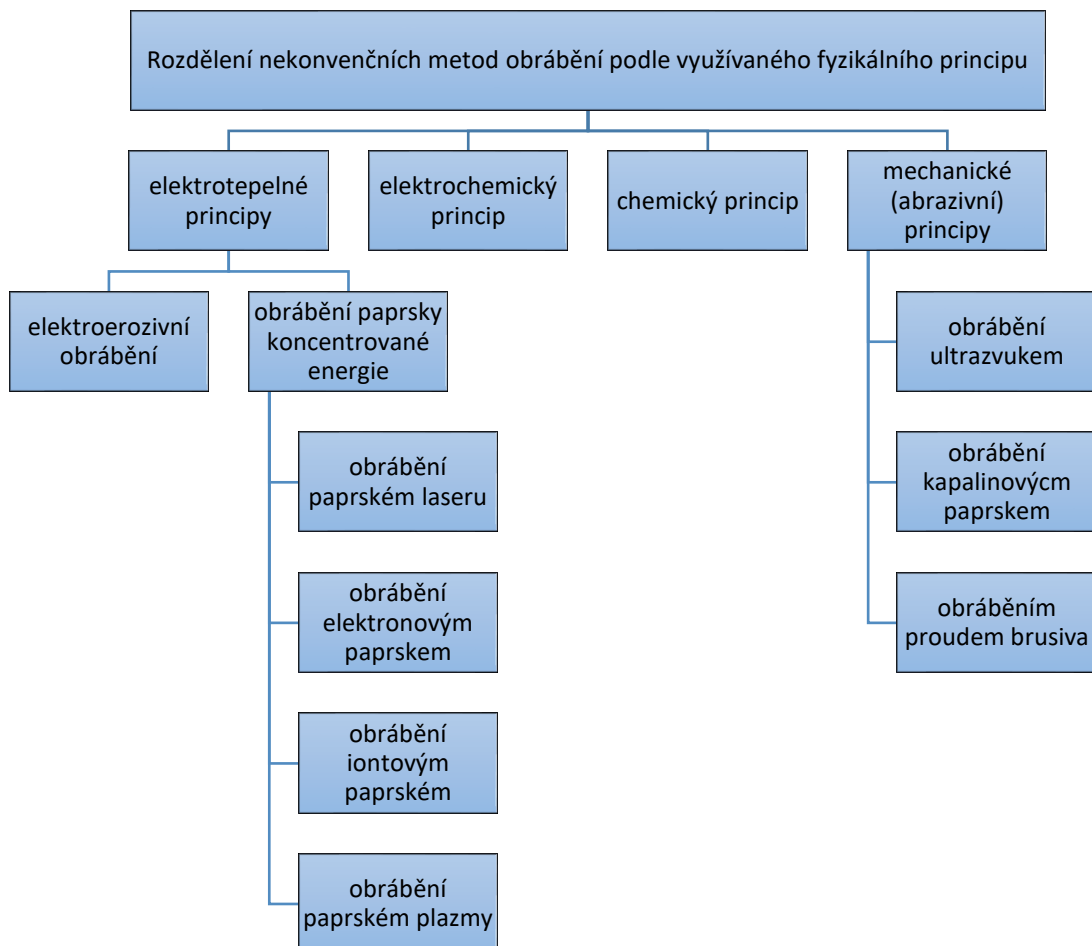
Miniaturizace dílců

V dnešní době redukce rozměrů dílců zvyšují zavádění nových výrobních procesů, které dokáží odebrat materiál nejen v oblasti mikro rozměrů ale i nano rozměrů, a dokonce i odebrání několika molekulárních a atomových vrstev. Např. vrtání ultra malých rozměrů nelze provést běžnými technologiemi, ale můžeme využít technologie, které řeší tento problém, jako jsou mikrochemické obrábění nebo obrábění pomocí svazku elektronů a iontů.

[1]

1.2 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Samotné nekonvenční metody obrábění se především oddělují podle využitého fyzikálního principu pro obrábění. Toto rozdělení je zobrazeno na obr. 1.1. Metody založené na elektro-tepelném principu obrábění pracují na základě využití tepla pro kontrolované řízení odtavování materiálu. Na intenzivní elektrolýze fungují principy elektrochemického obrábění kovů, tento jev je také známý z galvanických procesů. Pod společný název elektrické metody obrábění můžeme s ohledem na přímé působení elektrického proudu na odebrání materiálu zahrnout jak elektroerozivní, tak i elektrochemické obrábění. Chemický princip obrábění je založený na základě chemických reakcí. Metody mechanického (abrazivního) obrábění pracují s vhodnými látkami, jako jsou brusiva nebo kapaliny a stimulaci jejich erozivních nebo abrazivních účinků.



Obr. 1.1 Základní rozdělení NMO podle využitého fyzikálního procesu. [3]

Některé metody obrábění jako obrábění za pomoci soustředěného vodního paprsku nebo proudu písku, brusiva přináší i nepříznivé vlastnosti. Z těchto důvodů došlo

k vytvoření nových metod obrábění označovaných jako paprskové metody. Tyto metody jsou založeny na dynamickém působení částic na malinkou plochu, čímž vzniká vysoká měrná energie, která má za následek ohřátí až vypalování v této oblasti. Mezi tyto metody řadíme různé metody řezání směsí plynů a fotonového obrábění. Řadíme zde i technologie, který využívají elektronového paprsku dopadajícího na velmi malou plochu. Také zde patří v neposlední řadě i obrábění vysokotlakým soustředěným paprskem vody a vodním paprskem doplněným o abraziva. [4]

2 PRINCIP LASERU

Obrábění pomocí laseru je založeno na principu soustředění viditelného světla na malou plochu obrobku využití jeho energie elektromagnetického záření. Na místě dopadu tohoto záření dochází k přeměně energie na energii tepelnou, tudíž se místo dopadu ohřeje na takovou teplotu, která značně přesahuje tavicí teplotu daného obráběného povrchu. V místě dopadu tedy dochází k tavení a odpařování materiálu. Laser je generátorem více zmiňovaných svazků paprsků světla o velmi vysoké intenzitě. Pojmenování laser vychází ze zkratky anglického pojmenování metody zesílení paprsku světla (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Laser pracuje na principu, kdy dochází k uvolňování potenciální energie elektronů atomů prvku. Tyto atomy jsou obsaženy v základní hmotě laseru ve velmi malém množství, zároveň jsou vlastními nositeli zesílení světelných paprsků. Při vyzařování světelného paprsku laserem je dosaženo až stotisíc krát intenzivnějšího světla, než je samotné světlo, které laser ozářilo. [4]

Lasery využívají technologie vyzařování paprsků ve vodorovném směru tak, že pomocí optické čočky soustředí tento paprsek na malou plochu obrobku (řádově 0,001 až 0,01 mm). V místě dopadu paprsku dochází k vyvinutí tak vysoké teploty, že stačí k odpaření materiálu z povrchu obrobku. Jako příklad je možno uvést soustředění paprsku na plochu o průměru $D = 0,01$ mm a tím vyzařené energie 1 J dosáhneme na povrchu obrobku hustoty energie $E = 13955 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-2}$. [4]

2.1 Buzení paprsku

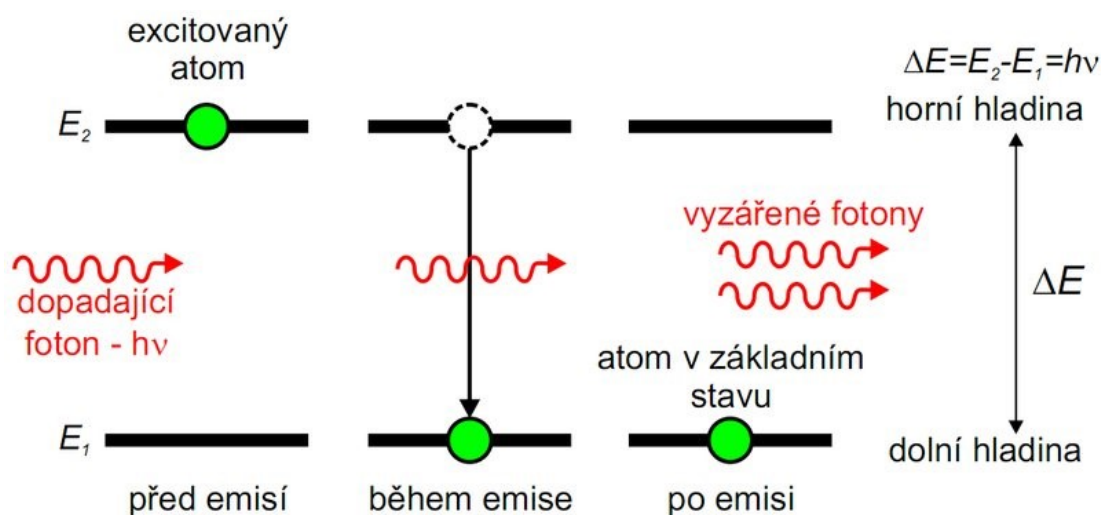
Princip, na jakém pracuje laser, je možné popsat pomocí kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Světelné záření je běžně vlnění, které se šíří všemi směry. V okolí určitého stimulujícího elektromagnetického záření vzniká potlačením spontánní emise vlivem působící emise záření laserové světlo. K vybuzením atomů s energetickou hladinou E_2 dochází vlivem spontánní (samovolné) emise záření. Tyto atomy chtějí zaujat hladinu s nižší hodnotou energie E_1 a během toho dochází k emitaci kvanta světelného záření o frekvenci ν . Tuto frekvenci lze určit z rovnice (2.1):

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (2.1) [1]$$

Kde $h=6,626\cdot 10^{-34}$ [J. s] je Planckova konstanta.

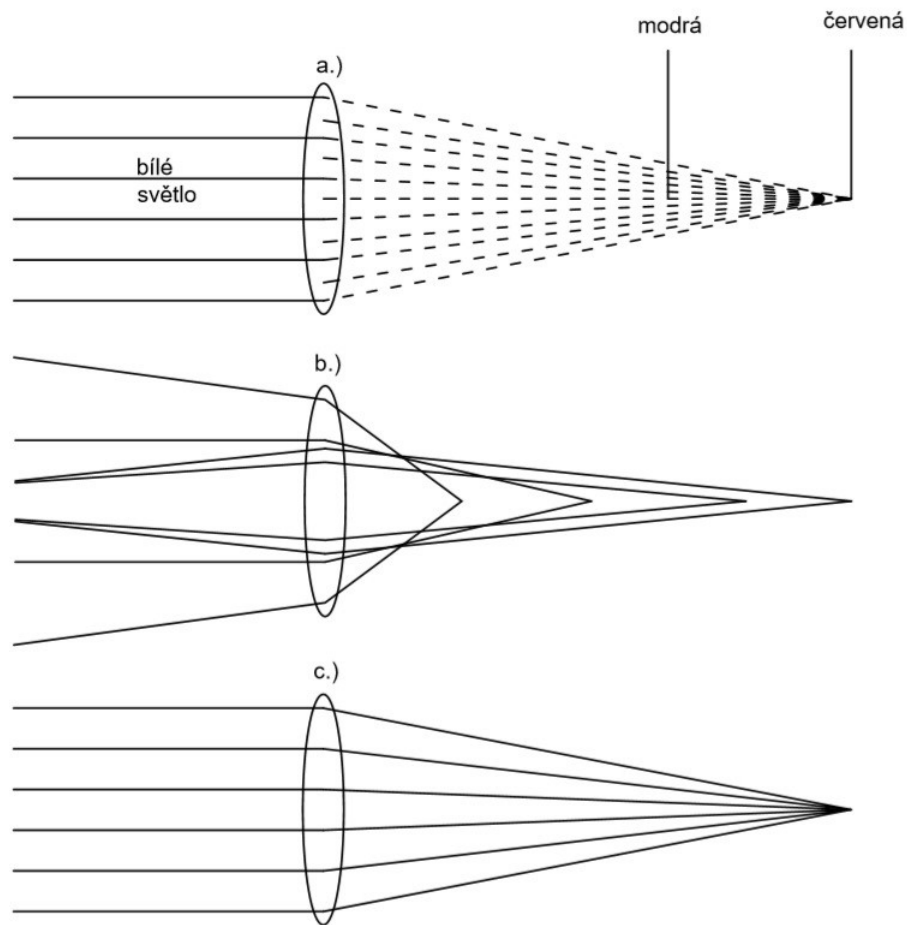
V důsledku vnějšího podnětu se vrací vybuzený atom do původního stavu, přičemž dochází k emitaci nového kvanta s hodnotou frekvence, kterou měl předcházející kvant. Tento princip je nazýván jako stimulovaná (vynucená) emise záření. Na základě vzniku těchto hladin dochází ke vzniku infračerveného, ultrafialového nebo viditelného světelného záření.

Většinou, při běžných podmínkách, se atom objevuje v základním stavu. Při přechodu elektronů ze základní energetické hladiny na vyšší dochází k absorpci, a naopak při přechodu z vyšší hladiny na nižší, tedy na základní energetickou hladinu dochází k emisi, přičemž dochází ve formě záření ke vzniku energie. Stimulovaná emise je na popsána na obr. 2.1. [1]



Obr. 2.1 Stimulovaná emise [5]

Světelný paprsek můžeme považovat za vysoce monochromatický. Ve světelném paprsku se tedy nachází světlo, které má jen jednu vlnovou délku. Světelný paprsek také obsahuje vysoký stupeň časové a prostorové koherence. V paprsku, který je prostorově koherenční, kmitají se stejnou fází v rovině kolmé na směr, ve kterém se šíří paprsek všechny částice světelné vlny. V paprsku časově koherenčním kmitají ve směru šíření paprsku všechny částice světelné vlny se stejnou fází. [1]

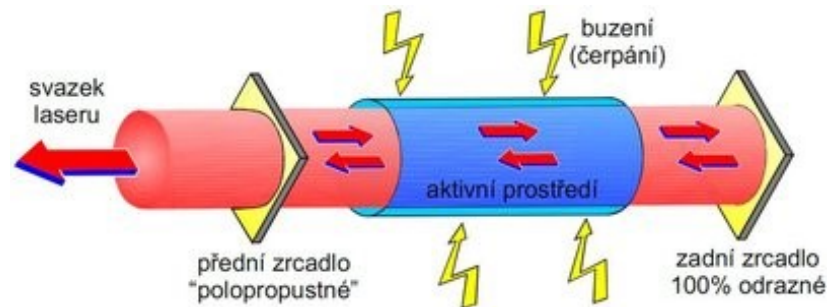


Obr. 2.2 Rozdíl fokusace bílého a laserového světla. [1]

- V případě fokusace bílého světla dochází k tomu, že ohniskovou vzdálenost od čočky má každá barva jinou.
- V případě fokusace neparalelního světla závisí ohnisková vzdálenost na částicích původního paprsku a na jejich úhlu dopadu.
- Laserové světlo je rovnoběžné a monochromatické, proto je možné ho soustředit do poměrně úzkého bodového svazku. [1]

2.2 Popis laseru

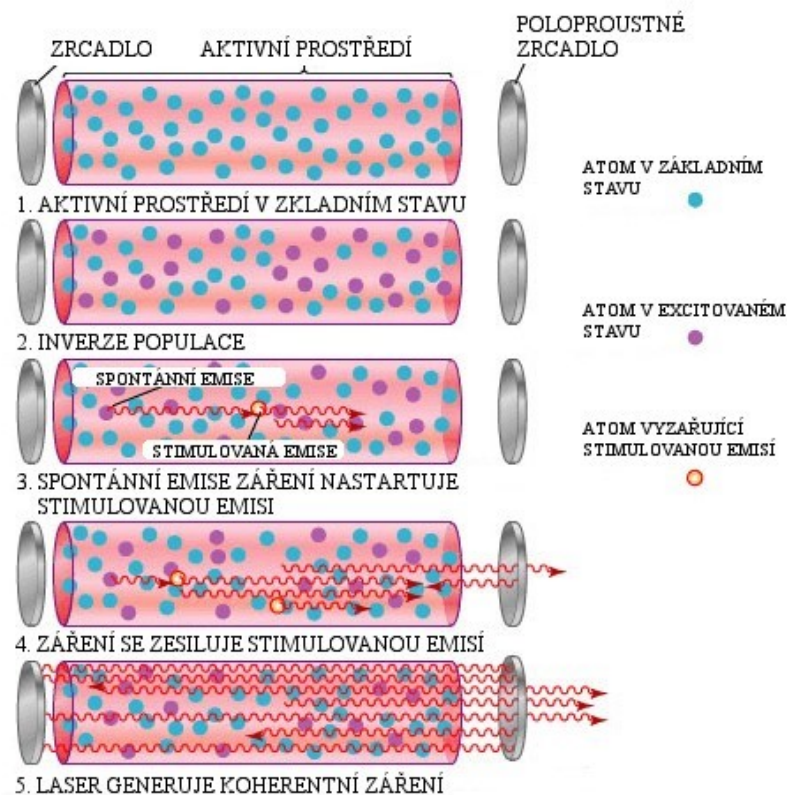
Laser můžeme považovat jako generátor světelných vln a elektronický zesilovač, který využívá k vytvoření světelného paprsku stimulovanou emisi záření. Kromě aktivního prostředí, ve kterém dochází stimulované emisi, se laser skládá z dalších důležitých součástí, mezi které patří čerpací (budící) zařízení, optický rezonátor, vedení svazku, chlazení, manipulační zařízení a řídicí počítač. Základní schéma laseru můžeme vidět na obr. 2.3 na str. 19. [1][6]



Obr. 2.3 Obecné schéma laseru. [5]

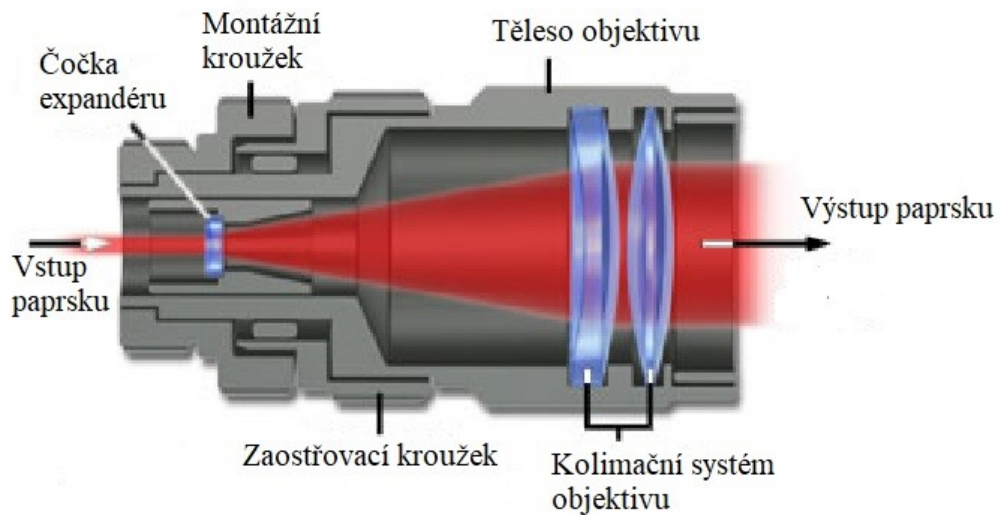
Dodávání energie aktivnímu prostředí zajišťuje čerpací (budící) zařízení. Toto zařízení také zajišťuje přebytek částic s vyšší energií, tedy inverzní populaci, která je nutná pro vznik stimulované emise. [6]

Optický rezonátor musí být zařazen pro dosažení většího počtu stimulovaných přechodů vůči spontánním. Rezonátor je složen ze dvou zrcadel, mezi nimiž se nachází aktivní prostředí. Záření po opuštění aktivního prostředí se odráží zpět do aktivního prostředí pomocí zrcadla, kde funguje jako podnět pro další stimulovanou emisi. Záření se zesiluje právě opakovanými odrazy. Po obdržení požadované intenzity svazek odchází z rezonátoru pomocí jednoho ze zrcadel, které je částečně propustné. [6]



Obr. 2.4 Princip laseru. [5]

U průmyslových laserů je řazen za rezonátor systém čoček a clon, který se nazývá expandér (obr. 2.5). Tento systém zvyšuje kvalitu svazku, který opouští rezonátor a také upravuje průměr výstupního svazku. Nevýhodou je, že zde dochází k velké ztrátě energie, což má za následek snížení výsledné účinnosti laserového systému. Ovšem mnohdy se dává přednost kvalitě svazku před jeho výkonem. [6]



Obr. 2.5 Úprava svazku pomocí expandéru. [7]

3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ LASERŮ

Lasery lze dělit na základě vlnové délky, typu paprsku, oblasti použití, výkonu a dalších kritérií dle tab. 3.1.

Tab. 3.1 Rozdělení laserů. [1]

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblast použití
Pevný	Rubín	Cr ³⁺	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd- YAG	Nd ³⁺	1,064	Kontinuální pulzní	100 – 1200 W	Strojírenský průmysl
	Nd - sklo	Nd ³⁺	1,064	pulzní	2 mW	
	alexandrit		0,7-0,818	pulzní	10W	
Polovodičový	GaAs		0,8-0,9	pulzní	2 – 10 mW	Informační technologie optoelektronika
Plynný	CO ₂ (N ₂ + He)	CO ₂	10,6	Kontinuální nebo pulzní	500 - 15000 W	Strojírenský průmysl
	He - Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20 mW	Metrologie, geodezie, holografie
	Ar	Ar ⁺	0,4764; 0,488; 0,5145	Kontinuální nebo pulzní	1 – 5000 W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,170	pulzní	20 – 250 W	Fotolitografie, laserová chirurgie, strojírenství
	(XeCl)		0,308			
(XeF)		0,351				
(KrF)		0,248				
Kapalinový	Barvivo Rhodamine 6	Etanol, metanol	0,34 – 1,175	pulzní	100 W	Fotochemie, spektroskopie

Běžně používané lasery v průmyslu jsou popsány v tabulce 3.2, kde ^a je efektivita (účinnost) přeměny energie elektrické na světelnou (optickou) ^b. U laserů pulsních se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon uvedený v závorce. Zkratka CW znamená kontinuální režim a QCW režim kvazikontinuální. U typických aplikací zkratka Ř znamená řezání, S svařování, Z značení, K kalení, G gravírování, N nanášení vrstev, M mikro obrábění. Buzení pomocí LD laserové diody, RF radio frekvenčně, EL elektricky (výboj, proud). [8]

Tab. 3.2 Vlastnosti jednotlivých průmyslových laserů. [8]

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Efek. ^a	Režim ^b	Výkon/Energie	Typické aplikace	Život. [h]
Nd:YAG	1064	LD	~7%	CW	Až 6 kW	Ř, S	~10 000
				pulsní	~ mJ@ns (~100 W)	Z, G	
		lampy	~3%	pulsní	~ J@ms (~600 W)	S, V	~1 000
CO ₂	10 600	RF	~10%	CW/ pulsní	10-250 W	Z, G, Ř nekovů	~20 000
					Až 5 kW	Ř, S	
		EL	~25%	Až 20 kW	Ř, S	--	
Diskový	1070	LD	~15%	CW	Až 16 kW	Ř, S	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30%	CW	Až 80 kW	Ř, S	~100 000
				QCW	~ J@ms (~1,2 kW)	Z, G, M	
				pulsní	~ mJ@ns (~100 W)	Z, G, M	
Diodový	808-980	EL	~60%	CW	Až 10 kW	S, K, N	~15 000

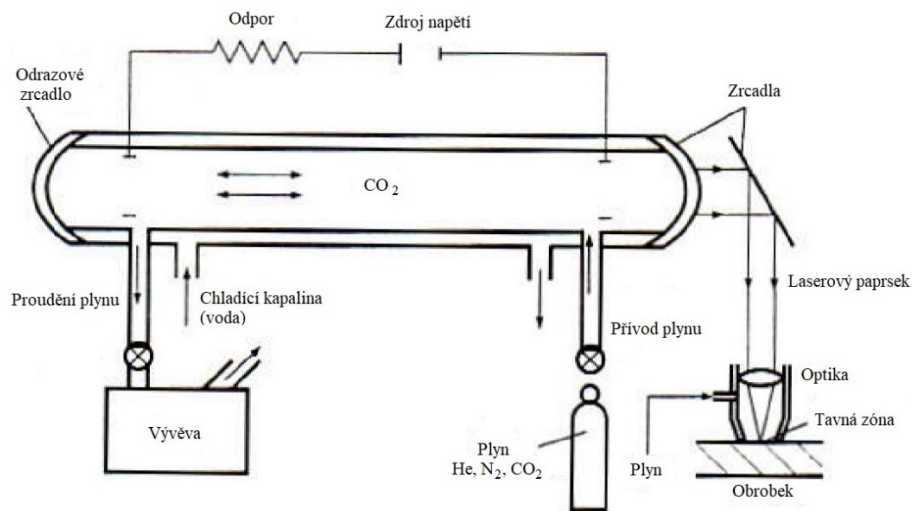
3.1 Plynný CO₂ laser

Jedná se o laser, jehož hlavní částí je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a He (helia).

Formou doutnavého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí, vzniká energie potřebná k excitaci. V doutnavém výboji se srážkami molekuly N₂ s elektrony excitují ze svého základního energetického stavu E_0 do prvního vibračního stavu na určité energetické hladině E_1 , která se blíží k energii E_2 , která je energií asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého. Vibrační energie molekul se tedy může účelně a velmi rychle měnit vlivem nepružných srážek excitovaných molekul N₂ s molekulami CO₂. Přeměnou z vyšší energetické hladiny E_2 na nižší přecházejí molekuly CO₂ ze svých asymetrických vibrací na symetrické, což je doprovázeno vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm .

Aby byla v laseru trvale zajištěna populace na hladině E_2 , je nutné ji neustále doplňovat (čerpat energii do systému ve formě doutnavého výboje), ale také je potřebné účinně depopulovat dolní úroveň laseru, což zajišťují srážky s molekulami He, které přijatou energii odvádějí ve formě tepla do systému. Hélium má relativně velký koeficient tepelné vodivosti, proto je pro tento účel obzvláště vhodné.

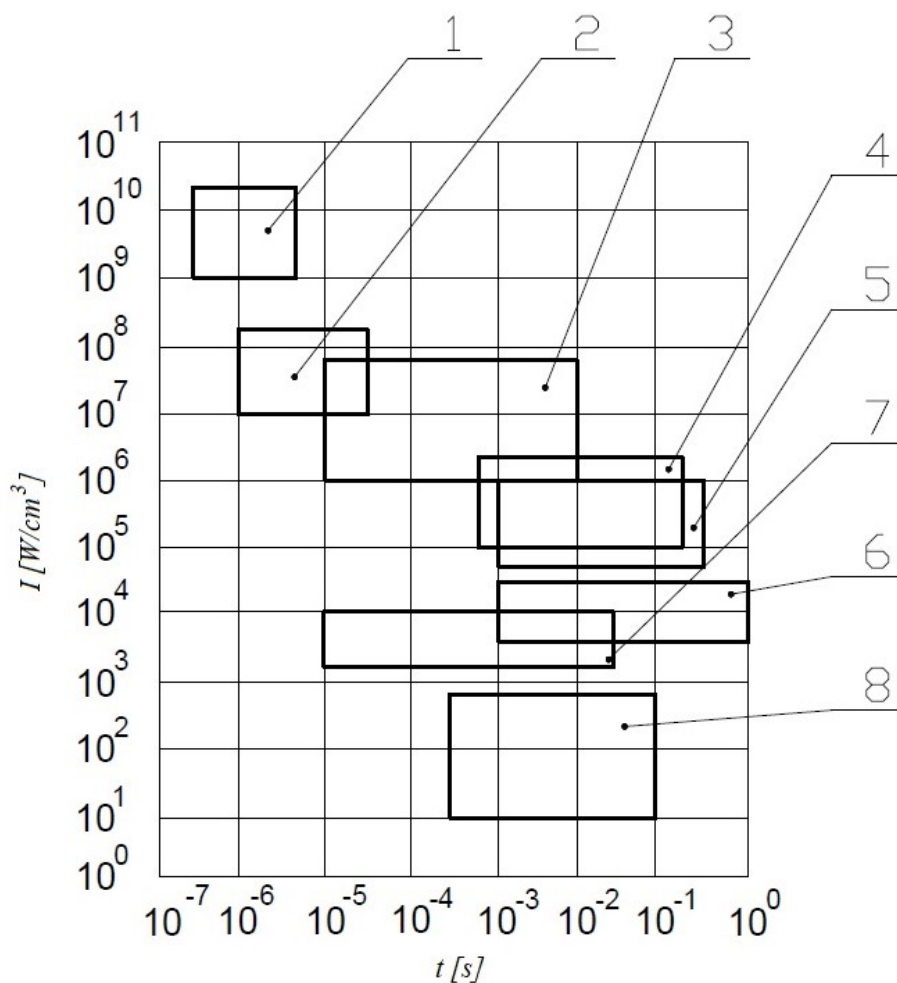
Teplu se pomocí chladicího média (nejčastěji vody) odvádí ze systému. Teplota v dutině nesmí překročit cca 400 °K, tudíž musí být chlazení dostatečně účinné. Vznik doutnavého výboje v laserové trubici zajišťuje nízký tlak plynu, který je udržovaný pomocí vývěvy. [1]



Obr. 3.1 Popis CO₂ laseru. [1]

4 VYUŽITÍ LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ

Mezi hlavní výhody laserů patří jejich široká oblast použití, jak z hlediska ekonomického, tak i technologických a ekologických charakteristik této metody. Na obr. 4.1 lze vidět využití laseru na odpaření (sublimaci) materiálu (1), nebo také na rytí, drážkování a popisování (2), na vrtání a děrování (3), na svařování (4), na povrchové natavování a legování (5), na kalení (6) na obrábění plastů (7), na polymeraci (8). Laserový paprsek je možné také využít ke kontrole a měření materiálů, na přenos informací, na zobrazování, holografii, osvětlování ve sdělovací technice a v neposlední řadě také hlavně jako řezný nástroj v medicíně.



Obr. 4.1 Využití laseru pro různá použití. [4]

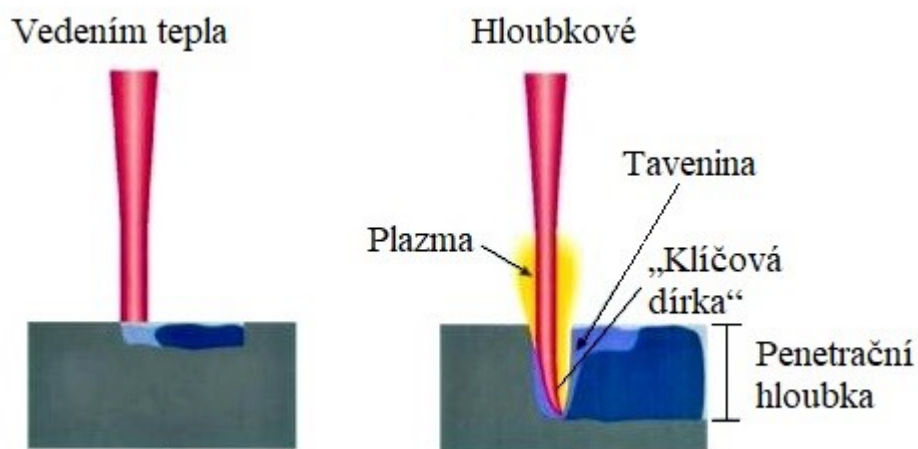
Laser má široké oblasti použití a má nezastupitelné místo ve výrobním procesu. Tomu nasvědčuje i to, že technologie zpracování materiálu laserem má svou normu DIN 8580.

[1]

4.1 Svařování pomocí laseru

Technologie svařování za pomoci laseru se dělí na:

- a) Vedením tepla – pomocí vedení se v materiálu šíří vzniklá tepelná energie. Svary vzniklé touto technologií jsou ploché a široké.
- b) Hlubkové – Paprsek proniká hluboko do materiálu po překročení určité intenzity přívodu tepla, materiál se roztaví a částečně odpaří. Svary dosahují velké hloubky a jsou úzké. [9]



Obr. 4.2 Metody svařování za pomoci laseru. [9]

Technologie svařování laserem přináší opět řadu výhod, ke kterým by jinou metodou nedošlo. Oproti dosud používané metodě MIG přináší výhody, jako jsou:

- dosažení vysoké rychlosti svařování
- nedochází k velkému tepelnému ovlivnění v místě svaru
- svařenec má malé délkové deformace
- lze provést svar i při přístupu pouze z jedné strany
- na jakost povrchu svařovaných součástí jsou malé nároky
- dosažení vysoké pevnosti svaru [9]

Pro svařování se používají Nd – YAG lasery, ale také plynné CO₂ a diodové lasery. Při svařování laserem se nevyužívá přídavného materiálu. Vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku pulzu laseru ve srovnání s dalšími aplikacemi. Svařovat lze materiály, které jsou svařitelné konvenčními metodami, včetně zlata, hliníku, titanu apod. [9]

4.2 Vrtání pomocí laseru

Tato metoda je založena na odebírání materiálu vlivem odpařování. Používá se pulzních laserů s délkou pulzu menší než 1ms, protože intenzita svazku musí být vyšší než u svařování. Platí zde pravidlo, že čím delší díra je, tím se více tvar díry odchyluje od geometrie (rozdělení energie) paprsku. Z toho vyplývá, že při použití krátké doby pulzu se dosáhne kvalitnější díry. Ovšem samotné snížení doby pulzu nestačí. Na stěně vrtané díry se vytvoří vrstva odtaveného materiálu. Vytvoření vrstvy odtaveného materiálu lze ovlivnit zvolením správné metody pro vrtání. Mezi tyto metody patří vrtání laserem jednotlivými pulzy, pulzy opakovanými, pohybem stopy po kružnici a tím dojde k vyřezání díry, vyřezávání díry při pohybu stopy po šroubovici nebo také laserovou erozí.

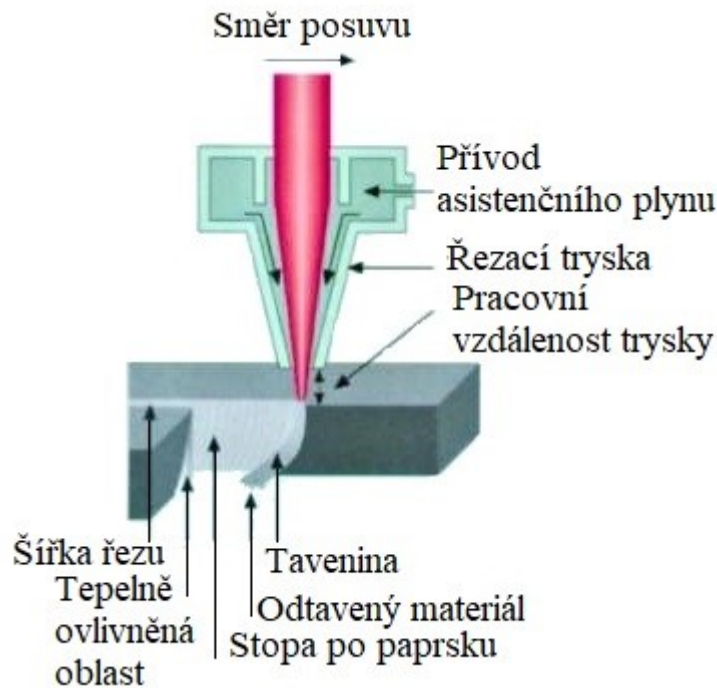
Této metody se využívá tehdy, když vytvoření díry pomocí jiné metody obtížné nebo nemožné. Lze vrtat díry kruhové i svarové. Vrtat lze do materiálů přírodních, jako je dřevo, ale také do plastů, kovů, keramiky apod. [9]

Pro vrtání se používání CO₂ lasery pro vyřezání tvarových i kruhových otvorů, také lasery Nd – YAG pro vrtání menších otvorů a lasery excimerové pro vrtání do keramiky. [9]

4.3 Řezání pomocí laseru

Princip řezání materiálu je zobrazen na obr. 4.3, na str. 27. Řezání materiálu může být provedeno některou z následujících metod:

1. Sublimační – v důsledku vysoké intenzity záření laseru v místě řezu je materiál odstraňován převážně odpařováním
2. Tavnou – materiál se v místě působení paprsku roztaví a je odfouknut asistenčním plynem. Touto metodou se řezou materiály nekovové jako je dřevo, plasty keramika, papír, sklo a textilie.
3. Pálením – materiál je v místě působení paprsku ohříván na zápalnou teplotu tak, že poté může za pomoci přiváděného reaktivního plynu shořet v exotermické reakci. Touto metodou lze řezat materiály jako je titan, korozivzdorné ocele a ocele s nízkým obsahem uhlíku.



Obr. 4.3 Princip řezání materiálu laserem. [9]

Tato metoda opět přináší řadu výhod, mezi které patří:

- malá šířka řezu a čistý řez
- složitost řezaných tvarů
- nedochází k opotřebení nástroje
- malá velikost tepelného ovlivnění materiálu

Nejvíce zastoupené lasery pro tuto technologii jsou lasery kontinuální plynné CO₂ pro řezání konstrukčních a korozivzdorných ocelí i slitin hliníku. Používají se také lasery Nd – YAG pro přesnější řezy s menší tloušťkou řezné spáry. [9]

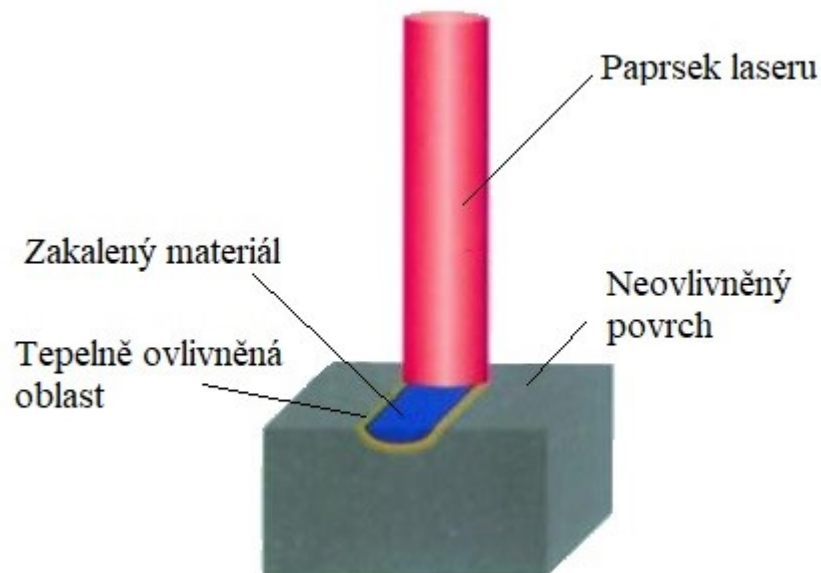
4.4 Tepelné zpracování za pomoci laseru

Podstatou této technologie je krátká doba ohřevu s malým objemem ohřátého materiálu. Princip této technologie je uveden na obr 4.4, na str. 28. Základem metody tepelného zpracování je:

- ohřev materiálu – pro žíhání, kalení a popouštění.
- tavení povrchu materiálu – zpevnění s natavením vlivem tepla a amortizace povrchu.
- odpařování materiálu – rázové zpevnění pracující na mechanismu vypařování.

Výhodou je způsob ohřevu, kdy je možné provádět tepelné zpracování i na místech, pro jiné technologie nepřístupných. Není nutné využívat chladící médium.

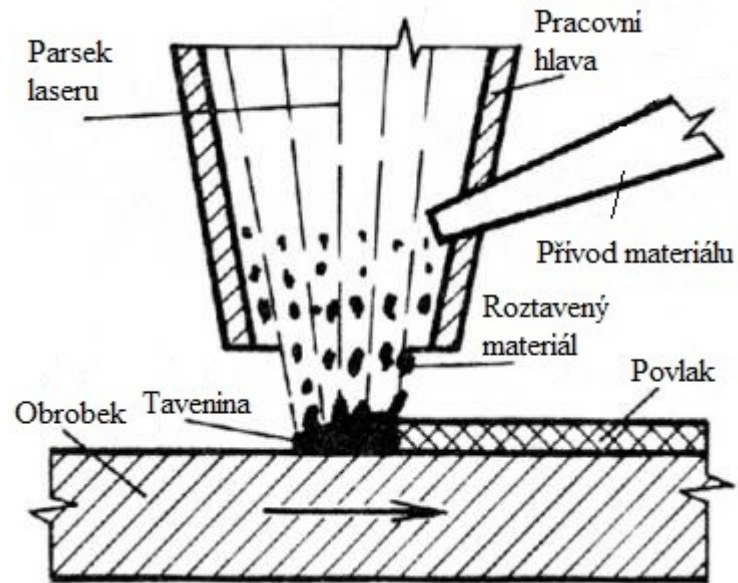
Zpravidla se používá pro kalení kontinuálních CO₂ laserů a také diodových laserů, které jsou vhodné vzhledem k rozdělení energie záření a tvaru emitovaného paprsku.



Obr. 4.4 Princip tepelného zpracování. [9]

4.5 Nanášení povlaků za pomoci laseru

Princip nanášení povlaku na obrobek je zobrazen na obr. 4.5, str. 29. Materiál, který je nanášen na povrch jako povlak, je přiváděn ve formě prášku nebo drátu do paprsku laseru. Zde dojde k roztavení a poté se nanese na povrch, kde ztuhne. Povlak je nanášen v páscech, kde se jednotlivé vrstvy vzájemně překrývají. Povlak lze vytvořit také reakcí nataveného materiálu s plynem, který je přiváděn do místa ohřevu, nebo také tak, že na povrchu obrobku je nanesený vhodný materiál, který je následně paprskem roztaven.



Obr. 4.5 Princip nanášení povlaku na obrobek. [9]

Povlak vytvořený touto technologií má dobrou přilnavost k povrchu obrobku a ne-vznikají na něm žádné trhliny. Nanášet jej lze na různé materiály, a to i na tvarově složité součásti. Pro nanášení se využívají plynné lasery CO_2 . [9]

5 LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ A POPISOVÁNÍ

Během posledních let se laserové popisování a gravírování stalo jednou z nejrozšířenějších aplikací jak v průmyslu, tak i také v oblasti reklamy, výroby reklamních i dárkových předmětů a v neposlední řadě také v umění. Oproti jiným technologiím laserové gravírování a popisování vyniká trvalostí vytvořeného nápisu, popřípadě grafického motivu, flexibilitou, nízkými provozními náklady a také rychlostí popisu. Také se označuje jako nekontaktní technologie. Využívá se této metody i z hlediska ekologického, kdy se nepoužívají žádné barviva či jiné škodlivé látky. Tímto způsobem mohou vznikat sériová čísla, čárové kódy, ale také vektorová grafika a rastrové obrázky. Popisování a gravírování je založeno na modifikaci povrchu materiálu působením paprsku laseru buď formou chemické reakce, kdy se změní barva povrchu (dřevo, kovy, speciální plasty), nebo odstraněním tenké vrstvy materiálu z povrchu obrobku jeho vypařením či ablací. [10]

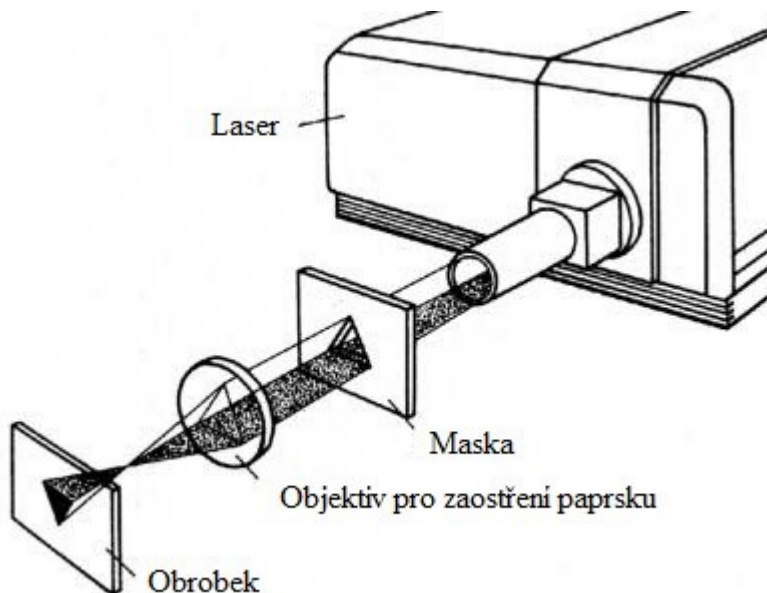
5.1 Laserové popisování

Popisování laserem je založeno, jak už je více zmíněno na místním odpaření materiálu nebo změně barvy na povrchu. Na povrchu obrobku je laserem vytvořený povrch s vysokou přesností, je stálý, mechanicky odolný, kontrastní a nenapodobitelný. Výška vytvořeného znaku obvykle dosahuje zlomů až jednotek milimetrů a odpařená tloušťka materiálu je v řádech mikrometrů. [9]

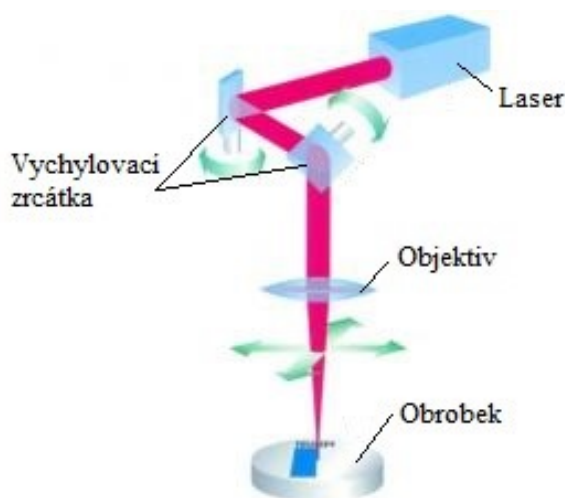
Existují dvě metody pro vytvoření popisu laserem:

- a. Popis pomocí masky – v masce je vyříznut celý text popisu, paprsek laseru najednou nebo po řádcích osvítí masku a tím se celý text přenesení na povrch obrobku. Místa, které maska zakrývá, zůstanou nepopsána. Výhody této metody jsou jednoduchý systém popisu, poměrně malé náklady a vysoká popisová rychlost. Ovšem tato metoda přináší i nevýhody jako je malé popisové pole, horší kvalita povrchu, malá flexibilita a náklady na vytvoření masky. Tato metoda se využívá především pro velké série popisování. Tato metoda je popsána na obr. 5.1, str. 31.
- b. Popis vychylováním paprsku laseru – zde dochází k vychylování paprsku dvěma vzájemně kolmými zrcadly, která jsou řízeny počítačem. Paprsek může být přenesen pomocí vláknové optiky, což umožňuje popisování i na špatně dostupných místech. U této metody dochází k vytvoření popisu dokonale čitelného s dobrým kontrastem. Tento způsob také přináší vysokou kvalitu popisu. Hlavní výhodou té-

to metody je vysoká operativnost a rychlost změny psaného textu, protože dochází pouze ke změně řídicího programu v počítači. Tato metoda je zobrazena na obr. 5.2. [9]



Obr. 5.1 Popisování pomocí masky. [9]



Obr. 5.2 Popisování vychylováním paprsku laseru. [9]

Pro popisování pomocí materiálu se používají lasery plynné CO₂, Nd – YAG. A pro popisování pomocí masky ještě také lasery excimerové. [9]

Laserem je možné popisovat rovinné, válcové i jinak zakřivené plochy různých materiálů, jak kalené, tak i nekalené oceli a litiny, titanu, mosazi, hliníku a jeho slitin, bronzu, slinutého karbidu, zlata, drahých kamenů, keramiky, plastů, skla, gumy apod. Popisovaný

povrch může být lakovaný, pískovaný, broušený, černý, opatřený povlakem apod. Příklad použití popisování je na obr. 5.3. [9]



Obr. 5.3 Příklady použití popisování pomocí laseru. [9]

5.2 Laserové gravírování

Při změně parametrů laseru lze přecházet spojitě od popisu povrchu obrobku do malé hloubky až po gravírování laserem do hloubky větší. Tato technologie se uplatňuje při tvorbě jednoduchých i velmi složitých obrazců především do keramických materiálů, kalených ocelí, dřeva, gumy apod. Příklad použití je k vidění na obr. 5.4. Základem gravírování do dřeva je shoření materiálu v místě, kde působí paprsek laseru.

U gravírování do keramických a kovových materiálů se využívají hlavně lasery Nd – YAG, pro gravírování do gumy a dřeva jsou nejvhodnější lasery plynné CO₂. [9]



Obr. 5.4 Příklad použití gravírování laserem do dřeva. [11]

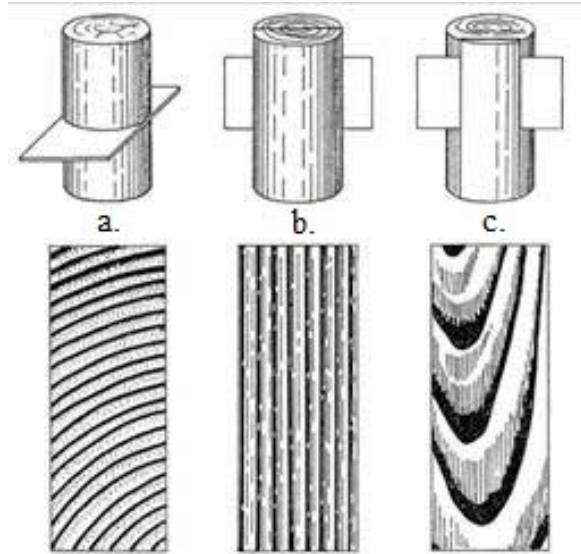
6 DŘEVO

Dřevo je velmi populární materiál, který se používá v různých odvětvích, především díky své proměnlivosti. Vhodný materiál pro laserové gravírování a řezání je ten, jehož dřevěná struktura je homogennější. Tato technologie je ovlivněna několika vlastnostmi dřeva, a to především jeho vlhkostí, obsahem olejů a pryskyřic, hustotou apod. Během zpracování dřeva se může na řezné hraně objevit lehká nebo i výrazná oxidace, která se projeví jako zčernání, kterému v podstatě nejde zabránit. Vhodnou volbou typu dřeva lze oxidaci řezné hrany zmírnit. Čím je dřevo sušší a čím má nižší obsah pryskyřic, tím je řezná hrana světlejší. [12]

6.1 Struktura dřeva

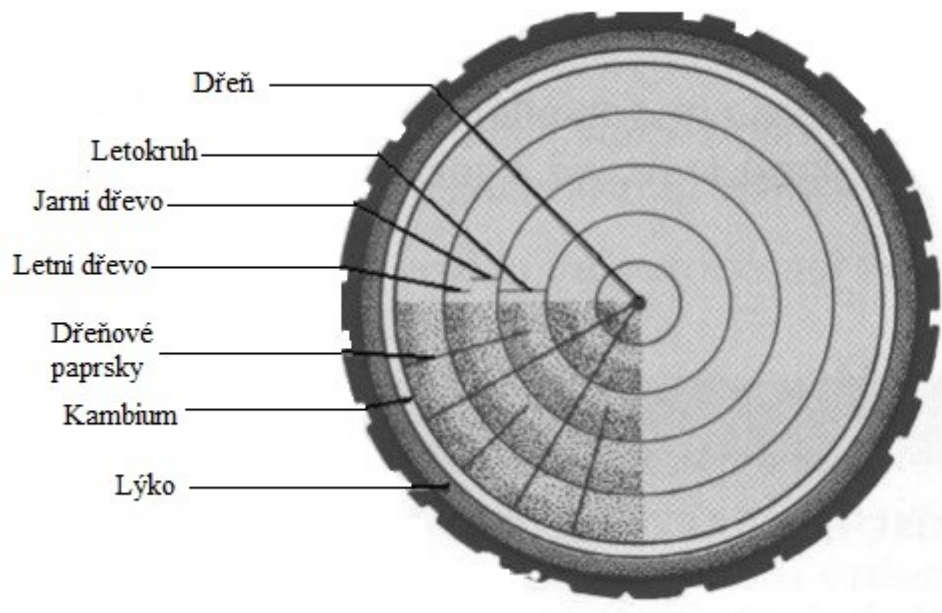
Ke vzniku dřeva dochází činností kambia, což jsou malé vrstvičky živých buněk, které se nacházejí mezi dřevem a kůrou. V průběhu růstu se tyto buňky dělí a vytvářejí na vnější straně kambia kůru a na vnitřní buňky dřeva. Dřevo přirůstá mnohem rychleji, protože se buňky ve směru dřeva dělí rychleji. S tloušťkou stromu roste i jeho výška. Kambium pracuje tak, že před zimou svou činnost zastaví a na jaře zase začne pracovat, tím vznikají letokruhy. Na jaře se tvoří světlejší část letokruhů a v létě vzniká vnější tvrdší a tmavší část. Během jednoho roku vznikne jeden letokruh. Pomocí příčného řezu je možné určit věk části kmene, kterou byl řez proveden. Stavba dřeva se hodnotí podle makroskopických znaků, které jsou pozorovatelné pouhým okem, nebo podle znaků mikroskopických, je možné pozorovat pouze pomocí mikroskopu. Pro zhodnocení stavby dřeva pomocí makroskopických znaků se používají tři základní řezy:

- a. Řez příčný – vedený kolmo k podélné ose kmene.
- b. Řez podélný poloměrový – vedený podélnou osou kmene, kolmo na příčný řez.
- c. Řez podélný tečnový – vedený rovnoběžně s podélnou osou kmene ve směru tečny k některému letokruhu. [13]



Obr. 6.1 Řezy dřevem. [14]

Na příčném řezu zobrazeném na obr. 6.2 lze pozorovat nejvíce makroskopických znaků. Uprostřed kmene se nachází dřev. V ideálním případě by se nacházela v jeho geometrickém středu, ovšem skutečně je většinou posunuta mimo geometrický střed. Dřeňové paprsky lze vidět jak na příčném řezu jako lesklé čáry, které vyběhají z dřevě ke kůře, tak i v podélném řezu. [13]



Obr. 6.2 Příčný řez kmenem. [13]

6.2 Fyzikální vlastnosti dřeva

Jako fyzikální vlastnosti jsou označovány ty vlastnosti, které lze zkoumat bez narušení chemického složení a celistvosti materiálu. Mezi tyto vlastnosti patří barva a kresba dřeva, vůně, lesk, vlhkost, hustota, zvukové, tepelné a elektrické vlastnosti dřeva. Fyzikální vlastnosti nejvíce ovlivňují chování budoucího výrobku a rozhodování při vhodné volbě materiálu. [16]

Barva

Barva dřeva patří k nejvýznamnějším znakům. O skutečné barvě dřeva lze hovořit jen tehdy, nejedná-li se o příliš staré dřevo. Během stárnutí dřevo tmavne působením světla a vzduchu. Každé dřevo má svou vlastní barvu následkem ukládání barviv do buněk. Také podle zbarvení lze odhalit napadené dřevo, např. zamodráná u borovice. [15]

Kresba

Kresba (textura) má značný význam z hlediska využití dřeva. Lze dosáhnout plochy s viditelnými zrcátky nebo fládovou kresbou podle vedení řezu. U růstových vad nebo při výskytu zvláštností lze získat pyramidální, rýglovanou nebo kořenicovou texturu. Kresbu také může oživit přítomnost zdravých suků. [15]

Vlhkost dřeva

Vlhkost je z hlediska použitelnosti rozhodující vlastností. Ovlivňuje to, jestli rozměry a tvar výrobku zůstanou beze změny nebo dojde ke zmenšení či zvětšení. Dřevo je hygroskopický materiál, dokáže, jak vydávat, tak přijímat vodu ze svého okolí. Suché dřevo z vlhčího prostředí přijímá a vlhké dřevo suššímu prostředí vodu odevzdává. To trvá tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání vlhkosti dřeva, relativní vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu. Tento stav rovnovážné vlhkosti je považován za ideální a dosažitelný jen velmi zřídka. [16][15]

Sesychání a bobtnání dřeva

K odpařování vody uložené v buněčné stěně dochází pomaleji. Tím dochází ke zmenšování objemu dřeva, tedy dřevo sesychá. Pokud v této fázi pod bodem nasycení vláken opět dřevo začne vodu přijímat, tak se voda začne ukládat do buněčných stěn a tím dojde k zvětšení objemu (bobtnání). Jakmile dojde k nasycení vláken, začne se další přijímaná voda ukládat do vnitrobuněčných prostor. Proto dále nedochází ke změnám objemu dřeva. [15]

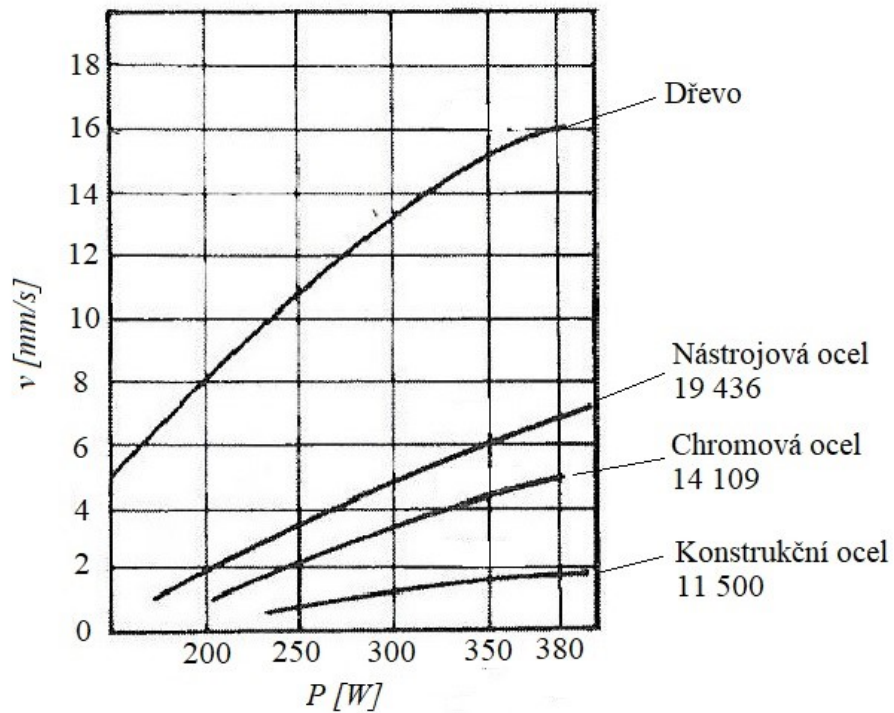
6.3 Druhy dřeva

Dřevo lze rozlišovat podle tvrdosti. Tvrdostí dřeva se rozumí odolnost povrchu vůči poškození nehtem, klíčem, dlátem, pilou, kuličkovým perem atd.). Podle tvrdosti se tedy dřevo dělí na:

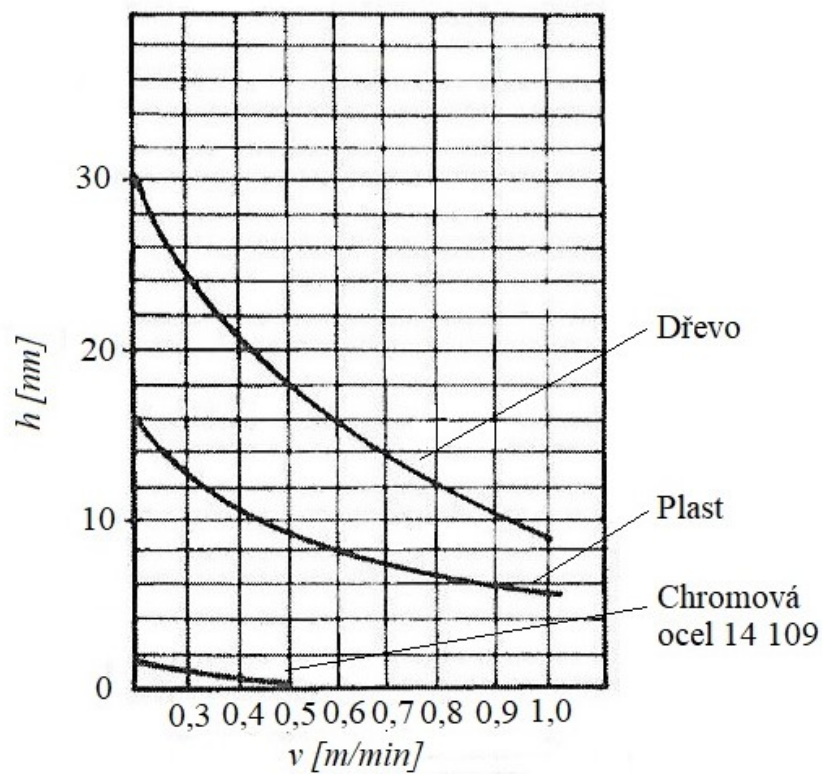
- velmi měkké (smrk, lípa, jedle, topol, vrba, borovice)
- měkké (douglaska, vrba jíva, olše, modřín)
- středně tvrdé (platan, jilm, líska, kaštan)
- tvrdé (buk, dub, habr, jasan, javor, třešeň, akát)
- velmi tvrdé (dřín, dub pýřitý, zimostráz)
- neobyčejně tvrdé (eben a jiné exotické dřeviny) [17][18]

6.4 Parametry řezání dřeva

Dřevo je specifický materiál, který se svými vlastnostmi liší od jiných materiálů. A také jak dokazují obr. 6.3 a 6.4, str. 37, tak i vlastnostmi rezného procesu. Dle závislosti rychlosti rezného procesu na výkonu laseru (obr. 6.3, str. 37) lze vidět u porovnání dřeva, nástrojové, chromové a konstrukční oceli, že dřevo dosahuje značně větší rychlosti řezání oproti ostatním materiálům. V následujícím zobrazení závislosti hloubky řezu na rychlosti rezného procesu u dřeva, plastu a chromové oceli při výkonu laseru $P=380$ W (obr 6.4, str. 37), lze pozorovat, že dřevo je možné, díky jeho vlastnostem, řezat do větší hloubky než ostatní materiály.



Obr. 6.3 Závislost hloubky řezu laseru na jeho výkonu. [4]



Obr. 6.4 Závislosti hloubky řezu na řezné rychlosti. [4]

Dosažení požadovaných vlastností vygravírovaného povrchu dřeva vlivem navržení optimálních pracovních podmínek laseru je řešeno v následující části.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRÁCE

V práci je zkoumáno, jakých povrchů lze dosáhnout při konkrétních pracovních podmínkách laserového zařízení ILS-3NM, dosažených rastrovým gravírováním nebo vektorovým řezáním. Na základě získaných informací je vytvořen motiv na obrobek rotačního tvaru pomocí rotační osy. Cíle jsou:

- popis metodiky práce pomocí laserového zařízení ILS-3NM
- příprava vzorků pro gravírování přírodního materiálu
- příprava vzorků pro řezání přírodního materiálu
- měření připravených vzorků
- návrh optimálních pracovních podmínek pro obrábění rotačního obrobku pomocí rotační osy

8 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro porovnání, jaký vliv mají různé řezné parametry laseru na obrobený povrch, a jak se bude povrch měnit v závislosti na změně těchto parametrů, byly připraveny vzorky pomocí laserové tiskárny ILS 3-NM, která je kompatibilní se softwarem Corel Draw.

8.1 Popis laserového zařízení ILS 3 - NM

Jedná se o uživatelsky přívětivé i cenově dostupné zařízení, které je schopné přenášet grafiku jako je obrázek, logo nebo text na příslušný povrch materiálu. Laserové zařízení 3-NM se využívá především pro gravírování do materiálů, jako je dřevo, PMMA, sklo, pryž, kůže, mramor, tkaniny, plastové fólie, vrstvené plasty, povlakované a eloxované kovy. Zhotovují se jím trofeje, dárkové předměty, kartony, architektonické modely, psací potřeby, pečeti.

Vnější rozměry laseru jsou šířka 970 mm, výška 865 mm a hloubka 990 mm, avšak výrobky jsou omezené velikostí pracovní plochy, která má šířku 660 mm, výšku 495 mm a hloubku 210 mm. Lze tedy použít maximální velikost obrobku o těchto rozměrech. Jako zdroj záření využívá zařízení CO₂. Pro odsávání se využívá potrubí připojeného na venkovní dmychadlo.

Maximální výkon laseru je 100 W a nastavuje se digitálně a to od 0–100 % s automatickým proporcionálním pulsním a barevným napájením. Řezná rychlost může dosahovat maximálně 1524 mm/s pro gravírování. Laser pracuje v rozlišení *DPI* 1000, *DPI* 500, *DPI* 333, *DPI* 250, *DPI* 200, *DPI* 166. Záleží na požadované kvalitě povrchu. Zařízení využívá provozní režimy vektorového řezání, rastrového gravírování a bodového vrtání.

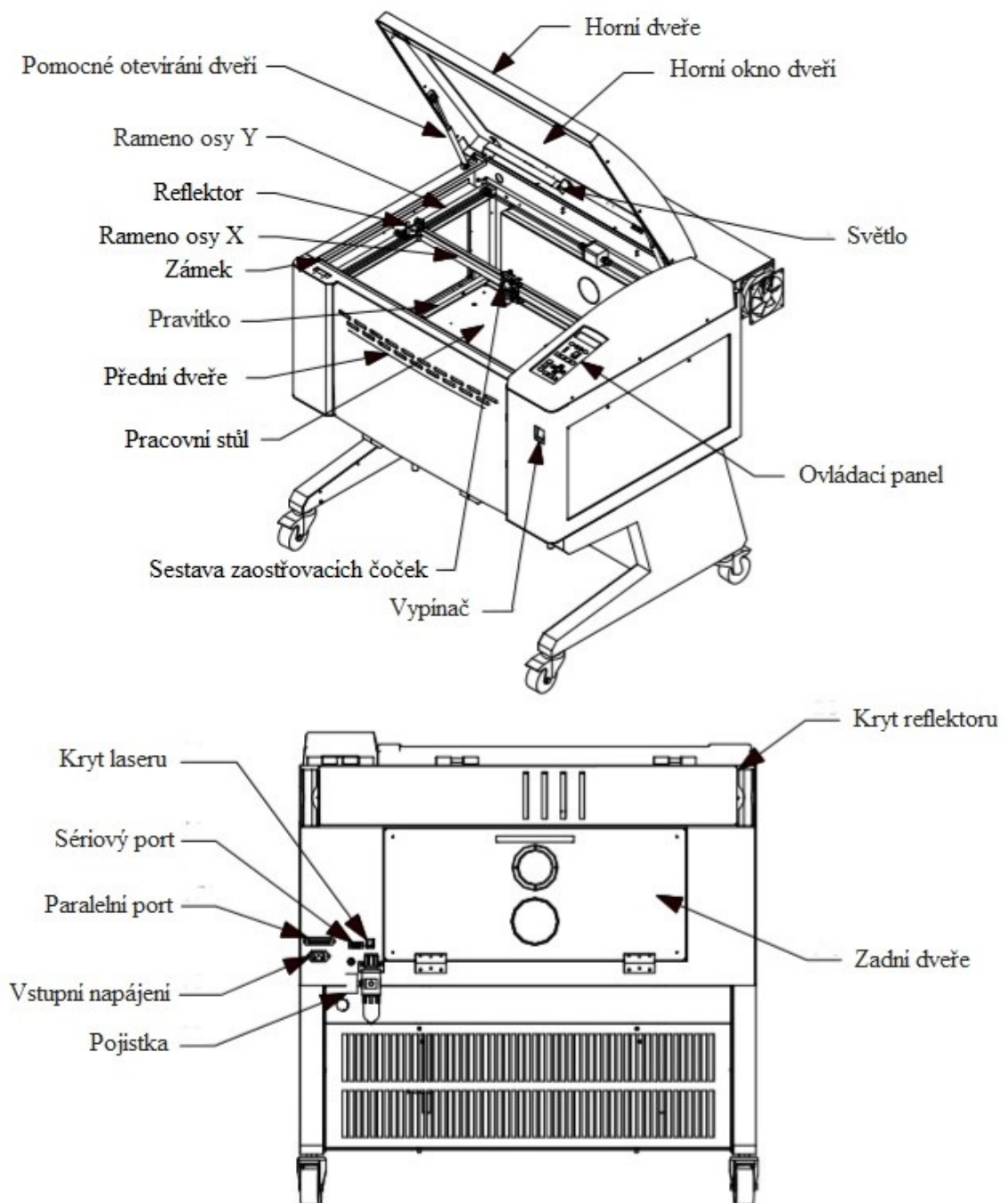
Na zařízení se nachází displej, který informuje o názvu aktuálního souboru, výkonu, řezné rychlosti, času práce, počtu načtených souborů do paměti a nastavení. Velikost paměti je 64 MB tedy cca 99 souborů. Pro připojení k PC se využívá paralelního portu, USB nebo LAN. Stejně jako u laserové tiskárny. Laserové zařízení ILS 3-NM plní bezpečnostní třídu 1.

Všechny tyto parametry jsou zaznamenány v tabulce (tab. 8.1, str. 41).

Tab. 8.1 Parametry laseru.

Model laseru	ILS-III-NM-100
Zdroj laseru	100 Watt, chlazení vzduchem, CO ₂ laser
Požadavek napájení	110/220 VAC, 20/10 A, 50/60 Hz
Řízení výkonu	Digitální řízení výkonu od 0–100 % s automatickým proporcionálním pulsním a barevným napájením
Maximální rychlost	1524 mm/s (60"/s) pro gravírování
Rozlišení	DPI 1000, DPI 500, DPI 333, DPI 250, DPI 200, DPI 166
Pracovní plocha	Šířka 660 mm, výška 495 mm
Nastavení osy Z	Nastavení až do výšky 210 mm (8,26")
Maximální velikost obrobku	Šířka 660 mm, výška 495 mm, hloubka 200 mm
Paměť	64 MB / do 99 souborů
Display	LCD display zobrazující název aktuálního souboru, výkon laseru, rychlost rastru nebo vektoru, čas chodu, počet souborů načtených do paměti, nastavení a menu.
Počítačové rozhraní	Paralelní port, ethernetový port (LAN, MAN)
Software	Kompatibilní s většinou softwaru Windows, CAD.
Provozní režimy	Vektorové řezání, rastrové gravírování a bodové vrtání.
Hmotnost	175,5/180/200/202,75/230 kg
Vnější rozměry	Šířka 970 mm, výška 865 mm, hloubka 990 mm
Bezpečnostní třída	CDRH třída 1
Odsávání	Venkovní dmychadlo a potrubí.

Pro podrobný popis laseru využijeme následujícího obrázku (obr. 8.1, str. 42).



Obr. 8.1 Popis laserového zařízení ILS 3-NM.

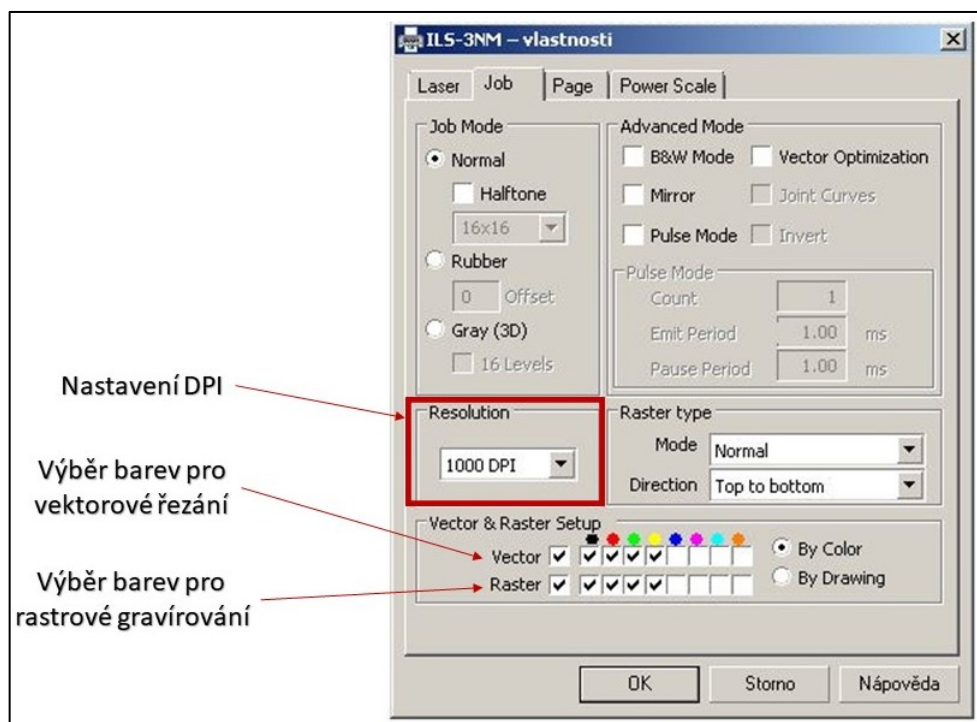
8.2 Zhotovení vzorků

Materiál jsem zvolil bukové dřevo, ze kterého je vyrobený i konečný výrobek. Vzorky jsem nejprve vytvořil v programu Corel Draw. Pro vzorky jsem zvolil tvar čtverců o rozměrech 15x15 mm (obr. 8.2, str. 43), kvůli snadnějšímu měření vzorků tohoto tvaru.



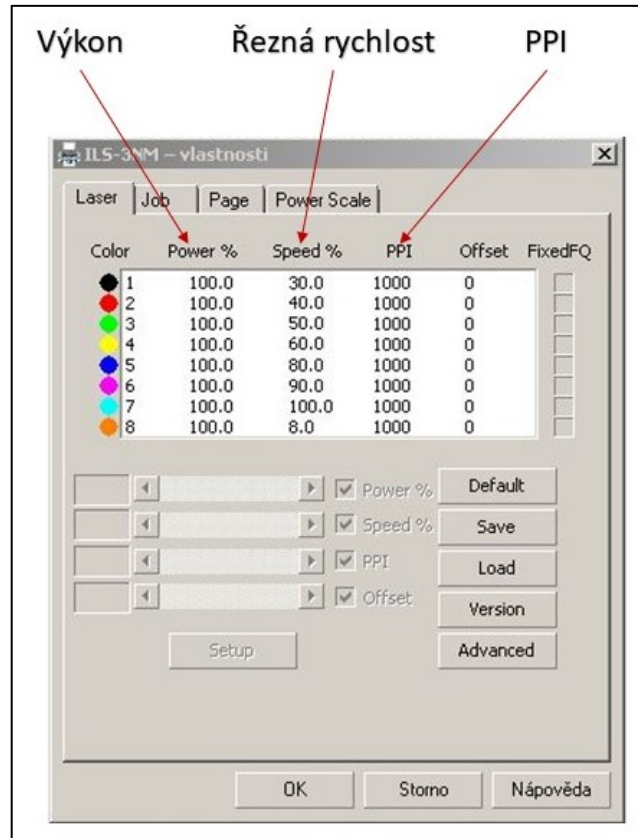
Obr. 8.2 Vzorky vytvořené v programu Corel Draw.

Laserové zařízení podporuje osm barev, a to černou, červenou, zelenou, žlutou, modrou, purpurovou, tyrkysovou a oranžovou základních barev z palety RGB (obr. 8.3).



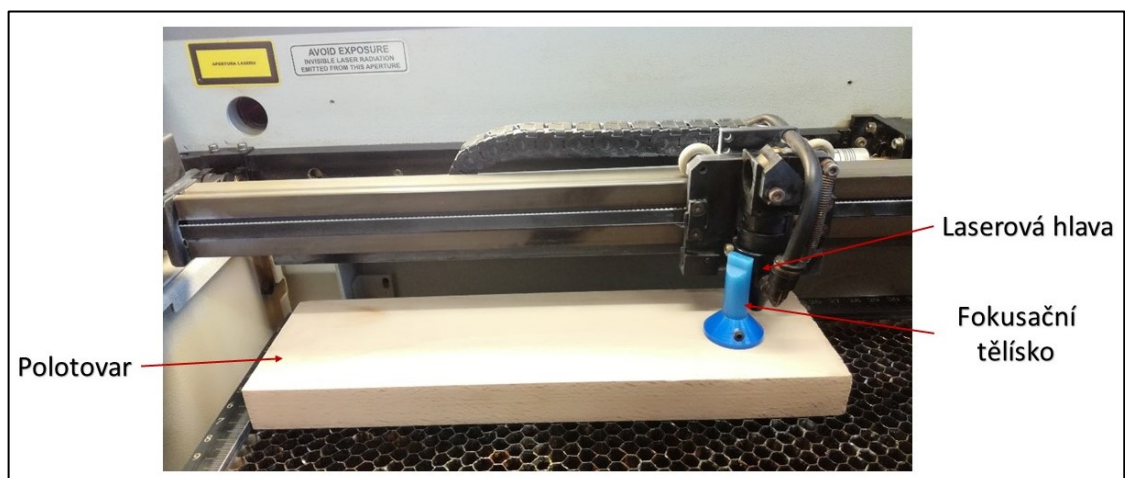
Obr. 8.3 Výběr barev pro gravírování a řezání.

Pro každou z barev můžeme nastavit odlišné hodnoty výkonu, řezné rychlosti a *PPI* (obr. 8.4, str. 44). Hodnota výkonu se zadává v procentech maximálního výkonu (100 W). Řezná rychlost se zadává opět v procentech z maximální řezné rychlosti (1524 mm/s). K vytvoření vzorků jsem využíval změny parametrů laseru, a to výkonu, řezné rychlosti a hodnot *DPI*.



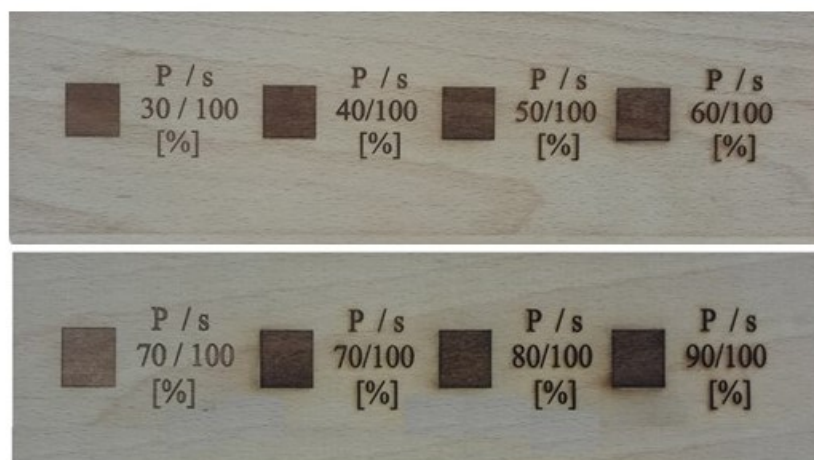
Obr. 8.4 Nastavení pracovních podmínek.

Po přípravě vzorků v programu Corel Draw jsem umístil polotovár na pracovní stůl a provedl jsem auto-fokusaci. Pomocí fokusačního tělíška jsem zkontroloval, jestli byla správně nastavena ohnisková vzdálenost (obr. 8.5). Po ověření správného nastavení jsem laser vrátil do výchozí referenční polohy.



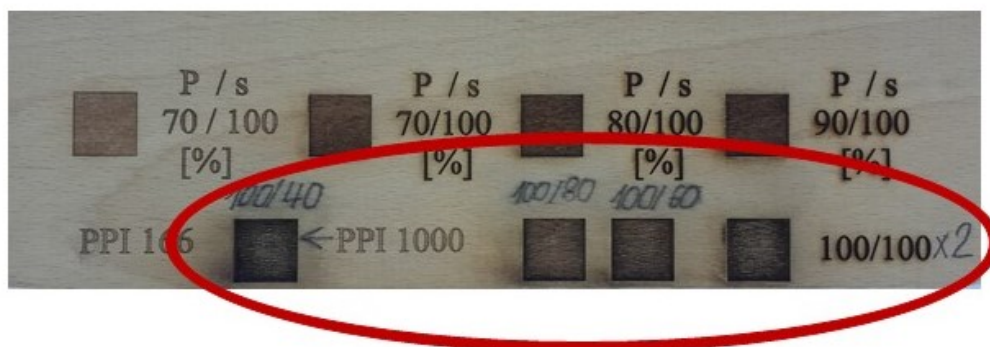
Obr. 8.5 Kontrola nastavení ohniskové vzdálenosti.

Nejprve jsem měnil výkon od 30 % (30 W) až do 100 % (100 W) po 10 % (10 W) při konstantní řezné rychlosti 100 % (1524 mm/s) (obr. 8.6).



Obr. 8.6 Vzorky vytvořené při změně výkonu laseru.

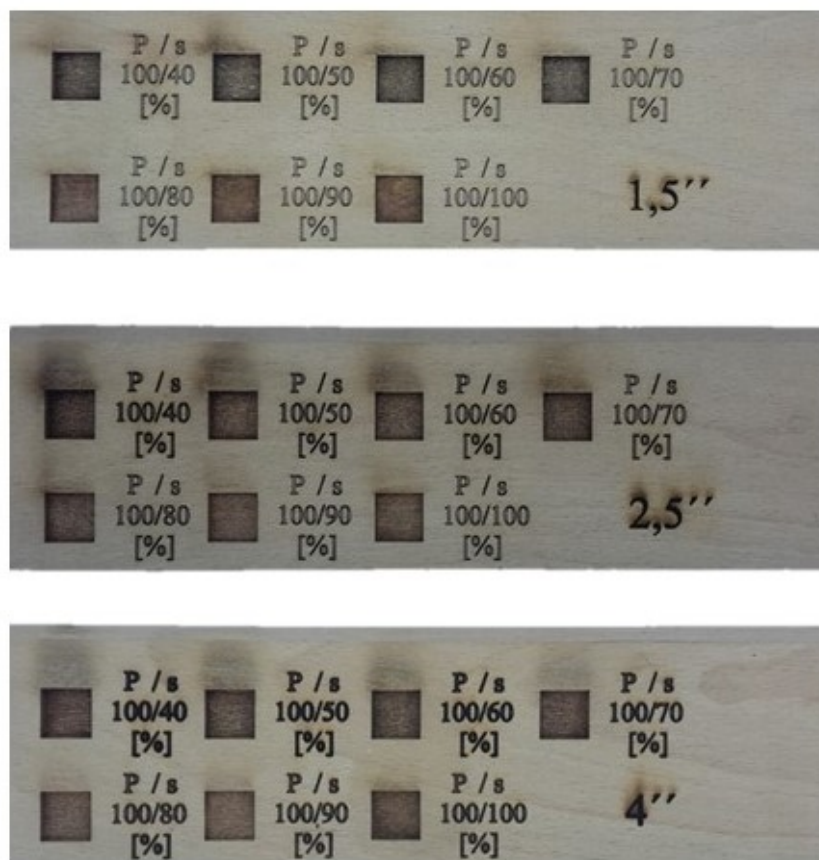
Následně jsem ponechal maximální výkon laseru (100 W) a snižoval řeznou rychlost od 100 % (1524 mm/s) až na 40 % (609,6 mm/s) po 20 % (304,8 mm/s), kdy dřevo začínalo být ohořelé (obr. 8.7). Na základě toho jsem se rozhodl, že už dále řeznou rychlost snižovat nebudu, aby nedošlo ke vznícení vzorku.



Obr. 8.7 Vzorky vytvořené při konstantním výkonu a změně řezné rychlosti.

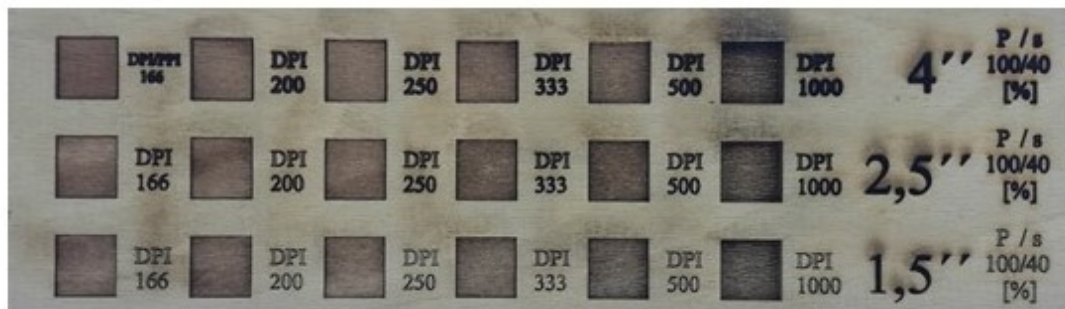
Pro vytvoření vzorků jsem měl k dispozici čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5'', 2,5'' a 4''. Pro porovnání vygravírovaných ploch, vytvořených čočkami s různou ohniskovou vzdáleností jsem připravil vzorky, kdy jsem při maximálním výkonu (100 W) zvyšoval řeznou rychlost od 40 % (609,6 mm/s) do 100 % (1524 mm/s) po 10 % (152,4 mm/s) (obr. 8.8, str. 46). Na hodnotě řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s) jsem začínal kvůli ohoření u předchozích vzorků, kdy jsem tuto hodnotu vyhodnotil jako mezní. Vzorky jsem připravil

nejprve pro čočku s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a poté pro čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5'' a 4''.



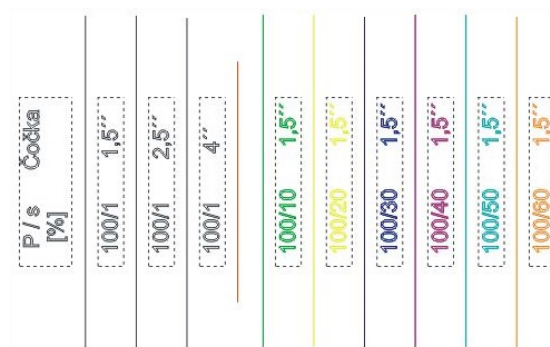
Obr. 8.8 Vzorky vytvořené při změně řezné rychlosti.

Na laserovém zařízení lze měnit kromě výkonu a řezné rychlosti i hodnoty *DPI* (počet pixelů na palec). Za účelem porovnání, jak se změna tohoto parametru projeví na vygravírované ploše, jsem připravil další vzorky (obr. 8.9, str. 47). Výkon laseru jsem zvolil 100 % (100 W) a řeznou rychlost 40 % (609,6 mm/s), za předpokladu, že při těchto hodnotách se změna *DPI* nejvíce projeví. Hodnoty *DPI* jsem volil 166, 200, 250, 333, 500, 1000. Jiné hodnoty použité zařízení neumožňuje.



Obr. 8.9 Vzorky vytvořené při změně hodnot DPI.

Laserové zařízení ILS 3-NM využívá rastrového gravírování nebo vektorového řezání. Všechny vzorky, které jsem do této chvíle vytvořil, byly zhotoveny rastrovým gravírováním. Abych mohl porovnat, jak se bude chovat laserový parsek u vektorového řezání při změně výkonu, řezné rychlosti laseru a změně ohniskové vzdálenosti čočky, tak jsem připravil další vzorky, opět do bukového dřeva. Pro vektorové řezání jsem nemohl použít stejný tvar vzorků, jako pro rastrové gravírování. Vytvořil jsem tedy vzorky pomocí úsečky o délce 66 mm (obr. 8.10).



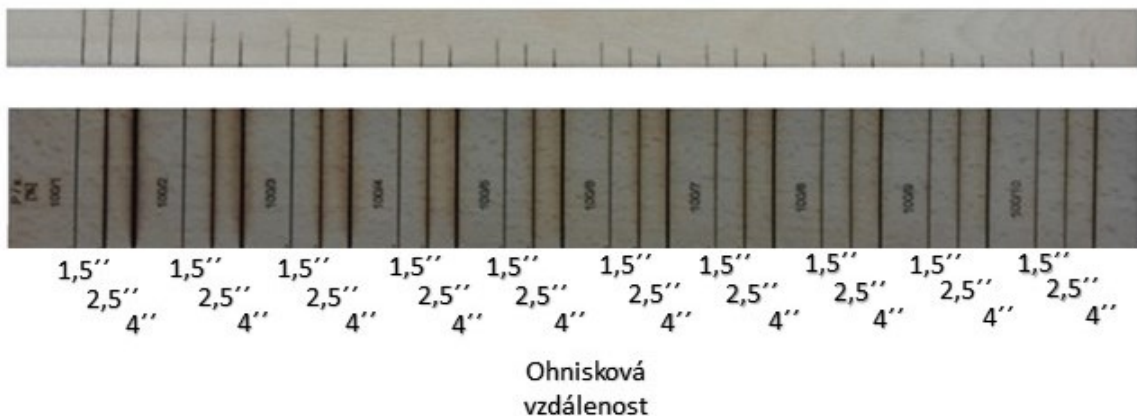
Obr. 8.10 Vzorky pro porovnání řezů.

Vzhledem k tomu, že bukové dřevo je tvrdé, jsem nejprve otestoval, zda bude vzorek proříznut. Pro vzorek o tloušťce 20 mm jsem zvolil maximální výkon (100 W) a minimální řeznou rychlost 1 % (15,24 mm/s). Proříznutí vzorku jsem dosáhl pouze při ohniskové vzdálenosti 1,5'' a 2,5''. Při stejných hodnotách výkonu a řezné rychlosti, ale ohniskové vzdálenosti 4'', už k proříznutí nedošlo. Následně jsem zvýšil řeznou rychlost na 10 % (152,4 mm/s) a postupně ji zvyšoval po 10 % (152,4 mm/s) až na 100 % (1524 mm/s) (obr. 8.11, str. 48), abych mohl porovnat, jak se budou se změnou řezné rychlosti měnit vlastnosti jednotlivých řezů. Řezy jsem provedl při ohniskové vzdálenosti 1,5'' a poté při vzdálenosti 2,5'' a 4''.



Obr. 8.11 Vzorky řezů vytvořené při změně rezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti.

U předchozích vzorků jsem mohl zkoumat pouze šířky jednotlivých řezů. Další důležitou vlastností řezu je jeho hloubka. Pro určení hloubky řezů, jsem připravil další vzorky, u kterých jsem provedl řez pomocí kotoučové pily kolmo k řezům vytvořených laserovým zařízením. Pro vzorky k měření hloubky řezů jsem zvolil maximální výkon (100 W) a reznou rychlost 1-10 [%], což představuje hodnoty 15,24; 30,48; 45,72; 60,96; 76,2; 91,44; 106,68; 121,92; 137,16; 152,4 [mm/s]. Vzorky jsem opět vytvořil při ohniskové vzdálenosti 1,5'', 2,5'' a 4'' (obr. 8.12).



Obr. 8.12 Vzorky pro měření hloubky řezů.

9 MĚŘENÍ HLOUBKY VYGRAVÍROVANÝCH VZORKŮ

Měření hloubky jednotlivých vzorků jsem provedl abych určil, jak se hloubky mění při různých parametrech pracovních podmínek, a zda došlo opracováním se změnou ohniskové vzdálenosti ke změně hloubky.

9.1 Popis lineárního výškoměru LH-600E/EG

Měření bylo provedeno na lineárním výškoměru LH-600E/EG (obr. 9.1). Toto zařízení se používá pro měření výšky předmětů vzhledem k referenční rovině, průměru kruhu, šířky, vzdálenosti nebo úhlů pomocí měřících postupů a výpočtů. Technické parametry tohoto zařízení jsou uvedeny v tabulce (tab. 9.1, str. 50).



Obr. 9.1 Lineární výškoměr LH-600E/EG.

Tab. 9.1 Technické parametry lineárního výškoměru LH-600E/EG.

Rozsah měření	0-972 mm
Rozsah posuvu	600 mm
Přesnost	(1,1+0,6L/600) μm
Kolmost	5 μm (po kompenzaci)
Přímmost	4 μm (mechanická)
Podporované jazyky	Angličtina, Němčina, Francouzština, Španělština, Italština, Holandština, Portugalština, Švédština, Turečtina, Čeština, Maďarština, Slovinština, Polština, Tradiční čínština, Japonština
Pohon doteku	Manuální/motorický (5-40 mm/s, 7 stupňů)
Metoda pohybu	Vestavěný kompresor
Kompenzační metoda	Protiváha
Počet uložených programů	Max. 50 programů
Počet uložených hodnot	Max. 60000
Měřicí síla	1 N
Číslicový krok	0,0001; 0,001; 0,01; 0,1 mm
Displej	Grafický LCD 320x240 bodů (s podsvětlením)

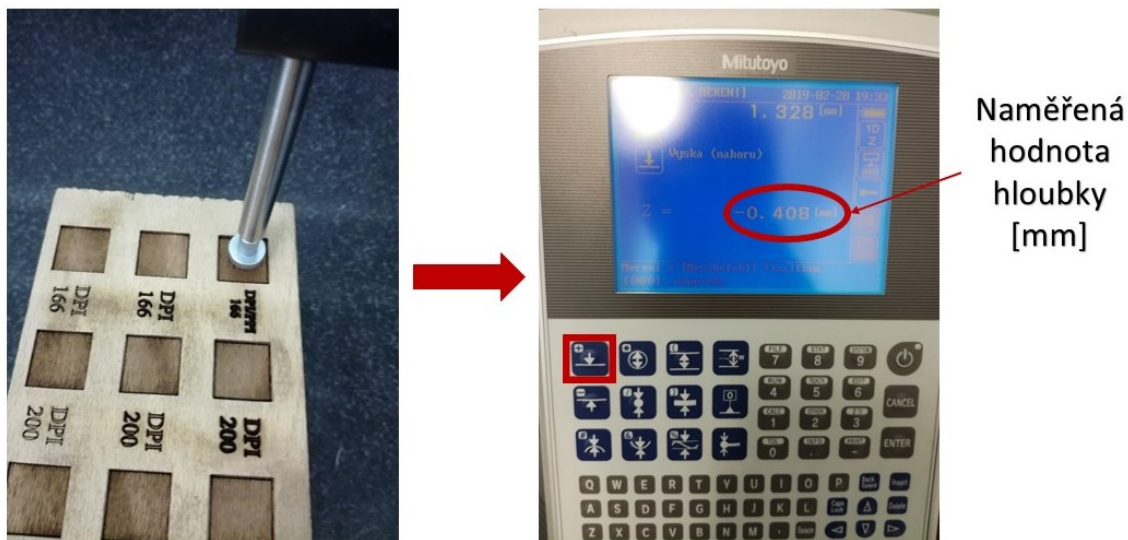
9.1.1 Postup měření

Pro měření na lineárním výškoměru LH-600E/EG lze využít několik typů měřících doteků, v tomto případě jsem použil talířkový dotek o $\varnothing 10$ mm. Dřevo je materiál s velmi členitým povrchem, a proto nebylo možno použít jednoho nulového bodu. Pro každý vzorek bylo nutné nastavit vlastní nulový bod, který jsem umístil vždy v pravém horním rohu měřeného vzorku (obr. 9.2).



Obr. 9.2 Postup nastavení nulového bodu.

Po nastavení nulového bodu jsem dotek výškoměru přemístil nad střed měřeného vzorku a provedl jsem měření jeho hloubky (obr. 9.3). Měření jsem kvůli nerovnostem vygravírované plochy vzorků provedl patnáctkrát pro každý vzorek. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách P I-VII.



Obr. 9.3 Postup měření hloubky daného vzorku.

9.2 Naměřené hloubky vygravírovaných vzorků

Naměřené hodnoty jsou uvedeny jako aritmetický průměr naměřených hloubek h daného vzorku a směrodatná odchylka (S), která se vypočítá ze vzorce (9.1).

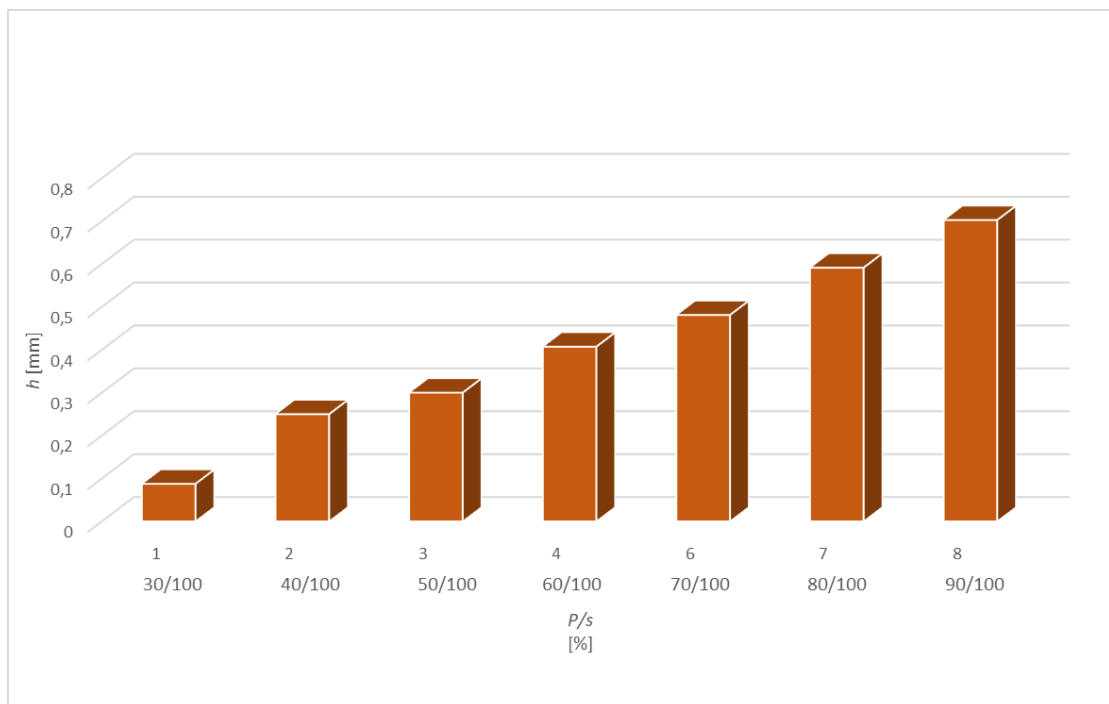
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (9.1)$$

Hloubky vzorků h (obr. 8.6, str. 45), které byly vytvořeny čočkou s ohniskovou vzdáleností $1,5''$, při konstantní řezné rychlosti s (1524 mm/s), pouze se změnou výkonu P laserového zařízení, jsem měřil jako první (tab. 9.2, str. 52).

Tab. 9.2 Hloubky vzorků vytvořených při změně výkonu.

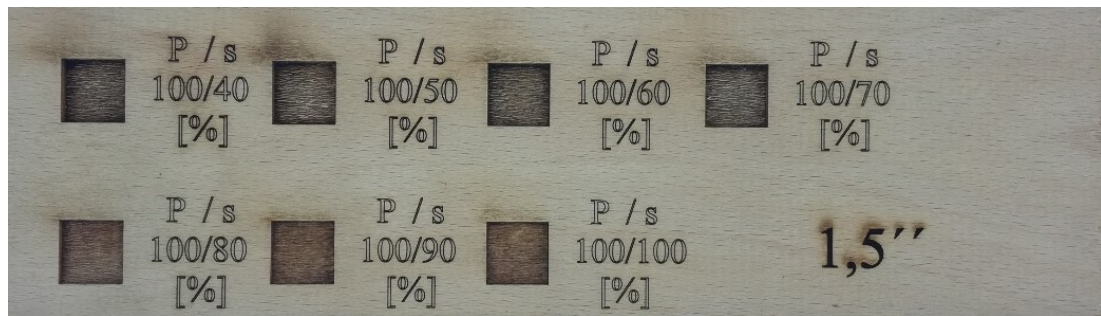
P/s		h [mm]	S [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]		
30/100	30/1524	0,087	0,003
40/100	40/1524	0,250	0,259
50/100	50/1524	0,300	0,005
60/100	60/1524	0,407	0,006
70/100	70/1524	0,481	0,004
80/100	80/1524	0,591	0,005
90/100	90/1524	0,702	0,005

V závislosti hloubky vzorků na výkonu laseru (obr. 9.4) je patrné, že s rostoucím výkonem se zvětšovala i hloubka vzorků.



Obr. 9.4 Závislost vygravírované hloubky na výkonu laseru.

Následně jsem měřil hloubky vzorků, které byly vytvořeny čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'', při konstantním maximálním výkonu (100 W) a snižování řezné rychlosti (obr. 9.5, str. 53).



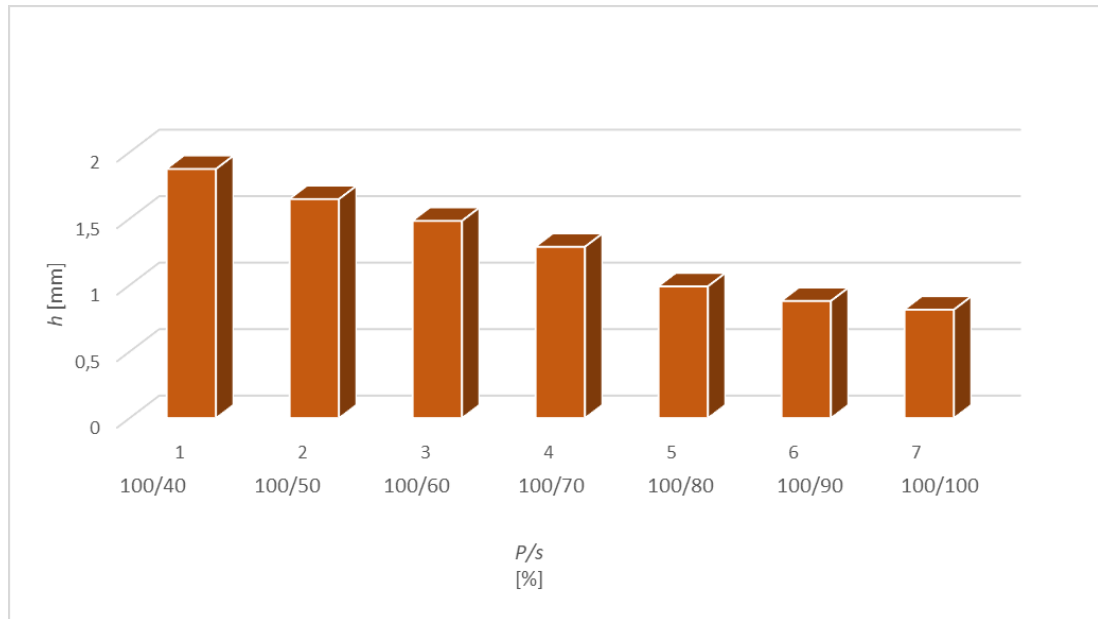
Obr. 9.5 Vzorky vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5''.

Hloubky těchto vzorků jsou zaznamenány v tabulce (tab. 9.3).

Tab. 9.3 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

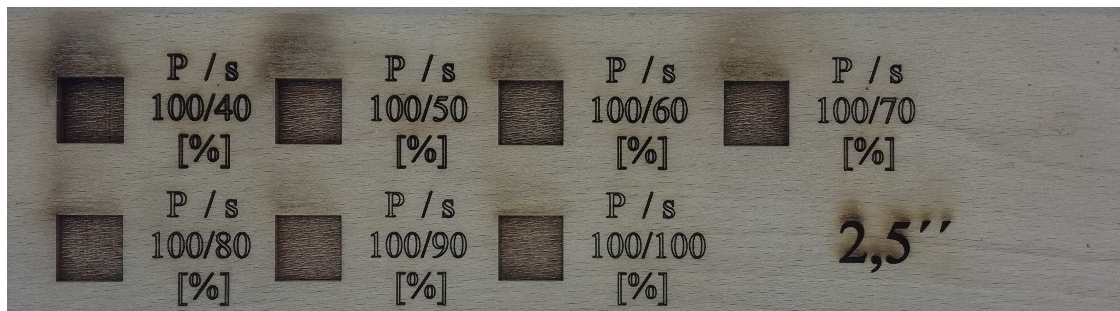
P/s		h [mm]	S [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]		
100/40	100/609,6	1,873	0,025
100/50	100/762	1,646	0,007
100/60	100/914,4	1,482	0,003
100/70	100/1066,8	1,287	0,004
100/80	100/1219,2	0,990	0,007
100/90	100/1371,6	0,880	0,013
100/100	100/1524	0,814	0,007

V závislosti hloubky vzorků na změně řezné rychlosti (obr. 9.6, str. 54) lze vidět, že se zvyšující se řeznou rychlostí se hloubka vzorků zmenšuje.



Obr. 9.6 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

Hloubky vzorků (obr. 9.7), vyrobených při stejných parametrech výkonu a řezné rychlosti, pouze při zvětšení ohniskové vzdálenosti čočky na 2,5'', jsou uvedeny v tab. 9.4.

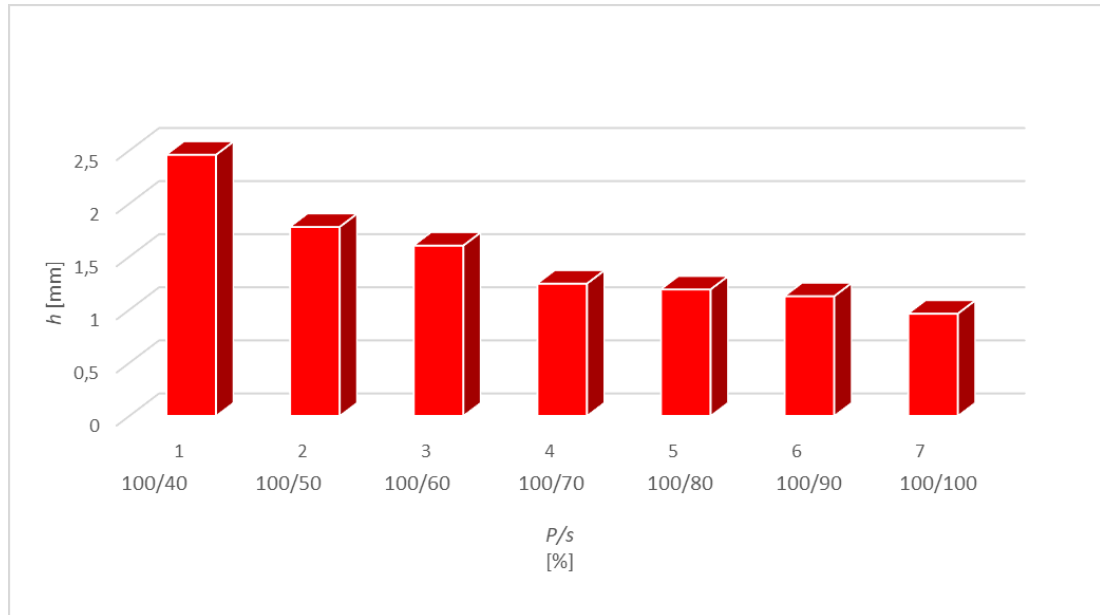


Obr. 9.7 Vzorky vyrobené čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5''.

Tab. 9.4 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

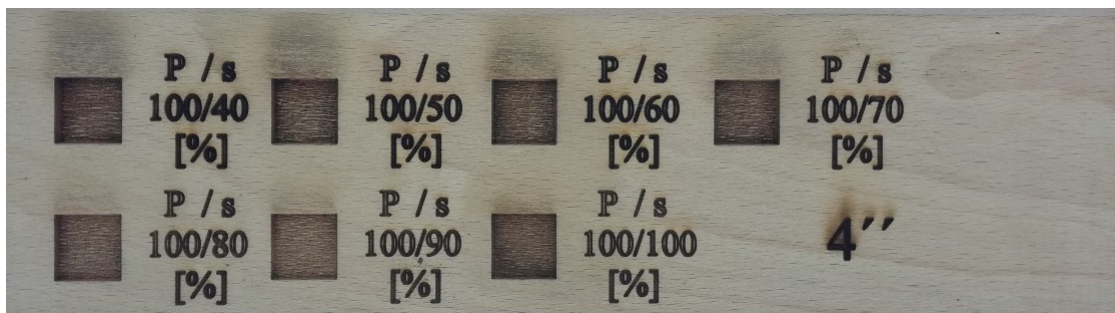
P/s		h [mm]	S [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]		
100/40	100/609,6	2,459	0,007
100/50	100/762	1,779	0,004
100/60	100/914,4	1,603	0,004
100/70	100/1066,8	1,245	0,006
100/80	100/1219,2	1,191	0,009
100/90	100/1371,6	1,127	0,003
100/100	100/1524	0,963	0,003

Se zvyšující se řeznou rychlostí se hloubka vzorků vytvořených při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5'' opět zmenšuje, jako u vzorků vytvořených čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' (obr. 9.8).



Obr. 9.8 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Následně po vzorcích, vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 2,5'', jsem měřil vzorky vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 4'' (obr. 9.9). Vzorky byly opět vytvořeny při konstantním výkonu (100 W) a snižování řezné rychlosti.



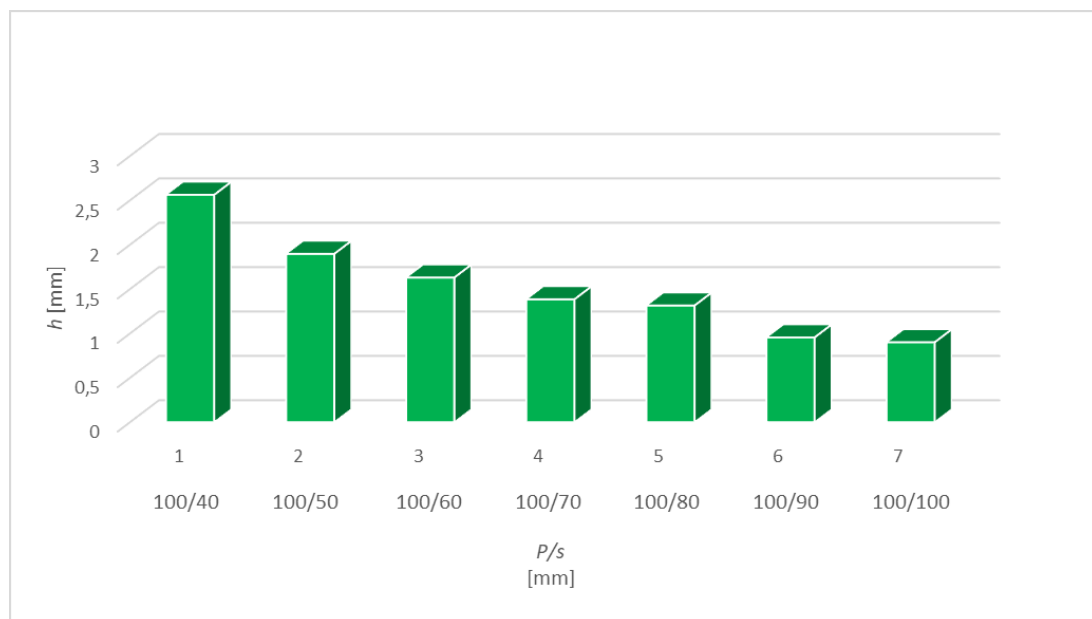
Obr. 9.9 Vzorky vyrobené čočkou s ohniskovou vzdáleností 4''.

Hloubky těchto vzorků jsou uvedeny v tab. 9.5 na str. 56.

Tab. 9.5 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 4''.

P/s		h	S
[%]	[W/mm·s-1]	[mm]	[mm]
100/40	100/609,6	2,561	0,004
100/50	100/762	1,896	0,018
100/60	100/914,4	1,629	0,02
100/70	100/1066,8	1,384	0,043
100/80	100/1219,2	1,313	0,005
100/90	100/1371,6	0,954	0,003
100/100	100/1524	0,899	0,004

Závislost hloubky vzorků na změně řezné rychlosti (obr. 9.10) zobrazuje, stejně jako u předešlých vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'' a 2,5'', že zvyšováním řezné rychlosti dochází ke snižování hloubky vzorků.



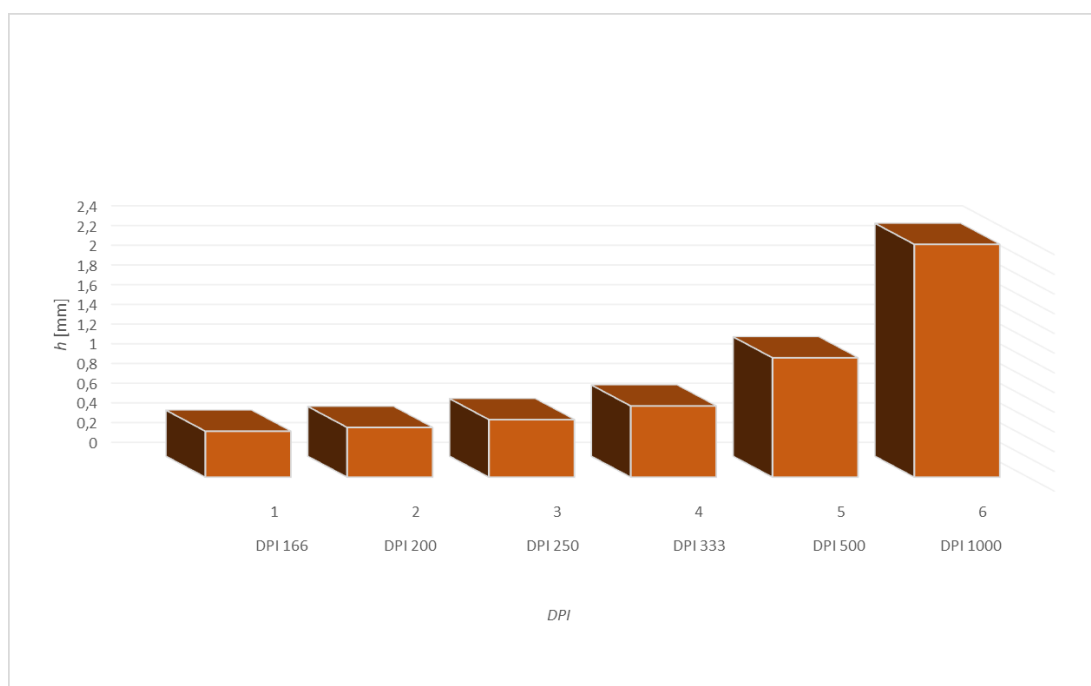
Obr. 9.10 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''.

Znečištění povrchu vzorků jsem se snažil regulovat změnou hodnot DPI . K pozorování, jak se změna těchto hodnot projeví na hloubce vzorků (obr. 8.9, str. 47) jsem provedl následující měření. Vzorky byly vyrobeny při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s). Hloubky vzorků, vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'', jsou zaznamenány v tab. 9.6 na str. 57.

Tab. 9.6 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

DPI	h [mm]	S [mm]
166	0,466	0,029
200	0,504	0,014
250	0,583	0,018
333	0,722	0,008
500	1,211	0,013
1000	2,362	0,003

V závislosti hloubky vzorků na změně hodnot DPI (obr. 9.11) lze vidět, že zvyšováním hodnot DPI dochází ke zvětšování hloubky vzorků.



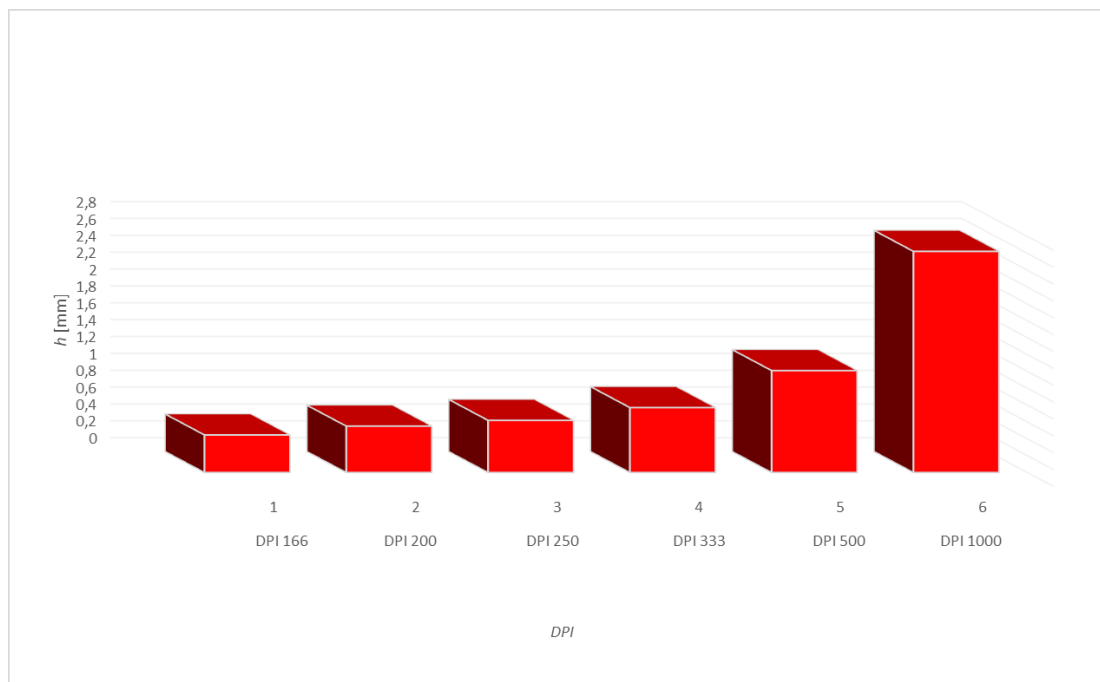
Obr. 9.11 Závislost hloubky na změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

Hloubky vzorků vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5'', při změně hodnot DPI , jsou uvedeny v tab. 9.7 na str. 58.

Tab. 9.7 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

DPI	h [mm]	S [mm]
166	0,444	0,008
200	0,549	0,008
250	0,617	0,006
333	0,769	0,004
500	1,207	0,003
1000	2,621	0,014

Změna hodnot DPI se projevuje stejně u vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 2,5'', jako u vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5''. Opět dochází k tomu, že zvyšováním hodnot DPI roste vygravírovaná hloubka vzorků (obr. 9.12).



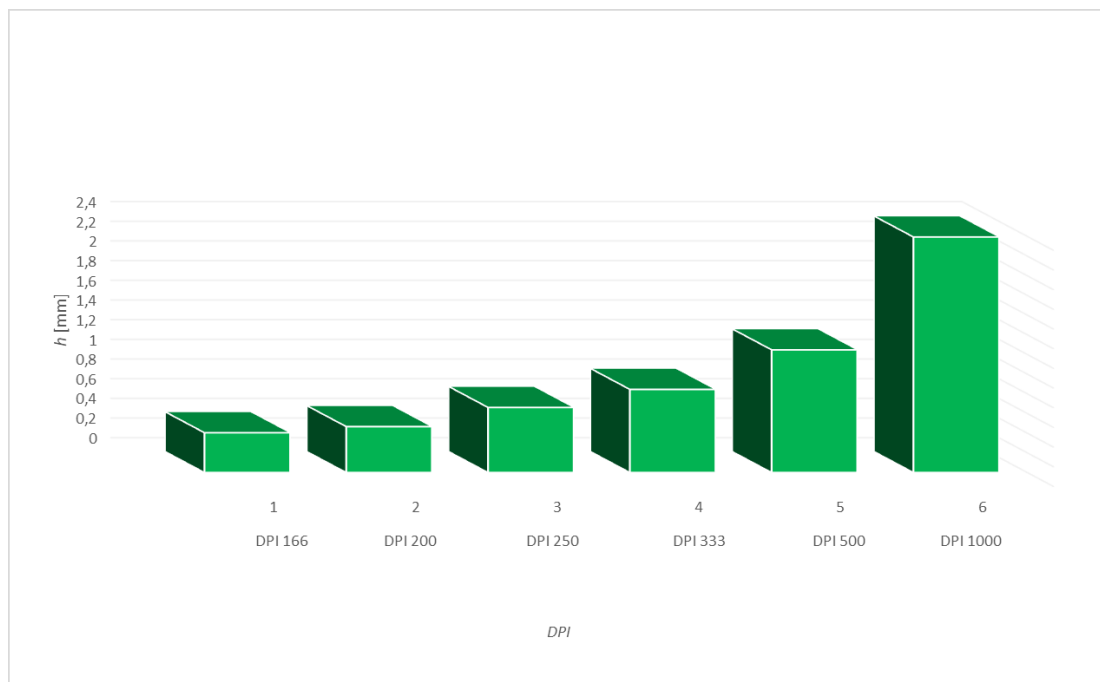
Obr. 9.12 Závislost hloubky na změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Hloubky vzorků vytvořených taktéž, jako předchozí vzorky, při změně hodnot DPI , pouze při ohniskové vzdálenosti čočky 4'', jsou zaznamenány v tab. 9.8 na str. 59.

Tab. 9.8 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 4''.

DPI	h [mm]	S [mm]
166	0,403	0,005
200	0,465	0,003
250	0,660	0,003
333	0,843	0,002
500	1,246	0,005
1000	2,393	0,086

V závislosti hloubky vzorků na změně hodnot DPI , při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 4'' (obr. 9.13), lze pozorovat, stejně jako u vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'' a 2,5'', že zvyšováním hodnot DPI se zvětšuje i hloubka vzorků.



Obr. 9.13 Závislost hloubky na změně hodnot DPI , při ohniskové vzdálenosti 4''.

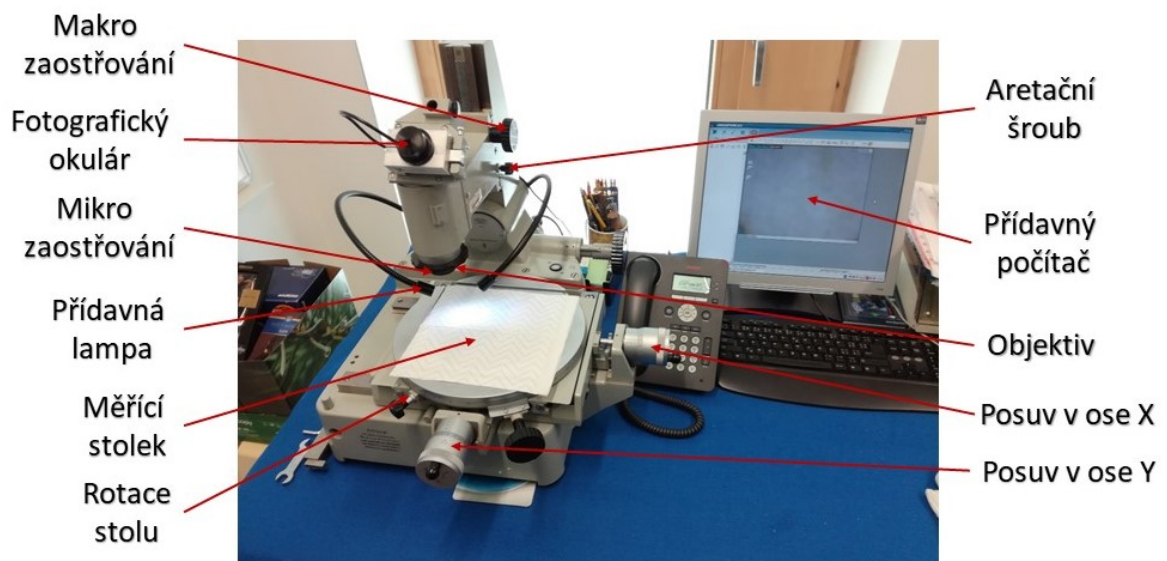
Největší vygravírované hloubky lze tedy dosáhnout při hodnotě DPI 1000, při výkonu 100 % (100 W) a řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s).

10 POROVNÁNÍ POVRCHŮ VZORKŮ

Pro porovnání, při jakých řezných podmínkách bylo dosaženo nejen optimální hloubky vzorků, ale také optimálního povrchu, tedy povrchu, který neobsahuje velké nerovnosti, jsem provedl následující pozorování povrchu vzorků pomocí mikroskopu Carl Zeiss.

10.1 Mikroskop Carl Zeiss

K vyfocení povrchů vzorků byl použit mikroskop Carl Zeiss se zvětšením 10x. Toto zařízení je složeno z makro zaostřování pro zaostření pozorovaného povrchu a z mikro zaostřování pro následné doostření tohoto povrchu. K tomuto mikroskopu je vyrobeno několik typů okulárů, mezi které patří například měřicí okulár pro měření pozorovaných objektů, nebo také okulár opatřený fotoaparátem pro nasnímání pozorovaného povrchu do počítače. Na mikroskopu se nachází křížový stůl s rotací, jehož posuv je zajištěn pomocí vodících šroubů. Posuvy v ose X a Y obsahují mikrometrické stupnice s udávanou přesností 0,01 mm, pomocí kterých je možné odečítat rozměry měřeného objektu. Popis mikroskopu lze vidět na obr. 10.1.



Obr. 10.1 Popis mikroskopu Carl Zeiss.

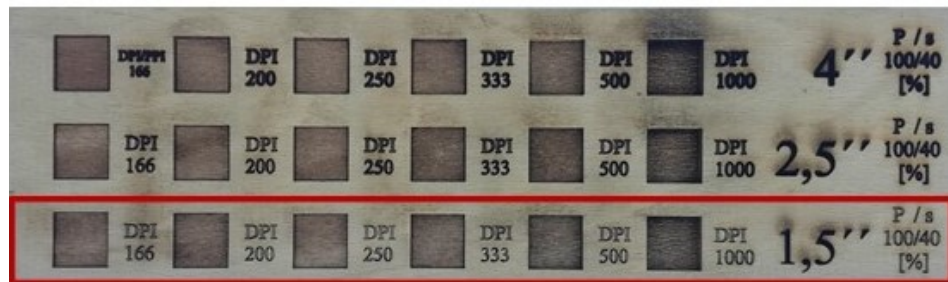
10.1.1 Postup snímání povrchů vzorků

Pomocí přídavné lampy jsem nasvítíl vzorek tak, aby byl v počítači co nejjasnější. Následně jsem pomocí makro zaostřování zaostřil snímání povrch. Vzorek jsem poté doostřil

mikro zaostřováním. Takto připravený vzorek jsem nasnímal pomocí fotografického okuláru, který přenesl snímek do počítače.

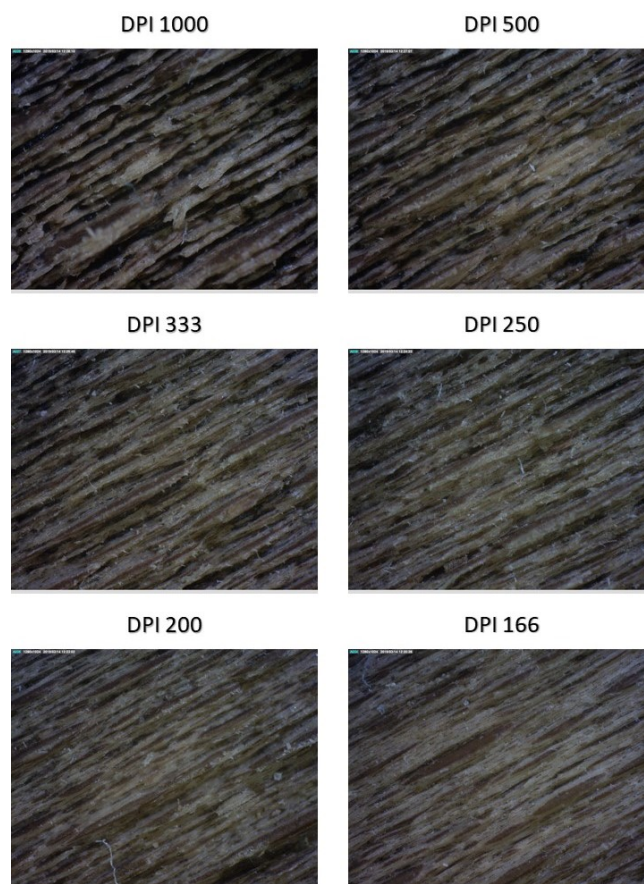
10.2 Nasnímané povrchy jednotlivých vzorků

Nejprve jsem pozoroval povrchy vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5'', konkrétně u vzorků, které byly vytvořeny při změně hodnot *DPI* (obr. 10.2).



Obr. 10.2 Vzorky vytvořené změnou *DPI*, při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

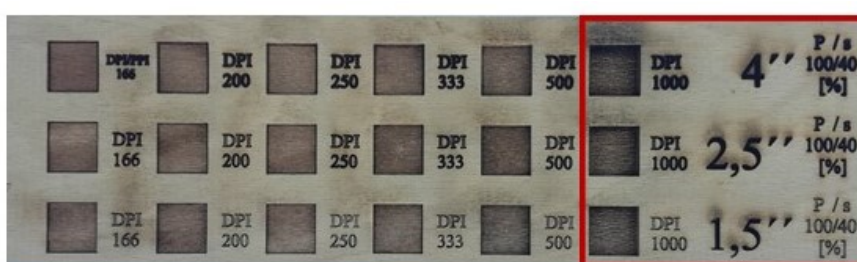
Zkoumal jsem, jak se změna těchto hodnot projeví na vygravírovaném povrchu. Snímky těchto povrchů jsou zobrazeny v následujícím obrázku (obr. 10.3).



Obr. 10.3 Povrchy při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

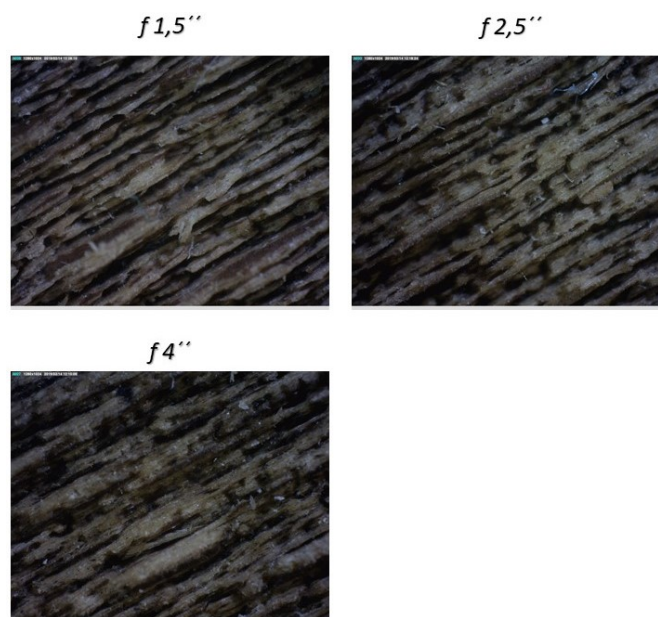
Předchozím měřením hloubky vzorků jsem zjistil, že s rostoucí hodnotou *DPI* roste i hloubka vzorků. Na povrchu těchto vzorků jsem pozoroval, že s rostoucí hloubkou vzorků dochází také k přibývání nerovností povrchu, jak je vidět na obr. 10.3, str. 61. U vzorků s nejnižší hodnotou *DPI* vznikly malé nerovnosti, ale s rostoucí hodnotou těchto parametrů začaly tyto nerovnosti přibývat.

Největších nerovností povrchu bylo dosaženo při hodnotě *DPI* 1000, proto jsem se rozhodl, že pro porovnání, jak se projeví změna ohniskové vzdálenosti na povrchu vzorku bude nejlepší porovnat vzorky vytvořené právě při těchto hodnotách (obr. 10.4).



Obr. 10.4 Povrchy vytvořené změnou ohniskové vzdálenosti čočky.

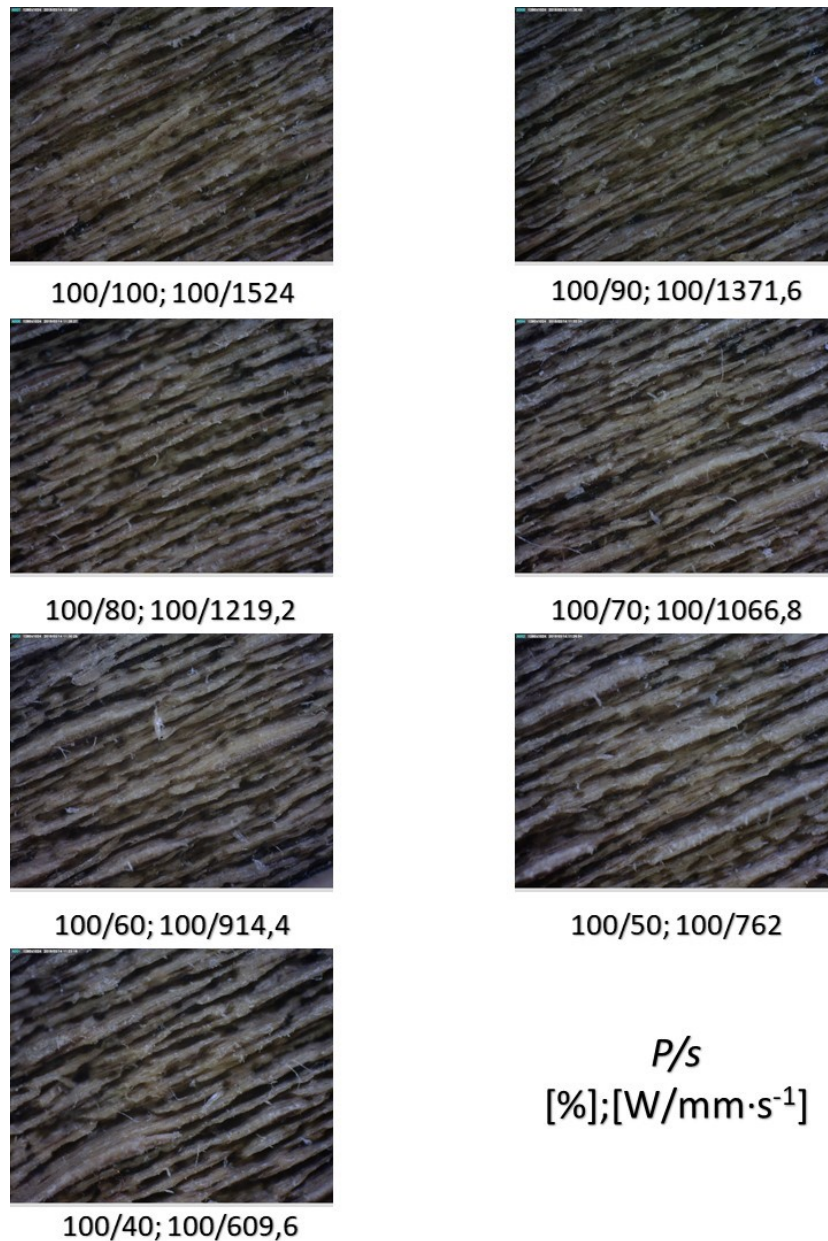
Porovnání povrchů vytvořených při stejných parametrech výkonu (100 W), řezné rychlosti (609,6 mm/s) a hodnotách *DPI* 1000, pouze se změnou ohniskové vzdálenosti, lze vidět na obr. 10.5.



Obr. 10.5 Povrchy při změně ohniskové vzdálenosti.

Pozorováním povrchů těchto vzorků jsem zjistil, že u vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5'' bylo dosaženo jemnějšího povrchu než u vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 2,5'' a 4''. Z hlediska docílení co nejjemnější členitosti povrchu se jeví jako nejvhodnější použití čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5'', z toho důvodu jsem se rozhodl dále zabývat jen povrchy vzorků, které byly vytvořeny při této ohniskové vzdálenosti.

Doposud zkoumané vzorky byly vytvořeny při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s), pouze při změně hodnot *DPI*. Dále jsem pozoroval povrchy vzorků, které byly vytvořeny čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'', při změně řezné rychlosti, konstantním výkonu laseru (100 W) a hodnotě *DPI* 1000 (obr. 9.5, str 53). Jak se změna řezné rychlosti projeví na vygravírovaném povrchu vzorku lze vidět na obr. 10.6.



Obr. 10.6 Povrchy vzorků vytvořených při změně řezné rychlosti.

Při měření hloubky vzorků jsem zjistil, že snižováním řezné rychlosti dochází ke zvětšování vygravírované hloubky. Pozorováním povrchů těchto vzorků jsem zjistil, že se zvětšující se hloubkou vzorků, vlivem snižování řezné rychlosti, se zvětšuje i členitost povrchu.

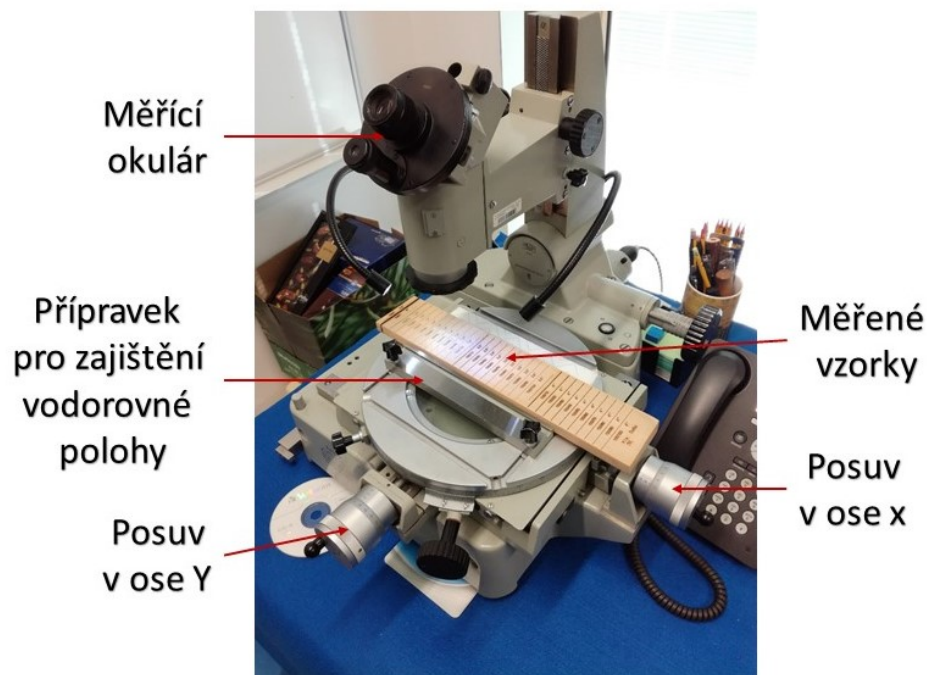
Snímky všech pozorovaných povrchů jsou k vidění v přílohách P VIII-X.

11 MĚŘENÍ ŠÍŘKY A HLOUBKY ŘEZŮ

V předchozí kapitole byly měřeny vzorky vytvořené rastrovým gravírováním. Měření šířky a hloubky řezů na připravených vzorcích bylo provedeno také pro vektorové soubory, pomocí mikroskopu Carl Zeiss.

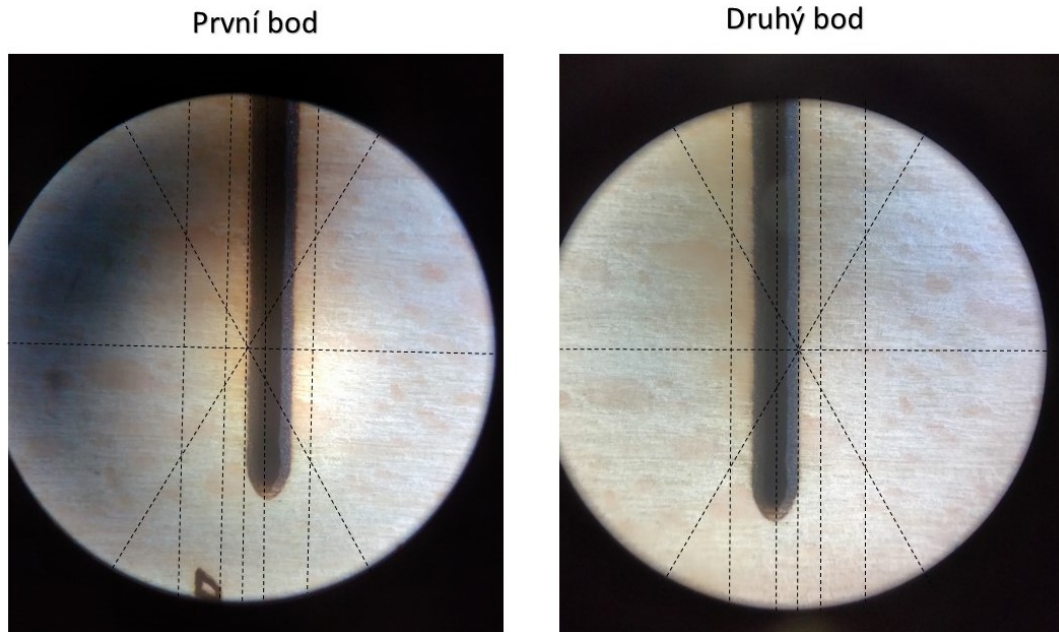
11.1 Postup měření šířky a hloubky řezů

Měřený vzorek jsem si připravil stejným způsobem, jako při snímání vygravírovaných povrchů vzorků. Zaměnil jsem pouze okulár opatřený fotoaparátem za okulár měřicí (obr. 11.1). Pomocí přípravku jsem zajistil vzorek ve vodorovné poloze. Posuv vzorku je vyvozen pomocí vodících šroubů křížového stolu, které jsou opatřeny v ose X a Y mikrometrickými stupnicemi, pomocí kterých jsem odečítal rozměry šířky a hloubky řezu.



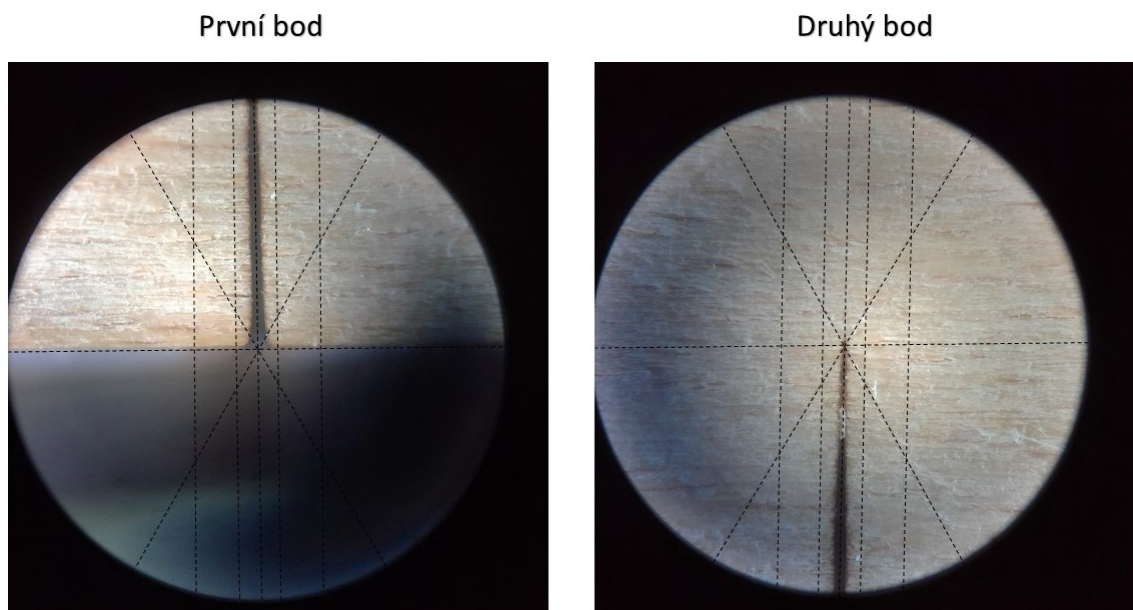
Obr. 11.1 Popis mikroskopu Carl Zeiss s měřícím okulárem.

Nejprve jsem měřil šířku řezů. Postupoval jsem tak, že jsem pomocí svislé čárkované čáry uprostřed okuláru najel na levou hranu řezu (obr. 11.2, str. 66). Odečetl jsem hodnotu na posuvu v ose X s mikrometrickou stupnicí. Poté jsem posunul svislou čárkovanou čáru uprostřed okuláru na pravou hranu řezu a opět odečetl hodnotu na mikrometrické stupnici posuvu X. Odečtením těchto hodnot od sebe jsem vypočítal šířku řezu.



Obr. 11.2 Postup měření šířky řezu.

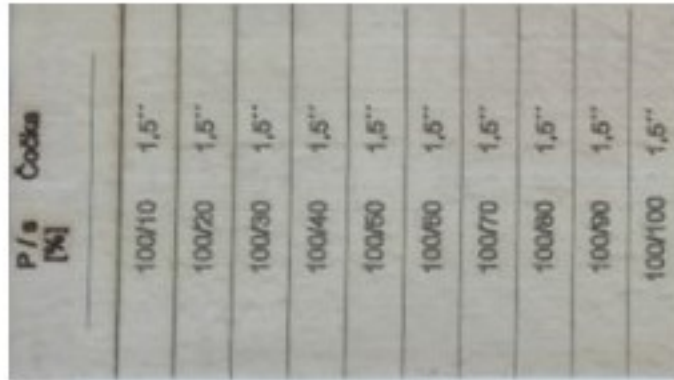
Při měření hloubky řezů jsem postupoval obdobně, jenom jsem využíval kromě posuvu v ose X i posuvu v ose Y, opatřeného taktéž mikrometrickou stupnicí. Nejprve jsem vodorovnou čárkovanou čáru nastavil na spodní okraj řezu (obr. 11.3) a odečetl jsem hodnotu na mikrometrické stupnici posuvu Y. Poté jsem nastavil vodorovnou čárkovanou čáru na protější okraj řezu a opět odečetl hodnotu na mikrometrické stupnici posuvu Y. Odečtením těchto hodnot jsem poté získal hloubku řezu.



Obr. 11.3 Postup měření hloubky řezu.

11.2 Naměřené hodnoty šířky řezů

Nejprve jsem měřil šířku řezů u vzorků, které byly vytvořeny čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'', při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 10–100 [%] (obr. 11.4).



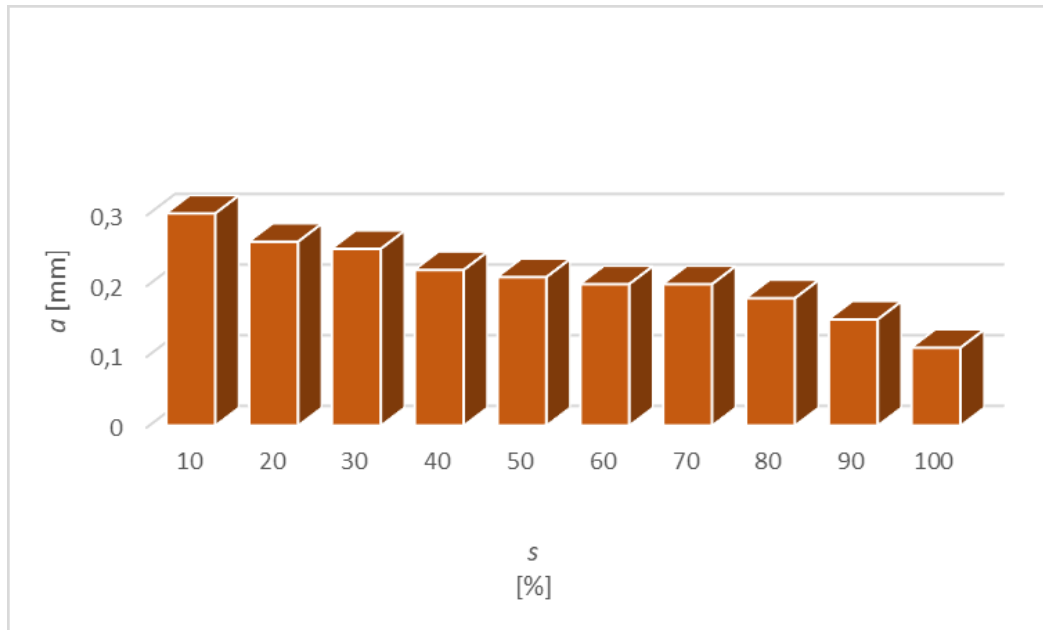
Obr. 11.4 Řezy při ohniskové vzdálenosti 1,5 ''.

U těchto vzorků jsem zkoumal, jak se změna řezné rychlosti s , projeví na šířce řezů a . Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 11.1.

Tab. 11.1 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 1,5 ''.

P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/10	100/152,4	0,3
100/20	100/304,8	0,26
100/30	100/457,2	0,25
100/40	100/609,6	0,22
100/50	100/762	0,21
100/60	100/914,4	0,2
100/70	100/1066,8	0,2
100/80	100/1219,2	0,18
100/90	100/1371,6	0,15
100/100	100/1524	0,105

V závislosti šířky řezů na řezné rychlosti (obr. 11.5, str. 68) lze vidět, že se zvyšující se řeznou rychlostí se zmenšuje šířka řezu.



Obr. 11.5 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

Šířky řezů jsem měřil následně u vzorků, které byly vytvořeny při stejných hodnotách výkonu a řezné rychlosti jako předchozí vzorky, pouze při změně ohniskové vzdálenosti z 1,5'' na 2,5'' (obr.11.6).

P/s [%]	Čočka
100/10	2,5''
100/20	2,5''
100/30	2,5''
100/40	2,5''
100/50	2,5''
100/60	2,5''
100/70	2,5''
100/80	2,5''
100/90	2,5''
100/100	2,5''

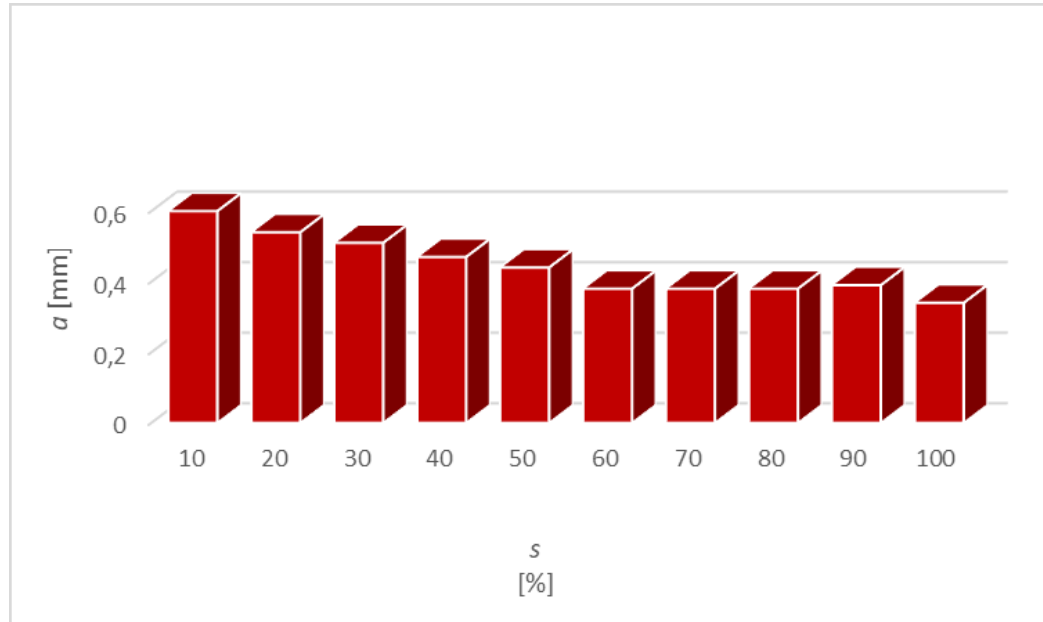
Obr. 11.6 Řezy při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Šířky těchto řezů jsou zaznamenány v následující tabulce (tab. 11.2, str. 69).

Tab. 11.2 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

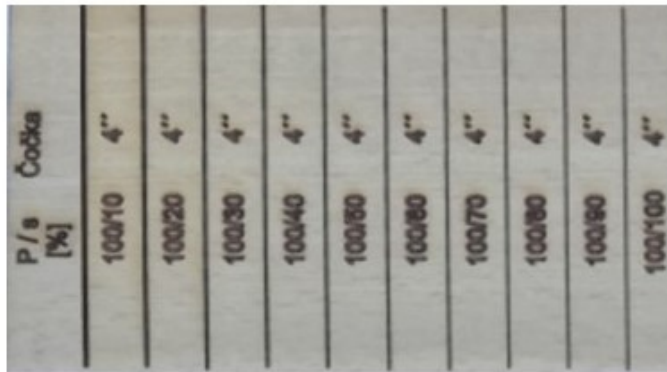
P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/10	100/152,4	0,6
100/20	100/304,8	0,535
100/30	100/457,2	0,51
100/40	100/609,6	0,47
100/50	100/762	0,44
100/60	100/914,4	0,38
100/70	100/1066,8	0,38
100/80	100/1219,2	0,38
100/90	100/1371,6	0,39
100/100	100/1524	0,34

Z vyobrazení závislosti šířky řezů na změně řezné rychlosti (obr. 11.7), je patrné, že s rostoucí hodnotou řezné rychlosti se šířka řezů opět zmenšuje.



Obr. 11.7 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Řezy vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 4'' (obr. 11.8, str. 70), při stejných pracovních podmínkách jako řezy vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a 2,5'', jsem měřil na závěr.



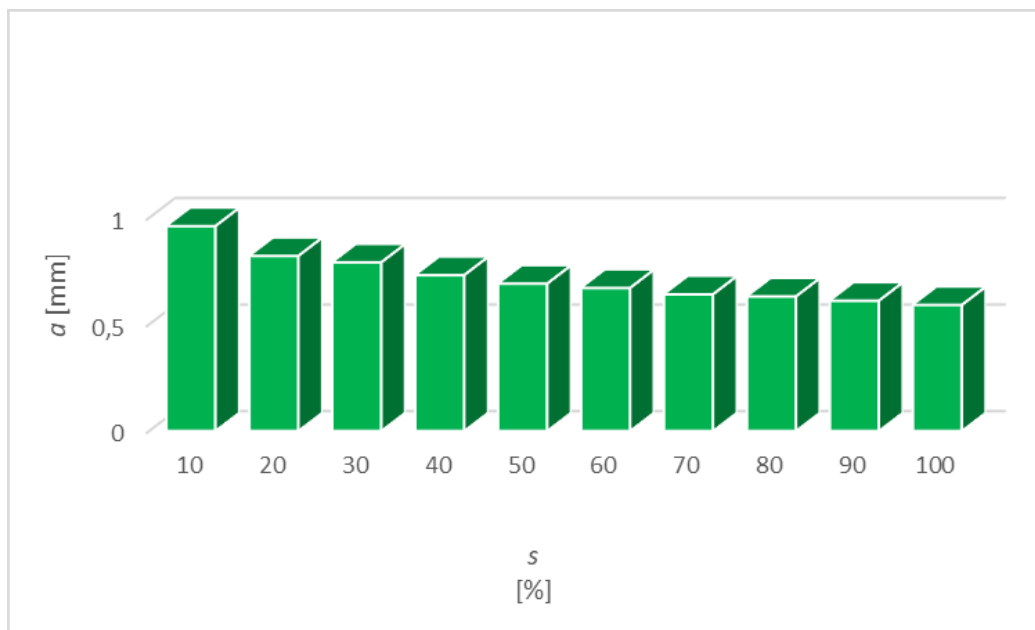
Obr. 11.8 Řezy při ohniskové vzdálenosti 4''.

Naměřené hodnoty šířky těchto vzorků jsou uvedeny v tab. 11.3.

Tab. 11.3 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 4''.

P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/10	100/152,4	0,96
100/20	100/304,8	0,82
100/30	100/457,2	0,79
100/40	100/609,6	0,73
100/50	100/762	0,69
100/60	100/914,4	0,67
100/70	100/1066,8	0,64
100/80	100/1219,2	0,63
100/90	100/1371,6	0,61
100/100	100/1524	0,59

Laserový paprsek čočky s ohniskovou vzdáleností 4'' způsobuje, stejně jako paprsky tvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a 2,5'', že se zvyšováním rezní rychlosti se zmenšuje šířka řezů (obr. 11.9, str. 71).



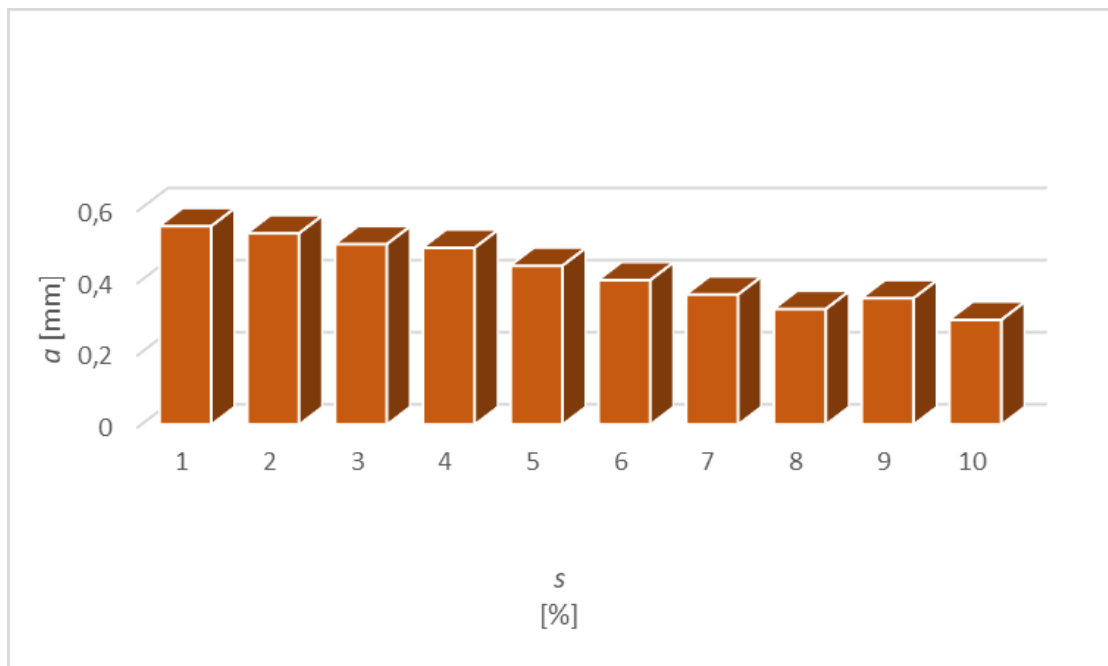
Obr. 11.9 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''.

Šířku řezů jsem měřil i u vzorků vytvořených při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 1–10 [%], což představují hodnoty 15,24; 30,48; 45,72; 60,96; 76,2; 91,44; 106,68; 121,92; 137,16; 152,4 [mm/s] (obr. 8.12, str. 48), za předpokladu dosažení větších šířek těchto řezů. Naměřené hodnoty šířky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'' lze vidět v tab. 11.4.

Tab. 11.4 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 1,5''.

P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	0,55
100/2	100/30,48	0,53
100/3	100/45,72	0,5
100/4	100/60,96	0,49
100/5	100/76,2	0,44
100/6	100/91,44	0,4
100/7	100/106,68	0,36
100/8	100/121,92	0,32
100/9	100/137,16	0,35
100/10	100/152,4	0,29

V závislosti šířky řezů na změně řezné rychlosti (obr. 11.10) lze vidět, u řezů vytvořených čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'', že stejně jako u předchozích vzorků vytvořených při řezné rychlosti 10-100 [%], tedy 152,4; 304,8; 457,2; 609,6; 762; 914,4; 1066,8; 1219,2; 1371,6; 1524 [mm/s], se se zvyšující řeznou rychlostí zmenšuje šířka řezu. Ovšem u řezů vytvořených při řezné rychlosti 1-10 [%], v přepočtu 15,24; 30,48; 45,72; 60,96; 76,2; 91,44; 106,68; 121,92; 137,16; 152,4 [mm/s], bylo dosaženo větší šířky, než u řezů vytvořených při řezné rychlosti 10-100 [%].



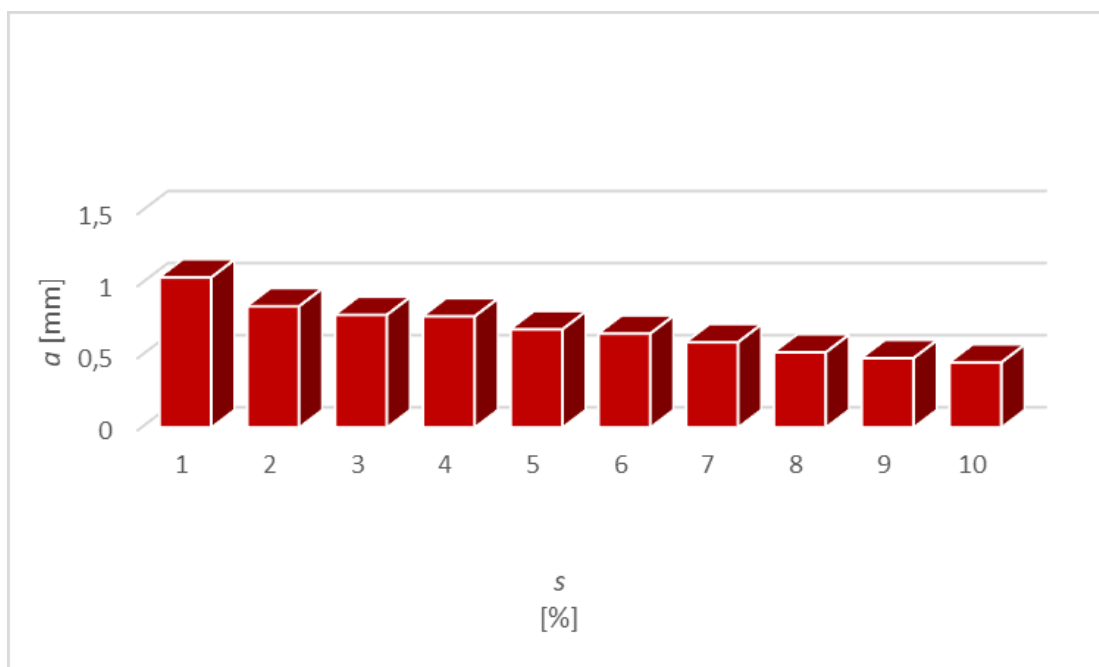
Obr. 11.10 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

Šířky řezů vytvořených čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5'', při stejné hodnotě výkonu (100 W) a řezné rychlosti 1-10 [%], tedy 15,24; 30,48; 45,72; 60,96; 76,2; 91,44; 106,68; 121,92; 137,16; 152,4 [mm/s], jsou uvedeny v tab. 11.5 na str. 73.

Tab. 11.5 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 2,5''.

P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	1,04
100/2	100/30,48	0,84
100/3	100/45,72	0,78
100/4	100/60,96	0,77
100/5	100/76,2	0,68
100/6	100/91,44	0,65
100/7	100/106,68	0,59
100/8	100/121,92	0,52
100/9	100/137,16	0,48
100/10	100/152,4	0,45

Ze závislosti šířky řezů na změně řezné rychlosti, při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5'' (obr. 11.11), je patrné, že zvyšováním řezné rychlosti se zmenšuje šířka řezů, jako tomu bylo u předchozích vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5''.



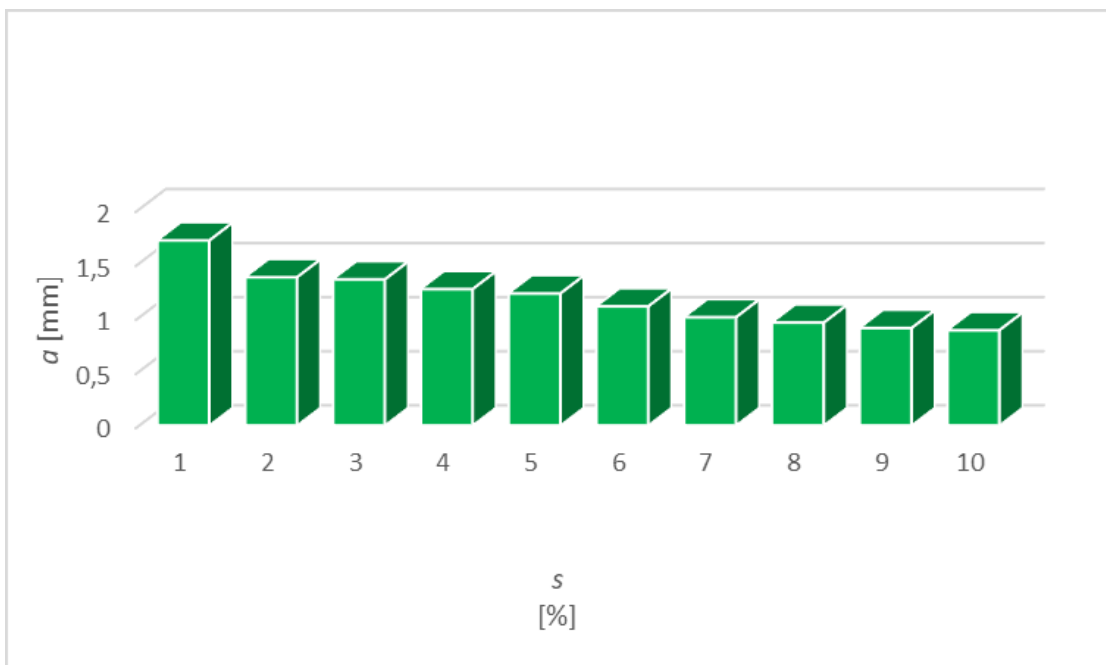
Obr. 11.11 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Šířky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 4'', při stejných hodnotách výkonu a řezné rychlosti, jako předchozí vzorky, jsou zaznamenány v tab. 11.6 na str. 74.

Tab. 11.6 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 4''.

P/s		a [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	1,71
100/2	100/30,48	1,37
100/3	100/45,72	1,35
100/4	100/60,96	1,26
100/5	100/76,2	1,22
100/6	100/91,44	1,1
100/7	100/106,68	1
100/8	100/121,92	0,95
100/9	100/137,16	0,9
100/10	100/152,4	0,88

Závislost šířky řezů na změně řezné rychlosti, při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 4'' (obr. 11.12), opět dokazuje, že zvyšováním řezné rychlosti dochází ke zmenšování šířky řezu.



Obr. 11.12 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 4''.

Největší šířky řezu bylo dosaženo při výkonu 100 % (100 W) a řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s). Naopak řezu o nejmenší šířce při stejném výkonu laserového zařízení, ale řezné rychlosti 100 % (1524 mm/s).

11.3 Naměřené hodnoty hloubky řezů

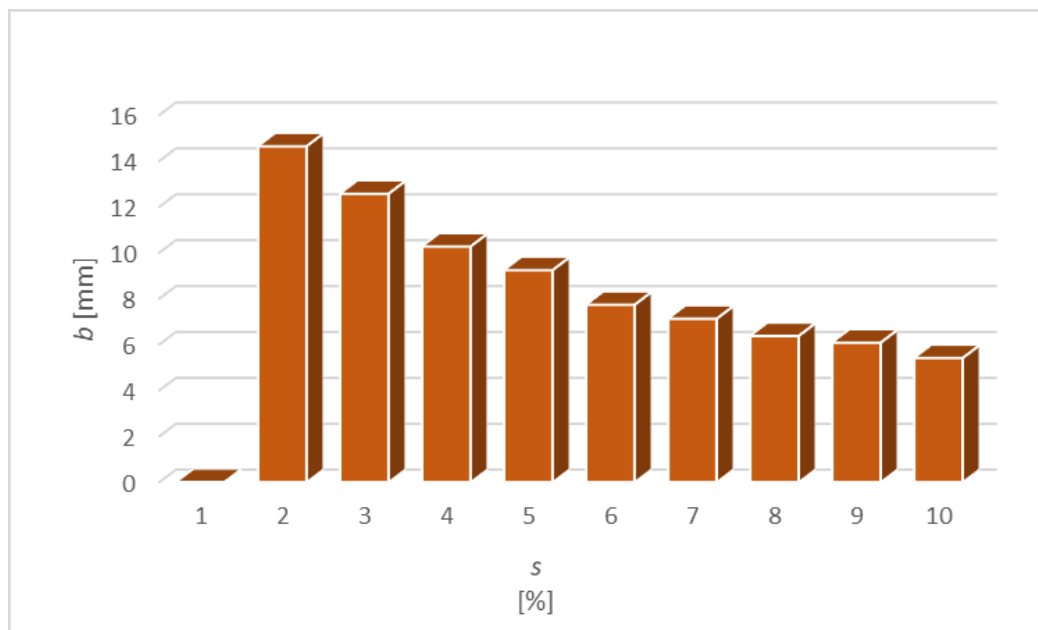
Předchozím měřením šířky řezů jsem zjistil, že se šířka řezů mění při změně řezné rychlosti a při změně ohniskové vzdálenosti čočky. K tomu, abych určil, jak se změna šířky a projeví na hloubce řezu b , jsem provedl následující měření vzorků (obr. 8.12, str. 48).

Hloubka řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'', při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 1-10 [%], kterou představují hodnoty 15,24; 30,48; 45,72; 60,96; 76,2; 91,44; 106,68; 121,92; 137,16; 152,4 [mm/s], jsou zaznamenány v tab. 11.7.

Tab. 11.7 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

P/s		b [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	Prořez
100/2	100/30,48	14,64
100/3	100/45,72	12,57
100/4	100/60,96	10,27
100/5	100/76,2	9,24
100/6	100/91,44	7,73
100/7	100/106,68	7,12
100/8	100/121,92	6,37
100/9	100/137,16	6,08
100/10	100/152,4	5,41

Z naměřených hodnot hloubky řezů jsem určil, že zvyšováním řezné rychlosti klesá hloubka těchto řezů. To lze vidět i v závislosti hloubky řezů na změně řezné rychlosti, při ohniskové vzdálenosti čočky 1,5'' (obr. 11.13, str. 76), kdy při řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s) došlo k úplnému proříznutí vzorku, jehož tloušťka byla 20 mm.



Obr. 11.13 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''.

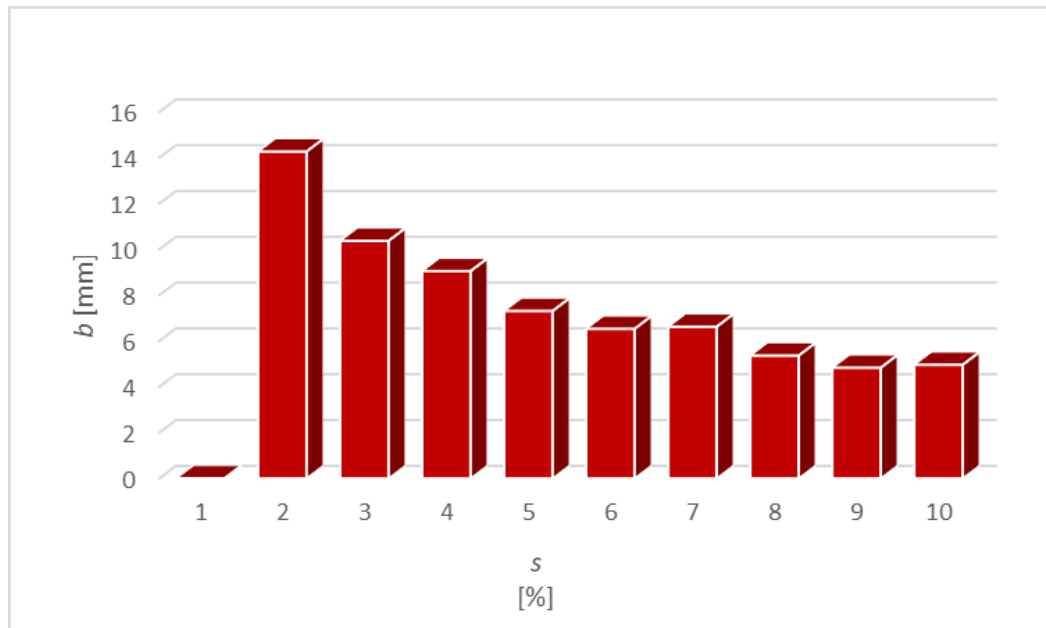
Hloubky řezů vytvořených při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5'', při stejné hodnotě výkonu a řezné rychlosti, jako předchozí vzorky vytvořené při ohniskové vzdálenosti 1,5'', jsou uvedeny v tab. 11.8.

Tab. 11.8 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

P/s		b [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	Prořez
100/2	100/30,48	14,27
100/3	100/45,72	10,37
100/4	100/60,96	9,05
100/5	100/76,2	7,31
100/6	100/91,44	6,53
100/7	100/106,68	6,62
100/8	100/121,92	5,36
100/9	100/137,16	4,83
100/10	100/152,4	4,96

V závislosti hloubky řezů, vytvořených čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5'', na změně řezné rychlosti (obr. 11.14, str. 77), lze vidět, že došlo k proříznutí vzorku, stejně jako při

použití čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5'', při použití řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s) a výkonu 100 % (100 W).



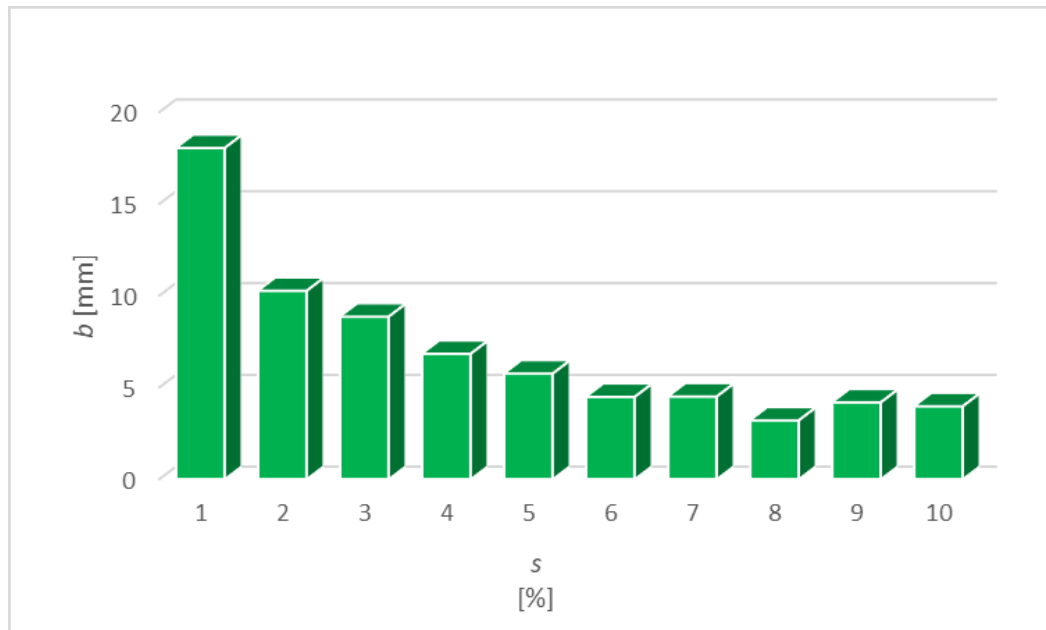
Obr. 11.14 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''.

Hloubky řezů vytvořených při stejných hodnotách výkonu a řezné rychlosti, jako předchozí vzorky, pouze se změnou ohniskové vzdálenosti čočky na 4'', jsou zaznamenány v následující tabulce (tab. 11.9).

Tab. 11.9 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 4''.

P/s		b [mm]
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	
100/1	100/15,24	18,04
100/2	100/30,48	10,26
100/3	100/45,72	8,85
100/4	100/60,96	6,83
100/5	100/76,2	5,75
100/6	100/91,44	4,48
100/7	100/106,68	4,5
100/8	100/121,92	3,2
100/9	100/137,16	4,18
100/10	100/152,4	3,97

U řezu vytvořených při výkonu 100 % (100 W) a řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s), došlo při použití čočky 1,5'' a 2,5'' k proříznutí vzorku, ale při změně ohniskové vzdálenosti čočky na 4'', k proříznutí nedošlo (obr. 11.15). Ovšem řez měl větší šířku než předchozí řezy vytvořené při použití čoček s ohniskovou vzdáleností 1,5'' a 2,5''.



Obr. 11.15 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''.

Lze tedy říci, že zvyšováním řezné rychlosti dochází ke zmenšování hloubky řezů. Největší hloubky řezu bylo dosaženo při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s). Naopak řezu s nejmenší hloubkou při stejném výkonu, ale řezné rychlosti 100 % (1524 mm/s).

12 VOLBA VHODNÝCH PRACOVNÍCH PODMÍNEK PRO ROTAČNÍ VÝROBEK

Pro výrobu rotačního výrobku z přírodního materiálu jsem požadoval takové pracovní podmínky, při kterých výsledná plocha bude dosahovat co největší hloubky, ale zároveň nebude obsahovat velké nerovnosti a znečištění povrchu. K tomu účelu jsem připravil další vzorky.

12.1 Příprava vzorků pro práci na rotační ose

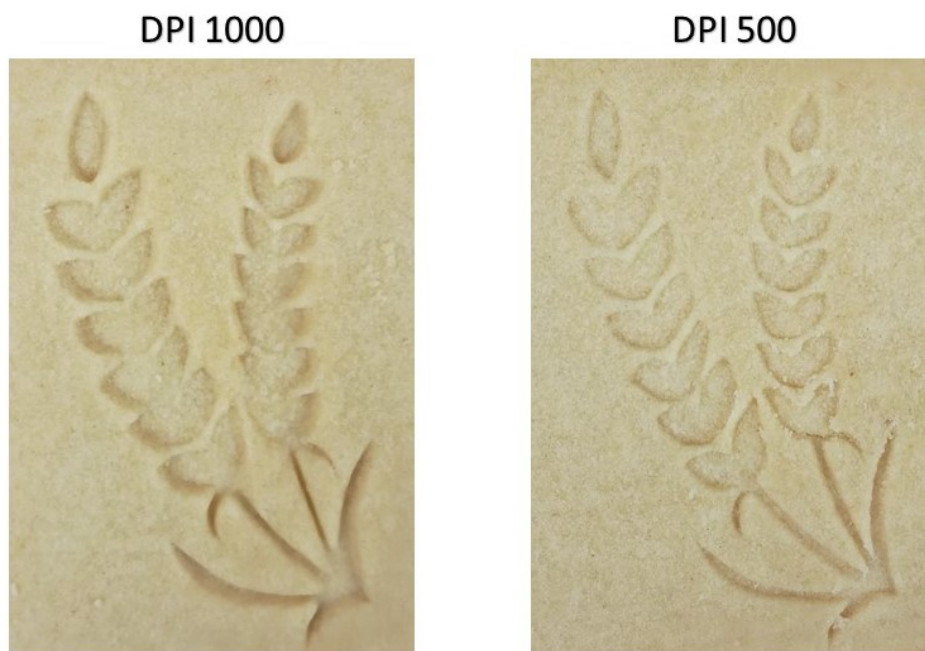
Na základě předchozích měření jsem vytvořil další vzorky, které jsem použil pro otisk do těsta, abych mohl určit optimální pracovní podmínky pro výrobu válečku (obr. 12.1). Tyto vzorky byly vytvořeny rastrovým gravírováním. Pro výrobu jsem zvolil čočku s ohniskovou vzdáleností 1,5'', protože povrch vytvořený při této ohniskové vzdálenosti obsahoval nejmenší členitost a nedocházelo k takovému ohoření jako u čoček s ohniskovou vzdáleností 2,5'' a 4''. Za předpokladu požadavku na tisknutí vzoru do těsta, který i po upečení bude čitelný, jsem zvolil pracovní podmínky o maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s), kdy bylo dosaženo největší vygravírované hloubky 1,873 mm. Zároveň jsem chtěl dosáhnout co nejčistějšího povrchu, z toho důvodu jsem se rozhodl postupně snižovat hodnotu DPI od 1000 až do 250. Dále jsem tyto hodnoty již nesnižoval, protože bylo dosaženo malé hloubky vzorku a dalo se předpokládat, že by vzor otisknutý na těstě po upečení vymizel.



Obr. 12.1 Návrh vzorků pro rotační osu.

12.2 Navržení vhodných pracovních podmínek

K volbě optimálních řezných podmínek jsem použil linecké těsto, které tolik nemění tvar po upečení. Přesto u vzorků vytvořených při hodnotě *DPI* 333 a 250 došlo upečením k vytracení obilného vzoru. To bylo zapříčiněno malou hloubkou otisknutí do těsta. Z toho důvodu jsem dále pracoval pouze se vzorky vytvořenými při hodnotách *DPI* 1000 a 500. Tyto vzorky po upečení lze vidět na obr. 12.2.



Obr. 12.2 Vzorky po upečení.

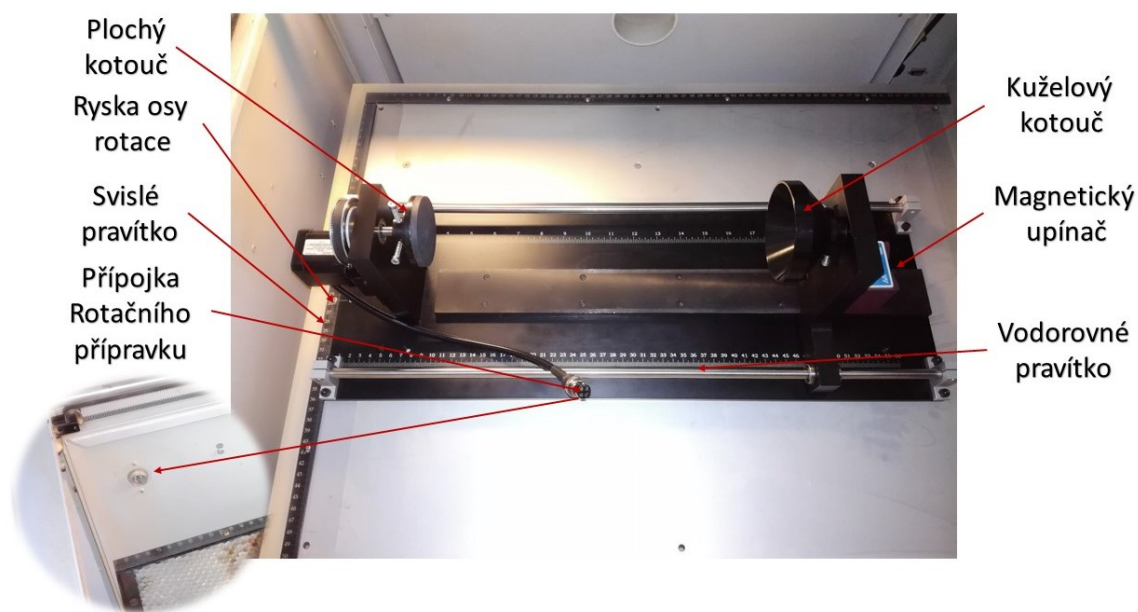
Vzorky vyrobené při hodnotách *DPI* 500 zůstaly i po upečení dobře viditelné, ale i tak hloubka vzorku nebyla optimální. Záviselo především na tom, jak byl vzor v těstě otisknutý. Vzorky vytvořené při hodnotách *DPI* 1000 zůstaly pěkně viditelné vždy. Jako optimální pracovní podmínky pro výrobu válečku na těsto jsem tedy určil maximální výkon (100 W), řeznou rychlost 40 % (609,6 mm/s) a hodnotu *DPI* 1000.

13 ROTAČNÍ OSA

Pomocí rotační osy je možné obrábět polotovary válcového tvaru. Laserový paprsek se při rovinném gravírování, nebo řezání, pohybuje ve vodorovné ose X a svislé ose Y. U rotačního obrábění je pohyb v ose Y doplněn o pootočení, které je vyvozeno motorkem, o další řádek laserového paprsku.

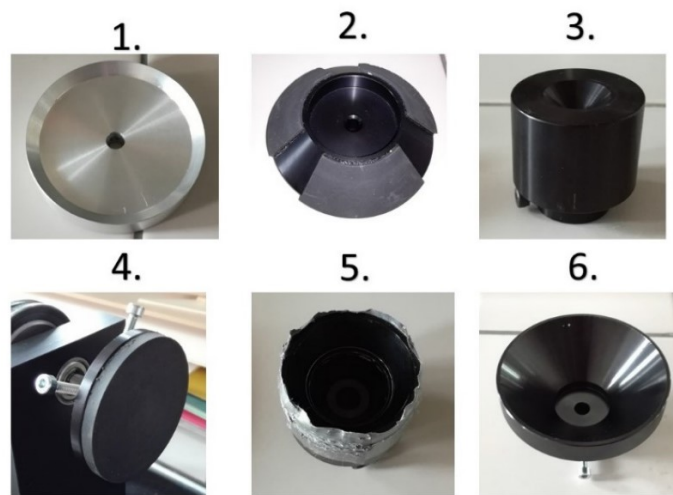
13.1 Montáž a nastavení rotační osy

Nejprve se umístí rotační osa na pracovní stůl tak, aby byla zarovnaná s pravítky a aby se levou stranou dotýkala svislého pravítka. Poté se připevní pomocí šroubů k pracovnímu stolu. Rotační řídicí kabel se připojí do zásuvky na levé straně laseru. Popis rotační osy lze vidět na následujícím obrázku (obr. 13.1).



Obr. 13.1 Popis rotační osy.

Polotovar se umístí mezi upínací přípravky. Existuje více typů těchto přípravků (obr. 13.2, str. 82):

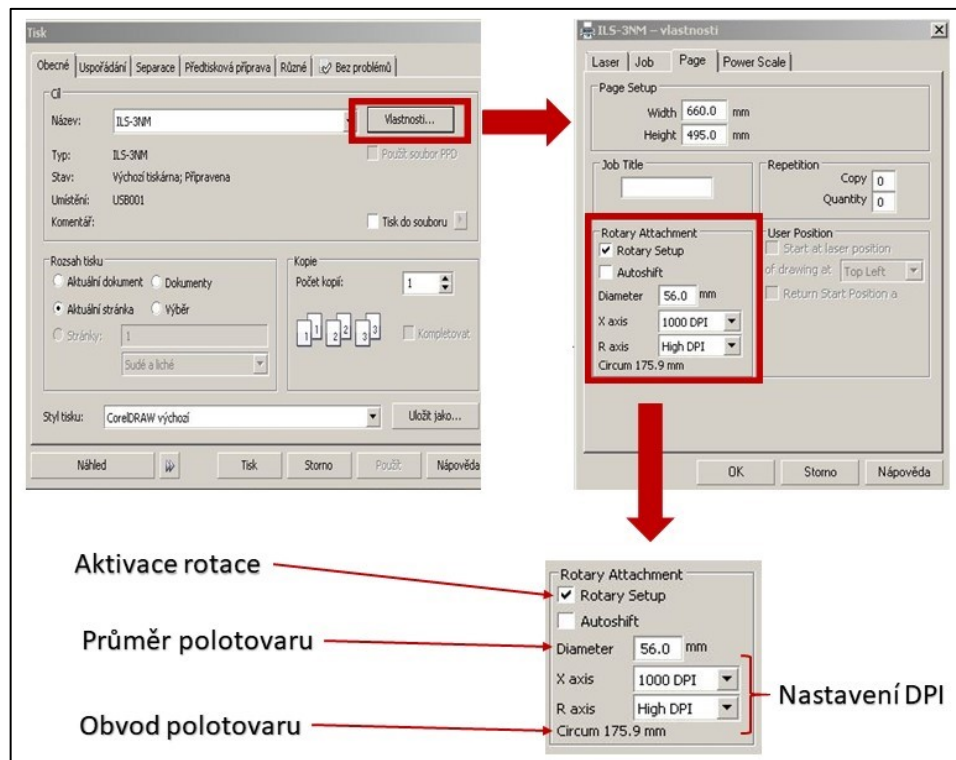


Obr. 13.2 Přípravky pro upínání polotovarů.

1. pro upínání polotovarů s rovinnou plochou (láhev na víno)
2. pro upínání rotačních dutých polotovarů (sklenička).
3. pro upínání polotovarů s malým úhlem kuželové plochy
4. pro upínání polotovaru s hladkou rovinnou plochou
5. pro upínání polotovarů s tvarovým uchycením (váleček na těsto)
6. pro upínání polotovarů s velkým úhlem kuželové plochy.

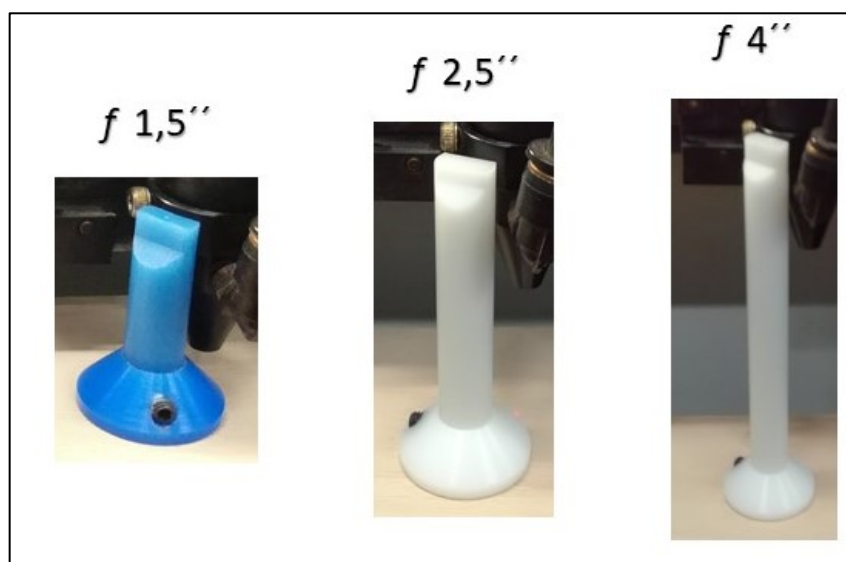
Následně se posune pravá část rotační osy s magnetickým upínačem proti konci polotovaru tak, aby byl materiál pevně upnut mezi upínací přípravky. Potom se zapne magnetická základna.

Po připravení polotovaru se nastaví rotace ve vlastnostech laseru (obr.13.3, str. 83). Nejprve se připraví soubor, který má být vygravírován, popřípadě vyřezán, do polotovaru. Po připravení souboru se aktivuje rotace ve vlastnostech tisku v záložce PAGE (stránka). V této záložce se rotace aktivuje zaškrtnutím pole ROTARY SETUP (nastavení rotace). Do pole diametr (průměr) se zadá hodnota průměru polotovaru v milimetrech. Systém si poté automaticky dopočítá rozvinutou délku. Dále se nastavení řezných podmínek provádí stejným způsobem jako při rovinném obrábění.



Obr. 13.3 Postup nastavení rotační osy v programu Corel Draw.

Při použití rotační osy nelze využít auto-fokusace, jako při rovinném obrábění. Nastavení ohniskové vzdálenosti čočky se musí v tomto případě provést ručně, pomocí kontrolního tělíska. Pro každou ohniskovou vzdálenost je speciální fokusační tělísko (obr. 13.4).



Obr. 13.4 Fokusační tělíska pro jednotlivé ohniskové vzdálenosti.

Pro nastavení správné ohniskové vzdálenosti se zařízení přepne do ručního režimu. Poté se laserová hlava přesune pomocí ovládacího panelu (obr. 13.5, str. 84) nad rotační obrobek.

Následně se přiložením fokusačního tělíska a posuvem pracovního stolu v ose Z, opět pomocí ovládacího panelu, nastaví správná ohnisková vzdálenost.



Obr. 13.5 Ovládací panel laserového zařízení.

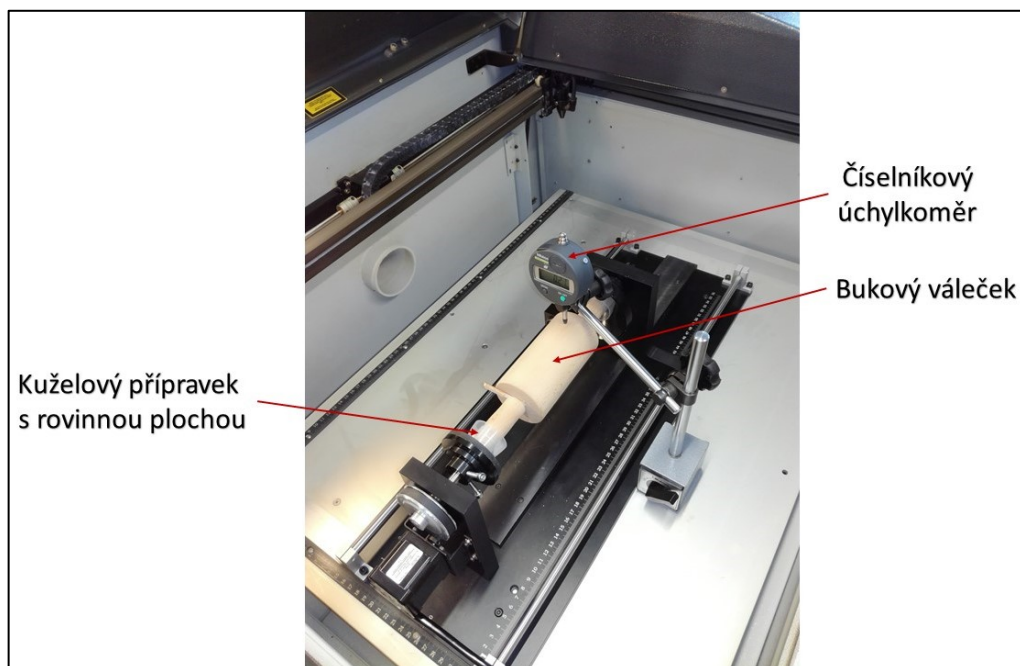
14 VÝSLEDNÝ VÝROBEK

Jako výsledný výrobek jsem vytvořil folklorní vzor na bukový váleček na těsto. Předchozí vzorky byly vytvořeny v rovině, za účelem zjištění vhodných pracovních podmínek, z důvodu možností měření. Váleček byl ze stejného dřeva, jako byly rovinné vzorky. Na základě měření rovinných vzorků jsem určil neoptimálnější pracovní podmínky pro vytvoření vzoru na váleček.

14.1 Výroba vzoru na váleček

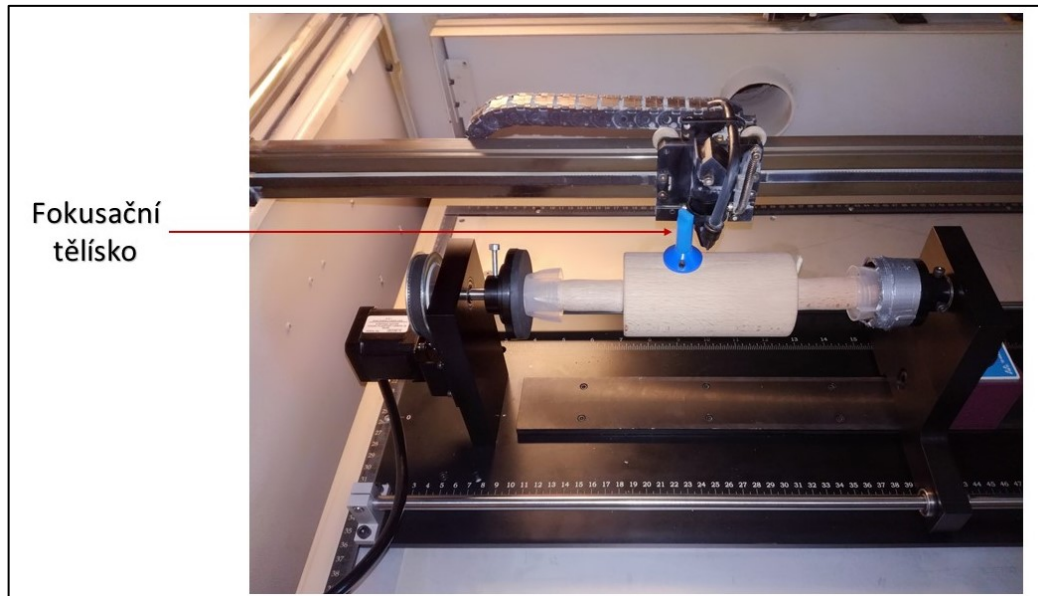
Polotovár, v mém případě bukový váleček, jsem umístil mezi kuželový a plochý upínací kotouč. Po upnutí válečku jsem musel zamezit rotaci samotného válečku po jeho rukojeti, aby při gravírování nedocházelo k prokluzování. Pro rotační těleso jsem si připravil plastové kuželové přípravky s rovinnou plochou, které jsem použil pro zajištění polohy válečku.

Pomocí číselníkového úchylkoměru byl nastaven obrobek do osy rotace (obr. 14.1).



Obr. 14.1 Kontrola upnutí válečku pomocí číselníkového úchylkoměru.

Když byl váleček upnut v ose, tak jsem ručně nastavil ohniskovou vzdálenost laseru pomocí fokusačního tělíska (obr. 14.2, str. 86).



Obr. 14.2 Nastavení ohniskové vzdálenosti pomocí fokusačního tělíska.

Pracovní parametry laseru pro výrobu válečku jsem zvolil na základě předchozího experimentu, kdy jsem provedl otisk vzoru s obilím do materiálu. Nastavil jsem tedy maximální výkon (100 W), řeznou rychlost 40 % (609,6 mm/s) a hodnotu *DPI* 1000. Váleček se vzorem lze vidět na obr. 14.3.



Obr. 14.3 Konečný výrobek – váleček s folklorním vzorem.

15 VYHODNOCENÍ

Z naměřených hodnot bylo vytvořeno porovnání hloubek vzorků vytvořených rastrovým gravírováním a porovnání šířky a hloubky řezů, pomocí tabulek a grafů. Vyhodnocení struktury vygravírovaných povrchů, bylo provedeno za použití foto-snímků, které byly vytvořeny snímáním mikroskopu, s ohledem na specifické vlastnosti materiálu dřevin.

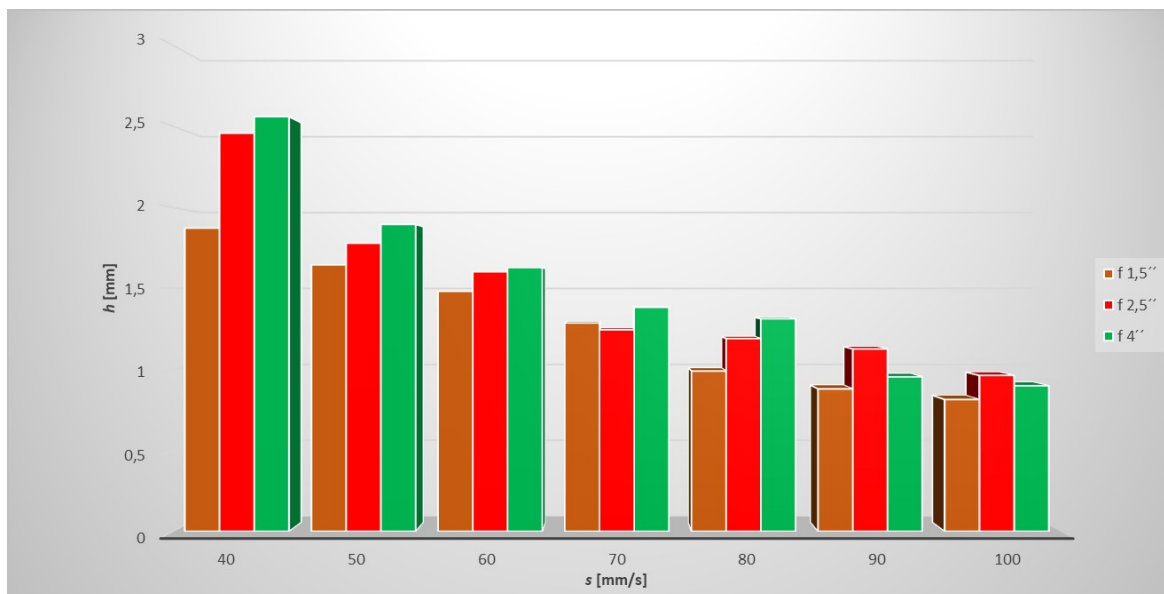
15.1 Hloubka vygravírované plochy

Hloubka vygravírované plochy h roste se zvyšujícím se výkonem P a snižující se řeznou rychlostí s laseru. Největší vygravírované hloubky bylo dosaženo při maximálním výkonu laseru (100 W) a řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s), jak lze vidět v tab. 15.1. Naopak nejmenší vygravírované hloubky bylo dosaženo při maximální řezné rychlosti (1524 mm/s) a výkonu laseru 30 % (30 W).

Tab. 15.1 Hloubky vzorků při změně řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti.

P/s		$f 1,5''$		$f 2,5''$		$f 4''$	
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	h [mm]	S [mm]	h [mm]	S [mm]	h [mm]	S [mm]
100/40	100/609,6	1,873	0,025	2,459	0,007	2,561	0,004
100/50	100/762	1,646	0,007	1,779	0,004	1,896	0,018
100/60	100/914,4	1,482	0,003	1,603	0,004	1,629	0,02
100/70	100/1066,8	1,287	0,004	1,245	0,006	1,384	0,043
100/80	100/1219,2	0,990	0,007	1,191	0,009	1,313	0,006
100/90	100/1371,6	0,880	0,013	1,127	0,003	0,954	0,003
100/100	100/1524	0,814	0,007	0,963	0,003	0,899	0,004

Hloubka vzorků se mění i se změnou ohniskové vzdálenosti čočky f . V závislosti hloubky vygravírované plochy na změně řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti (obr. 15.1, str. 88) je patrné, že při stejných řezných podmínkách lze dosáhnout větší vygravírované hloubky při ohniskové vzdálenosti čočky 4'' než při použití ohniskové vzdálenosti 2,5'' nebo 1,5''. Lze tedy říci, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností roste i hloubka vygravírované plochy.

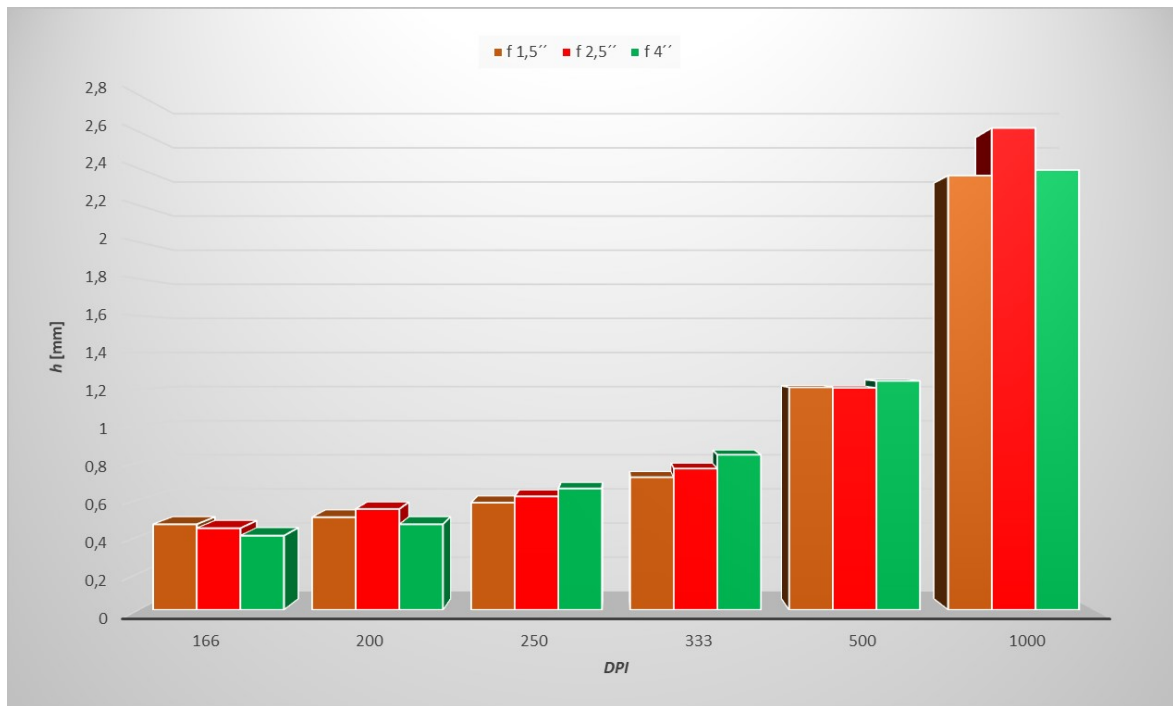


Obr. 15.1 Závislost hloubky na řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti při výkonu 100 W.

Na hloubku vygravírované plochy má vliv také hodnota *DPI*. Z naměřených hodnot hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot *DPI* (tab. 15.2) lze vidět, že zvyšováním těchto hodnot, dochází ke zvětšování hloubky vzorků. Projevuje se zde také změna ohniskové vzdálenosti čočky. Opět dochází k tomu, že vzorky vyrobené při ohniskové vzdálenosti čočky 4'' dosahují větší hloubky než vzorky vyrobené při ohniskové vzdálenosti 2,5'' a 1,5'' (obr. 15.2, str. 89).

Tab. 15.2 Hloubky vzorků při změně hodnot *DPI* a ohniskové vzdálenosti.

<i>DPI</i>	<i>f</i> 1,5''		<i>f</i> 2,5''		<i>f</i> 4''	
	<i>h</i> [mm]	<i>S</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>S</i> [mm]	<i>h</i> [mm]	<i>S</i> [mm]
166	0,466	0,029	0,444	0,008	0,403	0,005
200	0,504	0,014	0,549	0,008	0,465	0,003
250	0,583	0,018	0,617	0,006	0,660	0,003
333	0,722	0,008	0,769	0,004	0,843	0,002
500	1,211	0,013	1,207	0,003	1,246	0,005
1000	2,362	0,003	2,621	0,014	2,393	0,086



Obr. 15.2 Závislost hloubky vzorků na hodnotách DPI a ohniskové vzdálenosti.

15.2 Povrch vygravírované plochy

Povrch vygravírované plochy závisí především na hloubce, které bylo dosaženo. S rostoucí hloubkou vygravírované plochy se zvyšují i nerovnosti, roste členitost povrchu. Nejjemnějšího povrchu bylo dosaženo při maximálním výkonu laseru (100 W), řezné rychlosti 40 % (609,6 mm/s) a hodnotě DPI 166. Naopak povrchu s největší členitostí bylo dosaženo při stejných hodnotách výkonu a řezné rychlosti laserového zařízení, ale hodnotě DPI 1000 (obr. 10.3, str. 61).

Strukturu povrchu ovlivňuje také ohnisková vzdálenost čočky, kdy čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5'' lze dosáhnout jemnějšího povrchu, než při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5'' nebo 4'', jak lze vidět na obr. 10.5 na str. 62.

Platí tedy, že se zvětšováním hloubky vygravírované plochy, jakoukoliv metodou, se bude zvětšovat i členitost povrchu.

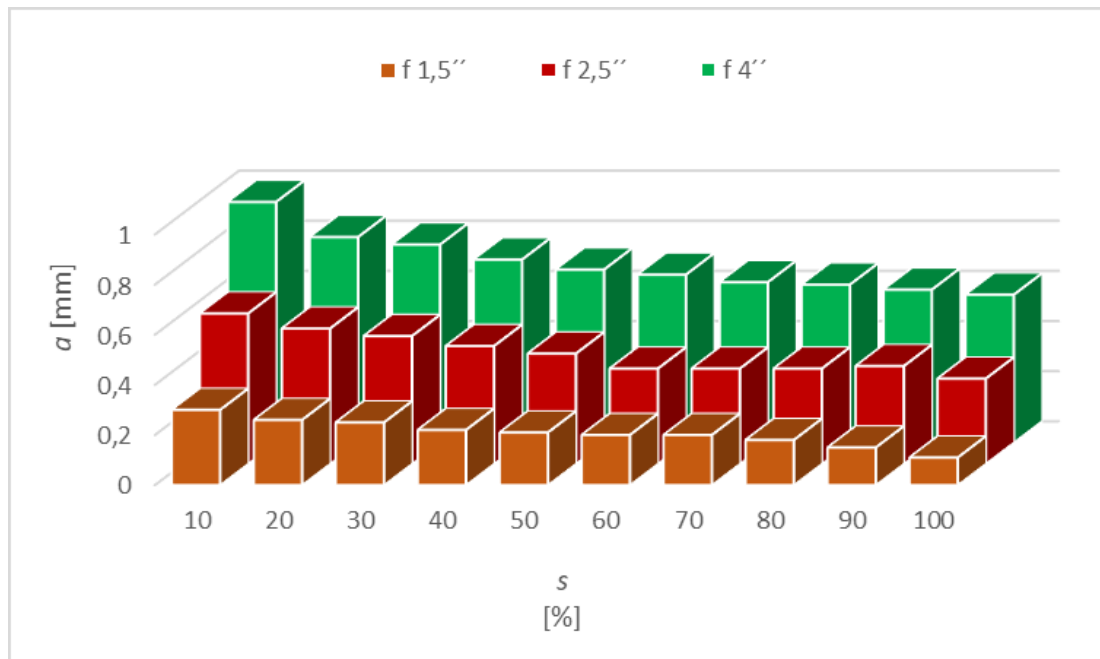
15.3 Šířka řezů

Šířka řezu a se zvětšuje s rostoucím výkonem P a klesající řeznou rychlostí s , to dokazuje i závislost šířky řezů na změně řezné rychlosti (obr. 15.3, str. 91 a obr. 15.4, str. 92). V této závislosti lze také pozorovat, že se zvětšující se ohniskovou vzdáleností f roste i šířka řezu.

Z naměřených hodnot (tab. 15.3) vyplývá, že řezu o nejmenší šířce bylo dosaženo při maximálním výkonu (100 W) a maximální řezné rychlosti (1524 mm/s), při použití čočky s ohniskovou vzdáleností 1,5''. Naopak řezu o největší šířce bylo dosaženo čočkou s ohniskovou vzdáleností 4'', při maximálním výkonu (100 W) a řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s) (tab. 15.4, str. 91). Všechny řезы byly vytvořeny při hodnotě DPI 1000.

Tab. 15.3 Šířky řezů při změně řezné rychlosti (10-100 %).

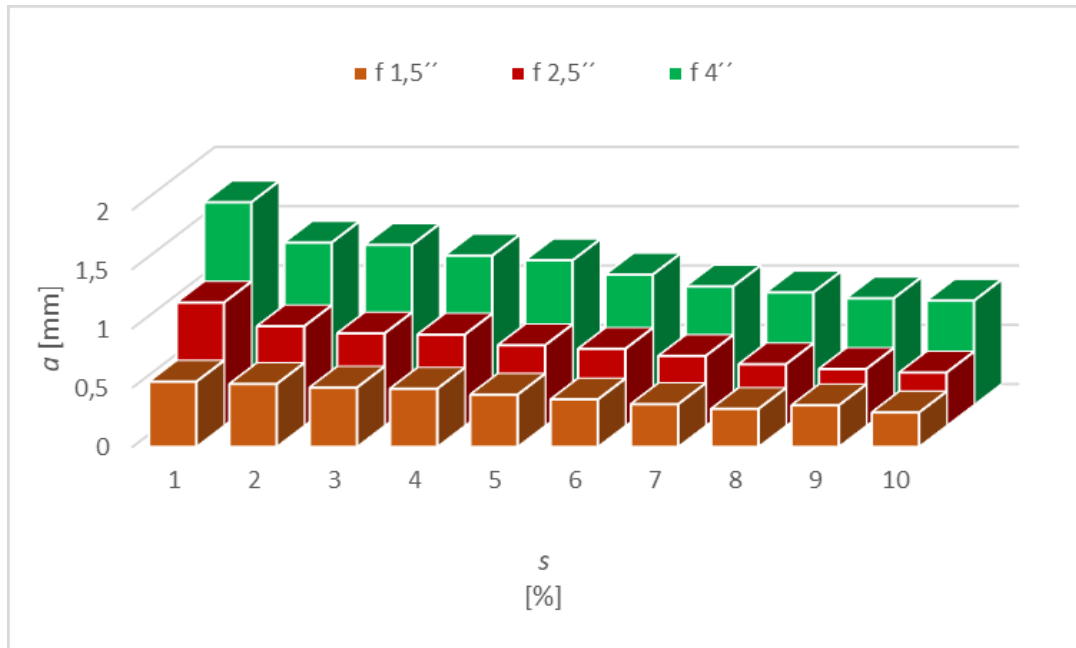
P/s		a		
		[mm]		
[%]	[W/mm·s ⁻¹]	$f 1,5''$	$f 2,5''$	$f 4''$
100/10	100/152,4	0,3	0,6	0,96
100/20	100/304,8	0,26	0,535	0,82
100/30	100/457,2	0,25	0,51	0,79
100/40	100/609,6	0,22	0,47	0,73
100/50	100/762	0,21	0,44	0,69
100/60	100/914,4	0,2	0,38	0,67
100/70	100/1066,8	0,2	0,38	0,64
100/80	100/1219,2	0,18	0,38	0,63
100/90	100/1371,6	0,15	0,39	0,61
100/100	100/1524	0,105	0,34	0,59



Obr. 15.3 Závislost šířky řezu na řezné rychlosti 10-100 [%] a ohniskové vzdálenosti.

Tab. 15.4 Šířky řezů při změně řezné rychlosti (1-10 %).

P/s		a [mm]		
[%]	[$W/mm \cdot s^{-1}$]	$f 1,5''$	$f 2,5''$	$f 4''$
100/1	100/15,24	0,55	1,04	1,71
100/2	100/30,48	0,53	0,84	1,37
100/3	100/45,72	0,5	0,78	1,35
100/4	100/60,96	0,49	0,77	1,26
100/5	100/76,2	0,44	0,68	1,22
100/6	100/91,44	0,4	0,65	1,1
100/7	100/106,68	0,36	0,59	1
100/8	100/121,92	0,32	0,52	0,95
100/9	100/137,16	0,35	0,48	0,9
100/10	100/152,4	0,29	0,45	0,88



Obr. 15.4 Závislost šířky řezu na řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti.

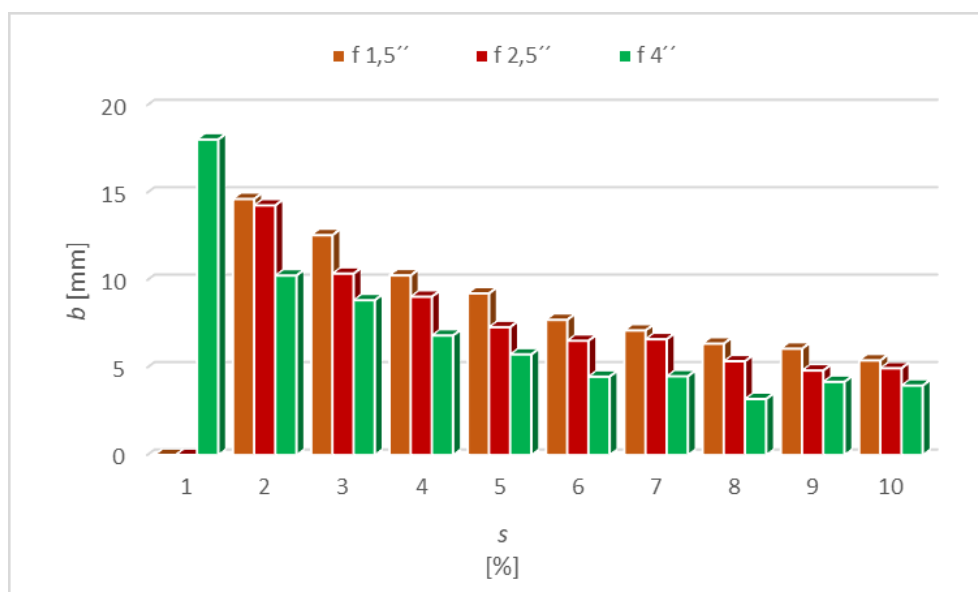
15.4 Hloubka řezu

Hloubka řezu b se mění podobně jako šířka řezu. S rostoucím výkonem P se zvětšuje a s rostoucí řeznou rychlostí s naopak snižuje. Z tabulky (tab. 15.5, str. 93), která zobrazuje naměřené hloubky jednotlivých řezů, lze určit, že největší hloubky řezu bylo dosaženo při maximálním výkonu laseru (100 W) a řezné rychlosti 1 % (15,24 mm/s), při použití čočky s ohniskovou vzdáleností f 1,5''. Naopak nejmenší hloubky řezu bylo dosaženo při ohniskové vzdálenosti čočky 4'', při stejné hodnotě výkonu, ale vyšší řezné rychlosti 10 % (152,4 mm/s).

Tab. 15.5 Naměřené hloubky řezů při změně řezné rychlosti.

P/s		b [mm]		
[%]	$[W/mm \cdot s^{-1}]$	$f 1,5''$	$f 2,5''$	$f 4''$
100/1	100/15,24	Prořez	Prořez	18,04
100/2	100/30,48	14,64	14,27	10,26
100/3	100/45,72	12,57	10,37	8,85
100/4	100/60,96	10,27	9,05	6,83
100/5	100/76,2	9,24	7,31	5,75
100/6	100/91,44	7,73	6,53	4,48
100/7	100/106,68	7,12	6,62	4,5
100/8	100/121,92	6,37	5,36	3,2
100/9	100/137,16	6,08	4,83	4,18
100/10	100/152,4	5,41	4,96	3,97

Na obrázku (obr. 15.5, str. 94), který zobrazuje závislost hloubky řezu na řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti čočky, lze vidět, že zvyšováním řezné rychlosti se snižuje hloubka řezů. Také zde lze pozorovat, že se změnou ohniskové vzdálenosti čočky se mění hloubka řezu.



Obr. 15.5 Závislost hloubky řezů na řezné rychlosti.

Měřením šířky řezů bylo zjištěno, že se zvyšující se ohniskovou vzdáleností se zvětšuje i šířka řezu. Toto zvětšení šířky řezu, vlivem zvětšení ohniskové vzdálenosti čočky, má za následek zmenšení hloubky řezu.

15.5 Povrch rotačního obrobku

Na povrchu válečku (obr. 15.6) lze vidět, že u rotačních obrobků se dosahuje jiných vlastností vygravírovaného povrchu než u obrobků rovinných. Přesto, že byl váleček vyrobený při stejných pracovních podmínkách po celém obvodu, tak i přes to má na různých místech různý povrch. Z toho plyne, že vygravírovaný povrch záleží na struktuře zpracovávaného dřeva, především na polotovaru a jeho rozmístění léta.



Obr. 15.6 Povrch rotačního obrobku.

ZÁVĚR

Laserový paprsek má na různé materiály různé účinky. Každý materiál má jiné vlastnosti, zejména přírodní materiály jako je dřevo. Tyto vlastnosti mohou být rozdílné i u dvou vzorků vytvořených ze stejného druhu dřeva. Tyto odlišnosti jsou způsobené především strukturou dřeva, tvrdostí, vlhkostí a stářím dřeva. Najít vhodné pracovní podmínky pro dosažení požadovaného povrchu obrobku z přírodního materiálu není snadné. Proto jsem se v této práci zaměřil na jednu vybranou dřevinu, konkrétně na bukové dřevo, u kterého jsem zkoumal, jaké účinky má laserový paprsek na tento druh dřeviny při různých pracovních podmínkách.

Cílem bylo navrhnout vzorky pro vytvoření přehledu ve formě tabulek a grafů zobrazujících závislosti vlastností povrchů, vytvořených rastrovým gravírováním, a vlastností řezů, vytvořených vektorovým řezáním, na pracovních podmínkách laserového zařízení. Vzorky jsem připravil na rovinné polotovary kvůli snadnějšímu měření těchto vzorků. Tento přehled pro zpracování bukového dřeva na laseru ILS 3-NM bude sloužit jako pomůcka v laboratořích, která pomůže především pro určení vhodných pracovních podmínek pro dosažení požadovaného povrchu obrobku.

Zjištěné informace z měření platí pouze pro vybranou dřevinu, tedy bukové dřevo, protože každá dřevina má odlišnou strukturu v různých místech polotovaru, podle toho, z jaké polohy ve kmeni je vyroben. I u samotného bukového dřeva nebude dosaženo vždy stejných povrchů, protože každá část dřeva má jiné vlastnosti. Tyto vlastnosti ovlivňuje mnoho faktorů, jako jsou vlhkost dřeva, šířka letokruhů a podíl letního dřeva, poloha ve kmeni a věk stromu, to potom ovlivňuje i samotnou práci se dřevem.

Informace získané měřením rovinných vzorků jsem uplatnil při návrhu pracovních podmínek pro rotační obrobek z přírodního materiálu. Rotační polotovary lze gravírovat, popřípadě řezat, pomocí rotační osy. Vypracoval jsem postup, jak správně tuto rotační osu připravit a nastavit. Při práci na rotační ose jsem musel vytvořit vlastní přípravky, abych mohl dobře upevnit váleček mezi upínací přípravky. Také nastavení obrobku do osy rotace a následné nastavení ohniskové vzdálenosti čočky bylo poměrně obtížné a zdouhavé. Z toho důvodu by bylo vhodné vytvořit nové upínací přípravky pro umožnění obrábění více tvarově různorodých obrobků pomocí rotační osy a vytvořit také přípravky pro snadnější nastavení obrobků do osy rotace a pro usnadnění nastavení ohniskové vzdálenosti čočky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Maňková, Ildikó. Progresívne technológie. Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] LASER: supernástroj člověka 21. století [online]. MOCEK, Tomáš. 2017 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: http://www.avcr.cz/opencms/export/sites/avcr.cz/.content/galerie-souboru/Laser_supernastroj-cloveka-21.-stoleti.pdf
- [3] MORÁVEK, R. Nekonenční metody obrábění. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [4] Bílek, Ondřej a Lukovics Imrich. Výrobní inženýrství a technologie. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [5] SERIÁL NA TÉMA LASERY – ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ [online]. NOVÁK, Miroslav. 2011 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [6] Laserové technologie v praxi [online]. LAPŠANSKÁ, Hana. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [7] Laser Systems for Optical Microscopy [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/microscopylasers/>
- [8] Seriál na téma lasery – Hlavní typy laseru používaných v průmyslu [online]. KOŘÁN, Pavel. 2013 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laserupouzivanych-v-prumyslu-128>
- [9] Nekonenční metody obrábění – 5. díl [online]. ŘASA, Jaroslav a Kerečaninová Zuzana. 2008 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- [10] Značení a gravírování laserem [online]. 2003 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem.html>

- [11] Gravírování dřeva [online]. 2017 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: www.grazir.cz/gravirovani-a-rezani-dreva
- [12] Laserové řezání a gravírování dřeva [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://www.eurolaser.com/cz/materialy/drevo/>
- [13] Stavba dřeva [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: www.elearning.aspara.cz/subdom/elearning/index.php?page=stavba-dreva
- [14] Makroskopická stavba dřeva [online]. 2013 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/makroskopicka-stavba-dreva/page/318/>
- [15] JOSTEN, E., REICHE, T., WITTCHEN, B. Dřevo a jeho obrábění. Grada Publishing, a.s. Praha, 2010. ISBN 978-80-247-2961-9.
- [16] Fyzikální vlastnosti dřeva [online], [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.elearning.aspara.cz/subdom/elearning/index.php?page=fyzikalni-vlastnosti-dreva>
- [17] Mechanické vlastnosti dřeva [online]. [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <http://www.elearning.aspara.cz/subdom/elearning/index.php?page=mechanicke-vlastnosti>
- [18] Tvrdost dřeva, přehled [online]. 2016 [cit. 2018-12-30] Dostupné z: <https://www.optimtop.cz/tvrdost-dreva-prehled/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Význam symbolů
a	[mm]	Šířka řezu
b	[mm]	Hloubka řezu
DPI	[-]	Počet pixelů na palec
f	['']	Ohnisková vzdálenost
h	[mm]	Hloubka vygravírované plochy
P	[W]	Výkon
PPI	[-]	Počet pulsů na palec
s	[mm/s]	Řezná rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Základní rozdělení NMO podle využitého fyzikálního procesu. [3]</i>	14
<i>Obr. 2.1 Stimulovaná emise [5]</i>	17
<i>Obr. 2.2 Rozdíl fokusace bílého a laserového světla. [1]</i>	18
<i>Obr. 2.3 Obecné schéma laseru. [5]</i>	19
<i>Obr. 2.4 Princip laseru. [5]</i>	19
<i>Obr. 2.5 Úprava svazku pomocí expandéru. [7]</i>	20
<i>Obr. 3.1 Popis CO₂ laseru. [1]</i>	23
<i>Obr. 4.1 Využití laseru pro různá použití. [4]</i>	24
<i>Obr. 4.2 Metody svařování za pomoci laseru. [9]</i>	25
<i>Obr. 4.3 Princip řezání materiálu laserem. [9]</i>	27
<i>Obr. 4.4 Princip tepelného zpracování. [9]</i>	28
<i>Obr. 4.5 Princip nanášení povlaku na obrobek. [9]</i>	29
<i>Obr. 5.1 Popisování pomocí masky. [9]</i>	31
<i>Obr. 5.2 Popisování vychylováním paprsku laseru. [9]</i>	31
<i>Obr. 5.3 Příklady použití popisování pomocí laseru. [9]</i>	32
<i>Obr. 5.4 Příklad použití gravírování laserem do dřeva. [11]</i>	32
<i>Obr. 6.1 Řezy dřevem. [14]</i>	34
<i>Obr. 6.2 Příčný řez kmenem. [13]</i>	34
<i>Obr. 6.3 Závislost hloubky řezu laseru na jeho výkonu. [4]</i>	37
<i>Obr. 6.4 Závislosti hloubky řezu na řezné rychlosti. [4]</i>	37
<i>Obr. 8.1 Popis laserového zařízení ILS 3-NM.</i>	42
<i>Obr. 8.2 Vzorky vytvořené v programu Corel Draw.</i>	43
<i>Obr. 8.3 Výběr barev pro gravírování a řezání.</i>	43
<i>Obr. 8.4 Nastavení pracovních podmínek.</i>	44
<i>Obr. 8.5 Kontrola nastavení ohniskové vzdálenosti.</i>	44
<i>Obr. 8.6 Vzorky vytvořené při změně výkonu laseru.</i>	45
<i>Obr. 8.7 Vzorky vytvořené při konstantním výkonu a změně řezné rychlosti.</i>	45
<i>Obr. 8.8 Vzorky vytvořené při změně řezné rychlosti.</i>	46
<i>Obr. 8.9 Vzorky vytvořené při změně hodnot DPI.</i>	47
<i>Obr. 8.10 Vzorky pro porovnání řezů.</i>	47
<i>Obr. 8.11 Vzorky řezů vytvořené při změně řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti.</i>	48
<i>Obr. 8.12 Vzorky pro měření hloubky řezů.</i>	48

<i>Obr. 9.1 Lineární výškoměr LH-600E/EG.</i>	49
<i>Obr. 9.2 Postup nastavení nulového bodu.</i>	50
<i>Obr. 9.3 Postup měření hloubky daného vzorku.</i>	51
<i>Obr. 9.4 Závislost vygravírované hloubky na výkonu laseru.</i>	52
<i>Obr. 9.5 Vzorky vytvořené čočkou s ohniskovou vzdáleností 1,5''.</i>	53
<i>Obr. 9.6 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	54
<i>Obr. 9.7 Vzorky vyrobené čočkou s ohniskovou vzdáleností 2,5''.</i>	54
<i>Obr. 9.8 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	55
<i>Obr. 9.9 Vzorky vyrobené čočkou s ohniskovou vzdáleností 4''.</i>	55
<i>Obr. 9.10 Závislost hloubky na změně řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	56
<i>Obr. 9.11 Závislost hloubky na změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	57
<i>Obr. 9.12 Závislost hloubky na změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	58
<i>Obr. 9.13 Závislost hloubky na změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	59
<i>Obr. 10.1 Popis mikroskopu Carl Zeiss.</i>	60
<i>Obr. 10.2 Vzorky vytvořené změnou DPI, při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	61
<i>Obr. 10.3 Povrchy při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	61
<i>Obr. 10.4 Povrchy vytvořené změnou ohniskové vzdálenosti čočky.</i>	62
<i>Obr. 10.5 Povrchy při změně ohniskové vzdálenosti.</i>	62
<i>Obr. 10.6 Povrchy vzorků vytvořených při změně řezné rychlosti.</i>	64
<i>Obr. 11.1 Popis mikroskopu Carl Zeiss s měřícím okulárem.</i>	65
<i>Obr. 11.2 Postup měření šířky řezu.</i>	66
<i>Obr. 11.3 Postup měření hloubky řezu.</i>	66
<i>Obr. 11.4 Řezy při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	67
<i>Obr. 11.5 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	68
<i>Obr. 11.6 Řezy při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	68
<i>Obr. 11.7 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	69
<i>Obr. 11.8 Řezy při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	70
<i>Obr. 11.9 Závislost šířky řezů na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	71
<i>Obr. 11.10 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	72
<i>Obr. 11.11 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	73
<i>Obr. 11.12 Závislost šířky na řezné rychlosti 1-10 [%] při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	74

<i>Obr. 11.13 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 1,5''</i>	76
<i>Obr. 11.14 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 2,5''</i>	77
<i>Obr. 11.15 Závislost hloubky na řezné rychlosti při ohniskové vzdálenosti 4''</i>	78
<i>Obr. 12.1 Návrh vzorků pro rotační osu</i>	79
<i>Obr. 12.2 Vzorky po upečení</i>	80
<i>Obr. 13.1 Popis rotační osy</i>	81
<i>Obr. 13.2 Přípravky pro upínání polotovarů</i>	82
<i>Obr. 13.3 Postup nastavení rotační osy v programu Corel Draw</i>	83
<i>Obr. 13.4 Fokusační tělíska pro jednotlivé ohniskové vzdálenosti</i>	83
<i>Obr. 13.5 Ovládací panel laserového zařízení</i>	84
<i>Obr. 14.1 Kontrola upnutí válečku pomocí číselníkového úchylkoměru</i>	85
<i>Obr. 14.2 Nastavení ohniskové vzdálenosti pomocí fokusačního tělíska</i>	86
<i>Obr. 14.3 Konečný výrobek – váleček s folklorním vzorem</i>	86
<i>Obr. 15.1 Závislost hloubky na řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti při výkonu 100 W</i>	88
<i>Obr. 15.2 Závislost hloubky vzorků na hodnotách DPI a ohniskové vzdálenosti</i>	89
<i>Obr. 15.3 Závislost šířky řezu na řezné rychlosti 10-100 [%] a ohniskové vzdálenosti</i>	91
<i>Obr. 15.4 Závislost šířky řezu na řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti</i>	92
<i>Obr. 15.5 Závislost hloubky řezů na řezné rychlosti</i>	93
<i>Obr. 15.6 Povrch rotačního obrobku</i>	94

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 3.1 Rozdělení laserů. [1]</i>	21
<i>Tab. 3.2 Vlastnosti jednotlivých průmyslových laserů. [8]</i>	22
<i>Tab. 8.1 Parametry laseru.</i>	41
<i>Tab. 9.1 Technické parametry lineárního výškoměru LH-600E/EG.</i>	50
<i>Tab. 9.2 Hloubky vzorků vytvořených při změně výkonu.</i>	52
<i>Tab. 9.3 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	53
<i>Tab. 9.4 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	54
<i>Tab. 9.5 Hloubky vzorků vytvořených při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	56
<i>Tab. 9.6 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	57
<i>Tab. 9.7 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	58
<i>Tab. 9.8 Hloubky vzorků vytvořených při změně hodnot DPI, při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	59
<i>Tab. 11.1 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	67
<i>Tab. 11.2 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	69
<i>Tab. 11.3 Šířky řezů při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	70
<i>Tab. 11.4 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	71
<i>Tab. 11.5 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	73
<i>Tab. 11.6 Šířka řezů při řezné rychlosti 1-10 [%] a ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	74
<i>Tab. 11.7 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 1,5''.</i>	75
<i>Tab. 11.8 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 2,5''.</i>	76
<i>Tab. 11.9 Hloubky řezů vytvořených při ohniskové vzdálenosti 4''.</i>	77
<i>Tab. 15.1 Hloubky vzorků při změně řezné rychlosti a ohniskové vzdálenosti.</i>	87
<i>Tab. 15.2 Hloubky vzorků při změně hodnot DPI a ohniskové vzdálenosti.</i>	88
<i>Tab. 15.3 Šířky řezů při změně řezné rychlosti (10-100 %).</i>	90
<i>Tab. 15.4 Šířky řezů při změně řezné rychlosti (1-10 %).</i>	91
<i>Tab. 15.5 Naměřené hloubky řezů při změně řezné rychlosti.</i>	93

SEZNAM PŘÍLOH

Seznam naměřených hloubek vygravírovaných vzorků.

- P I** Hloubky po gravírování s konstantní řeznou rychlostí s (1524 mm/s), $f=1,5''$.
- P II** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W), $f=1,5''$.
- P III** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W), $f=2,5''$.
- P IV** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W), $f=4''$.
- P V** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W) a řeznou rychlostí s (609,6 mm/s), $f=1,5''$.
- P VI** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W) a řeznou rychlostí s (609,6 mm/s), $f=2,5''$.
- P VII** Hloubky po gravírování s konstantním výkonem P (100 W) a řeznou rychlostí s (609,6 mm/s), $f=4''$.

Seznam snímků vygravírovaných povrchů vzorků.

- P VIII** Povrchy po gravírování s konstantní řeznou rychlostí s (1524 mm/s), $f=1,5''$.
- P IX** Povrchy po gravírování s konstantním výkonem P (100 W).
- P X** Povrchy po gravírování s konstantním výkonem P (100 W) a řeznou rychlostí s (609,6 mm/s).