

Vliv dráhy laserového paprsku na šířku řezu

Michal Hanus

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Michal Hanus
Osobní číslo:	T21514
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Vliv dráhy laserového paprsku na šířku řezu

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Provedení výroby vzorků pro experiment
3. Vyhodnocení šířky řezu
4. Zpracování získaných dat a provedení vyhodnocení

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

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

A Deep Dive Into Laser Cutter Speed And Power 2019 <https://makenzine.com/2019/03/04/a-deep-dive-into-laser-cutter-speed-and-power>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Knedlová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. března 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na porovnání šířky řezu při řezu rozdílnými trajektoriemi za použití čoček s ohniskovou vzdáleností 1,5“ a 2,5“ na materiálu o tloušťce 3 mm a 5 mm. Vzorky byly vyrobeny na laserovém zařízení ILS 3NM a poté měřeny pomocí dílenského mikroskopu a profil projektoru. Hlavním parametrem pro vyhodnocování byla šířka řezu laserového paprsku.

Klíčová slova: laserový paprsek, šířka řezu, laser, dílenský mikroskop

ABSTRACT

The thesis focuses on the comparison of the width of the cut when cutting with different trajectories using lenses with focal lengths of 1.5" and 2.5" on 3 mm and 5 mm thick material. The specimens were fabricated on an ILS 3NM laser scanner and then measured using a workshop microscope and profile projector. The main parameter for evaluation was the width of the laser beam cut.

Keywords: laser beam, cutting width, laser, workshop microscope

Zde je místo pro případné poděkování, popř. motto, úryvky knih atp.

Na tomto místě bych chtěl obzvláště poděkovat vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Janě Knedlové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, ochotu a za rady a připomínky, které napomohli ke vzniku této práce.

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

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PRINCIP LASERU	11
2 ROZDĚLENÍ LASERŮ PODLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ.....	14
2.1 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	17
2.1.1 Laser Nd:YAG	17
2.1.2 Vláknový laser	18
2.1.3 Diodový laser	19
2.1.4 Diskový laser.....	19
2.2 PLYNOVÉ LASERY	19
2.2.1 Oxid uhličitý.....	20
2.2.2 Excimerové lasery	21
2.3 KAPALINOVÉ LASERY	21
2.4 POLOVODIČOVÉ LASERY	22
3 LASER V PRŮMYSLU	23
3.1 ŘEZÁNÍ LASEREM	23
3.1.1 Oxidační řezání	25
3.1.2 Tavné řezání	25
3.2 ZNAČENÍ LASERU	25
3.2.1 Značení přes masku	25
3.2.2 Značením vychylování paprsku	26
3.3 VRTÁNÍ LASEREM.....	27
3.4 OBRÁBĚNÍ LASEREM.....	28
3.4.1 Laserem podporované obrábění	28
3.4.2 Obrábění laserem	29
3.6 TEPelné ZPRACOVÁNÍ	30
3.6.1 Kalení laserem.....	31
3.6.2 Nanášení povlaků	32
3.7 NEPRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ LASERU	33
3.7.1 Optická mechanika	33
3.7.2 Laserová tiskárna	33
3.7.3 Laserové ukazovátko.....	33
3.7.4 Čtečka čárového kódu	33
4 OPTICKÉ ČOČKY.....	35
5 POLYMERNÍ MATERIÁLY	37
5.1 POLYMETHYLMETAKRYLÁT	37
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	39

6	CÍLE PRÁCE	40
7	VYHOTOVENÍ VZORKŮ.....	41
8	MĚŘENÍ VZORKŮ	44
9	NAMĚŘENÉ HODNOTY	47
10	ZPRACOVÁNÍ DAT	51
11	VYHODNOCENÍ	60
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

Název laser pochází z anglického výrazu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, jak můžeme přeložit: zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Základy pro princip laseru představil poprvé Albert Einstein v roce 1917. Předchůdcem laseru byl MASER, což je zařízení vydávající mikrovlny. A. L. Schawlow a C. H. Townes zdokonalovali toto zařízení, čímž se jim podařilo vytvořit první laser a následně ho sestrojili. Oba za tuto práci získali Nobelovu cenu. V roce 1960 T. H. Maiman sestrojil první funkční laser, který byl pouze rubínový a je nesrovnatelný s dnešními lasery.

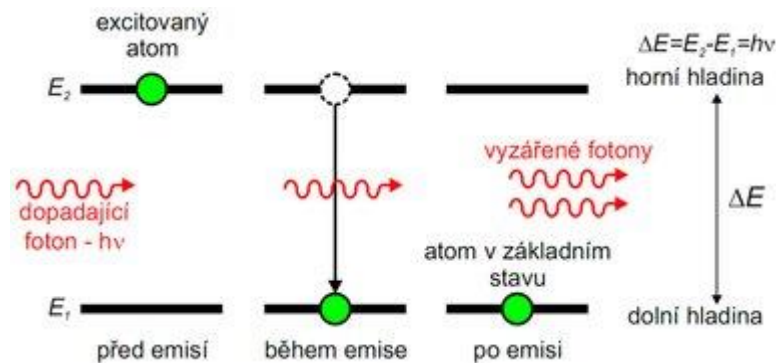
V dnešní době je laser běžnou součástí našeho života a denně se s ním setkáváme na každém kroku. Podle technických parametrů laseru (aktivní prostředí, výkon, vlnová délka,...) lze určit, pro jakou činnost je vhodný. Laser má využití v průmyslu, lékařství, výpočetní technice, biologii a dalších oblastech. V lékařství laser slouží jako skalpel, používá se k zničení nádorů a ve stomatologii slouží jako vrtačka. V geodezii má využití pro měření vzdálenosti mezi dvěma body a v zbrojním průmyslu ho lze použít jako zbraň nebo zaměřovač. Běžně můžeme laserový paprsek najít v tiskárnách, čtečkách čárových kódů a v průmyslu nahrazuje nekonvenční technologie díky své vysoké efektivitě a nízkým nákladům.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP LASERU

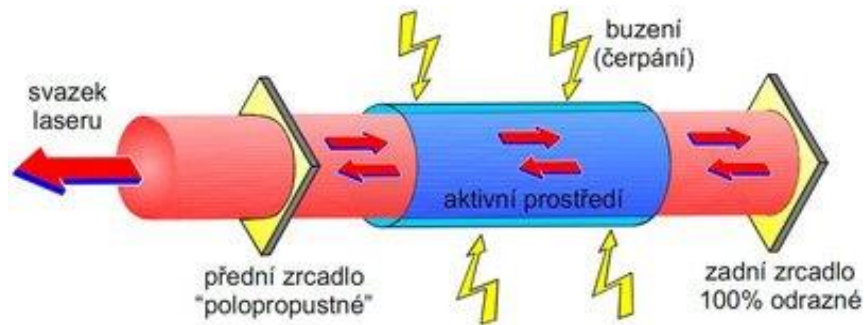
Výkon laserových zařízení je koncipován v širokém spektru, přičemž obvykle bývá i přes 1000 wattů. Zároveň laser disponuje širokým rozsahem vlnových délek. Například vlnové délky 690 nm získáme využitím rubínového stimulatoru. S CO₂ lze dosahovat vlnových délek až 10 600 nm.

Princip laseru spočívá v zaostření a soustředění paprsku na velmi malou plochu. Tímto získáme paprsek o velmi vysoké energetické koncentraci. Energetická hodnota přesahuje řádově MW.cm⁻². Materiál se v místě dopadu vlivem teploty odpařuje. Šířka řezu paprsku je v řádu desetin milimetrů.

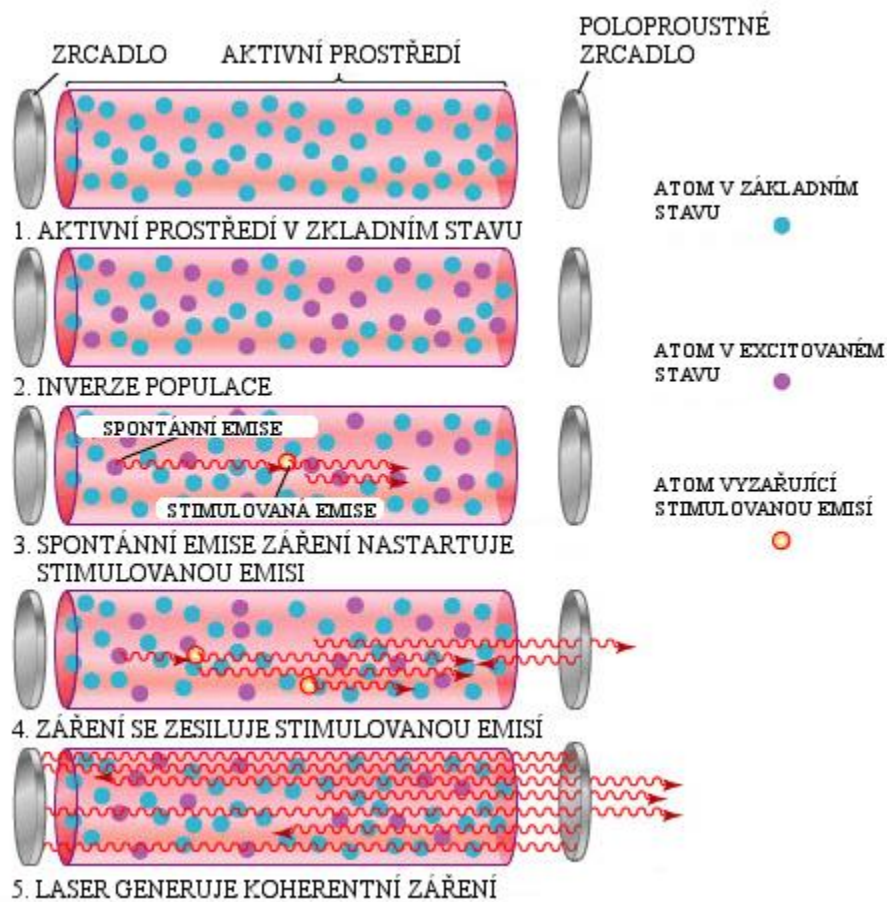


Obrázek 1: Emise [11]

Běžné světelné zdroje šíří paprsky do všemi směry, ve srovnání s paprskem laseru v upraveném prostředí, které stimuluje elektromagnetické záření, aniž by potřebovalo spontánní emise záření. Tento jev probíhá v neprospěch vynucené emise. Spontánní emise je vytvářena díky vybuzeným atomům s určitou energetickou hladinou pokoušející se zaujmout hladinu o nižší energii. V průběhu procesu vznikne množství světelného záření s určitou frekvencí. Spontánní emise můžeme nazvat jako samovolnou. Do původního stavu se atom vrací reakcí na vnější podnět, ale také vyzařuje fotony o stejné frekvenci. Tuto reakci nazýváme vynucenou emisí jinými slovy emisí stimulovanou. Dle energetické hladiny vzniká infračervené, světelné nebo ultrafialové záření. [1],[2],[3],[4]



Obrázek 2: Obecný popis laseru [11]



Obrázek 3: Princip laseru [11]

Atomy se za běžných podmínek vyskytují v základním stavu. Základním stavem můžeme definovat stav s nejnižší energetickou hladinou. Buzením můžeme přimět atom vydávat emisní záření, k tomu ale potřebujeme určité množství energie. Takto přidanou energii nazýváme čerpání.

Typy buzení můžeme rozdělit podle:

- Excitace elektronů
- Pomocí fotonů
- Vzájemným střetem atomů

Může dojít ke dvěma jevům. K emisi tedy záření dochází při poklesu z nižší energetické hladiny do vyšší. Za předpokladu dosažení absorbce, elektrony z nižší energetickou hladinou přechází do hladiny s vyšší energetickou hladinou.

Laser lze nazvat generátorem světelného záření a zároveň kvantovo-elektrickým zesilovačem. Dle typu zařízení vytvoří laserový paprsek stimulovanou emisí fotonů v aktivním prostředí. Generovaný svazek paprsků může dosáhnout až 100 000krát intenzivnější záření než původní zdroj. V technologiích se využívá především horizontální konstrukce. [1], [3],

Monochromaticita

Záření, které je produkované laserem, vyzařuje na jedné vlnové délce a jedné barvě. Jedná se o primární vlastnost principu laseru. Tuto vlastnost využijeme spíše u měření vzdáleností a rychlostí než při obrábění.

Koherence

Další z primárních vlastností laserového zařízení. Dělí se na prostorovou a časovou. Časová koherence znamená, že částice o stejné fázi kmitají všechny stejným směrem ve směru šíření paprsku. Prostorová koherence znamená, že dochází ke kmitání částic se stejnou fází v kolmém směru vzhledem k šíření paprsku.

Divergence a Intenzita paprsku

Další z vlastností důležitou pro funkčnost laseru je divergence neboli rozbíhavost paprsku. Udává se ve $W.cm^2$ a je označována jako poloviční hodnota vrcholového úhlu kužele vystupujícího z rovinného otvoru laseru.

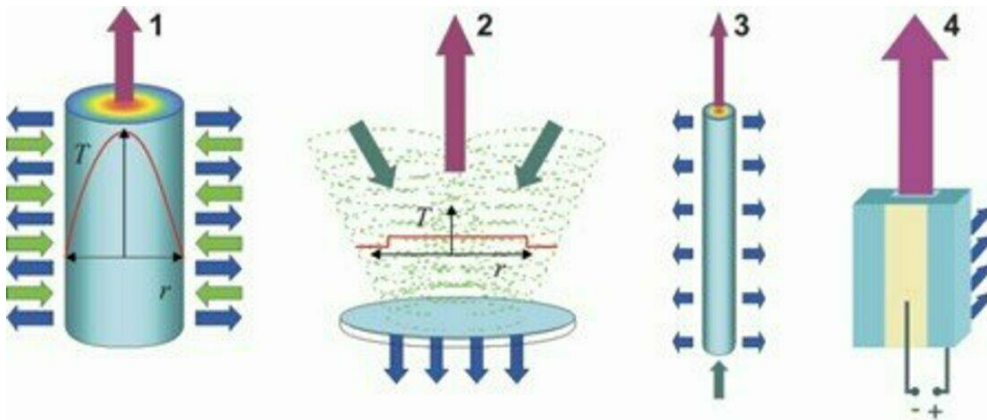
Intenzita laseru je velmi vysoká, díky tomu že pro něj neplatí stejné zákony vyzařování černého tělesa jako na jiná tělesa.

Při obrábění musíme udržovat takovou vzdálenost mezi paprskem a obrobkem, při které neklesne hloubka ostrosti. [1],[3]

2 ROZDĚLENÍ LASERŮ PODLE AKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ

V současné době máme širokou nabídku laserových zařízení s velkým množstvím aplikací. Lasery obecně lze dělit do několika základních skupin a jejich podskupin. Mezi parametry základního rozdělení patří například aktivní prostředí, výkon, vlnová délka, buzení nebo jejich životnost. [4]

Nejčastěji se lasery dělí dle použitého aktivního prostředí na pevnolátkové, plynové, kapalinové a polovodičové.



Obrázek 4: 1. Pevnolátkové lasery: 1 – Nd:YAG laser, 2 – diskový laser, 3 – vláknový laser, 4 – diodový laser [12]

Význam šipek: modré – chlazení, zelené – buzení, fialové – svazek laseru. Červeně je zobrazen teplotní profil v aktivním médiu. U diodového laseru je buzení přímým elektrickým proudem.

Dle vlnové délky lze dělit na infračervené záření (780 nm – 1 mm), viditelné spektrum (360 nm – 780 nm), rentgenové záření (10 nm – 1 pm) a ultrafialové záření (10 nm – 360 nm). Pracovní režimy je možné dělit na pulzní, kontinuální a impulzní. Pulzní režim dále lze dělit podle délky jednotlivého pulzu na dlouhé pulzy, krátké pulzy a velmi krátké pulzy. Buzení atomu u jednotlivých laserů lze opticky, chemicky, výbojem, elektronovým svazkem, jadernou energií nebo tepelnými přechody. Elektronové hladiny mohou být jaderné, elektronové nebo molekulární. Zařízení podle úrovně výkonu lze dělit na dva základní typy. Jedná se o vysokovýkonné, které dosahují výkon víc než jeden kilowatt. Používají se především pro náročnější technologické operace, jako je svařování nebo tepelné zpracování. Druhou skupinou jsou nízkotlaké, které charakterizuje výkon pouze v stovek wattů a jsou vhodné hlavně pro vrtání nebo řezání.

Lasery jsou nejčastěji využívány při různých aplikacích jako je značení, řezání, vrtání, gravírování, kalení, svařování nebo mikroobrábění.

Rozdělení laserových zařízení podle aktivního prostředí je největší a nejdůležitější skupinou. Tato skupina se dále dělí na konkrétní stroje. Pevnolátkové lasery patří mezi ně a zahrnují Nd:YAG, vláknové, diskové a diodové lasery. Skupina s plynovým aktivním prostředím se dělí na dvě hlavní části: CO₂ lasery a excimerové lasery. [3],[5]

Tabulka 1 Rozdělení laserů dle aktivního prostředí

Druh laseru	Aktivní prostředí		Vlnová délka	Typ paprsku	Výkon Laseru	Oblasti aplikace
Pevný	Rubín	Cr ³⁺	0,6943	Pulzní	5 W	Holografie
	Nd-YAG	Nd ³⁺	1,064	Kontinuální Pulzní	100 W až 1200 W	Strojní průmysl
	ND-sklo	Nd ³⁺	1,064	Pulzní	2 mW	
	Alexandrit		0,7- 0,818		10 W	
Polovodičový	GaAs		0,8-0,9	Pulzní	2 W až 10 W	Informační technologie, optoelektronika
Plynový	CO ₂ (N ₂ -He)	CO ₂	10,6	Kontinuální Pulzní	500 W až 1500 W	Strojní průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328 1,15 3,39	Kontinuální	20 mW	Metrologie, geodézie a holografie
	Ar	Ar ⁺	0,4764 0,488 0,5145	Kontinuální Pulzní	1 W až 500 W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl) (XeCl) (XeFl) (KrF)		0,170 0,308 0,351 0,248	Pulzní	20 W až 250 W	Fotolitografie, laserová chirurgie a strojírenství
Kapalinový	Barvivo Rhodamine 6	Ethalon Methanol	0,34- 1,175	Pulzní	100 W	Fotochemie a spektroskopie

Tabulka 2 Srovnání CO₂ a Nd-YAG laseru

Laser	Vlnová délka [mm]	Buzení	Efektivita	Režim	Výkon	Životnost (h)
CO ₂	10 600	RF	~10%	CW/pulzní	1~250 W	~ 20 000 W
					až 5 kW	
		EL	~25%		až 20 kW	
ND-YAG laser	1064	LD	~7%	CW	až 6 kW	~ 10000
				Pulzní	~ 100 W	
		lampy	~3%	Pulzní	~ 600 W	~ 1000

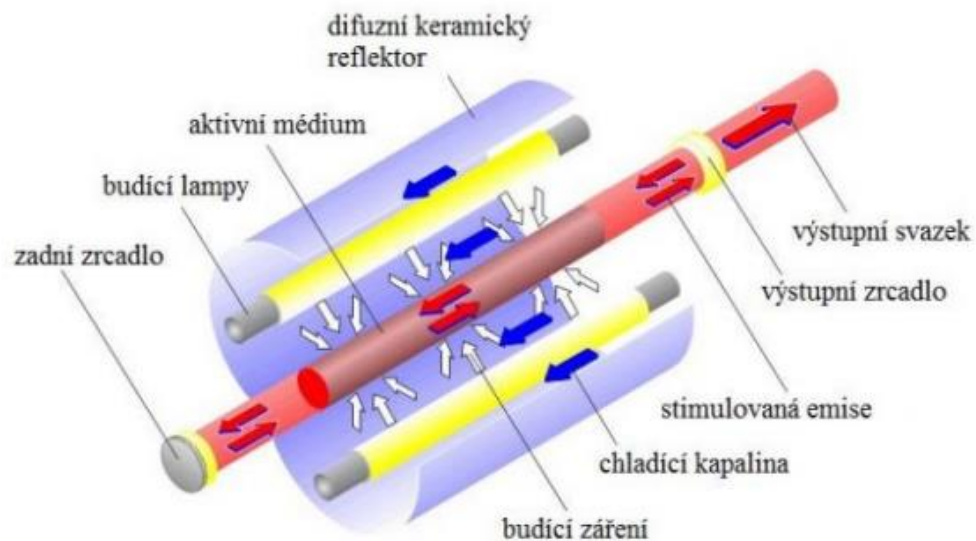
2.1 Pevnolátkové lasery

Většinou se zde aktivní prostředí skládá z pevných látek jako jsou krystaly, granáty nebo sklo a běžně se vybudí opticky. Tyto lasery se používají v průmyslových aplikacích pro mikroobrábění, opracování jemné mechaniky, gravírování, řezání a svařování, v závislosti na výkonu, který může být od 200 W až do 5 kW. Vyšší výkony jsou obvykle vhodné pouze pro svařování. Laserové systémy se také dají rozdělit podle aktivního prostředí na tyčové lasery (s tyčinkou o délce 15-20 mm a průměru v řádech milimetrů), vláknové lasery (s optickým vláknem o délce několika metrů a průměru 50-300 mm) a diskové lasery (s tloušťkou disku v desetinách milimetru a průměrem do 100 mm). [6],[7]

2.1.1 Laser Nd:YAG

Tento laser je nejčastěji používaným typem pevnolátkových laserů. Jeho aktivním prostředím je yttrium aluminium granát (Y₃Al₅O₁₂), do kterého jsou dopovány ionty neodymu (Nd₃₊) v množství přibližně 1 %. V pulzním režimu může dosáhnout energie impulzů v rozmezí 1-50 J, zatímco v kontinuálním režimu má energii impulzů 1-5 mJ.

Buzení tohoto laseru se nejčastěji provádí světelnými impulzy z xenonové nebo kryptonové obloukové lampy. [2]



Obrázek 5: Nd-YAG laser [11]

Nejčastěji se u zařízení této skupiny laserů používá vlnová délka 1 064,1 nm, zatímco slabší varianty Nd:YAG laserů mají vlnové délky 1 120, 1 320 a 1 440 nm. Tyto lasery jsou běžně využívány v průmyslové oblasti s výkonem do 10 kW. V kontinuálním režimu dosahují výkonu až 6 kW a v pulzním režimu až jednotky megawattů. Jejich jednoduchá konstrukce, vlnová délka a vysoký výkon umožňují široké spektrum aplikací, včetně řezání, vrtání, svařování a žíhání. Existuje také modifikace Nd:YAG laseru s vlnovou délkou 532 nm, zvaná zelené světlo, která se používá především pro precizní značení plastů a elektroniky. Lasery s vlnovou délkou 355 nm se nacházejí v UV spektru a jsou vhodné pro "studené značení" a mikroděrování v průmyslu za použití vakua. [8],[9]

2.1.2 Vlákenný laser

Zařízení této skupiny laserů obsahuje dlouhé křemíkové vlákno s průměrem v řádu mikrometrů. Vlákno je dopováno jedním z tří prvků – ytterbiem, erbium nebo thulium, což určuje vlnovou délku laseru. Lasery s ytterbiem poskytují nejvyšší výkony až v desítkách kilowattů, zatímco ostatní prvky dosahují menších výkonů v řádu desetinásobku. [10]

Kvalita svazku paprsků je velmi vysoká, což umožňuje efektivní chlazení. Křemíkové vlákno nahrazuje funkci krystalu a při vhodné konstrukci se dosahuje vysoké intenzity při malém příkonu. Například při použití 100 W lze svazek fokusovat do vzdálenosti 5 m s

intenzitou záření $10 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Vláknové lasery o výkonu 1,3 kW a krátké délce pulzů jsou vhodné pro obrábění materiálů citlivých na teplotní změny nebo s vysokou vodivostí tepla.

Vláknové lasery jsou v současnosti v průmyslových oblastech často využívány. Dostupný výkon těchto laserů může překročit 40 kW. Jsou běžně používány pro technologické operace, jako je řezání, gravírování a svařování. [9],[11]

2.1.3 Diodový laser

Aktivní prvek tohoto zařízení je vyroben z polovodičového materiálu, který má velmi vysokou účinnost a dosahuje až 60 %. Vlnová délka může být regulována až na

1000 nm a výkon se pohybuje v rozmezí od několika wattů až po 15 kW. Výhodou tohoto zařízení je relativně dlouhá životnost a nízké pořizovací náklady. Nevýhodou je horší kvalita paprsku a větší divergence než u jiných zařízení. Většinou je vyzářený paprsek obdélníkového tvaru a intenzita je prakticky rovnoměrně rozložena po celé ploše. Diodové lasery jsou využívány k řezání, svařování a kalení. [11]

2.1.4 Diskový laser

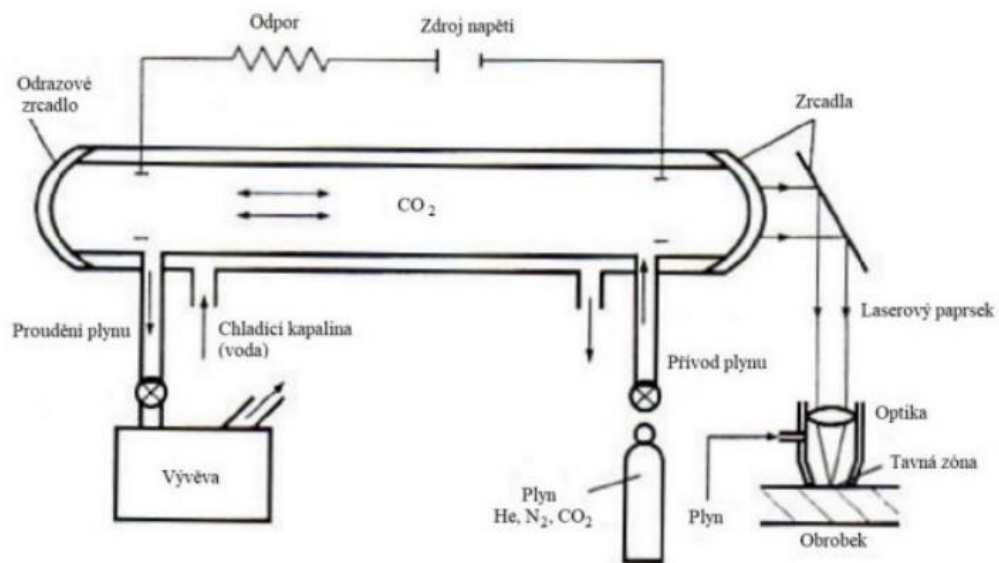
Tento typ laseru je moderní technologií používanou k opracování materiálu. Jeho princip je podobný jako u Nd:YAG laseru, ale s tím rozdílem, že aktivním prvkem je disk s průměrem do 100 mm. Výhodou tohoto zařízení je rovnoměrné rozložení teploty po celé ploše disku, vysoká kvalita paprsku a velký výkon, který může běžně dosáhnout až 16 kW. Nevýhodou je nižší účinnost, která se pohybuje mezi 15 až 20 % a kratší životnost než například u vláknových laserů. Diskové lasery se využívají při řezání a svařování kovů a jiných náročnějších technologických operacích. [12]

2.2 Plynové lasery

Lasery jejichž aktivní prostředí je oxid uhličitý jsou nejvýznamnějšími a nejčastěji používanými mezi plynovými lasery. Excimerový laser a helium-neonový laser jsou další významné typy plynových laserů, u kterých je aktivní prostředí tvořeno plyny nebo směsí plynů. Tyto lasery mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu. [13]

2.2.1 Oxid uhličitý

Lasery s využitím CO₂ jsou nejčastěji využívány v průmyslových aplikacích pro obrábění různých materiálů. Tyto lasery vysílají na vlnové délce 10 600 nm a patří mezi nejsilnější dostupné lasery. Nejvyšší výkon může dosáhnout až 20 kW. Pokud jde o obrábění nekovových materiálů nebo tenkostěnných profilů, používají se lasery s nižším výkonem (do 500 W). Pro řezání trubek a profilů se obvykle používají lasery s oxidem uhličitým středního výkonu (500 - 6 000 W). Lasery s oxidem uhličitým mohou řezat ocelové plechy do tloušťky 25 mm, hliník do tloušťky 15 mm a mosaz do tloušťky přibližně 8 mm. Tyto lasery jsou velmi flexibilní a mohou být úspěšně využity i v malosériové a středně sériové výrobě. Laserové systémy s vyšším výkonem, tj. 6 000 W a více, jsou ideální pro svařování. Tyto lasery umožňují dosáhnout hloubky svaru až 20 mm a jsou nejvýhodnější pro velké sériové výrobky. [1]



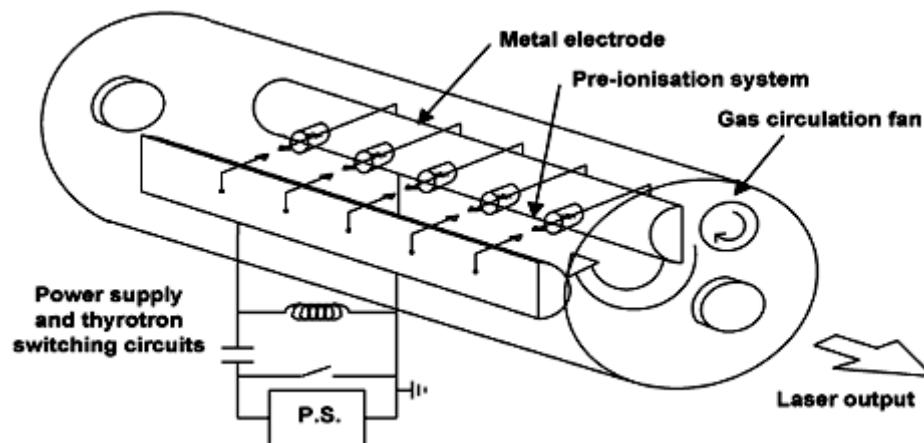
Obrázek 6: Schéma CO₂ laseru [1]

Mezi elektrodami laseru se vytváří teplo, které je nutné odvádět a zařízení chladit, aby nedošlo k poškození některých částí a poklesu výkonu. Ochlazování se obvykle provádí vzduchem u laserů s výkonem do 100 W a vodou u laserů s vyšším výkonem. Nejčastěji se používají CO₂ lasery, které mají krátké pulzy, ale vysokou energii na výstupu. Trubice, která obsahuje aktivní prostředí a oxid uhličitý, má obvykle délku 0,5 až 1 m a průměr 10 až 20 mm. Laser není příliš citlivý na nečistoty v plynu a přidáním jiných plynů, jako je helium

nebo xenon, lze zvýšit jeho výkon. Kromě zpracování kovů a plastů lze laser díky jeho vlnové délce a dobré absorpci využít i k zpracování dřeva, kůže a papíru. [1]

2.2.2 Excimerové lasery

Tento typ laseru používá jako aktivní prostředí excimery, což jsou speciální molekuly, které se excitují pouze ve vybuzeném stavu a při návratu do stavu základního se rozpadají na jednotlivé atomy. Tyto molekuly vznikají srážením atomů různých plynů, nejčastěji halogenů a vzácných plynů smíchaných do jedné směsi. Vyzařování laseru probíhá většinou v ultrafialové oblasti. Excimerové lasery vydávají záření v ultrafialové oblasti s vlnovou délkou mezi 157 a 351 nm. Tento typ záření je velmi dobře absorbován vzduchem, proto je pro aplikaci nezbytné použití vakuového prostředí. Tyto lasery mohou generovat výkony od miliwattů po kilowatty, ale pouze v krátkých pulzech. Buzení probíhá elektrickým výbojem a vycházející paprsek má vysokou kvalitu a malou rozbíhavost. Hlavní nevýhodou excimerových laserů je jejich krátká životnost aktivního prostředí. Tyto lasery se nejčastěji používají v oblasti mikroelektroniky a jemného obrábění, kde není žádoucí teplotní ovlivnění oblasti. [12],[14]



Obrázek 7: Schéma excimerového laseru [31]

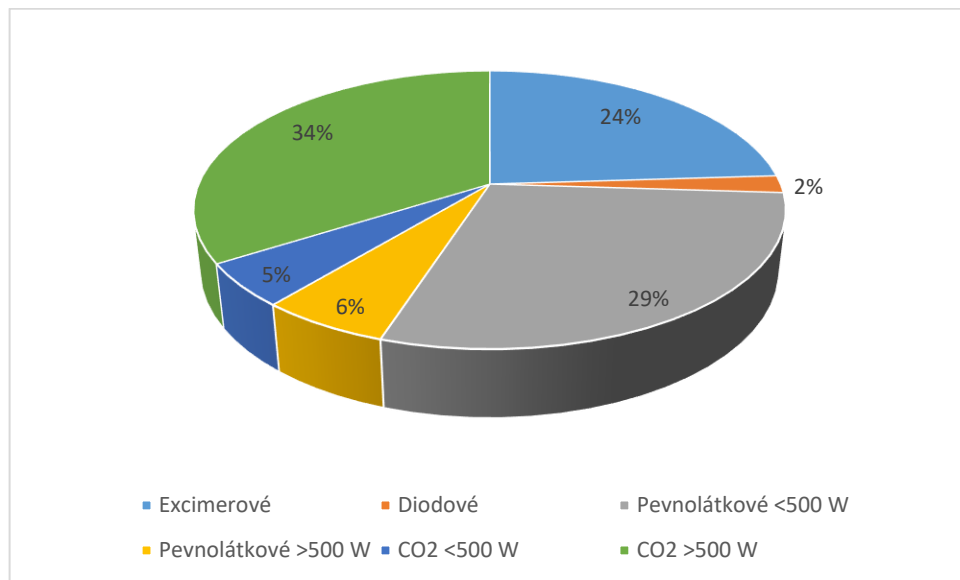
2.3 Kapalinové lasery

Excimerové lasery vysílají záření s vlnovou délkou v rozmezí 157–351 nm, což je ultrafialové záření, které je dobře absorbováno vzduchem. Proto je nutné tento typ laseru používat ve vakuu. Výkon excimerových laserů může být generován v rozsahu od miliwattů po kilowatty při krátkých pulzech. Buzení se provádí pomocí elektrického výboje.

Vycházející paprsek má malou rozbíhavost a vysokou kvalitu. Hlavní nevýhodou tohoto typu laseru je relativně krátká životnost aktivního prostředí. Excimerové lasery jsou vhodné pro aplikace v oblasti mikroelektroniky a jemného obrábění, kde je důležité minimalizovat tepelné ovlivnění zpracovávané oblasti. [7],[15]

2.4 Polovodičové lasery

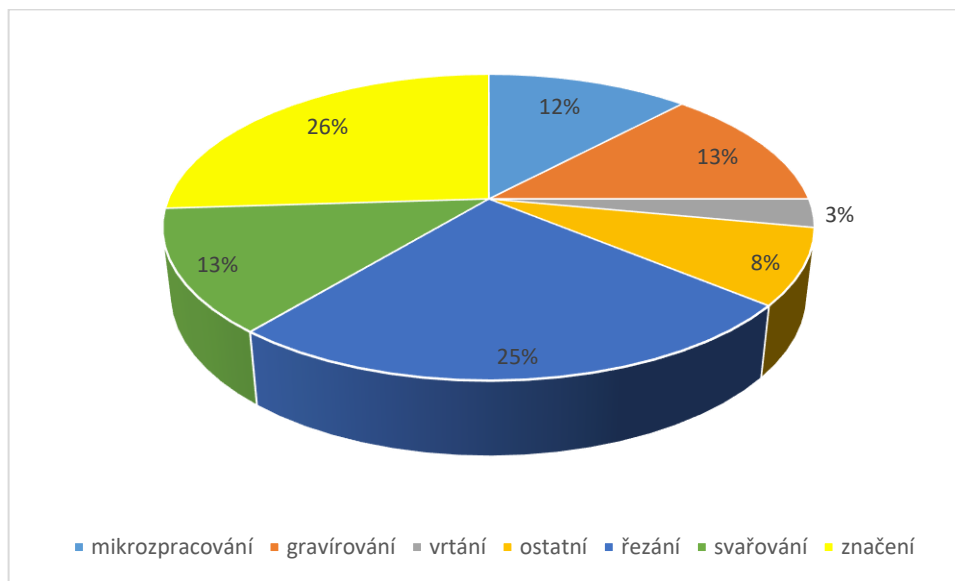
Aktivním prostředím polovodičových laserů jsou materiály s nerovnovážnými elektrony, jako například galium arsenid (GaAs) nebo kadmium selen (CdSe). Tyto lasery mohou být buzeny elektrickým proudem nebo elektronovým svazkem a jejich výkony se pohybují v řádu miliwattů až kilowattů s účinností až 50 %. Polovodičové lasery umožňují regulaci vlnových délek v rozmezí 0,3 μm až 30 μm , což je jejich výhodou. Nevýhodou je vyšší divergence paprsku a obdélníkový průřez výstupního svazku paprsků. Tyto lasery se často používají v laserových tiskárnách a mohou mít velmi malé rozměry. [13],[16]



Obrázek 8: Zastoupení laserů v průmyslu [32]

3 LASER V PRŮMYSLU

Díky úsilí o zlepšení účinnosti a kvality výroby se laser stal v průmyslu nezbytným nástrojem. Na rozdíl od tradičních technologií umožňuje laserové zpracování křehkých materiálů, jako je sklo a keramika. Laserový paprsek má malý průměr a umožňuje opracování špatně dostupných oblastí. Laserem lze provádět řadu úkonů, jako je soustružení, frézování, řezání, svařování a povrchové úpravy a další.



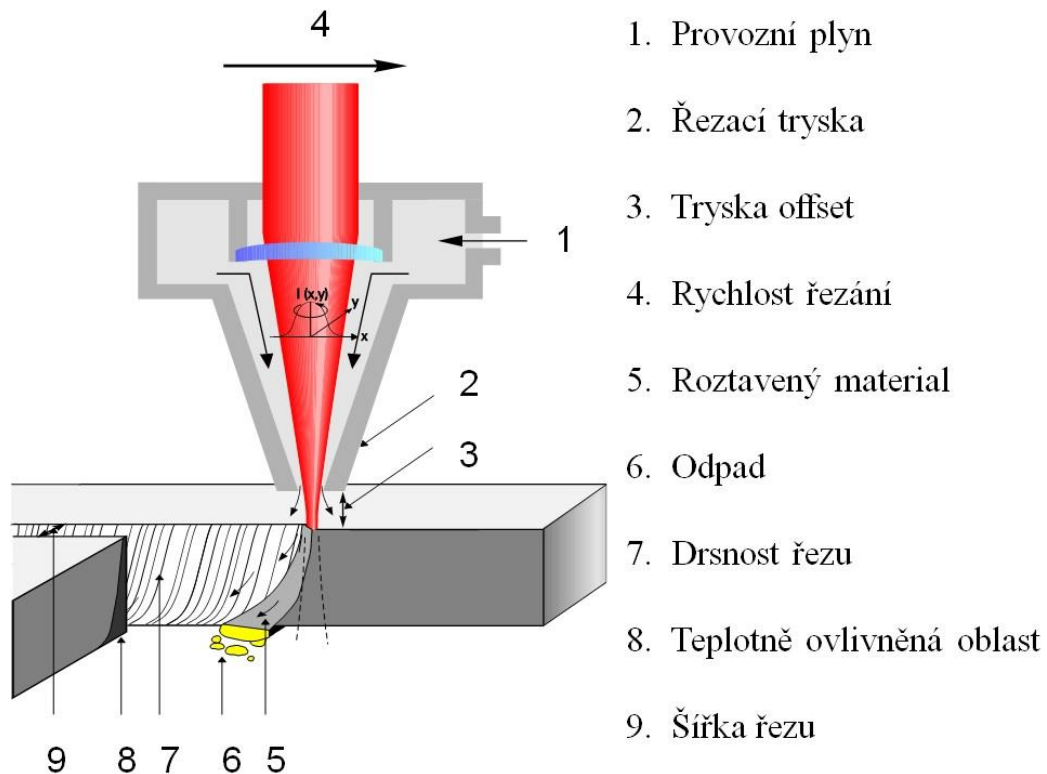
Obrázek 9: Využití laserů v průmyslu [17]

Laserová technologie byla zavedena do průmyslu koncem 60. let minulého století a od té doby prošla mnoha inovacemi a modernizacemi. V současné době je možné se setkat s různými typy laserových zařízení, které jsou využívány k provádění technologických operací, jako například řezání, značení, svařování, gravírování a vrtání. [17]

3.1 Řezání laserem

Tento typ laserového použití je velmi běžný a spočívá v propálení materiálu na jednom místě pomocí nakumulované energie, která se nemůže odvést vedením tepla. Poté se materiál postupně odstraňuje ve směru pohybu laserového paprsku. Tato technologie umožňuje řezat kovové i nekovové materiály různých tloušťek a vyžaduje správné nastavení parametrů, jako je výkon, frekvence pulzů, rychlost posuvu, vlnová délka a tlak plynu, aby bylo dosaženo čistého a přesného řezu.

Laserové řezání má mnoho výhod, například umožňuje řezání různých tvarů, lze obrábět většinu materiálů a dosažení vysoké přesnosti a drsnosti ploch po řezání. Přesnost řezu se pohybuje v rozmezí 0,05 - 0,1 mm na délku řezu jednoho metru.



Obrázek 10: Řezání laserem [33]

CO₂ lasery v kontinuálním režimu jsou nejčastěji používanou technologií pro dělení materiálů. Při středním výkonu do 15 kW jsou schopny běžně řezat konstrukční ocel do tloušťky 20 mm, nerezovou ocel do tloušťky 10 mm a slitiny do tloušťky 5 mm. Nd:YAG zařízení jsou také využívána s výkony mezi 100 a 1000 W, což umožňuje velmi úzké řezy při vysoké přesnosti, s tloušťkami řezných spár mezi 0,02 a 0,2 mm. Konstrukční ocel může být takto řezána do tloušťky 6 mm, korozivzdorná ocel do 3 mm a hliníkové slitiny do 2 mm.

Použití laseru pro řezání materiálů obvykle produkuje přesný a hladký řez bez drsných okrajů a s úzkou šířkou řezu. Okraje většinou nevyžadují další opracování a i při větší tloušťce materiálu si udržují relativně dobrý úhel. Maximální hloubka řezu závisí hlavně na výkonu laseru a typu materiálu. [18],[19]

3.1.1 Oxidační řezání

Tento postup je efektivní zejména pro materiály s vysokou vodivostí tepla, jako je měď a černá ocel. Procesním plynem se obvykle používá kyslík, který zvyšuje teplotu v místě řezu a zlepšuje hoření. Při řezání silnějších materiálů se může snížit výkon a tlak plynu, protože vzniká větší tepelná plocha. V této oblasti již není dostatek prostoru pro únik procesního plynu, což vede ke snížení jeho spotřeby. Oxidační řezání má výhodu v dosažení větších hloubek řezu oproti tavnému řezání. [17]

3.1.2 Tavné řezání

Proces tavného řezání se obvykle provádí s použitím dusíku jako procesního plynu. Jeho účelem je odstranění taveniny a ochlazování obrobku, čímž se minimalizují tepelné účinky v okolí řezu. Tento způsob se často používá pro řezání materiálů jako mosaz, nerezová ocel, hliník, černá ocel a některé druhy plastů. I přes vysokou tepelnou vodivost se tavné řezání používá i u hliníku, který má vysokou reaktivitu s kyslíkem. [17]

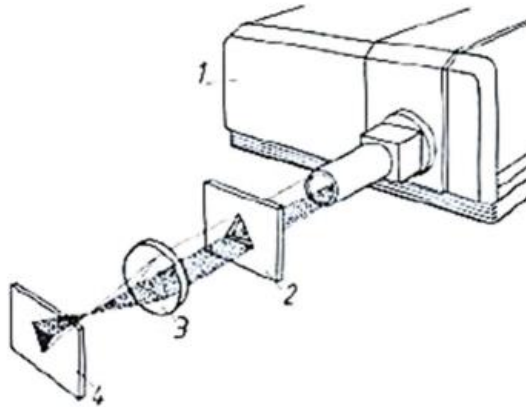
3.2 Značení laseru

Princip značení pomocí laseru spočívá v odpařování materiálu na místě, kde má být vytvořen popis nebo značka. Značky jsou obvykle velmi malé, s výškou maximálně v řádu milimetrů, ale hloubka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů. Tento proces lze aplikovat na různé tvary, včetně rovinných, válcových a zakřivených ploch, a to i na obtížně dostupných místech. Laserové značení je vhodné pro mnoho různých materiálů, včetně litiny, kalené oceli, titanu, zlata, slinutého karbidu, keramiky, platových materiálů, pryže a dřeva. Dokáže značit i na povrchy pokryté povlaky nebo laky. Značení je velmi přesné, stálé a mechanicky odolné. K dispozici jsou dvě hlavní metody značení: metoda přes masku a metoda vychylováním paprsků. [20]

3.2.1 Značení přes masku

Princip této metody spočívá v odpařování materiálu z povrchu, kde má vzniknout popis nebo značka, přičemž se využívají lasery, jako například Nd:YAG a CO₂ lasery. Značení může být aplikováno na rovinné, válcové a zakřivené plochy, a to i na těžce dostupných místech. Téměř všechny materiály, včetně litiny, kalené oceli, titanu, zlata, slinutého karbidu, keramiky, platových materiálů, pryže a dřeva, mohou být označeny touto metodou, včetně povrchů s povlakem nebo lakem.

Pro vytvoření značky se používá maska z ušlechtilé oceli nebo bronzu, která má vyřiznut požadovaný znak. Laser prosvítí masku, což způsobí, že se popis aplikuje na výrobek, zatímco zakrytá místa zůstanou nedotčená. Tato metoda je výhodná pro jednoduchost, rychlost a nízké náklady, zejména u velkosériové výroby. Nevýhodami jsou však menší popisovací pole (do 40 mm²) a nepříliš dobrá kvalita popisu. Pokud dojde ke změně značky, je nutné vytvořit novou masku, což může být další náklad.[21]

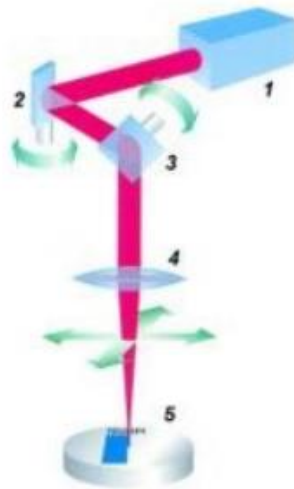


Obrázek 11: Značení přes masku [12]

1 – laser, 2 – maska, 3 – objektiv pro zaostření paprsku, 4 - obrobek

3.2.2 Značením vychylování paprsku

Pro značení se obvykle používají CO₂ a Nd:YAG lasery. CO₂ laserové zařízení má výkon mezi 8 a 20 W a pracovní plochu o velikosti 60 x 60 mm. Pevnolátkový Nd:YAG laser má výkon mezi 10 a 60 W a může značit na ploše až 260 x 260 mm. Princip značení pomocí Nd:YAG lasera spočívá v počítačovém vychylování dvou zrcadel, které jsou vzájemně kolmé. Výhodou této metody je vysoká kvalita popisu a možnost rychlé změny značky nebo popisu. [21]



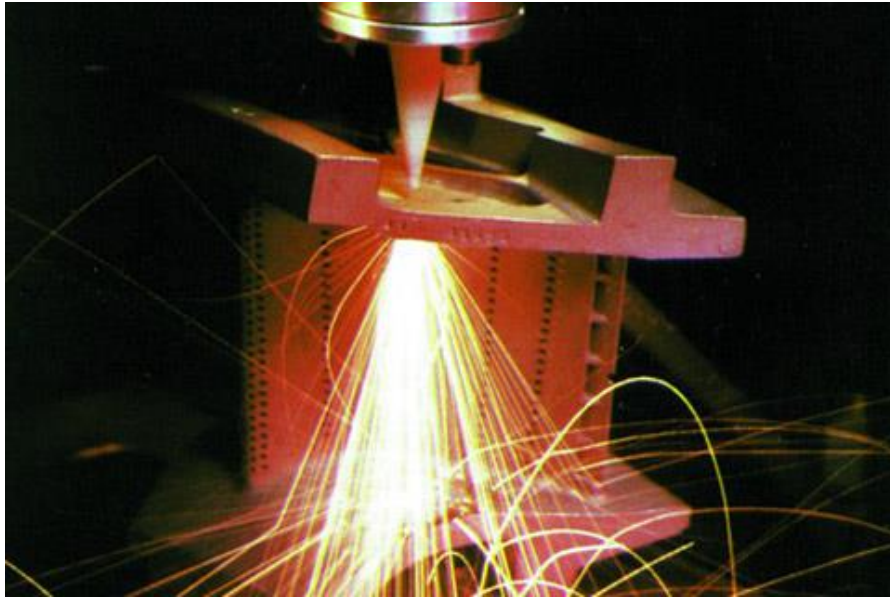
Obrázek 12: Značení pomocí vychylování paprsku [12]

1 – laserové zařízení, 2, 3 – vychylovací zrcátka, 4 – objektiv, 5 – výrobek

3.3 Vrtání laserem

Lasery se používají k vrtání otvorů v pulzním režimu, a to zejména plynového CO₂ a pevnolátkového Nd:YAG laseru. CO₂ laser dokáže vrtat otvory o průměru až 0,2 mm a tvarové otvory o velikosti až 5 mm, zatímco v průmyslu se nejčastěji používají rubínové lasery s výkonem 100-500 W, které umožňují vrtat díry s průměrem až 0,025 mm. Laserové vrtání umožňuje pracovat s kovovými, nekovovými i těžkoobrobitelnými materiály a dosáhnout hloubky až 50 mm. Vrtané otvory nemusí být vždy kruhového tvaru, mohou mít i jiné geometrické tvary. [21]

Pro vrtání otvorů se často používají lasery, které pracují v pulzním režimu a nejčastěji se využívají plynové CO₂ a pevnolátkové Nd:YAG lasery. CO₂ laser dokáže vrtat otvory o průměru až 0,2 mm a tvarové otvory velikosti asi 5 mm, zatímco v průmyslu se nejčastěji používají rubínové lasery s výkonem 100-500 W, které umožňují vrtat díry s průměrem až 0,025 mm. Laserové vrtání umožňuje pracovat s kovovými, nekovovými a těžkoobrobitelnými materiály a dosáhnout hloubky až 50 mm. Tvar vrtaného otvoru nemusí být vždy kruhový, může mít i jiné geometrické tvary. [20]



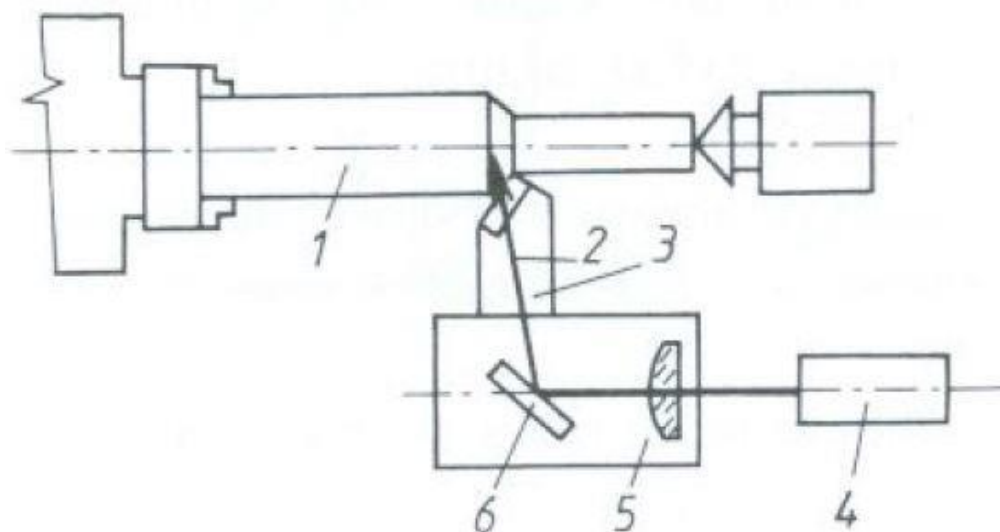
Obrázek 13: Vrtání laserem [17]

3.4 Obrábění laserem

Na rozdíl od vrtání, což je proces probíhající v jediném rozměru, a řezání, což je proces probíhající ve dvou rozměrech, soustružení a frézování vyžadují alespoň tři rozměry. Tyto procesy jsou označovány zkratkami LM a LAM (Laser machining, Laser-assisted machining) v praxi.[18]

3.4.1 Laserem podporované obrábění

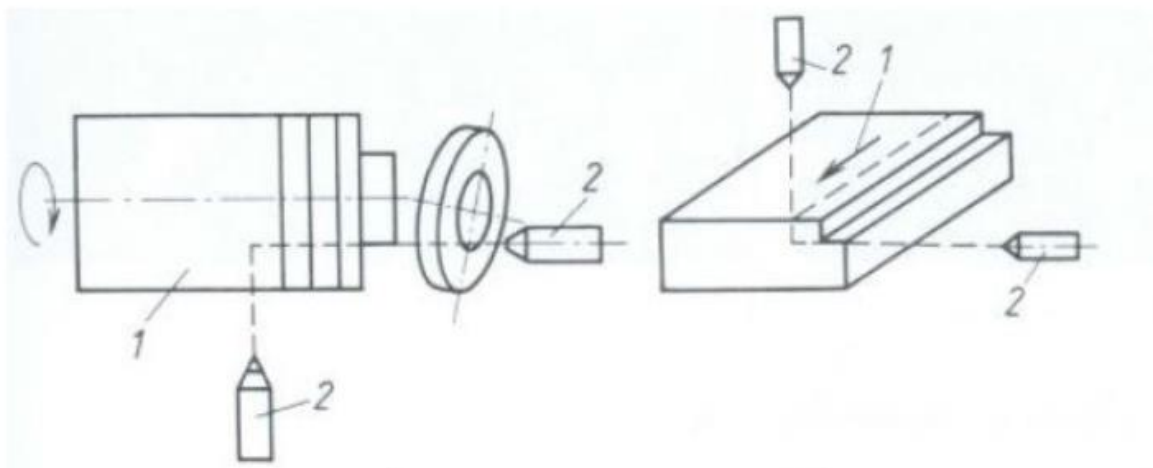
Tato metoda se nazývá konvenční obrábění a využívá laser jako tepelný předehřev. Používá se především k obrábění keramických a těžko obrobitelných materiálů. Při běžném obrábění by musely být použity pomalé rychlosti a časté povrchové vady by byly běžné. Navíc by byly potřeba drahé nástroje, nejlépe z diamantu, což by výrazně zvýšilo náklady. Na druhou stranu, laserem podporované obrábění snižuje náklady, umožňuje odstraňovat materiály s větší šířkou záběru ostří, zvyšuje životnost nástroje a zároveň snižuje strojní časy. Vhodné lasery pro tuto metodu jsou Nd:YAG nebo CO₂. [18]



Obrázek 14: Laserem podporované obrábění [21]

3.4.2 Obrábění laserem

Laserový paprsek se používá jako nástroj pro odstraňování materiálu a existují dvě základní metody. První metoda využívá pouze jeden paprsek, který je emitován kolmo na obrobek, a pohybuje se tak, že materiál se odpařuje. Tato metoda je vhodná pro jednoduché tvary. Druhá metoda využívá dva paprsky, kdy jeden paprsek proniká druhým a tak se materiál odstraňuje. Tato metoda je vhodná pro obtížně obrobitelné materiály, jako jsou například křemičitany nebo nitridy. [39]

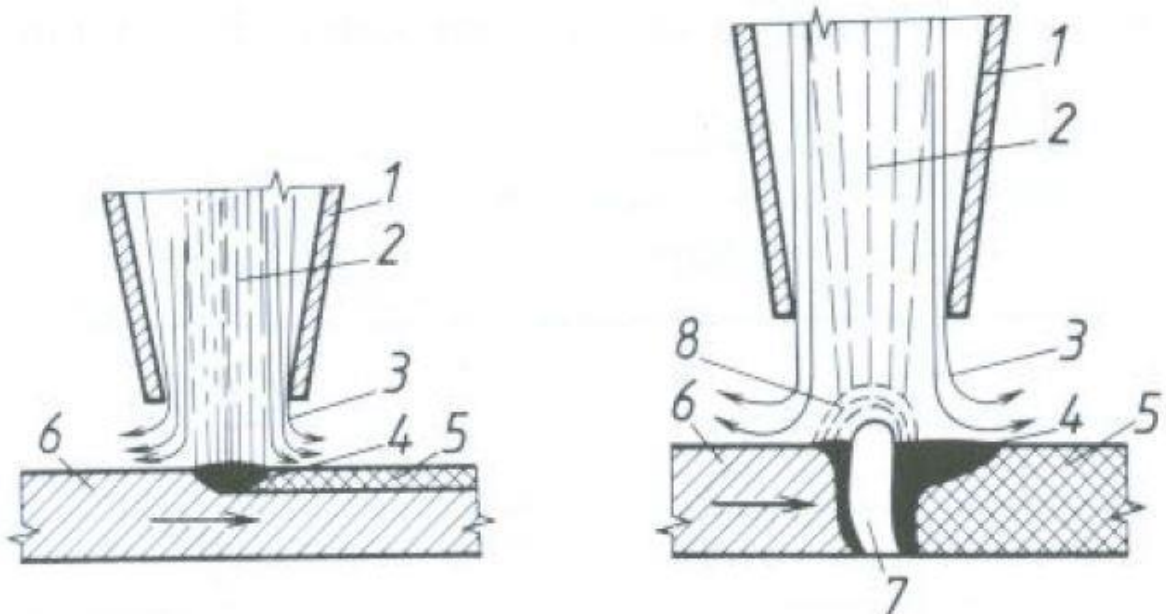


Obrázek 15: Obrábění laserem [21]

3.5 Svařování laserem

Laserové svařování je moderní metoda spojování jak kovových, tak i nekovových materiálů. Hlavní výhodou této metody je vytvoření precizního, kvalitního a čistého svaru s vysokou

rychlostí. Svarové spoje lze vytvořit v ochranné atmosféře nebo i za atmosférických podmínek bez použití přídavného svařovacího materiálu. Mezi běžně svařované materiály patří hliníkové a titanové slitiny, nerezové oceli a jiné kovy s obsahem uhlíku do 0,22 %. Navíc, tuto metodu lze použít i na nekovové materiály, jako jsou plasty a kompozity. Laserové svařování se často využívá v sériové výrobě a na automatizovaných pracovištích. Mezi nejčastěji používané lasery patří CO₂, Nd:YAG a diodové lasery. [22]



Obrázek 16: Svařování laserem povrchově a hloubkově [21]

Existují dva hlavní způsoby svařování laserem, z nichž prvním je povrchové svařování, také nazývané svařování vedením tepla. Tento proces spočívá v rozpuštění materiálu na povrchu součásti a následném smísení taveniny, přičemž teplo se šíří vlastní tepelnou vodivostí svařovaného materiálu. Svar se tvoří po vychladnutí a ztuhnutí taveniny, přičemž není potřeba dalšího zpracování. Hloubka svaru bývá obvykle do 1 mm a jeho šířka je větší. Druhým způsobem je hloubkové svařování, známé také jako metoda klíčovou dírkou. Zde se paprsek laseru zaměřuje na povrch součásti, kde se materiál taví a odpařuje, přičemž vzniklá pára tlačí taveninu ven ze vzniklého otvoru (klíčové dírky). Tento způsob umožňuje dosáhnout hlubšího svaru s menším průměrem otvoru, avšak vyžaduje vysokou výkonnost zařízení a svar může být až desetkrát hlubší než široký. [22]

3.6 Tepelné zpracování

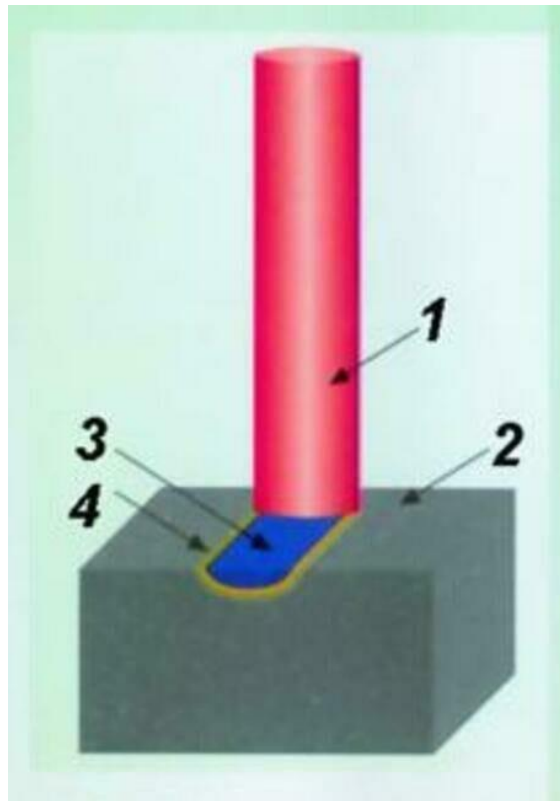
Laserové zařízení umožňuje velmi rychlé tepelné zpracování malého objemu materiálu. Existují tři základní metody tepelného zpracování v závislosti na působení paprsku na obrobek. První metodou je ohřev materiálu, který se využívá k technologickým operacím,

jako je kalení, žíhání nebo popouštění. Druhou možností je tavení materiálu na povrchu, což vede k tepelnému zpevnění a natavování povrchu a jeho amorfizaci. Poslední základní metodou je tepelné zpracování pomocí odpařování materiálu, což způsobuje rázové zpevnění materiálu. [20]

3.6.1 Kalení laserem

Paprsek laseru o vysoké energii způsobuje rychlé zahřátí povrchu kalené součásti nad austenitizační teplotu. Po odstranění paprsku dochází k samovolnému ochlazení, které rychle rozvádí tepelnou energii do celého obrobku. Tímto způsobem se teplota na povrchu rychle snižuje, takže není nutné používat chladicí médium. Tento proces vede k vytvoření jemné martenzitické struktury s velkou tvrdostí a tloušťkou zakalené vrstvy obvykle do 2 mm. Oproti klasickým metodám kalení je laserový proces velmi rychlý a čistý, což ho činí vhodným pro automatizaci. Další výhody zahrnují vytvoření velmi tvrdého a odolného povrchu s houževnatým jádrem. Tepelné ovlivnění oblasti je minimální a nedochází k deformaci obrobku. Díky těmto vlastnostem je možné kalit materiály, které nelze konvenčně kalit.

Pro tepelné zpracování se často používají kontinuální plynové lasery s CO₂, které mají výkon v tisících wattů a jsou vybaveny speciální optickou soustavou, a také Nd:YAG lasery. Moderní metody kalení využívají také diodové lasery s velkými výkony, které mají čtvercový nebo obdélníkový průřez paprsku a jsou pro kalení velmi vhodné. [20],[21]

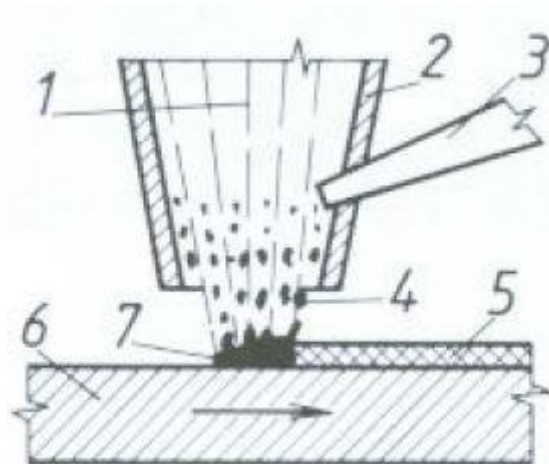


Obrázek 17: Kalení laserem [20]

3.6.2 Nanášení povlaků

K tepelnému zpracování materiálů se nejčastěji využívají kontinuální plynové lasery s CO_2 s výkonem v tisících wattů a speciální optickou soustavou, stejně jako Nd:YAG lasery.

Dále se pro moderní metody kalení používají diodové lasery s velkými výkony, které mají paprsek s čtvercovým nebo obdélníkovým průřezem a jsou pro kalení velmi efektivní. [21]



Obrázek 18: Nanášení povlaku pomocí laseru [21]

3.7 Neprůmyslové využití laseru

Laserové technologie se vyskytují nejen v průmyslových aplikacích, ale také běžně v našem každodenním životě. Jsou pro nás důležité a běžně používané, ať už jsme v kanceláři, ve škole nebo doma.

3.7.1 Optická mechanika

V počítačích a notebookech jsou běžně používány optické mechaniky, které umožňují číst a zapisovat data pomocí laserového svazku. V těchto mechanikách je klíčovou částí polovodičový laser, který vysílá paprsek na povrch disku, který obsahuje vrstvu zlata nebo hliníku s organickou vrstvou pokrytou polykarbonátem. Pokud laserový paprsek dopadne na organickou vrstvu, vytvoří se důlek v podobě otvoru a čím výkonnější je laser, tím rychleji může vypalovat otvory. Při otáčení disku se světelný paprsek odráží od vytvořených důlků a zaznamenává se změna intenzity paprsku pomocí fotodiod. Tato změna intenzity se pak převádí na elektrický signál, který obsahuje zaznamenaná data. [13]

3.7.2 Laserová tiskárna

Dalším příkladem použití laserů je laserová tiskárna, která pracuje na principu vytváření textu nebo obrázku pomocí laserového paprsku na světlocitlivém válci. Povrch válce je vyroben z polovodičového materiálu, takže když na něj dopadne laserový paprsek, dochází k poklesu elektrického náboje na místě dopadu. Toner se poté přilne pouze na místech s opačným nábojem, která byla ovlivněna laserem. Ostatní části válce jsou stejně nabitě jako toner a odpuzují se od sebe. Hlavní výhodou laserových tiskáren je vysoká kvalita tisku, ale nevýhodou může být cena, která je vyšší než u jiných typů tiskáren. [13]

3.7.3 Laserové ukazovátko

Tento laser je založen na malé laserové diodě s elektronickým obvodem, kterou vylepšuje spojovací čočka pro zajištění rovnoběžnosti paprsků. Napájení je zajištěno pomocí malé baterie. Tento typ laseru je také často používán pro zaměřování u zbraní. [13]

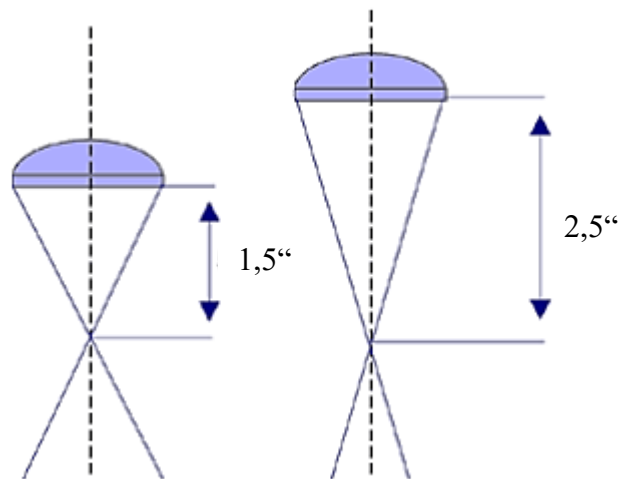
3.7.4 Čtečka čárového kódu

Laserový paprsek rychle kmitá a přejíždí přes čárový kód, přičemž odražený paprsek se odráží od bílých mezer na kódu. Černá barva kódu pohlcuje světlo, takže se od ní nic neodráží. Kmitání paprsku je řízeno otáčejícím se zrcadlem, které mění směr paprsku. Informace o poloze paprsku a jeho odrazu jsou použity k identifikaci položky, kterou

reprezentuje kód. Tato informace je následně převedena do databáze pomocí softwarového programu. [13]

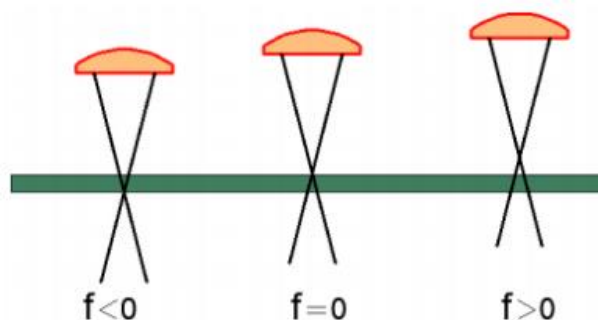
4 OPTICKÉ ČOČKY

Optická čočka slouží ke spojení paralelního paprsku do jednoho bodu, které se nazývá ohnisko. V ohnisku se nachází největší hustota koncentrace energie. Kromě toho, při fokusaci laserového paprsku, je čočka ochlazována řezacím plynem, který proudí souose s paprskem pod čočku. Řezný plyn a fokusovaný svazek jsou do řezu vedena tryskou, která se chladí proudem tlakového vzduchu. Pro získání co nejužší řezné spáry se doporučuje použít větší průměr laserového paprsku. Tím lze totiž lépe fokusovat paprsek do ohniska a dosáhnout přesnějšího řezu. Velikost ohniskového bodu závisí na fokusační čočce a její ohniskové vzdálenosti.



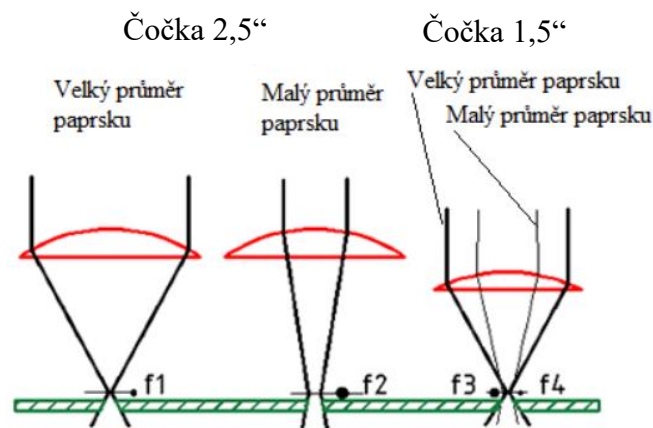
Obrázek 19: Porovnání ohniskových vzdáleností použitých čoček [35]

2,5" čočka poskytuje větší hloubku ostrosti, což umožňuje řezání většího rozsahu tloušťek materiálu, zejména u materiálů s větší tloušťkou, kdy dochází ke snížení řezných rychlostí. Naopak 1,5" čočka je vhodnější pro tenčí materiály, kde je možné použít vyšší rychlosti a její použití je výhodné i z hlediska ekonomického. Při stejném výkonu laserového zařízení tvoří 1,5" čočka užší řeznou spáru než 2,5" čočka díky vyšší hustotě energie. [24]



Obrázek 20: Umístění polohy ohniska [35]

Výběr správného umístění ohniska má významný vliv na kvalitu a vlastnosti řezu. Obvykle se ohnisko umísťuje v jedné ze tří základních poloh a změna materiálu může způsobit potřebu změnit zaostření ohniska. Hlavním faktorem, který ovlivňuje výběr umístění ohniska, je tloušťka řezaného materiálu. Pokud jde o plechy s tloušťkou do 6 mm, optimální umístění ohniska je obvykle na povrchu materiálu. Při řezání silnějších plechů se ohnisko zaostřuje nad povrchem materiálu. U vysokotlakého řezání hliníku nebo nerezové oceli se paprsek soustředí pod povrch materiálu. [23],[24]



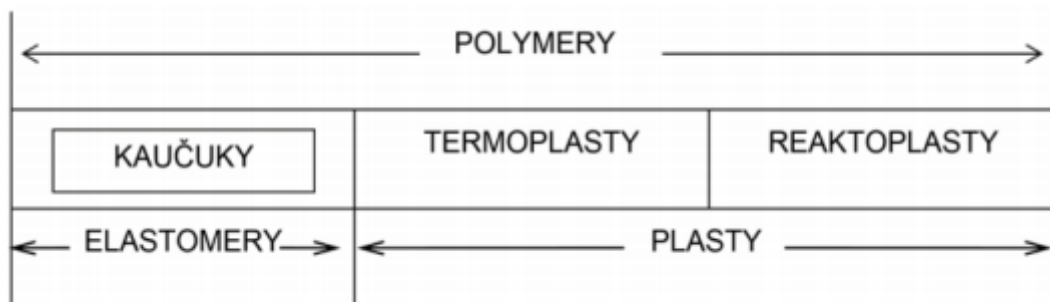
Obrázek 21: Porovnání fokusace paprsku [23]

Optické čočky určené pro laserové operace se vyznačují velmi kvalitním povrchem, nízkou divergencí a absorpcí, ale mají velmi vysoký prahový stupeň poškození. Materiály, které se pro výrobu těchto čoček používají, jsou různé, například optická skla, selenid zinečnatý, safír, fluorid vápenatý, fluorid hořečnatý nebo syntetické sklo. Tyto materiály jsou vhodné pro viditelné, infračervené a ultrafialové záření. Je také možné nanášet antireflexní povlaky v širokém spektru vlnových délek od 193 do 2200 nm. [24]

5 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymery představují jednu z nejnovějších skupin konstrukčních materiálů. Jsou to chemické sloučeniny s rozmanitými vlastnostmi, jejichž velké molekuly obsahují převážně atomy uhlíku, kyslíku, dusíku, vodíku, chloru a dalších prvků. Polymerní materiály jsou ve svém hotovém stavu pevné, ale během zpracování za vysokých teplot a tlaku se stávají kapalnými, což umožňuje formování budoucího tvaru výrobku. Jejich vlastnosti lze upravit různými modifikacemi a příměsemi. Obecně jsou plasty lehké, dobře izolují teplo i elektrický proud a jsou odolné vůči korozi.[27]

Polymerní materiály lze rozdělit na dvě hlavní skupiny, plastické a elastomerní. Skupina plastů zahrnuje termoplasty a reaktoplasty, které jsou obvykle tvrdé a mohou se trvale deformovat při vysokém zatížení. Elastomery zahrnují kaučuky a termoplastické elastomery, které mohou být výrazně deformovány při malém zatížení. Tyto materiály mají velkou elasticitu a obvykle se po deformaci dokážou vrátit do svého původního tvaru. [28],29]

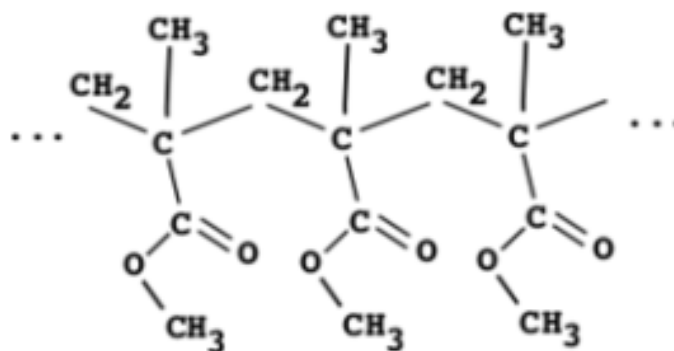


Obrázek 22: Základní dělení polymerů [37]

Vhodným materiálem pro obrábění laserem je polymethylmetakrylát.

5.1 Polymethylmetakrylát

Existuje několik výhod použití polymethylmetakrylátu (PMMA), jako je vysoká kvalita povrchu a odolnost proti poškrábání, vysoká tvrdost a pevnost při zachování velké tuhosti, průhlednost s dobrými optickými vlastnostmi, odolnost vůči vodě, slabým kyselinám, olejům a nepolárním rozpouštědlům. Materiál má také dobré elektrické a dielektrické vlastnosti a je tepelně odolný. Díky těmto vlastnostem je vhodný pro mechanické zpracování v široké škále aplikací. [28]



Obrázek 23: Vzorec PMMA [36]

V průmyslu se často používá kvůli jeho snadnému zpracování konvenčními i nekonvenčními metodami. Desky z PMMA lze snadno tvarovat a ohýbat za použití tepla při teplotě kolem 160 °C. Tento materiál lze také pevně spojovat pomocí různých lepidel, včetně jiných polymerů. Povrchová úprava je rovněž snadná a může zahrnovat leštění, lakování, pokovování a potisk bez nutnosti předchozí speciální úpravy povrchu materiálu. [28]

Materiál lze snadno obrábět třískovými metodami, jako jsou frézování, řezání pilou, vrtání a broušení. Využití progresivních metod obrábění, zejména laserů, je velmi vhodné pro zpracování tohoto materiálu. Plynové lasery na principu CO₂ jsou vhodné pro řezání i gravírování PMMA. Obrábění laserem vytváří hladké a čisté hrany bez potřeby následné úpravy povrchu, jako je leštění. I při vytváření vnitřních tvarů jsou rohy téměř ostré bez zaoblení. Při použití laseru není nutné používat upínací přípravky, protože polotovar je volně uložen na pracovním stole. Spaliny a výpary vznikající během obrábění lze snadno odsávat pomocí ventilačního systému. [28],[30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

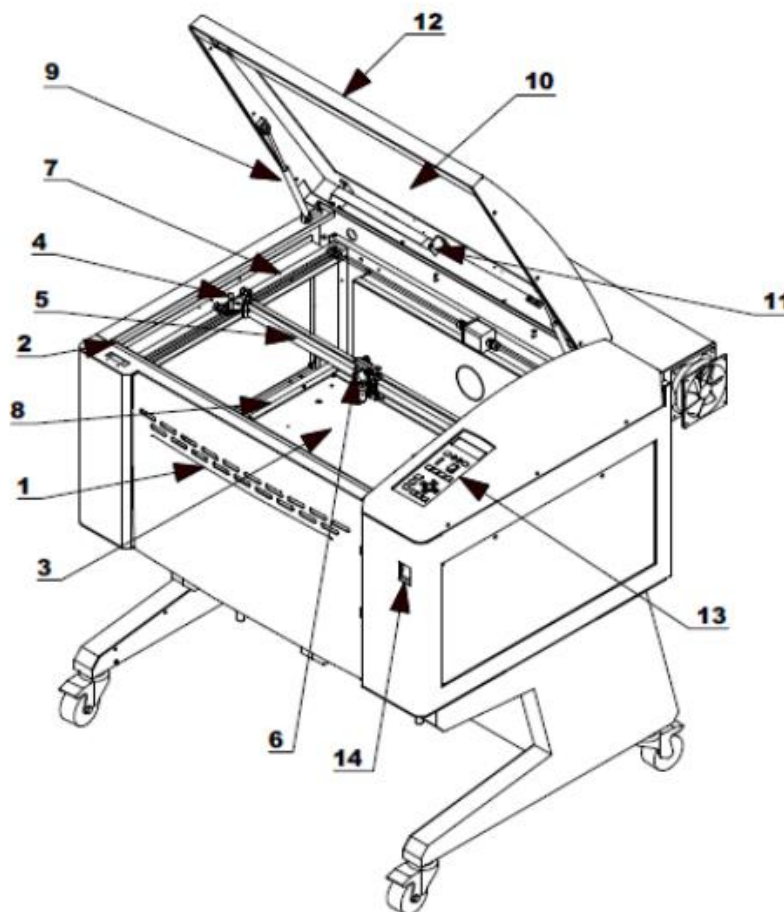
6 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je porovnání vlivu dráhy laserového paprsku při obrábění pomocí laserového zařízení ILS 3NM při použití čoček s ohniskovými vzdálenostmi 1,5 " a 2,5 " na vyhotovených vzorcích z PMMA:

- vyhotovení vzorků
- zpracování získaných dat a jejich vyhodnocení
- porovnání šířky řezu
- porovnání umístění řezu

7 VYHOTOVENÍ VZORKŮ

Vzorky byly vytvořeny pomocí laserového zařízení ILS 3NM, který je ideální pro práci s materiály jako dřevo, PMMA, sklo, pryž, textilie, plastové folie, mramor a povrchově upravené kovy. Toto zařízení je plně kompaktní a používá software Microsoft Windows, s možností připojení přes USB, LAN nebo paralelní port. Jeho vnější rozměry jsou 970x865x990 mm, s pracovní plochou omezenou na šířku 660 mm, délku 495 mm a hloubku 210 mm. Pro gravírování je možné dosáhnout řezné rychlosti až 1524 mm/s. Rozlišení lze nastavit na 166, 200, 250, 333, 500 nebo 1000 DPI („dots per inch“). Maximální výkon laseru dosahuje 100 W a je možné jej regulovat od 0 % do 100 %.



Obrázek 24 Schéma použitého laseru [41]

1 – přední dvířka, 2 – zámek dvířek, 3 – voštinový stůl, 4 – osvětlení, 5 – posuvné rameno v ose X, 6 – sestava držáku optické čočky, 7 – posuvné rameno v ose Y, 8 – lišta s pravítkem, 9 – píst horních dvířek, 10 – okno horních dvířek, 11 – vnitřní osvětlení, 12 – horní dvířka, 13 – ovládací panel, 14 – hlavní vypínač

Pro výrobu vzorků byl použit materiál PMMA ve dvou různých tloušťkách. První ze vzorků byl ve tvaru kruhové desky o průměru 185 mm a tloušťce (t , *tabulka 3*) 5 mm. Druhý vzorek o tloušťce 3 mm byl ve formě pásu s šířkou 189 mm rozdělen na menší obdélníky. Tvar výsledného řezu byl zvolen čtverec o rozměru 30 mm. Původní tvar pro srovnání dráhy laserového paprsku byla kružnice také o rozměru 30 mm. Vzorky byly nakresleny v programu CorelDraw, který je zcela kompatibilní s laserovým zařízením ILS 3NM.

Pracovní podmínky byly navrženy tak, aby byl materiál prořezán skrz celou tloušťku, což znamenalo, že bylo použito maximálního výkonu (P) laseru 100 W a minimální řezné rychlosti (v_f) 45,72 mm \cdot s⁻¹ (3 % z maximálního nastavení laseru), jak je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 3 Řezné podmínky pro vzorky

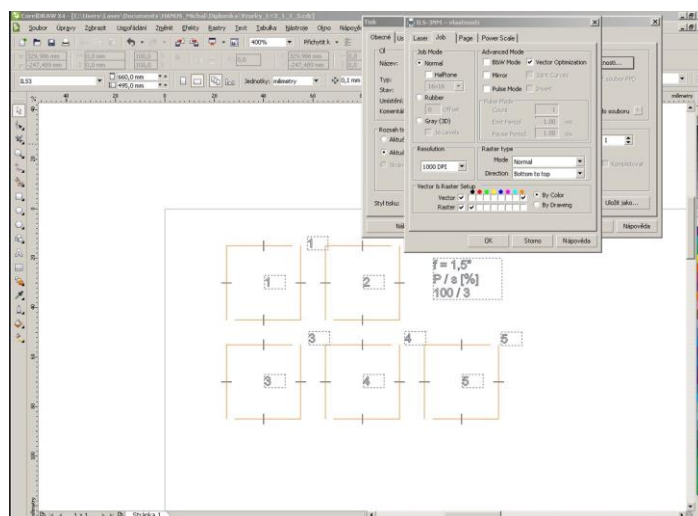
t [mm]	3		5	
f ["]	1,5	2,5	1,5	2,5
v_f [mm/s]	45,72	45,72	45,72	45,72

f – ohnisková vzdálenost

t – tloušťka materiálu

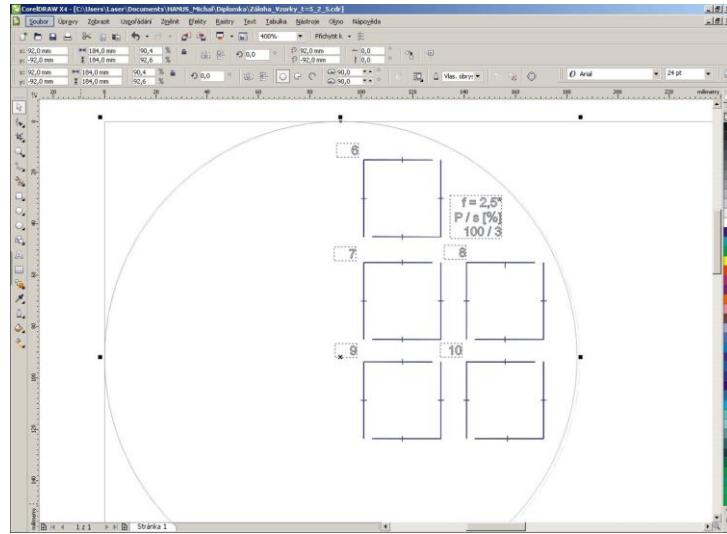
v_f – řezná rychlost

Na obdélníkový materiál z PMMA o tloušťce 3 mm byly poskládány námi požadované obrazce, viz. obrázek 25. Pro jednotlivé ohniskové vzdálenosti byl použit samostatný polotovár.

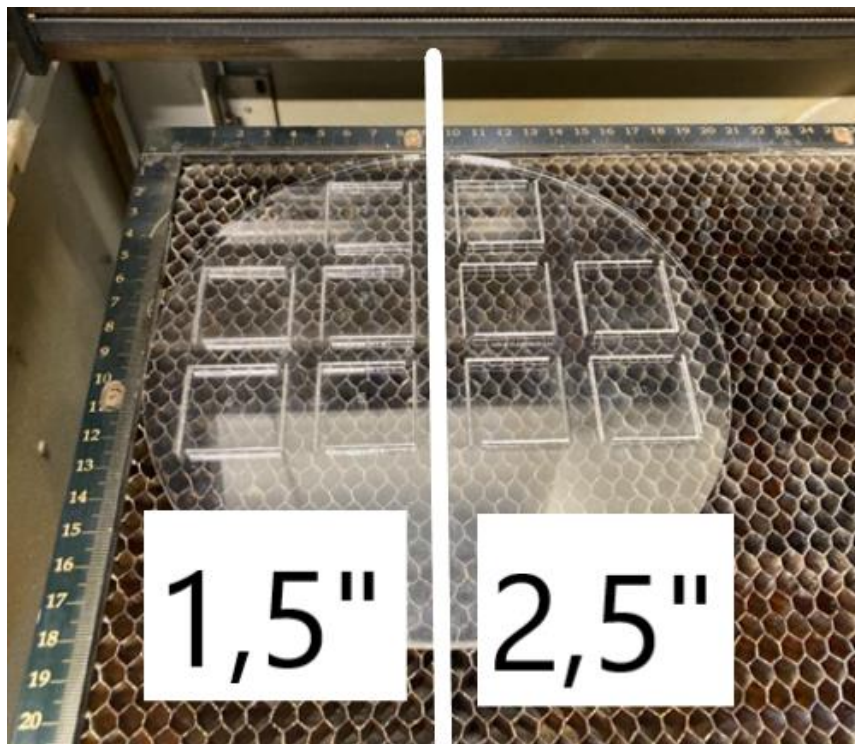


Obrázek 25 Pracovní soubor pro tloušťku 3 mm v CorelDraw

Pro vzorky materiálu o tloušťce 5 mm byl použit kruhový polotovar (obrázek 26), na který byly vyřezány vzorky pro obě ohniskové vzdálenosti (obrázek 27).



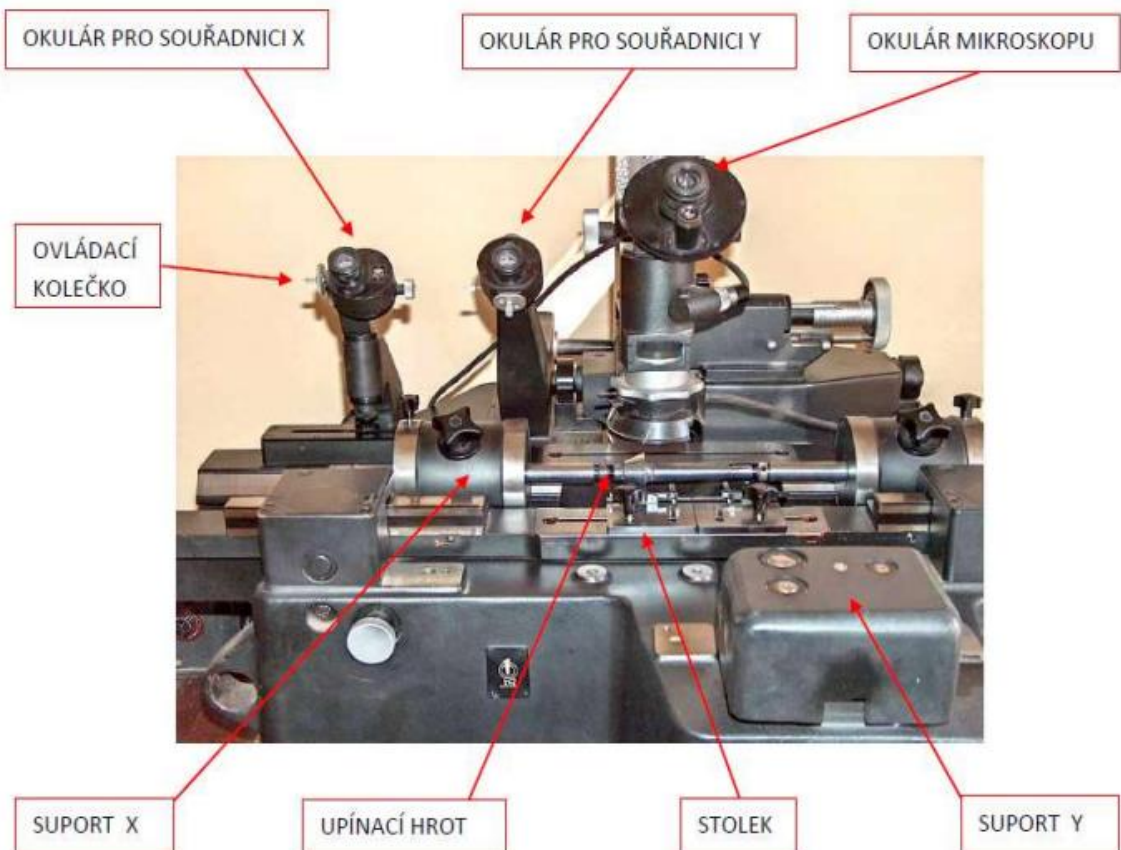
Obrázek 26 Pracovní soubor pro materiál o tloušťce 5 mm v programu CorelDraw
Nejprve byla vyřezána levá polovina vzorků s čočkou o ohniskové vzdálenosti 1,5“ a poté byla čočka vyměněna a byla vyřezána druhá polovina vzorků.



Obrázek 27 Vyřezané vzorky

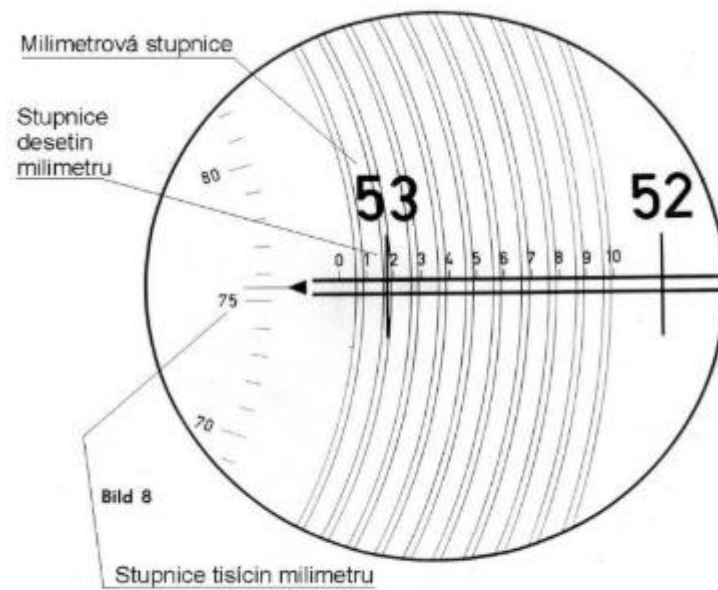
8 MĚŘENÍ VZORKŮ

Měření proběhlo za pomoci univerzálního dílenského mikroskopu značky Carl Zeiss (viz obrázek 28), při použití objektivu s 10x zvětšením. Toto zařízení umožňuje měření s přesností až na 0,001 mm. Na pracovním stole je umístěno pravítko, které usnadňuje přesné nastavení měřené součásti. Vzorky byly položeny volně na skleněný pracovní stůl a zarovnány podle pravítka.



Obrázek 28 Dílenský mikroskop [40]

Měření bylo prováděno analogickým způsobem v osách Y a X pomocí nitkového kříže v okuláru. Tímto způsobem byla určena poloha první hrany. Poté byl suport posunut v dané ose, dokud nebyla zaměřena druhá hrana. Tím byla určena vnitřní a vnější hodnota mezery.



Obrázek 29 Odečítací stupnice dílenského mikroskopu [42]

Pro kontrolu, zda bylo měření správně, byla zvoleno druhé měření. Toto měření bylo provedeno na profil projektoru, viz. obrázek 30.



Obrázek 30 Měření pomocí zařízení profil projektor

Rozdíl mezi jednotlivými měřidly je stupeň přesnosti měření. Pomocí dílenského mikroskopu lze měřit s přesností na tisíce, profil projektor se provádí měření s přesností na desítky tisíc. Jednou z výhod profil projektoru je modernější, a tedy jednodušší ovládání pracovního stolu pomocí joysticku. Další velkou výhodou je větší šířka pracovního stolu než u dílenského mikroskopu. Největší výhodou je čtení čísel přímo z obrazovky, tedy nebylo nutné hodnotu odečítat jako u měření pomocí mikroskopu.



Obrázek 31 Řez laserem zobrazený na profil projektoru

Díky promítnutí na obrazovku byl řez lépe viditelný a bylo snazší zaměřit přesný bod měření.

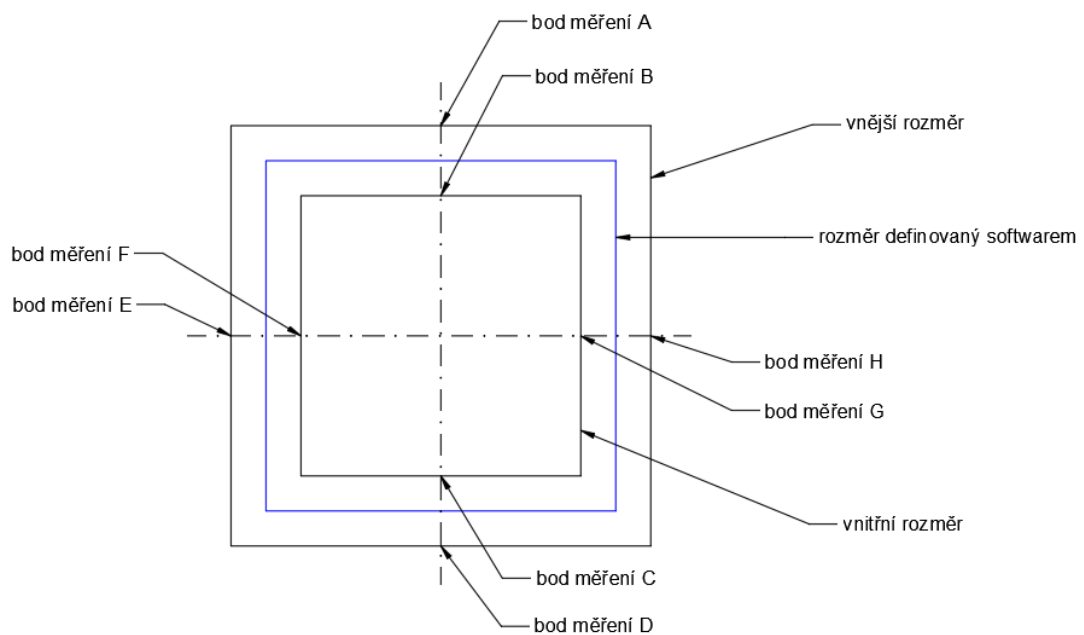


Obrázek 32 Neprořezaná mezera

9 NAMĚŘENÉ HODNOTY

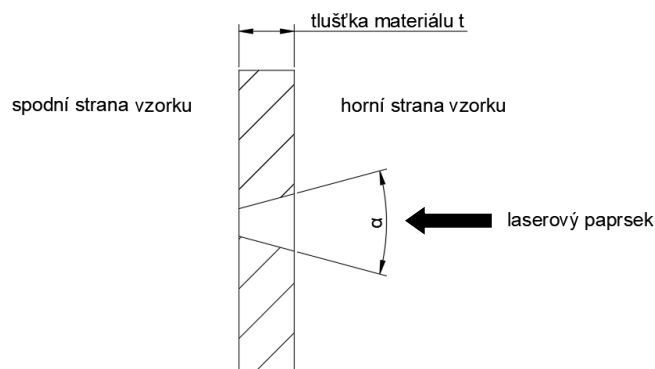
Měření bylo provedeno na 2 vzorcích za použití čoček 1,5" a 2,5" s rozdílnou tloušťkou materiálu 3 mm a 5 mm.

Měření bylo prováděno v 8 bodech každého čtverce (obrázek 33). V každém místě byla vytvořena úsečka, pro přesnější zaměření mikroskopu v daném místě měření. Body byly měřeny na povrchu materiálu a poté z druhé strany. Na každé zadané parametry bylo tedy provedeno 20 měření viz. tabulka 4.



Obrázek 33 Vyobrazení místa měření

Při působení paprsku laseru na plochu se v místě řezu paprsek zmenšuje viz. obrázek 34.



Obrázek 34 Působení laserového paprsku

Následnými výpočty, byla zjištěna šířka řezu v každém místě. Zde je ukázka pro jeden vzorek. Další vzorky najdete v příloze Příloha_P I a Příloha_P II.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty horní strana ve směru vertikálním, $f 1,5''$, $t 5 \text{ mm}$

Vzorek	1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]
A	0	0	0	0	0
B	0,394	0,285	0,271	0,384	0,435
C	29,959	29,911	29,771	29,957	29,939
D	30,345	30,213	30,191	30,226	30,296
B-A	0,394	0,285	0,271	0,384	0,435
D-C	0,386	0,302	0,420	0,269	0,357
C-B	29,565	29,626	29,500	29,573	29,504
D-A	30,345	30,213	30,191	30,226	30,296
(B-A) + (D-C)	0,780	0,587	0,691	0,653	0,792

Z důvodu jednoduššího zápisu a výpočtů byly hodnoty rozděleny na vertikální a horizontální. Dále se už toto rozdělení neuvažuje, protože k takovému vyhodnocení by bylo zapotřebí více dat z měření a více vzorků.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty

Vzorek	1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]
E	0	0	0	0	0
F	0,276	0,300	0,264	0,318	0,297
G	29,921	29,978	29,958	29,921	29,893
H	30,251	30,284	30,240	30,206	30,242
F-E	0,276	0,300	0,264	0,318	0,297
H-G	0,330	0,306	0,282	0,285	0,349
G-F	29,645	29,678	29,694	29,603	29,596
H-E	30,251	30,284	30,240	30,206	30,242
(F-E) + (H-G)	0,606	0,606	0,546	0,603	0,646

Hodnoty D-A a H-E představují vnitřní rozměr, hodnoty C-B a G-F vnější rozměr a (B-A) + (D-C) a (F-E) + (H-G) celkovou šířku řezu.

Vnitřní a vnější hodnota je brána vzhledem ke středu vzorku, který je shodný se středem osového kříže.

Pro každý materiál byly vypočítány průměrné hodnoty (tabulky 6 a 7), s kterými jsme dále pracovali.

Tabulka 6 Naměřené průměrné hodnoty pomocí dilenského mikroskopu

	f ["]	1,5	2,5	1,5	2,5
	t [mm]	3	3	5	5
Horní strana	Vnější rozměr [mm]	30,333	30,427	30,249	30,264
Horní strana	Vnitřní rozměr [mm]	29,445	29,321	29,626	29,583
Spodní strana	Vnější rozměr [mm]	30,290	30,301	30,128	30,163
Spodní strana	Vnitřní rozměr [mm]	29,506	29,537	29,712	29,806

Tabulka 7 Naměřené průměrné hodnoty pomocí profil projektoru

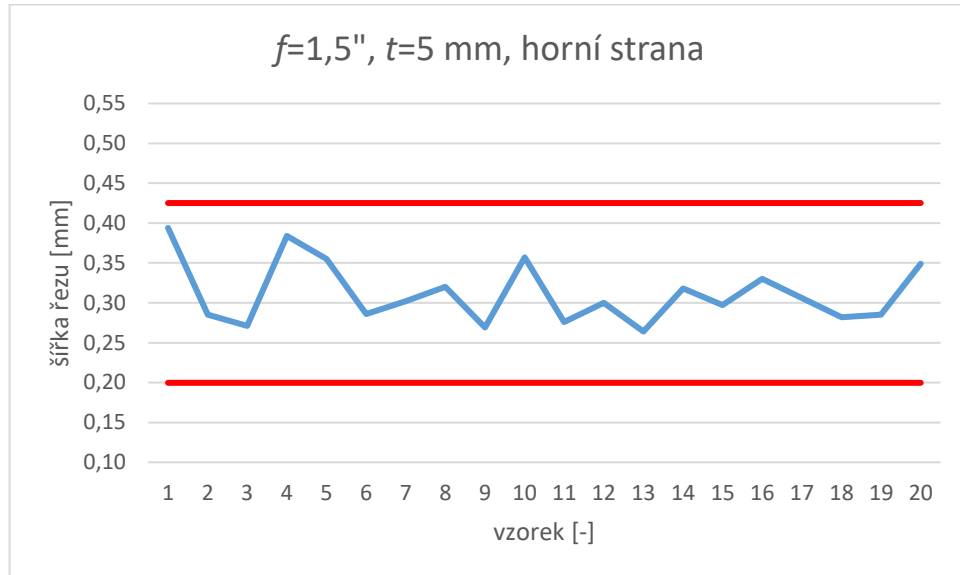
	f ["]	1,5	2,5	1,5	2,5
	t [mm]	3	3	5	5
Horní strana	Vnější rozměr [mm]	30,276	30,461	30,201	30,282
Horní strana	Vnitřní rozměr [mm]	29,508	29,332	29,583	29,492
Spodní strana	Vnější rozměr [mm]	30,224	30,268	30,125	30,034
Spodní strana	Vnitřní rozměr [mm]	29,581	29,517	29,698	29,682

Pro ověření, zda některá z hodnot nevybočuje z naměřených hodnot a příliš se neliší od ostatních, byla vypočítána směrodatná odchylka, která byla následně vynásobena 3. Naměřená hodnota se nesmí od průměrné hodnoty lišit o více než 3σ . Vypočítané dovolené hodnoty byly následně porovnány v grafu (obrázek 35) s každou naměřenou hodnotou šířky řezu. Jednotlivá měření jsou uvedena v příloze Příloha_PI a Příloha_PII.

Tabulka 8 Chyba měření

	[mm]
Průměrný vnější rozměr	30,2005
Průměrný vnitřní rozměr	29,5830
Průměrná šířka řezu	0,3088
Směrodatná odchylka (σ)	0,0764
$3*\sigma$	0,0648
Největší dovolený rozměr	0,3736
Nejmenší dovolený rozměr	0,2440

Zde je ukázka kontroly nejistoty měření. Červené úsečky představují hraniční hodnotu, kterou nesmí naměřená hodnota přesáhnout. V případě že by byla hodnota větší nebo menší, měření by nebylo provedeno správně.



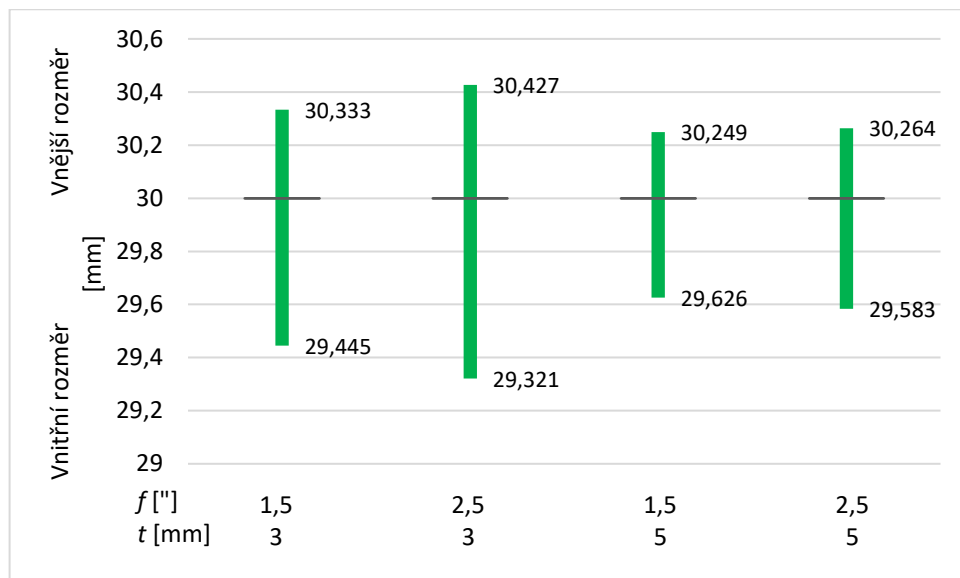
Obrázek 35 Naměřené hodnoty řezů

10 ZPRACOVÁNÍ DAT

Pro vyhodnocení byly použity dva způsoby typu měření. Dílenský mikroskop dostupný v laboratořích UTB a profil projektor z externí firmy.

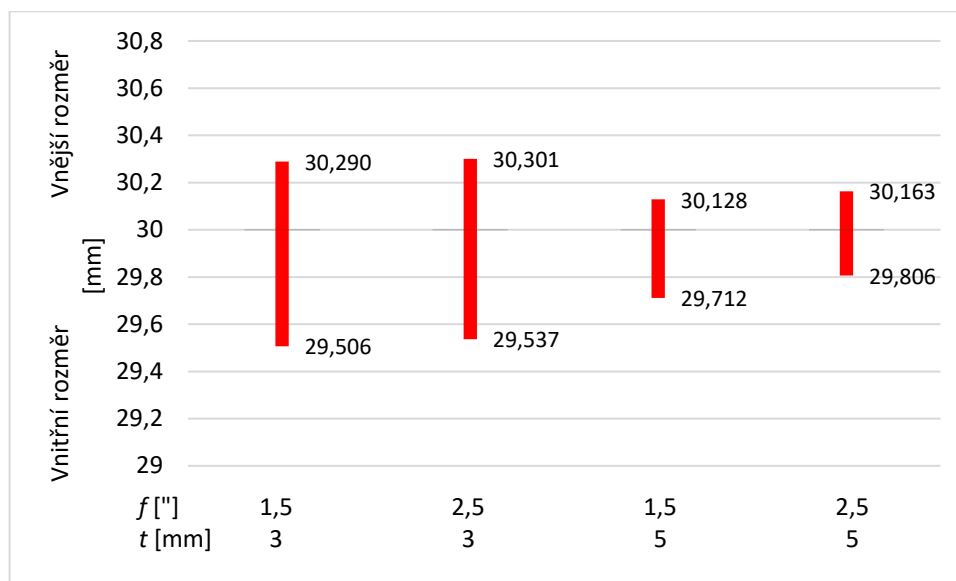
Dílenský mikroskop

Graf (obrázek 36) znázorňuje průměrný vnější a vnitřní rozměr vyřezaného obrazce. Na svislé ose jsou průměrné hodnoty z 20 měření pro horní stranu vzorku. Na vodorovné ose je rozdělení podle tloušťky materiálu a použité čočky. Hodnota (30,333 mm) znázorňuje průměrnou hodnotu pro vnější průměr čtverce, zatímco hodnota (29,445 mm) znázorňuje hodnoty pro vnitřní stranu, viz obrázek 33.



Obrázek 36 Průměrné hodnoty z horní plochy vzorků naměřené mikroskopem

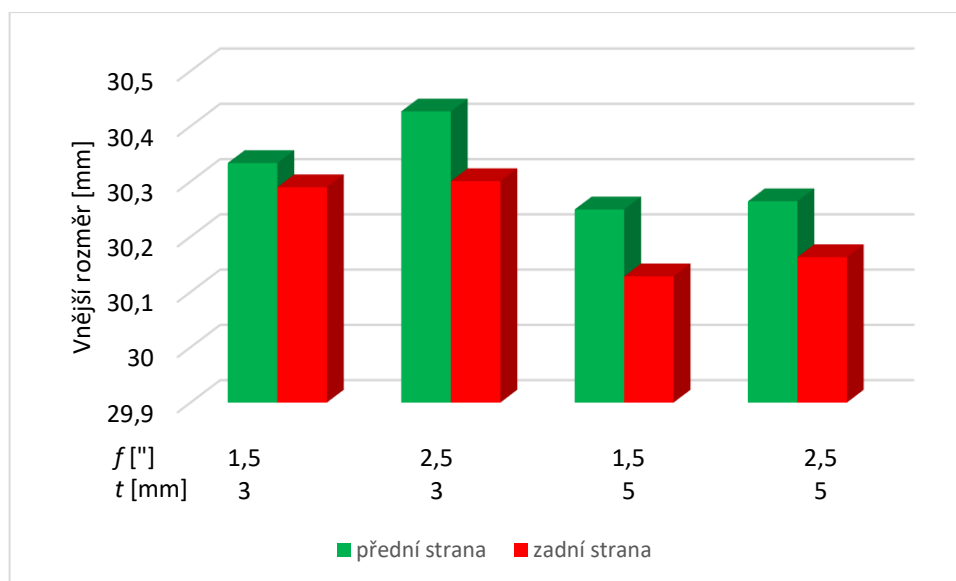
V následujícím grafu (obrázek 37) pozorujeme vnější a vnitřní rozměr vyřezaného obrazce, ze spodní strany.



Obrázek 37 Průměrné hodnoty spodní strany vzorků naměřené mikroskopem

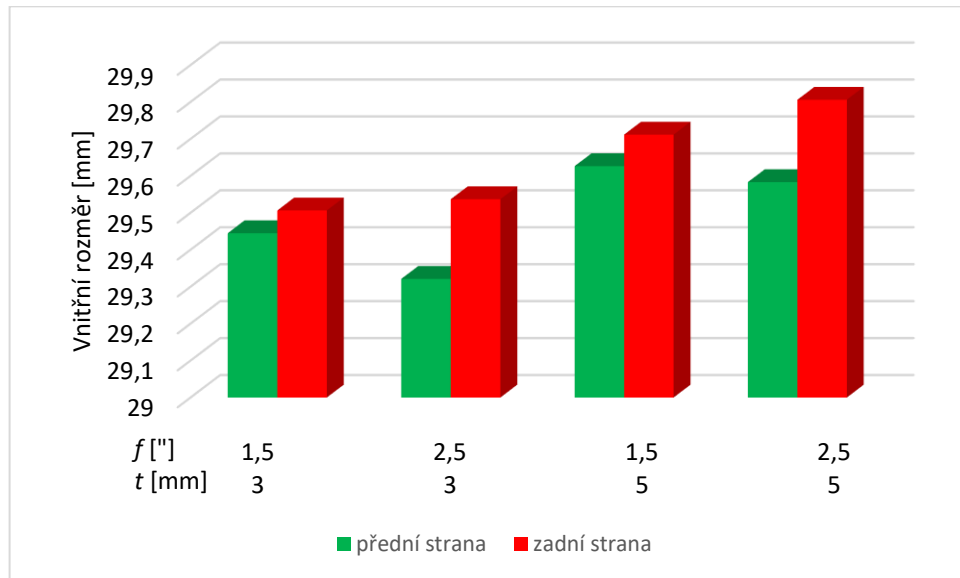
Úbytek materiálu by se měl projevit a plocha pro materiál 3 mm by měla větší než u materiálu 5 mm. U čočky 1,5“ je předpoklad, že bude úběr materiálu menší než u čočky 2,5“.

V obrázku 38 je provedeno porovnání vnějších rozměrů vyřezaného obrazců horní a spodní strany. Jak je vidět vnější rozměr se měnil při jednotlivých parametrech.



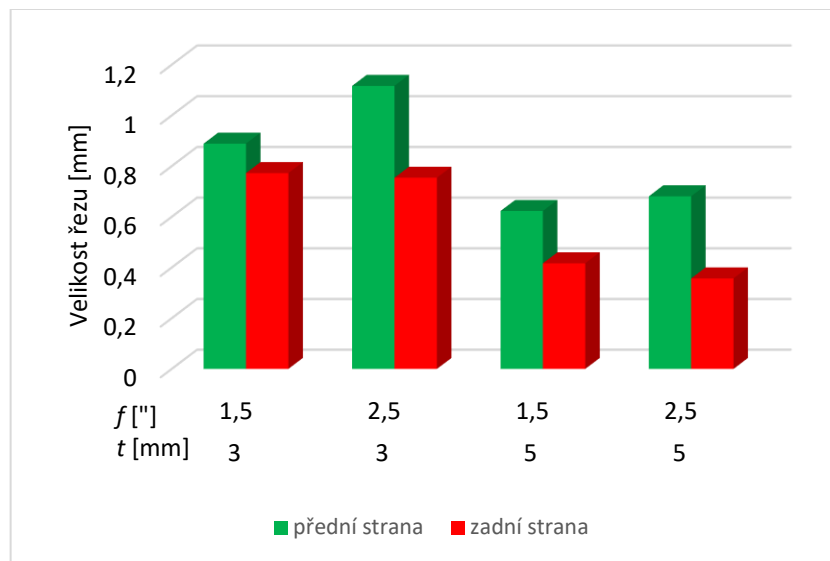
Obrázek 38 Porovnání vnějších stran vzorků při měření mikroskopem

Zde je graf, který porovnává vnitřní stranu vzorků. Čím menší je sloupeček, tím větší je vzniklá mezera. Výška grafu představuje negativ mezery.



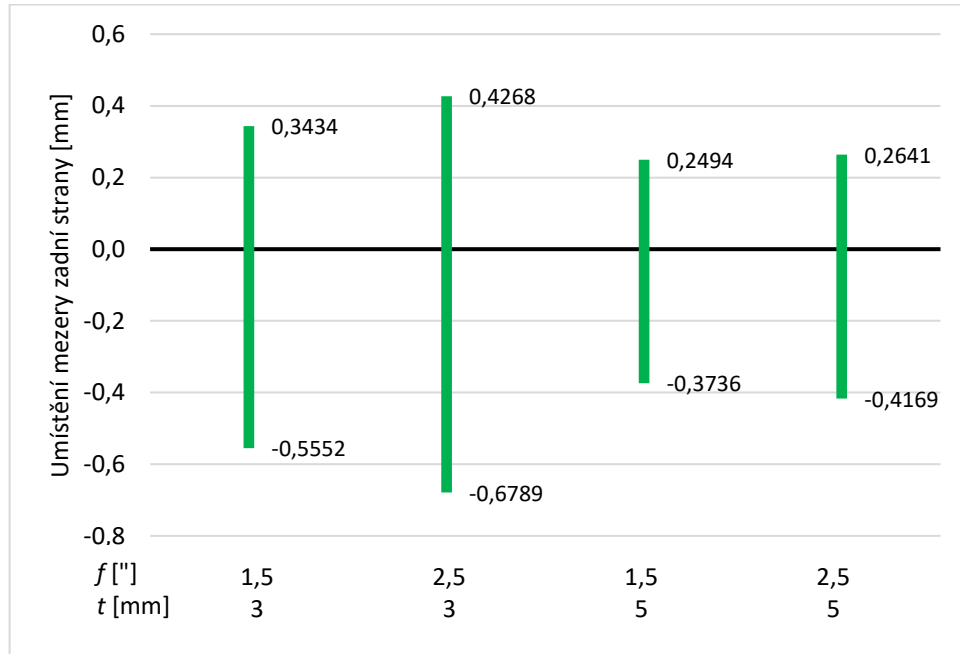
Obrázek 39 Porovnání vnitřních stran vzorků při měření mikroskopem

Obrázek 40 srovnává celkovou velikost řezu průměrných hodnot vzorků.



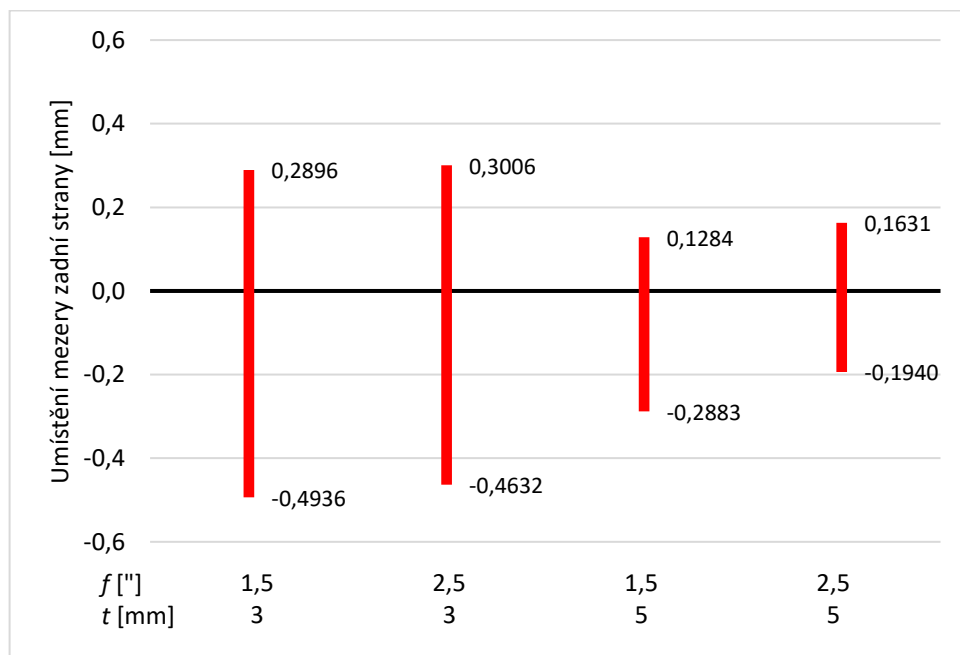
Obrázek 40 Celková šířka řezu naměřená mikroskopem

Obrázek 41 ukazuje umístění řezu na vzorcích. Na svislé stupnici 0 představuje námi definovaný parametr a čísla ukazují o kolik se mezera zvětšila na každou stranu. Tento graf znázorňuje horní stranu vzorku.



Obrázek 41 Šířka řezu horní strany vzorků naměřená mikroskopem

Obrázek 42 znázorňuje také umístění řezu, ale ze spodní strany vzorku.



Obrázek 42 Šířka řezu spodní strany vzorků naměřená mikroskopem

U obou stran se dá konstatovat, že šířka řezu závisí jen na tloušťce materiálu. Vliv použité čočky je menší, než se předpokládalo.

Paprsek laseru se během řezání zmenšuje (obrázek 34, strana 47). Následující tabulka ukazuje, pod jakým úhlem paprsek řeže.

Tabulka 9 Úhel vzniklých řezů při měření mikroskopem

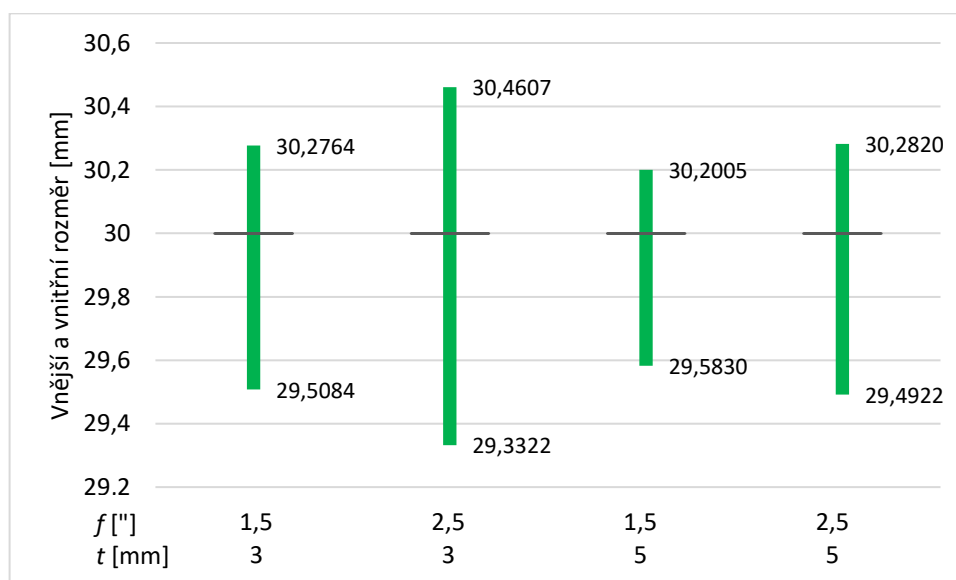
f ["]	1,5	2,5	1,5	2,5
t [mm]	3	3	5	5
α kružnice [°]	1,108	3,456	1,182	1,855

Pozorujeme, že se zvětšením ohniskové vzdálenosti čočky nám narůstá i úhel řezu. Úhel se nám více zvětšil u materiálu o tloušťce 3 mm, zatím co u materiálu o tloušťce 5 mm se úhel změnil o méně než 1°.

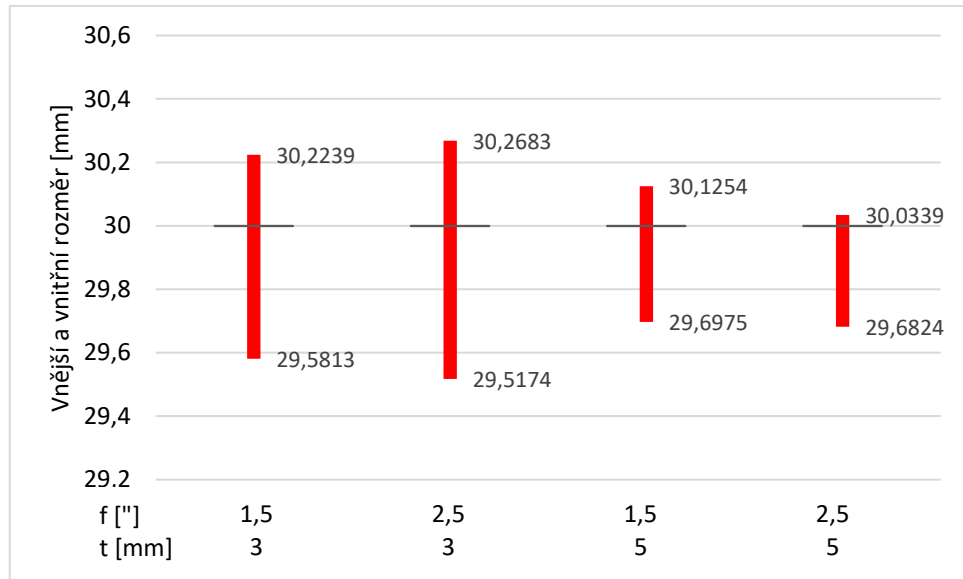
Profil projektor

Protože se naměřené hodnoty řezu po přímce zásadně lišily od hodnot řezu po kružnici, bylo provedeno druhé měření za pomoci profil projektoru.

Obrázek 43 znázorňuje průměrné hodnoty vnějších a vnitřních rozměrů vyřezaného obrazce ze strany řezání laseru a obrázek 44 spodní strany vzorků.



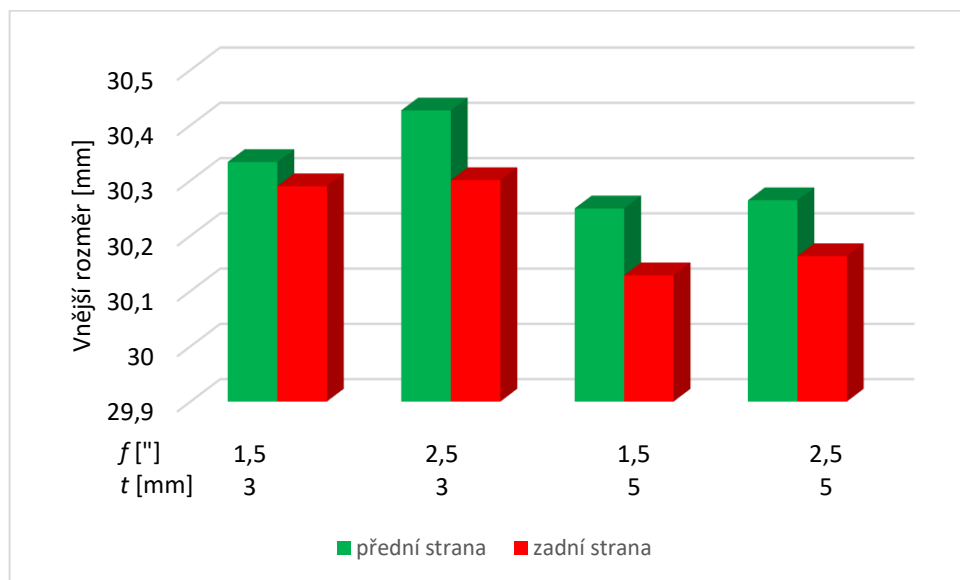
Obrázek 43 Průměrné hodnoty horní strany vzorků naměřené profil projektorem



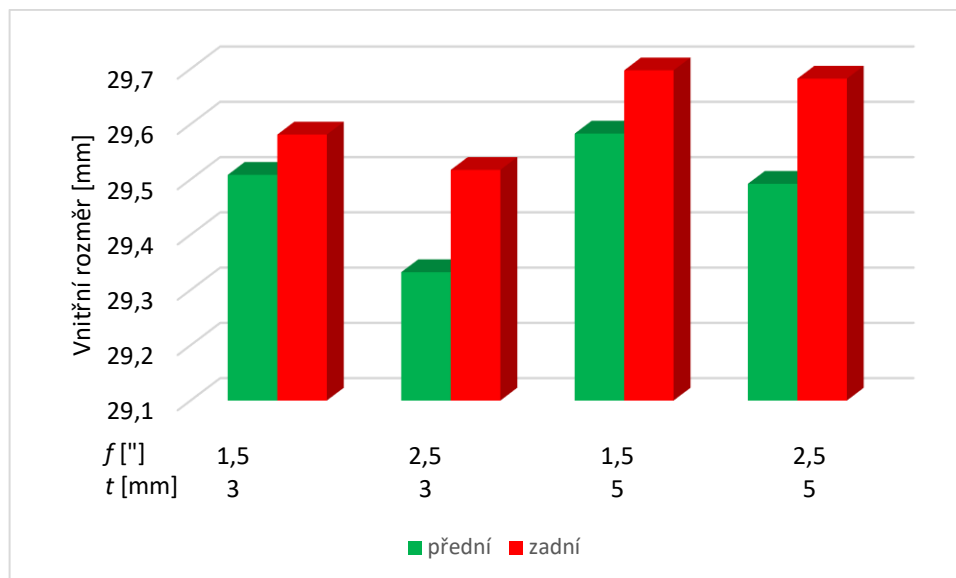
Obrázek 44 Průměrné hodnoty spodní strany vzorků naměřené profil projektorem

Hodnota pro poslední sloupec neodpovídá předpokladům. Materiál nebyl zcela prořezán viz. obrázek 32.

Obrázky 45 a 46 porovnávají vnější a vnitřní rozměry vyřezaného obrazce horní a spodní strany vzorků.



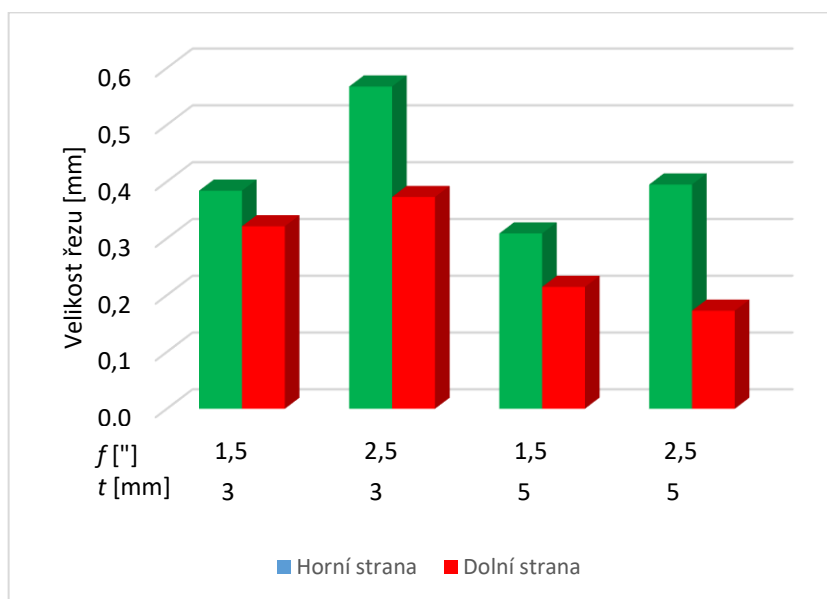
Obrázek 45 Porovnání vnějších stran vzorků při měření profil projektorem



Obrázek 46 Porovnání vnitřních stran vzorků při měření profil projektorem

Grafy odpovídají teorii, jednotlivé hodnoty se mění podle upravených parametrů tak jak bylo předpokládáno.

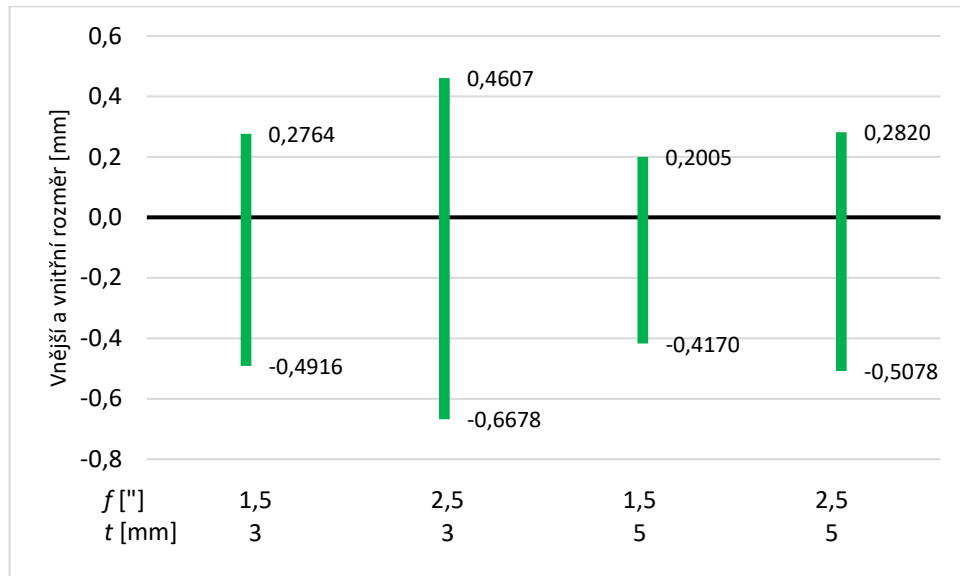
Na obrázku 47 je znázorněna velikost mezery pro jednotlivé vzorky z horní a spodní strany.



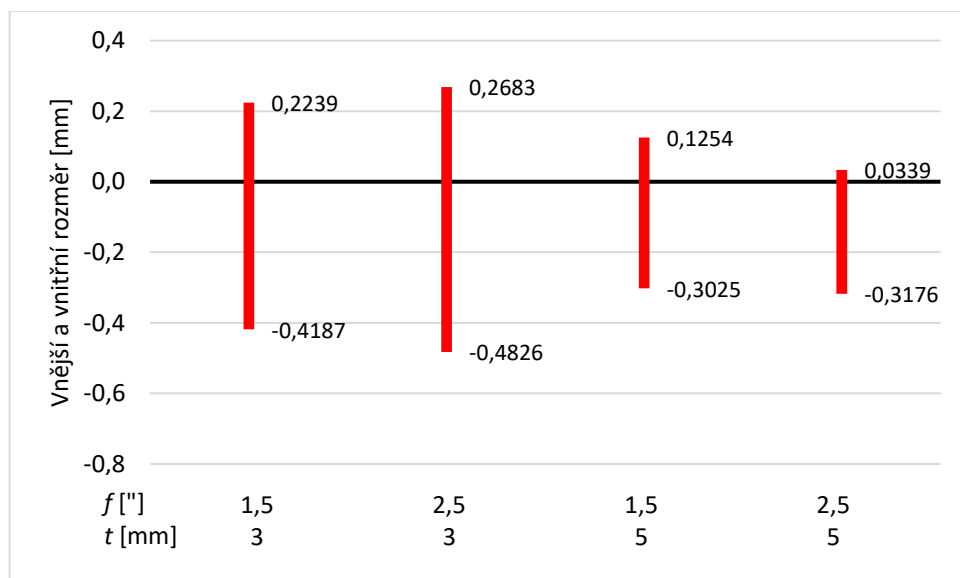
Obrázek 47 Celková šířka řezu naměřená mikroskopem

Největší šířku řezu dosáhneme při použití tenkého materiálu a větší čočky, tak jak by se dalo předpokládat. Spodní strana vzorků má šířku řezu menší.

Obrázky 48 a 49 zobrazují umístění řezu na vzorku. Nulový bod představuje námi definovaný rozměr a čísla ukazují o kolik se do jednotlivé strany řezu zvětšila.



Obrázek 48 Šířka řezu horní strany naměřená mikroskopem



Obrázek 49 Šířka řezu spodní strany naměřená mikroskopem

Materiál je více odebírán z vnitřní strany, a to skoro dvojnásobně, například (obrázek 49) materiál je do vnější strany odebrán o 0,2239 mm, zatím co do vnitřní strany 0,4187 mm.

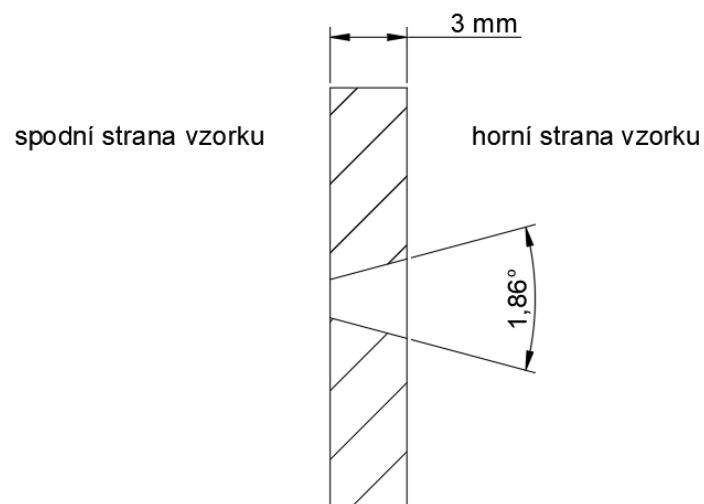
U horní strany hodnoty odpovídají předpokladům, že tenčí materiál s větší čočkou dokáže prořezat větší mezeru. U spodní strany je výsledek stejný. Až na poslední sloupec, který

představuje vzorek o tloušťce (t) 5 mm při ohniskové vzdálenosti (f) 2,5“. Řez je menší, protože v některých místech nebyl materiál úplně prořezán. Obr. 50.

Tabulka 10 Úhel řezu paprsku při měření profil projektorem

f [“]	1,5	2,5	1,5	2,5
t [mm]	3	3	5	5
α [°]	0,60	1,86	0,54	1,27

Na úhel má větší vliv použitá čočka, úhel se zvětší více než dvakrát. Při změně materiálu se úhel změní jen v řádu desetin.



Obrázek 50 Vzniklý úhel

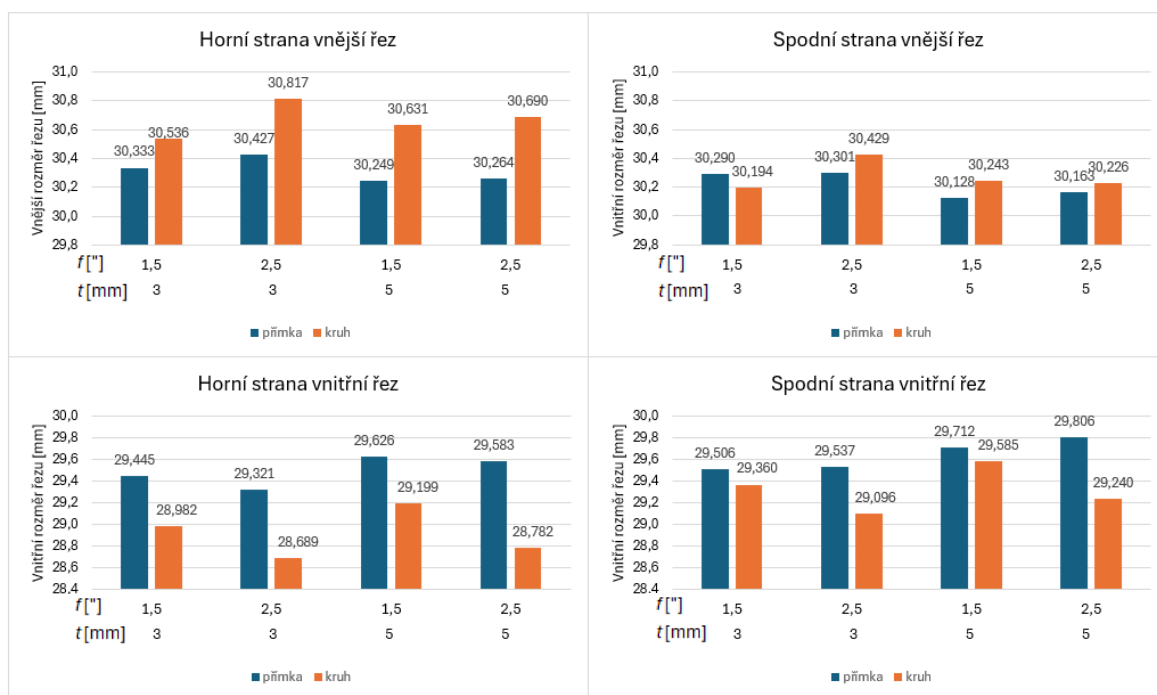
11 VYHODNOCENÍ

Jako hlavní parametr pro porovnání byla zvolena šířka řezu. Další parametry, které byly porovnávány jsou umístění řezu a úhel, pod kterým se paprsek zmenšil během řezu.

Přímka/Kružnice

Hodnoty pro měření přímky byly měřeny v této práci, zatím co hodnoty kružnice byly poskytnuty vedoucím diplomové práce.

Námi definovaný parametr byl 30 mm. Horní grafy ukazují o kolik se šířka řezu zvětšila na vnější stranu a spodní ukazují o kolik se zvětšila na vnitřní stranu. Na svislé straně je stupnice v mm.



Obrázek 51 Porovnání šířky řezu vytvořené laserovým paprskem mezi dráhou po přímkách a po kružnici

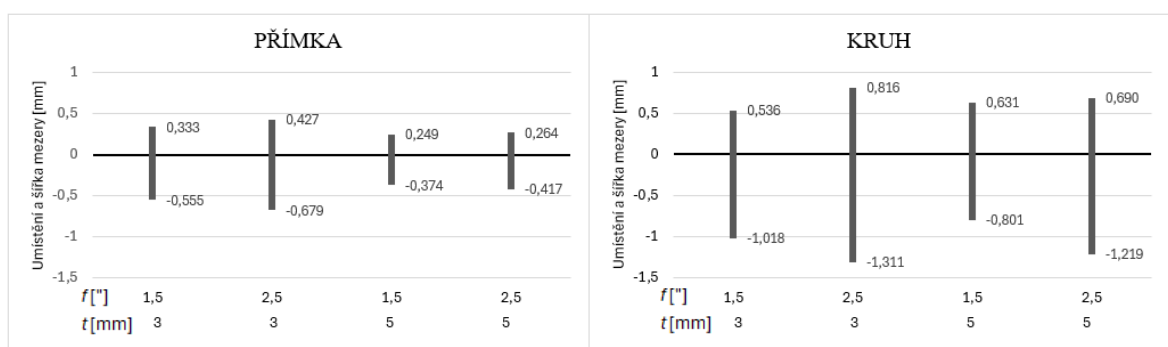
V řezu přímky dosahujeme menšího řezu než při řezu kružnice při všech námi zvolených parametrech. V některých případech až o dvojnásobek řezu.

Tabulka 11 Porovnání úhlů přímky a kružnice

f	[°]	1,5	2,5	1,5	2,5
t	[mm]	3	3	5	5
α kružnice	[°]	1,108	3,456	1,182	1,855
α přímky	[°]	6,49	4,43	7,58	5,13

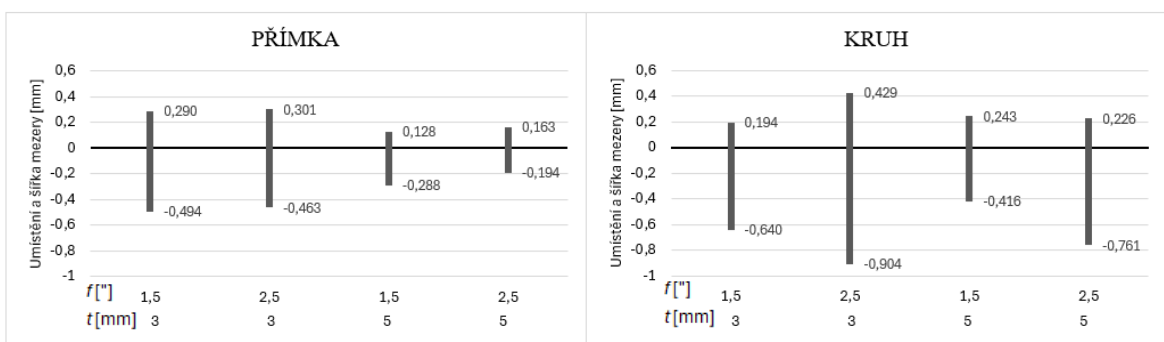
V tabulce 11 lze číst, že se nám hodnoty úhlu při řezání jednotlivých obrazců zásadně liší. U přímky se úhel při změně čočky na větší zmenší. Také se zmenší při použití materiálu o větší tloušťce. Zatímco na přímce se úhel chová opačně a vždy se zvětší.

Na vyobrazeném grafu můžeme vidět přesné umístění šířky řezů a jejich velikost. Vždy jsou vedle sebe dva stejné parametry. Liší se v tom, že první je pro mnou naměřené hodnoty přímky a druhý je pro poskytnuté hodnoty vyřezané po kružnici. První porovnání (obrázek 52) je pro horní stranu vzorků. Druhé porovnání (obrázek 53) je pro spodní stranu vzorků.



Obrázek 52 Porovnání dráhy laserového paprsku na horní ploše mezi dráhou po přímkách a po kružnici

Výsledky se velmi rozcházejí, při řezu po kružnici byla mezera dvojnásobná až trojnásobná oproti dráze laserového paprsku po přímce.



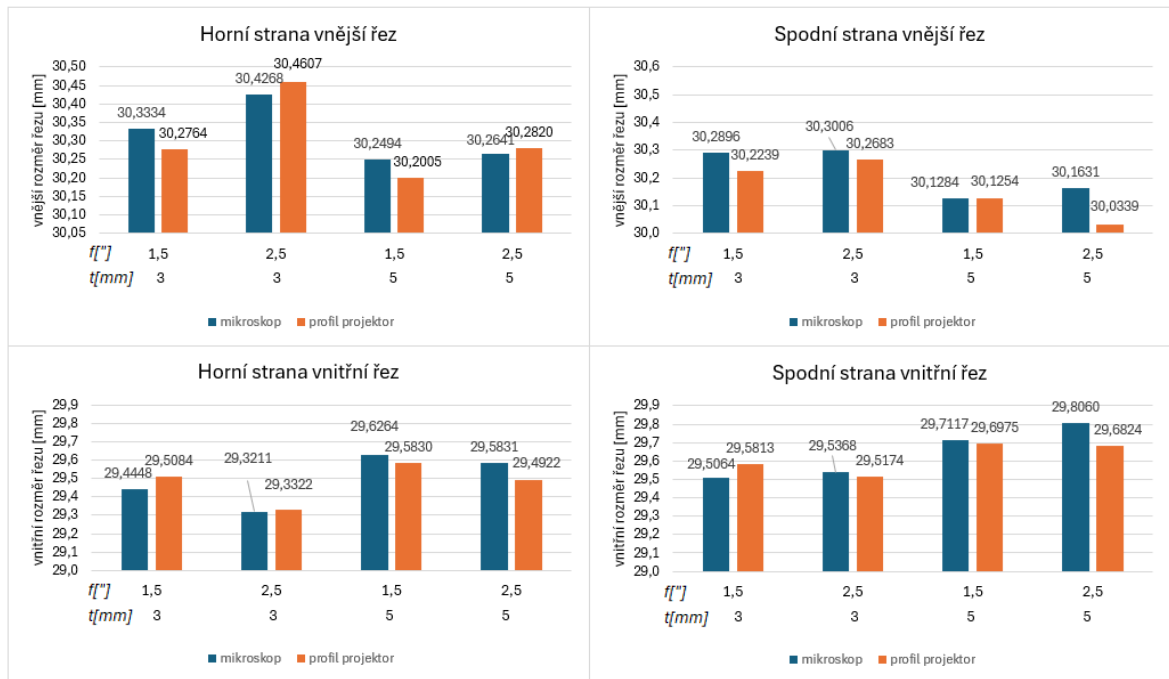
Obrázek 53 Porovnání dráhy laserového paprsku na spodní ploše mezi dráhou po přímkách a po kružnici

Hodnoty pro řez po kružnici jsou vyšší, avšak není v něm většího rozdílu, tentokrát jsou hodnoty téměř dvojnásobné. Výjimku tvoří materiál o tloušťce 5 mm a za použití čočky 2,5°, naměřené hodnoty pro vnitřní rozměr se liší o 5,5 mm.

Co mají ale všechny grafy stejné, je podíl řezu vnitřní a vnější části. U všech řezů po přímce i po kružnici, horní i vnější plochy bylo zjištěno většího úbytku materiálu vnitřní strany.

Porovnání naměřených hodnot mezi dílenským mikroskopem a profil projektorem

Přestože byla vyloučena chyba měření, byly hodnoty rozdílné v porovnání s hodnotami naměřené při řezu po kružnici. Proto bylo provedeno další měření na profil projektoru, aby bylo možné ověřit správnost měření.



Obrázek 54 Porovnání vnitřních a vnějších hodnot mezi mikroskopem a profil projektorem
Měření na obou zařízeních vychází u většiny vzorků v rozdílu do 0,1 mm.

Jediná hodnota, která je vyšší než 0,1 mm je při použití materiálu o tloušťce 5 mm a čočky s ohniskovou vzdáleností 2,5“ a to ze spodní strany vnějšího řezu (obrázek 54 vpravo nahore). Pravděpodobně na mikroskopu nebylo rozpoznáno, že není materiál zcela prořezán, zatím co profil projektor tento jev poznal.

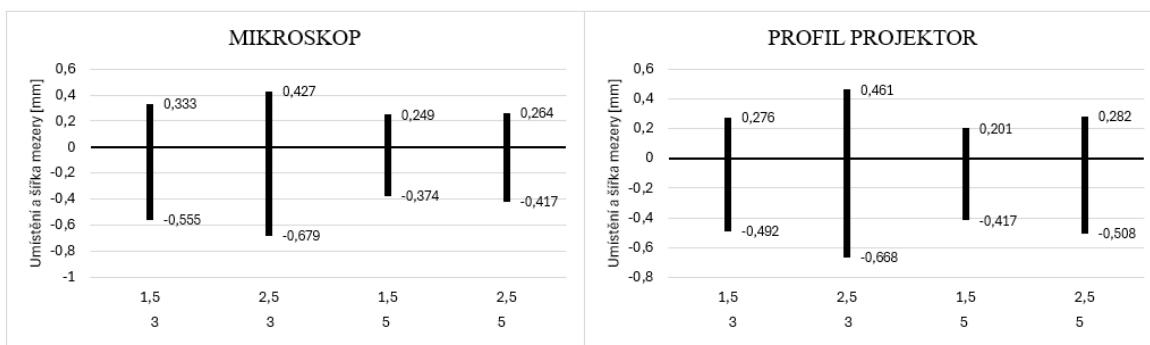
Tyto grafy nám ověřily, že měření na mikroskopu lze brát jako správné.

Tabulka 12 Porovnání úhlů mikroskopu a profil projektoru

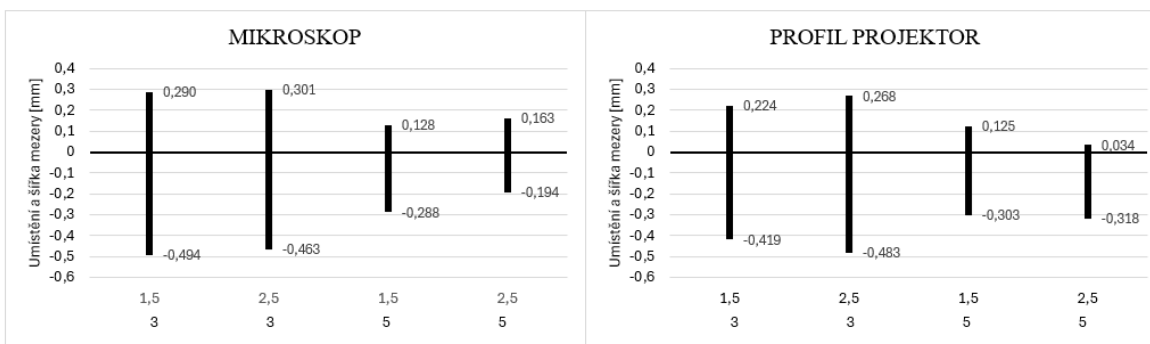
f ["]	1,5	2,5	1,5	2,5
t [mm]	3	3	5	5
α měreno mikroskopem [°]	1,11	3,46	1,18	1,86
α měreno profil projektorem [°]	0,6	1,86	0,54	1,27

Přestože jsou hodnoty velmi podobné, úhel, pod kterým laser řezal se velmi liší. Z měření nelze přesně určit, která naměřená hodnota blíže odpovídá skutečnosti. Můžeme říct, že správná hodnota pro úhel bude minimálně $0,54^\circ$ a maximálně $4,35^\circ$.

Nulová hodnota na svislé ose znázorňuje definovaný parametr 30 mm. Kladné čísla znázorňují o kolik se šířka řezu zvětšila na vnější stranu a záporná čísla ukazují o kolik více odebrala materiálu ze strany vnitřní.



Obrázek 55 Porovnání dráhy laserového paprsku na horní ploše měřené mikroskopem a profil projektorem



Obrázek 55 Porovnání dráhy laserového paprsku na spodní ploše měřené mikroskopem a profil projektorem

Již na první pohled jde poznat, že se grafy vzájemně podobají. Lze předpokládat, že obě měření vychází správně. Přesnějších měření bychom dosáhli pomocí automatického měření, které ale není pro naše účely dostupné.

ZÁVĚR

Nejprve bylo nutné vyrobit vzorky pomocí laserového zařízení ILS 3NM. Při řezání pomocí laseru, musíme počítat s tím, že nám laserový paprsek odstraní materiál v okolí řezu. Na vzniklou šířku řezu má vliv několik parametrů. Mezi nejdůležitější můžeme zařadit zvolený typ laseru a materiál, který obrábíme. Další významné vlastnosti jsou řezná rychlost, výkon laseru, tloušťka daného materiálu a ohnisková vzdálenost dle použité čočky. Vzorky byly vyrobeny na dvou tloušťkách materiálu a za pomoci dvou čoček s rozdílnou ohniskovou vzdáleností 1,5“ a 2,5“. Pro řezání byly nastaveny nejlepší pracovní podmínky, což znamenalo, že byl výkon nastaven na maximum 100 % a řezná rychlost na 3 %.

Předpoklad z teorie říká, že se šířka řezu zmenší, použijeme-li materiál o větší tloušťce. Pokud změníme čočku s ohniskovou vzdáleností z 1,5“ na 2,5“, pak se šířka řezu zvětší. Vzorky naměřené jak mikroskopem, tak profil projektorem na horní a spodní straně odpovídají hodnotám, které jsme očekávali. Správně se projevil vliv tloušťky materiálu a vliv změny čočky.

Hodnoty řezu po kružnici vnějšího i vnitřního rozměru přímky z horní i spodní strany se velmi odlišují od hodnot řezů po přímce. Obě trajektorie mají podobně vypadající grafy, které správně ukazují rozdílná měření mezi jednotlivými vzorky, tedy vliv tloušťky materiálu a ohniskové vzdálenosti. Na všech vzorcích s přímkou je šířka řezu užší než u vzorků s kružnicí. Průměrné hodnoty se odlišují i o dvojnásobek až trojnásobek jak na horní straně, tak na spodní. Pokud budeme chtít řezat kružnicí, musíme počítat s tím, že nám laserový paprsek odebere mnohem více materiálu než při řezu kružnice.

Měření profil projektorem bylo provedeno z důvodů rozlišných výsledků v řezu přímky a kružnice. Měření prokázalo, že při měření dílenským mikroskopem bylo naměřeno přibližně stejných hodnot jako při měření profil projektorem. Hodnoty se liší, protože v obou případech se jedná o měření založené na osobní chybě při měření. Pokud si zvolíme hodnotu 0,1 mm jako naši míru, kdy lze považovat za výsledek za rozdílný, pak pouze jediná naměřená průměrná hodnota tuto hodnotu překračuje. Jedná se o hodnotu při měření spodní strany při tloušťce 5 mm, kdy nebyl zcela prořezán materiál. Na rozdíl od řezu po kružnici, kdy byl materiál zcela prořezán. Pro úplné prořezání by bylo nutné použít výkonnější laser.

Měření vzorků nám ukázalo, že šířka řezu po přímce je menší než šířka řezu po kružnici za stejných pracovních podmínek. Hodnoty vnějšího a vnitřního rozměru přímky z horní i

spodní strany naměřené na dvou rozdílných přístrojích se neliší o více než 0,1 mm a rozdíl mezi nimi lze přisuzovat pouze osobní chybě měření. Také bylo dokázáno, že při řezu po přímce laser ILS 3NM nedokáže zcela prořezat materiál o tloušťce 5 mm. Ani v tom případě, že nastavíme nejlepší pracovní podmínky pro řezání. Pro určení, zda se materiál neprořezal ve všech částech nebo jen v některých konkrétních místech, by bylo vhodné vytvořit více vzorků s tloušťkou materiálu 5 mm a změřit jejich šířku řezu v různých místech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Maňková, Ildikó. Progresívne technológie. Vienaľa Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [2] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [3] GELETA, Vojtech. Progresívne technológie obrábania. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [4] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS, 2007. Výrobní stroje a zařízení. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [5] TRUMPF, 2020 [online]. Laser cutting [cit. 30.11.2023]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/en_SE/solutions/applications/laser-cutting/
- [6] KACHTÍK, Lukáš. Využití laserů. Laser a vše o něm [online]. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/vyuziti.html>
- [7] Nekonvenční metody obrábění [online]. [cit. 22.11.2023]. Dostupné z WWW: Nekonvenční metody obrábění – 4. díl (mmspektrum.com)
- [8] Leonardo technology s.r.o. - Automatizace průmyslového značení, 2020 [online]. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red [cit. 12.11.2023]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [9] Šmíd, Jiří. Lasery pro průmysl. MM průmyslové spektrum. [online]. 2008 [cit. 15.11.2023] ISSN: 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserypro-prumysl>
- [10] LAPŠANSKÁ, Hana, 2020 [online]. Laserové technologie v praxi [cit. 15.11.2023]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [11] LAO - lasery a optika, 2020 [online]. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení > LAO - lasery a optika [cit. 16.11.2023]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

- [12] MM průmyslové spektrum, 2020 [online]. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi [cit. 16.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-vprumyslove-praxi.html>
- [13] KACHTÍK, Lukáš. Využití laserů. Laser a vše o něm [online]. [cit. 20.12.2023]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/vyuziti.html>
- [14] Lascam – Laserové a optické technologie pro průmysl a vědu, 2020 [online]. Rozdělení laserů [cit. 21.11.2023]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [15] Lasery pro průmysl [online]. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html> 2
- [16] Typy laserů [online]. [cit. 20.11.2023]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k23.htm>
- [17] LASCAM systems s.r.o., 2020 [online]. Laserové řezání - základní rozdělení [cit. 29.11.2023]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/zakladni-rozdeleni-laseroveho-rezani/>
- [18] Laserové technologie v praxi [online]. LAPŠANSKÁ, Hana. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 29.11.2023]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [19] Cutting stainless steel at record thickness. [Online] 2013. [cit. 29.11.2023] <http://www.us.trumpf.com/en/metanavigation/news-archive/cutting-stainlesssteel-atrecord-thickness/rec-uid/266055.html>.
- [20] MM průmyslové spektrum, 2020 [online]. Nekonvenční metody obrábění [cit. 02.12.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metodyobrabeni-5-dil.html>
- [21] Eluc, 2020 [online]. Obrábění laserem [cit. 03.12.2023]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1423>
- [22] LaserTherm, 2020 [online]. Laserové svařování [cit. 08.12.2023]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserovesvarovani-kovu>

- [23] Janíčková, Petra. Sbližování teorie s praxí [online]. Uherské hradiště © 2012 [cit. 06.02.2024]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/laser-projektsablona.pdf>
- [24] ESAB, 2021 [online]. Laser Cutting Process [cit. 04.02.2024]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/laser-cutting-process.cfm>
- [25] FIT Eurazio, 2020 [online]. Čočky a odrazná zrcátka pro CO2 lasery [cit. 23.12.2023]. Dostupné z: <https://cnc.inshop.cz/cocky-a-odrazna-zreatka-pro-co2-lasery/>
- [26] EU TECHNOLOGIES, 2020 [online]. Optika do CO2 laserů. [cit 06.02.2024]. Dostupné z: <https://eu-technologies.cz/spravka/1-nky/optika-do-co2-laseru>
- [27] Publi, 2021 [online]. Rozdělení a charakteristika polymerů. [cit. 06.02.2024]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [28] Koplast - Your Partner for Plastic Products, 2021 [online]. Products from acrylic glass [cit. 06.02.2024]. Dostupné z: <https://www.koplast.org/products-from-acrylic-glass/>
- [29] ScienceDirect, 2021 [online]. Polymethylmethacrylate [cit. 06.02.2024]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polymethylmethacrylate>
- [30] Eurolaser, 2021 [online]. Laser cutting and engraving of acrylic [cit. 17.12.2023]. Dostupné z: <https://www.eurolaser.com/materials/acrylic-pmma/>
- [31] TWI. Joining Innovation with Expertise, 2021 [online]. What is an excimer laser? [cit. 07.02.2024]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-an-excimer-laser>
- [32] Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie [Online] Rndr.Libor Mrňa, Ph.D., [cit. 15.12.2023]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7209420-Vyuziti-vykonovych-laseru-ve-strojirenske-praxi-svarovani-deleni-a-dalsi-technologie.html>
- [33] Evropská databanka [online]. Schéma řezání laserem [cit. 20.12.2023] Dostupné z: <https://nabidky.edb.cz/Nabidka-64597-rezani-a-vrtani-laserem-nejdokonalejsi-metoda-deleni-materialu>

- [34] Mechanical Engineer Students Resource Site, 2020 [online]. Laser cutting Process [cit. 17.12.2023]. Dostupné z: http://www.engineerstudent.co.uk/laser_cutting.html
- [35] ESAB, 2021 [online]. Laser Cutting Process [cit. 12.01.2024]. Dostupné z: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/laser-cutting-process.cfm>
- [36] Polymethylmethakrylát [online]. [cit. 18.11.2023]. Dostupné z: <https://www.polyplasty.cz/polymethylmethakrylat.html>
- [37] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3, Přepřac. Praha: Vydavatelství vysoké školy chemicko-technologické v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [38] EU TECHNOLOGIES, 2020 [online]. Optika do CO2 laserů. [cit 19.12.2023]. Dostupné z: <https://eu-technologies.cz/spravka/1-nky/optika-do-co2-laseru>
- [39] Sváření laserem [online]. [cit. 18.12.2023]. Dostupné z: <http://www.dkstyl.com/svareni-laserem.php>
- [40] Metodika provozního měření mikroskopie [online]. [cit. 08.03.2024]. Dostupné z: https://ww.spolky-csvts.cz/cms/sites/default/files/mpm_1120317_metodika_provozniho_mereni_mikroskopie_0.pdf
- [41] Intelligent Laser System III-NM - Operation Manual, version 1.6. : Laser Tools & Technics Corp., 2007. 53 s.
- [42] Měření Abbeho délkoměrem. Studijní materiály a podklady školní rok 2007/2008 [online]. [cit. 15.03.2024]. VOŠ SPŠ Kladno. Dostupný seznam použitých symbolů a zkratk
- [43] How does a laser work? [online] [cit. 18.12.2023]. Dostupné z: <https://www.troteclaser.com/en/learn-support/faqs/how-does-a-laser-work>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

CO ₂	Oxid uhličitý
"	Palec
f	Ohnisková vzdálenost
DPI	Dots per inch
PMMA	Polymethylmetakrylát
°C	Stupeň Celsia
t	Tloušťka
P	Výkon
s	Rychlost posuvu
kg	Kilogram
PPI	Pulse per inch
ZnSe	Selenid zinečnatý
ms	Milisekunda
mJ	Milijoule
J	Joule
UV	Ultrafialový
m	Metr
pw	Pulse wave
cw	Continual wave
GaAs	Galium arsenid
CdSe	Kadmium selen
Ne	Neon
He	Helium
YAG	Yttrium aluminium granát
μm	Mikrometr

nm Nanometr

mm Milimetr

Nd Neodym

W Watt

kW kilowatt

MW Megawat

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Emise [11]</i>	11
<i>Obrázek 2: Obecný popis laseru [11]</i>	12
<i>Obrázek 3: Princip laseru [11]</i>	12
<i>Obrázek 4: 1. Pevnolátkové lasery: 1 – Nd:YAG laser, 2 – diskový laser, 3 – vláknový laser, 4 – diodový laser [12]</i>	14
<i>Obrázek 5: Nd-YAG laser [11]</i>	18
<i>Obrázek 6: Schéma CO₂ laseru [1]</i>	20
<i>Obrázek 7: Schéma excimerového laseru [31]</i>	21
<i>Obrázek 8: Zastoupení laserů v průmyslu [32]</i>	22
<i>Obrázek 9: Využití laserů v průmyslu [17]</i>	23
<i>Obrázek 10: Řezání laserem [33]</i>	24
<i>Obrázek 11: Značení přes masku [12]</i>	26
<i>Obrázek 12: Značení pomocí vychylování paprsku [12]</i>	27
<i>Obrázek 13: Vrtání laserem [17]</i>	28
<i>Obrázek 14: Laserem podporované obrábění [21]</i>	29
<i>Obrázek 15: Obrábění laserem [21]</i>	29
<i>Obrázek 16: Svařování laserem povrchově a hloubkově [21]</i>	30
<i>Obrázek 17: Kalení laserem [20]</i>	32
<i>Obrázek 18: Nanášení povlaku pomocí laseru [21]</i>	32
<i>Obrázek 19: Porovnání ohniskových vzdáleností použitých čoček [35]</i>	35
<i>Obrázek 20: Umístění polohy ohniska [35]</i>	35
<i>Obrázek 21: Porovnání fokusace paprsku [23]</i>	36
<i>Obrázek 22: Základní dělení polymerů [37]</i>	37
<i>Obrázek 23: Vzorec PMMA [36]</i>	38
<i>Obrázek 24 Schéma použitého laseru [41]</i>	41
<i>Obrázek 25 Pracovní soubor pro tloušťku 3 mm v CorelDraw</i>	42
<i>Obrázek 26 Pracovní soubor pro materiál o tloušťce 5 mm v programu CorelDraw</i>	43
<i>Obrázek 27 Vyřezané vzorky</i>	43
<i>Obrázek 28 Dílenský mikroskop [40]</i>	44
<i>Obrázek 29 Odečítací stupnice dílenského mikroskopu [42]</i>	45
<i>Obrázek 30 Měření pomocí zařízení profil projektor</i>	45
<i>Obrázek 31 Řez laserem zobrazený na profil projektoru</i>	46
<i>Obrázek 32 Neprořezaná mezera</i>	46
<i>Obrázek 33 Vyobrazení místa měření</i>	47

<i>Obrázek 34 Působení laserového paprsku.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 35 Naměřené hodnoty řezů.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 36 Průměrné hodnoty z horní plochy vzorků naměřené mikroskopem</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 37 Průměrné hodnoty spodní strany vzorků naměřené mikroskopem.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 38 Porovnání vnějších stran vzorků při měření mikroskopem</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 39 Porovnání vnitřních stran vzorků při měření mikroskopem.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 40 Celková šířka řezu naměřená mikroskopem.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 41 Šířka řezu horní strany vzorků naměřená mikroskopem</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 42 Šířka řezu spodní strany vzorků naměřená mikroskopem</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 43 Průměrné hodnoty horní strany vzorků naměřené profil projektorem</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 44 Průměrné hodnoty spodní strany vzorků naměřené profil projektorem</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 45 Porovnání vnějších stran vzorků při měření profil projektorem.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 46 Porovnání vnitřních stran vzorků při měření profil projektorem</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 47 Celková šířka řezu naměřená mikroskopem.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 48 Šířka řezu horní strany naměřená mikroskopem.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 49 Šířka řezu spodní strany naměřená mikroskopem.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 50 Vzniklý úhel</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 51 Porovnání šířky řezu vytvořené laserovým paprskem mezi dráhou po přímkách a po kružnici.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 52 Porovnání dráhy laserového paprsku na horní ploše mezi dráhou po přímkách a po kružnici.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 53 Porovnání dráhy laserového paprsku na spodní ploše mezi dráhou po přímkách a po kružnici.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 54 Porovnání vnitřních a vnějších hodnot mezi mikroskopem a profil projektorem</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 56 Porovnání dráhy laserového paprsku na spodní ploše měřené mikroskopem a profil projektorem</i>	<i>63</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Rozdělení laserů dle aktivního prostředí</i>	16
<i>Tabulka 2 Srovnání CO₂ a Nd-YAG laseru</i>	17
<i>Tabulka 3 Řezné podmínky pro vzorky</i>	42
<i>Tabulka 4 Naměřené hodnoty horní strana ve směru vertikálním, f 1,5", t 5 mm</i>	48
<i>Tabulka 5 Naměřené hodnoty</i>	48
<i>Tabulka 6 Naměřené průměrné hodnoty pomocí dilenského mikroskopu</i>	49
<i>Tabulka 7 Naměřené průměrné hodnoty pomocí profil projektoru</i>	49
<i>Tabulka 8 Chyba měření</i>	49
<i>Tabulka 9 Úhel vzniklých řezů při měření mikroskopem</i>	55
<i>Tabulka 10 Úhel řezu paprsku při měření profil projektorem</i>	59
<i>Tabulka 11 Porovnání úhlů přímky a kružnice</i>	60
<i>Tabulka 12 Porovnání úhlů mikroskopu a profil projektoru</i>	62

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha_I: NAMĚŘENÉ HODNOTY POMOCÍ DÍLENSKÉHO MIKROSKOPU

Příloha_II: NAMĚŘENÉ HODNOTY POMOCÍ PROFIL PROJEKTORU

