

Vliv změny technologických parametrů na kvalitu laserem obrobené plochy a ekonomičnost procesu obrábění PMMA

Bc. Josef Vávra

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef VÁVRA**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv změny technologických parametrů na kvalitu laserem obrobene plochy a ekonomičnost procesu obrábění PMMA**

Zásady pro vypracování:

1. **Progresivní technologie, jejich klasifikace a základní charakteristiky**
2. **Obrábění laserem, rozdělení laserů, klasifikace procesu mikroobrábění, využití laseru praxi**
 - A) **Vypracujte rešerši se zaměřením na tyto oblasti :**
 1. **progresivní technologie, jejich klasifikace a základní charakteristiky**
 2. **obrábění laserem, rozdělení laserů, klasifikace procesu mikroobrábění**
 3. **vlastnosti a charakteristika materiálu PMMA**
 4. **ekonomickou studii procesu laserového mikroobrábění**
 - B) **Experimentální část:**
 1. **obrábění PMMA za různých technologických podmínek a při rozlišení DPI 200.**
 2. **provedte měření drsnosti povrchu a hloubky řezu obrobene ploch**
 3. **provedte vyhodnocení vlivu změny technologických podmínek a zhodnocení změny rozlišení při hodnotách 200, 500 a 1000 DPI na jakost obráběných ploch**
 4. **vypracujte ekonomickou analýzu laserového procesu**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. MAŇKOVÁ, I.: **Progresivně technologie**, Vienaľa, Košice 2000

2. <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>

3. <http://www.nanotechnologie.cz/index.php?1=1&s=122>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

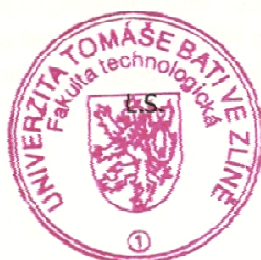
Ústav výrobního inženýrství

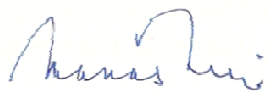
Datum zadání diplomové práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2007**

Ve Zlíně dne 22. ledna 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje problematiku technologie obrábění laserovým paprskem, její charakteristiky a možnosti. Dále se tato práce zaměřuje na oblast mikroobrábění a to konkrétně materiálu PMMA. Experimentální část této práce je zaměřena na obrábění desky z materiálu PMMA, při rozlišení laseru 200DPI, za různých technologických podmínek. Následuje zhodnocení rozdílů kvality obrobeneho povrchu pro 200, 500 a 1000DPI. V závěru práce je uvedeno ekonomické zhodnocení vlivu změny nastavení rozlišení při laserovém obrábění.

Klíčová slova: laser, PMMA, DPI, progresivní technologie, laserové mikroobrábění

ABSTRACT

This diploma thesis describing issue of laser machining technology, characteristics and options of this technology. This thesis has been focused also on microcutting and especially machining material PMMA. Experimental part of this thesis has been focused on machining plate of PMMA, when the resolution of laser is 200DPI, and the different technological conditions. The following part is valuation of different quality machined surfaces for 200, 500 and 1000DPI. At the end of this thesis, is economical valuation of changing resolution parameters for laser machining.

Keywords: laser, PMMA, DPI, progressive technologies, laser machining

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří přispěli k dokončení této práce. Především velmi děkuji své vedoucí Ing. Libuši Sýkorové, PhD. za její odborné vedení a rady. Dále vedení firmy Mechanika Prostějov za možnost uskutečnění experimentálních zkoušek na CO₂ laseru a také Mgr. Miroslavu Rycovi za pomoc při obrábění na laseru.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 24. 05. 2007

.....

jméno diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE	11
1.1 KLASIFIKACE PROGRESIVNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	12
1.1.1 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa.....	12
1.1.2 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu	12
1.1.3 Podle hlavního energetického zdroje obrábění	13
1.2 ZNÁZORNĚNÍ PRINCIPU TECHNOLOGIÍ A JEJICH STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA.....	13
1.2.1 Chemický a elektrochemický princip úběru materiálu.....	13
1.2.1.1 ECM – elektrochemické obrábění (Elektrochemical Machining)	13
1.2.1.2 CM – chemické obrábění (Chemical Machining).....	13
1.2.2 Mechanický princip úběru materiálu.....	14
1.2.2.1 USM – obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining)	14
1.2.2.2 WJM – obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining).....	14
1.2.2.3 AJM – obrábění proudem brusiva (Abrasive Jet Machining).....	14
1.2.3 Elektrotepelný princip úběru materiálu	15
1.2.3.1 EDM – elektroerosivní obrábění (Elektrodischarge Machining).....	15
1.2.3.2 LBM – laserové obrábění (Laser Beam Machining).....	15
1.2.3.3 EBM – obrábění elektronovým paprskem (Elektron Beam Machining)	15
1.2.3.4 IBM – obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining).....	16
1.2.3.5 PAM – obrábění plazmovým paprskem (Plasma Arc Machining)	16
2 OBRÁBĚNÍ LASEREM.....	17
2.1 HISTORIE A PRINCIP LASERU	17
2.1.1 Modulace laserové paprsku	20
2.2 ROZDĚLENÍ LASERŮ.....	21
2.2.1 Rozdělení laserů podle režimu paprsku	22
2.2.2 Dělení podle skupenství aktivního prostředí.....	23
2.2.2.1 Pevnolátkové lasery	23
2.2.2.2 Plynové lasery	26
2.2.2.3 Kapalinové lasery.....	30
2.2.2.4 Polovodičové lasery	31
2.2.2.5 Excimerové lasery.....	32
2.2.3 Rozdělení podle způsobu čerpání.....	32
2.2.4 Rozdělení laserů podle vlnové délky generovaného laserového paprsku	33
2.3 KLASIFIKACE PROCESU MIKROOBRÁBĚNÍ	33
2.4 VYUŽITÍ LASERU V TECHNOLOGII	35
2.4.1 Laserové svařování.....	35
2.4.2 Laserové vrtání	37
2.4.3 Laserové řezání.....	37
2.4.4 Dekorace skla laserem.....	38
2.4.5 Laserové značkování a gravírování.....	39

2.4.6	Laserové kalení.....	40
2.5	VYUŽITÍ LASERU VE SVĚTĚ	41
2.5.1	Laser v medicíně	41
2.5.2	Laser v mikroelektronice.....	42
2.5.3	Laser v astronomii, geodézii, geofyzice a ekologii	43
2.5.4	Laserová spektroskopie	44
2.5.5	Laserová separace izotopů.....	45
2.5.6	Využití laseru v holografii.....	45
3	VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU PMMA.....	46
3.1	CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU.....	46
3.2	ZPŮSOB VÝROBY	47
3.3	ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ A POUŽITÍ.....	48
4	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	49
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
5	ZKUŠEBNÍ VZOREK	51
6	ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCI.....	53
6.1	CO ₂ LASER MERCURY L-30	53
6.2	DRSNOMĚR – SJ 301	56
6.3	LINEÁRNÍ VÝŠKOMĚR LH – 600B.....	57
6.4	MIKROKAMERA PROSCOPE HR.....	58
6.5	METALOGRAFICKÝ MIKROSKOP.....	59
7	MĚŘENÍ HODNOT MATERIÁLU OBROBENÉHO PŘI ROZLIŠENÍ 200 DPI	60
7.1	MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	60
7.2	MĚŘENÍ HLOUBKY	67
8	ZHODNOCENÍ VLIVU ZMĚNY DPI NA JAKOST OBRÁBĚNÉ PLOCHY	70
8.1	SROVNÁNÍ DRSNOSTI.....	71
8.2	SROVNÁNÍ HLOUBKY POVRCHU OBROBENÉ PLOCHY	73
8.3	GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ROZDÍLŮ STRUKTURY	75
9	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	83
9.1	NÁKLADY NA JEDNU HODINU PRÁCE STROJE S OBSLUHOU.....	83
9.2	VÝPOČET CENY NAVRŽENÉ MIKROSTRUKTURY	85
9.2.1	Výpočet ceny obrábění při rozlišení 200DPI	86
9.2.2	Výpočet ceny obrábění při rozlišení 500DPI	87
9.2.3	Výpočet ceny obrábění při rozlišení 1000DPI	88
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ	89

10.1	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A HLOUBKY DRÁŽKY	89
10.2	ZHODNOCENÍ VLIVU ZMĚNY DPI NA KVALITU OBROBENÉ PLOCHY	89
	ZÁVĚR	91
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	92
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	93
	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
	SEZNAM TABULEK.....	97

ÚVOD

Laser je vynálezem dvacátého století a za čtyřicet let své existence se stal nedílnou součástí našeho života. Setkáváme se s ním v mnoha oborech lidské činnosti. Předměty opracované laserem potkáváme na každém kroku a ani si někdy neuvědomujeme, že právě předmět, který držíme v ruce, má něco společného s laserem.

V dnešní době je laserový paprsek využíván ve velmi mnoha oborech lidské činnosti. Je jemným chirurgickým nástrojem, zaznamenává informace a snímá jejich záznam z kompaktních disků, slouží k přenosu dat, obrábí tvrdé materiály, vrtá díry do diamantu, brousí nástroje, zaměřuje letící tělesa, slouží ve vojenství k zaměření cílů, rozpouští molekuly látek, dokáže proniknout do nitra atomů a zažehnout termionukleární reakci apod. Důležité je uplatnění v optoelektronice a kvantové elektronice.

Důležité a v současné době velmi populární je téma mikroobrábění. Pro mikroobrábění laserem mohou být použity téměř všechny materiály, rozměry součástí se pohybují od několika μm do stovek μm . Pro výrobu miniaturních součástek se vyžadují procesy obrábění, které garantují vysokou přesnost a výkonnost. Obrábění pomocí laseru představuje slibnou alternativu oproti konvenčním technologiím, např. procesu leptání. Firmám se nabízejí pozoruhodné možnosti laserového přesného mikroobrábění nejrůznějších materiálů s vynikajícími mechanickými, optickými, tribologickými, příp. magnetickými vlastnostmi, jako jsou keramika, sklo, polymery a různé kovy. Vyzařování nanosekundových impulsů v rozsahu UV vlnových délek způsobuje, že dochází k minimálním tepelným vlivům na keramiku, sklo a polymery.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE

Pod pojmem progresivní technologie si můžeme představit řadu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů určených k úběru materiálu.

Tyto progresivní metody obrábění se používají hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžce obrobitelné jako např. kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní keramické materiály, některé polymery apod. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich žárupevnosti, vysoké tvrdosti, křehkosti, nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem, nehomogenní mikrostruktury apod.

Právě vývoj progresivních technologií, které používají jinou než čistě mechanickou energii je řešením problému s opotřebením nástrojů při obrábění. Z hlediska opotřebenění nástrojů se je možné rozvoj progresivních metod rozdělit na dva směry:

- a) využívání elektrické, chemické a tepelné energie na podporu klasických metod obrábění s nástrojem jako geometrickým tělesem, které snižují intenzitu jeho opotřebenění
- b) využívání elektrické, chemické, elektrochemické a tepelné energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů bez použití nástroje jako geometrického tělesa, nebo s jeho použitím ale bez jeho zásahu do procesu obrábění – úběr materiálu je realizován pouze energií jinou než mechanickou.

Zvláštností těchto procesů v porovnání s klasickými metodami obrábění je možné shrnout následovně:

- úběr nezávislý na mechanických vlastnostech materiálu jako jsou tvrdost, pevnost
- v místě oddělování částic materiálu nepůsobí řezná síla, nevzniká řezný odpor, výrobky se vlivem mechanického zatížení vyplývajícího z technologického procesu nedeformují
- z místa úběru materiálu přechází méně tepla do hmoty obrobku
- opracovává se celý povrch obrobku najednou

- maximální velikost obrobku je limitována energetickou základnou zařízení
- možnost mikroobrábění a dosahování nanorozměrů

Dalšími důvody pro použití progresivních způsobů obrábění jsou také zvyšující se požadavky na přesnost, kvalitu, komplexnost tvarů, na dokončení povrchu atd. [1]

1.1 Klasifikace progresivních metod obrábění

Systematickou klasifikaci těchto technologií je možné zpracovat podle různých hledisek. Obvykle se používá toto dělení:

1.1.1 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa

Dělení podle přítomnosti nástroje vychází ze směrů vývoje technologií. Slovo nástroj je uvedené pouze z důvodu, že se používá, ale na úběru materiálu se vůbec nepodílí. V přeneseném smyslu se tedy používá z těchto důvodů:

- při vysvětlování teorie úběru materiálu se o nástroji mluví všeobecně jako o prostředku, který je příčinnou úběru materiálu např. laserový nástroj. V tomto případě ale nástrojem není tuhé geometrické těleso.
- nástroj jako tuhé geometrické těleso, které na rozdíl od klasického řezání a broušení není v přímém kontaktu s obráběným materiálem, ale v procesu úběru materiálu podléhá opotřebení. V tomto případě slouží na zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečení optimálního průběhu procesu. [1]

1.1.2 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu

- procesy s brusným účinkem: ultrazvukové obrábění, obrábění proudem brusiva
- procesy s erozivním účinkem: obrábění vodním paprskem
- procesy chemického rozpouštění materiálu: fotochemické a elektrochemické obrábění [1]

1.1.3 Podle hlavního energetického zdroje obrábění

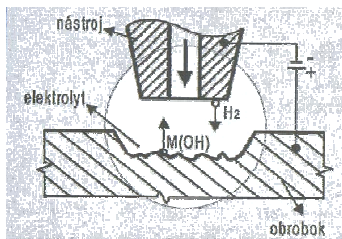
Toto rozdělení podle použité energie je nejvíc rozšířené. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálu a to na:

- mechanické procesy
- chemické procesy
- elektrické nebo elektromechanické procesy
- tepelné nebo elektrotepelné procesy [1]

1.2 Znázornění principu technologií a jejich stručná charakteristika

1.2.1 Chemický a elektrochemický princip úběru materiálu

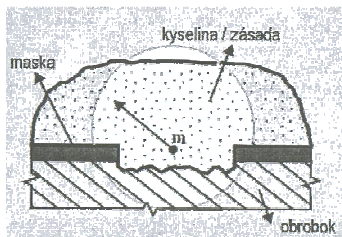
1.2.1.1 ECM – elektrochemické obrábění (*Electrochemical Machining*)



Obrábění tvarů, složitých profilů a otvorů s větší intenzitou úběru. Použití pouze pro vodivé materiály.

Nevýhody: požadavek vstupních technologických zkoušek pro určení vhodných parametrů procesu, vysoké náklady na zařízení, vysoká energetická náročnost [1]

1.2.1.2 CM – chemické obrábění (*Chemical Machining*)



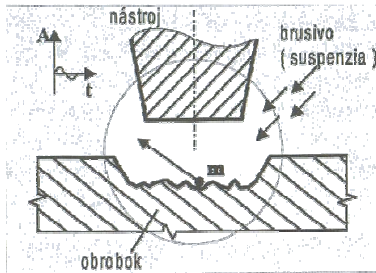
Chemické působení na úběr materiálu. Použití pro skoro všechny kovy, tvrdé, křehké a nevodivé materiály

Nevýhody: max. hloubka odleptání materiálu do 12 mm

Výhody: nízké náklady na zařízení [1]

1.2.2 Mechanický princip úběru materiálu

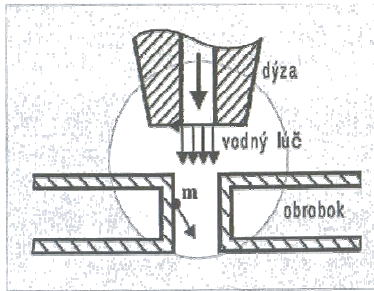
1.2.2.1 USM – obrábění ultrazvukem (*Ultrasonic Machining*)



Úběr materiálu pomocí abrazivní suspenze která proudí v mezeře mezi kmitajícím nástrojem a obrobkem. Použití při tvorbě plytkých nerovnoměrných profilů do tvrdých a křehkých materiálů.

Nevýhody: vysoké náklady, malý úběr materiálu [1]

1.2.2.2 WJM – obrábění vodním paprskem (*Water Jet Machining*)

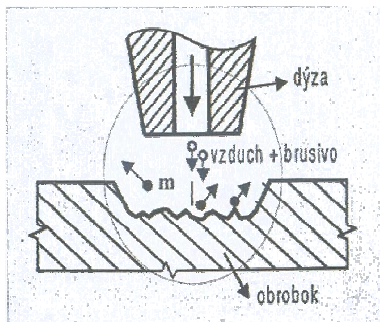


Není limitované vlastnostmi materiálu, je doporučeno zejména pro opracování těžkoobrobitelných mat. – keramika a kompozitní materiály do hloubky 25mm.

Výhody: technologie šetří životní prostředí

Nevýhody: vysoká hlučnost [1]

1.2.2.3 AJM – obrábění proudem brusiva (*Abrasive Jet Machining*)

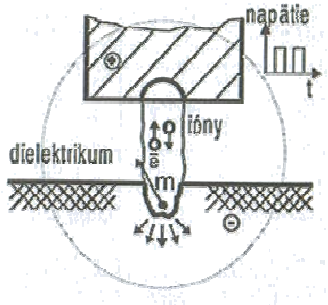


Používá stlačený plyn, obvykle vzduch na urychlení proudění pevného brusiva. Použití pro čištění povrchů a oddělování velmi malých dílců z křehkých materiálů

Nevýhody: pomalý úběr materiálu, nízký výkon zařízení [1]

1.2.3 Elektrotepelný princip úběru materiálu

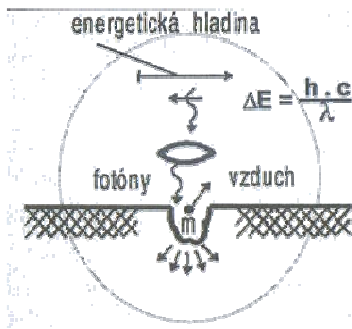
1.2.3.1 EDM – elektroerosivní obrábění (*Elektrodischarge Machining*)



Pro elektricky vodivé a tvrdé materiály, vysoké náklady a malá životnost nástroje elektrody, nutnost výroby vždy nové elektrody při změně profilu dílce.

EDM zvyšuje tvrdost vytvářené povrchové vrstvy a redukuje mez únavy [1]

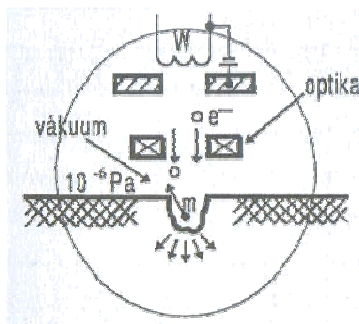
1.2.3.2 LBM – laserové obrábění (*Laser Beam Machining*)



Široce aplikovatelná technologie pro všechny druhy materiálů, nedoporučuje se pro velmi tenké dílce a pro velmi malé úběry.

Nevýhody: tepelně ovlivněná zóna, nerovnoměrnost řezu a vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu [1]

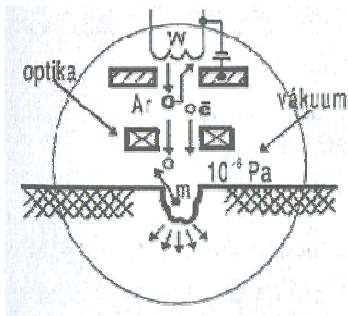
1.2.3.3 EBM – obrábění elektronovým paprskem (*Elektron Beam Machining*)



Vyžaduje vakuové prostředí, vhodné pro vrtání otvorů a tvarování mikro rozměrů.

Nevýhody: vysoké náklady na zařízení, rozměry omezená použitelnost, nízká produktivita a tepelné ovlivnění vytvářeného povrchu [1]

1.2.3.4 IBM – obrábění iontovým paprskem (Ion Beam Machining)

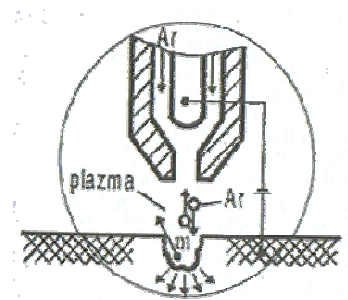


Vyžaduje se vakuové prostředí, vhodné pro tvarování mikro a nano rozměrů a velmi jemné opracování povrchů

Nevýhody: vysoké náklady, omezená použitelnost dané rozměrem vakuové komory

Výhody: povrchy nejsou ovlivněny teplem [1]

1.2.3.5 PAM – obrábění plazmovým paprskem (Plasma Arc Machining)



Vhodné pro opracování všech kovových materiálů vysokou rychlostí úběru

Nevýhody: vysoké provozní náklady, náklady na zařízení a tepelné ovlivnění místa řezu [1]

Původně byly progresivní metody obrábění vyvinuté jako alternativní způsoby. V současné době představují tyto technologie v mnohých případech běžný způsob obrábění a v některých případech také jako jedinou možnost pro opracování daného materiálu. Jejich používání je podpořeno důkaznými výhodami, mezi které patří:

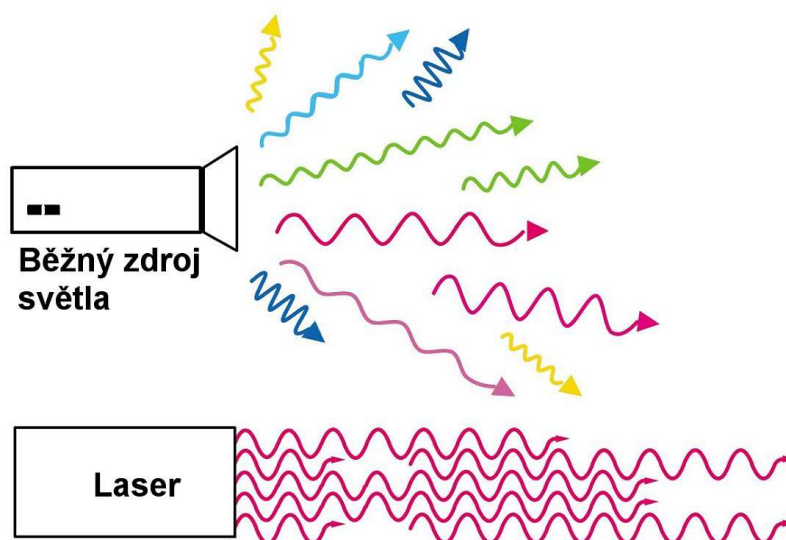
- obrobiteľnosť materiálů
- tvarová komplexnosť dílců
- jednoduchá automatizace výroby
- integrita povrchu a vysoká přesnost
- miniaturizace dílců

2 OBRÁBĚNÍ LASEREM

2.1 Historie a princip laseru

Historický vývoj poznatků o laserovém paprsku začíná popisem teoretických základů vynucené emise záření, kterou podal Albert Einstein v roce 1917. Avšak až začátkem 50. let byly položeny základy novému oboru – kvantové elektronice a bylo realizováno zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření na principu stimulované emise záření. První projekt laseru navrhli C.H.Towens a A.L.Shawlow v roce 1958. O dva roky později roce 1960 T.H.Maiman zkonstruoval a odzkoušel první rubínový laser.

Název **LASER** obsahuje první písmena slov v anglickém názvu **Liht Amplification by Stimulated Emission of Radiation** - zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry, zesílením je vytvořen úzký svazek fotonů (kvant elektromagnetického záření). Laserové světlo je monochromatické (jednobarvné) koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Rozdíl mezi běžným zdrojem světla a laserovým světlem můžeme vidět na (Obr. 1). Vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačení spontánní emise na úkor emise stimulované. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká v případě, že vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření.



Obr. 1. Rozdíl mezi běžným zdrojem světla a světelným paprskem [2]

Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jakou měl předchozí kvant. Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření. V závislosti na rozdílu energetických hladin vzniká infračervené, ultrafialové nebo viditelné světelné záření. V běžných podmínkách se atom nachází v základním stavu, k emisi záření jej lze přinutit vybuzením. Dodání energie, potřebné pro dosažení vybuzeného stavu, se nazývá čerpání (u rubínového laseru pomocí fotonů, u argonového laseru přímým vybuzením elektronů, u laseru typu hélium - neón vzájemnou kolizí atomů).

Každé laserové zařízení obsahuje laserové médium (aktivní látka), zdroj excitační energie (čerpání) a optický rezonátor (polopropustné a nepropustné zrcadlo), který neustále vrací část stimulované emise záření zpět do laserového média. Zdrojem čerpání může být elektrický výboj, elektronový paprsek, viditelné světlo (výbojka), ultrafialové světlo, chemická reakce, teplo, případně jiné zdroje. Po načerpání se v laserovém médiu zvyšuje počet atomů, iontů a molekul na vyšší energetické hladině a médium samovolně emituje svoji přebytečnou energii ve formě fotonů, které mohou mít různou frekvenci, směr šíření a polaritu. Optický rezonátor vybírá pouze ty fotony, které mají frekvenci shodnou s jeho rezonanční frekvencí. Fotony se pohybují podél osy rezonátoru tak, že dopadají kolmo na jeho zrcadla. Od nepropustného zrcadla (odrazivost 100%) se odrazí zpět, proletí znovu aktivní látkou k polopropustnému zrcadlu (odrazivost 40÷80%), přes které vycházejí ven jako koherentní monochromatický laserový paprsek. Zbylé fotony, které mají jiný směr šíření a jinou frekvenci se nezesílí a jsou vyzařovány vnějšími stěnami laserového média. Všechny vzniklé fotony zůstávají v rezonátoru po extrémně krátkou dobu. Schematický princip laseru je znázorněn na (Obr.2) [2,12]

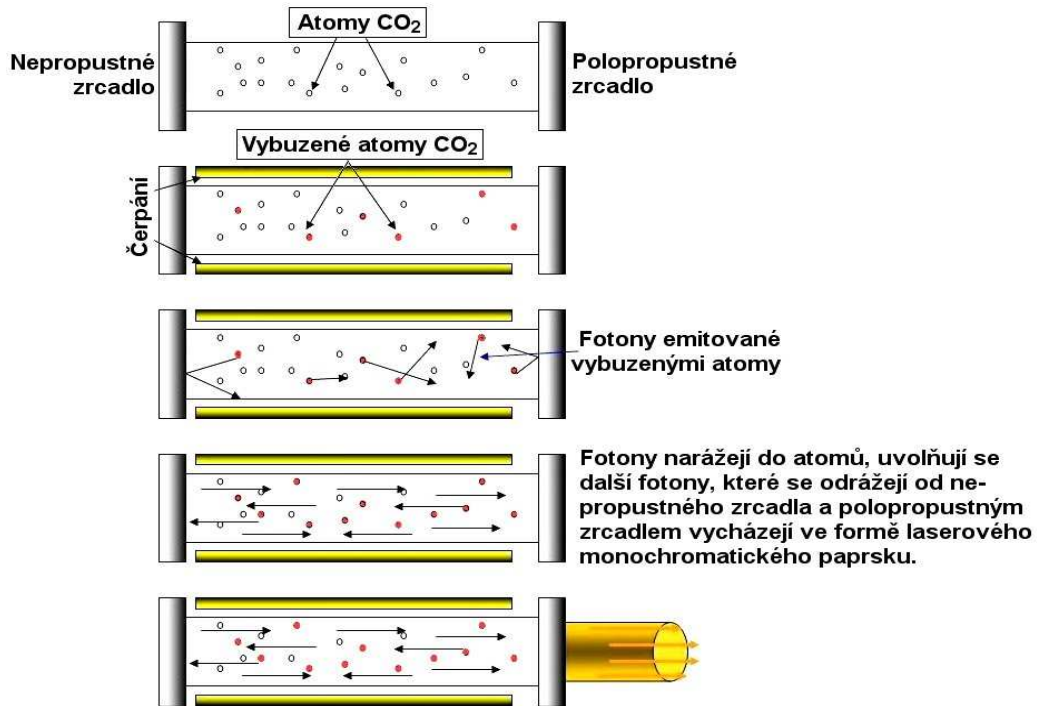
Při popisu principu laseru se setkáváme s těmito třemi základními pojmy:

- a) **Inverze populace:** Situace, při kterém je na vzbuzené hladině více elektronů než na hladině základní. Toto se může docílit vhodným čerpáním aktivní látky. Toto čerpání může být optické (výbojka nebo dioda), elektrické (výboj nebo proud procházející p-n přechodem), chemické (chemické reakce vytvářející vhodné molekuly nebo ionty), čerpání jadernými reakcemi aj.

- b) **Aktivní prostředí:** Látka, ve které se elektrony nebo molekuly dají vhodným čerpáním vzbudit na požadovanou pracovní hladinu, ze které pak mohou emitovat záření. Pracovní látkou může být plyn (He:Ne laser, oxid uhličitý), kapalina (Rhodamin-barvivo), krystal (rubín, Nd:YAG, Er:YAG), polovodič (GaAs, GaAsN), molekuly (XeCl, XeF) nebo plazma (C^{5+}).
- c) **Otevřený rezonátor:** Dutina, do které se vkládá aktivní látka a která zajišťuje jev zpětné vazby. Většinou je tvořena dvěma zrcadly, ze kterých je jedno polopropustné a druhé odrazné. V podstatě jde o to, že emitovaná vlna z aktivní látky se odráží nazpět a při zpětném přechodu vzbuzuje další a další vynucené emise fotonů. [2]

Laser je tedy kvantový elektronický zesilovač a generátor světelného svazku, který je charakterizován těmito základními vlastnostmi:

- je vysoce monochromatický - světlo v laserovém paprsku má prakticky pouze jednu vlnovou délku
- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence, v prostorově koherentním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku, v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku
- má minimální divergenci (rozbíhavost)
- má modální strukturu (v příčném průřezu vytváří paprsek buď jednoduchou stopu, nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické(Obr.3)). [2]



Obr. 2. Schematický princip laseru [2]

2.1.1 Modulace laserové paprsku

Důležitou roli zejména pro obrábění laserovým paprskem hraje také tvar průřezu svazku záření je významně závislý nejen na vlnové délce fotonů, ale též na sousostí, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice. Tvar průřezu svazku, neboli mód, je označován TEM (Transverse electromagnetic). Teoreticky může být vytvořeno nekonečné množství módů, ale jen některé mají praktické průmyslové uplatnění. V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu – základní mód – anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód – v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru.

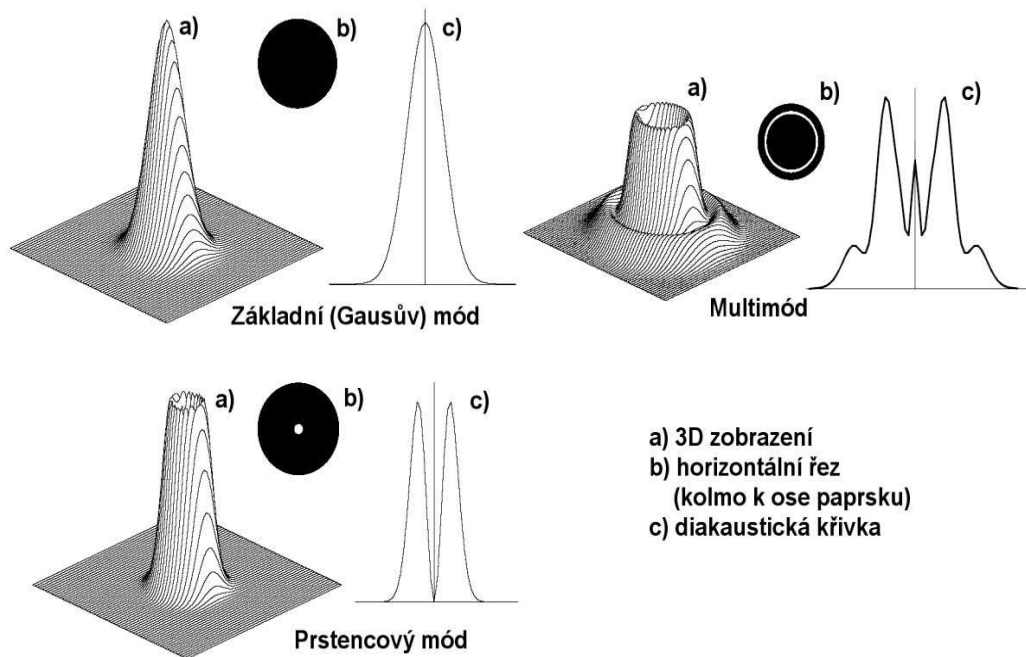
Označování jednotlivých módů :

$$\text{TEM}_{m,n}$$

m - počet minim intenzity ve směru poloměru příčného řezu svazku

n – polovina počtu minim intenzity po obvodě příčného řezu svazku

- Základní mód $TEM_{0,0}$ - má rozložení energie svazku tvar Gaussovy křivky četnosti s jedním maximem uprostřed svazku, který je dokonale souosý, má nejmenší divergenci a vytváří stopu velmi malého průměru a vysoké hustoty výkonu
- mód $TEM_{0,1}$ - má průřez ve tvaru mezikruží s energií soustředěnou po obvodu fokusovaného svazku.



Obr. 3. Modální struktura paprsku [2]

2.2 Rozdělení laserů

Rozdělení laserů můžeme provádět podle následujících kritérií:

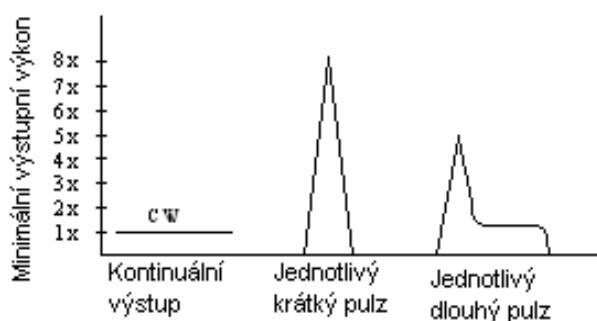
- podle režimu paprsku
- podle skupenství aktivního prostředí
- podle způsobu čerpání (buzení)
- podle použití
- podle vlnové délky generovaného laserového paprsku

2.2.1 Rozdělení laserů podle režimu paprsku

Podle režimu generace na kontinuální a pulsní. Pulsní provoz umožňuje:

- využití vysoké hustoty pulsu pro zvýšení absorpce záření v materiálu s vysokou odrazivostí,
- snížení objemového ohřevu materiálu při jeho zpracování laserem v důsledku krátké doby interakce laserového svazku s materiálem,
- provedení řady vysokorychlostních operací v důsledku schopnosti rychlého zažhání a zhasínání svazku.

Ve srovnání s kontinuálním režimem, kdy výstupní výkon je ekvivalentní celkovému jmenovitému výkonu daného typu laseru, při pulsním režimu je laser elektronicky modulován k emisi pulsu o výkonu několikanásobně vyšším než při kontinuálním režimu. Schematicky je toto srovnání patrné na (obr.4) [2]



Obr. 4. Kontinuální a pulsní režim provozu laseru [2]

Ve srovnání s kontinuálním režimem, kdy výstupní výkon je ekvivalentem celkovému jmenovitému výkonu daného typu laseru, při pulsním režimu je laser elektronicky modulován k emisi pulsu o několikanásobně vyšším výkonu než při kontinuálním režimu.

Při vysoké opakovací frekvenci pulsů je hustota výkonu pulsu nejnižší. To je výhodné pro řezání tenkých listů papíru nebo plastů a pro popisování, kde se vyžaduje vysoká vzájemná rychlost pohybu materiálu a laserového svazku. Naopak při nižších opakovacích frekvencích je možné dosáhnout nejvyšší hustoty výkonu pulsu. To je výhodné pro pulsní vrtání, bodové svařování a řezání materiálu a popisování keramiky. Při nízké opakovací

frekvenci pulsů se vysoká hustota výkonu laserového svazku soustřeďuje do tak malé oblasti materiálu, že objemový ohřev materiálu se snižuje na minimum.

Existují tři hlavní typy pulsních režimů:

- a) „normální“, s volnou generací pulsů, kdy puls je volně vázán na průběhu pulsu čerpací výbojky. V tomto režimu se dosahují poměrně dlouhé pulsy s vysokým špičkovým výkonem a malou opakovací frekvencí (do 100 Hz).
- b) s modulací jakosti rezonátoru, kdy provoz probíhá kontinuálně a pulsy se získávají periodickou změnou vlastností rezonátoru, nejčastěji jeho optické propustnosti. Tyto lasery pracují s pulsy o délce 100 ns při opakovací frekvenci až 100 kHz.
- c) s vázaným modem, který vede k formování velmi krátkých pulsů s vysokou opakovací frekvencí, až stovek MHz. [2]

2.2.2 Dělení podle skupenství aktivního prostředí

Jako laserové aktivní prostředí mohou sloužit rozličné materiály v různých skupenstích stavech. Vlastnosti materiálů aktivního prostředí se proto od sebe velmi výrazně liší a je výhodné sledovat odděleně lasery s aktivním prostředím z látek pevných, kapalných a plyných.

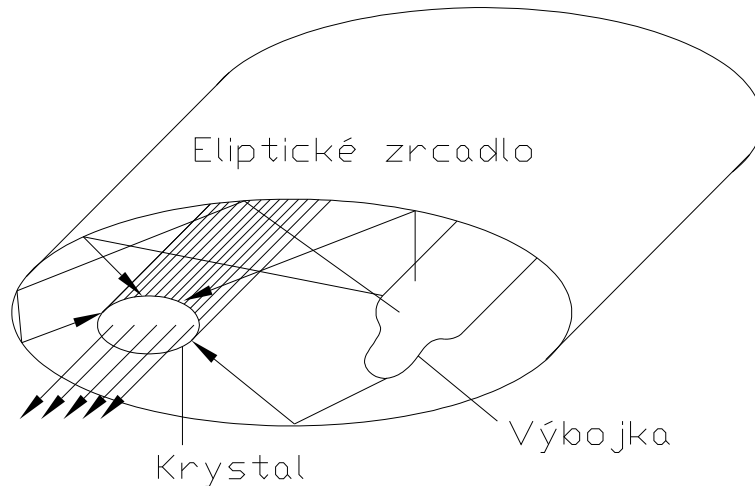
2.2.2.1 Pevnolátkové lasery

Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické, případně amorfní látky dopované příměsí vhodných iontů. Pevná fáze v těchto případech tvoří vlastně jen nosný skelet aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. U pevnolátkových laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje vyvolává změna v obsazení energetických hladin. [20]

2.2.2.1.1 Rubínový laser

Je to první skutečně fungující laser, sestrojený v roce 1960 americkým vědcem Theodorem H. Maimanem. Jeho konstrukce dovoluje názorně vysvětlit celou řadu pojmů a principů, které jsou v různých modifikacích využívány ve všech, i nejmodernějších konstrukcích laserů včetně polovodičových. Aktivní prostředí rubínového laseru je tvořeno krystalem syntetického rubínu (Al_2O_3), v němž jsou rovnoměrně rozptýleny trojmocné ionty chrómu Cr^{3+} v koncentraci asi 0,05 %. Osvětlí-li se krystal dostatečně intenzivním impulsem světla vhodné vlnové délky, např. z xenonové výbojky (doba trvání impulsu řádu desetin milisekundy), dojde k excitaci iontů chrómu. Jsou-li splněny některé další podmínky, vznikne uvnitř krystalu laserové aktivní prostředí, schopné stimulovanou emisí zesílit vstupní světelný paprsek. Jestliže si uvědomíme, že v laserovém aktivním prostředí probíhá současně kromě stimulované též spontánní emise fotonů dojdeme k závěru, že funkci vstupních fotonů by mohly zastávat fotony spontánně emitované v tomto prostředí, pokud bychom je vhodně umístěnou zrcadlovou plochou odrazili z výstupu zpět do prostoru, v němž k emisi dochází. Odražené fotony při své cestě od výstupní strany krystalu zpět ke vstupní vyvolají stimulovanou emisi fotonů z dalších excitovaných kvantových soustav, ty opět z dalších atd. Pokud také druhá z čelních stěn krystalu bude opatřena zrcadlem, dojde k novému odrazu již zesíleného světla zpět do prostoru krystalu. Při cestě paprsku od vstupní stěny krystalu k výstupní jsou uvolňovány další fotony. Po dosažení výstupní stěny dojde k novému odrazu světla atd.

Rubínový laser pracuje obvykle v impulsním režimu. Délka budícího impulsu je několik desetin milisekundy, až jedna milisekunda. Doba trvání výstupního impulsu by měla být co možná nejkratší, aby se dosáhlo co největší časové koncentrace energie, tj. co největší hustoty zářivého toku. Bez zvláštní konstrukční úpravy laseru trvá výstupní impuls přibližně jednu milisekundu a sestává z několika kratších impulsů. Aby se dosáhlo co možná nejkratšího impulsu, musí se laser poměrně složitě konstrukčně upravit, ale poté lze dosáhnout impulsu o době trvání řádově 10^{-9} až 10^{-12} sekundy. Záření má tak obrovskou hustotu, že odpovídá okamžitému výkonu řádu 109 wattů. Střední hodnota výkonu rubínových laserů je však malá, řádu desítek miliwattů. Celková účinnost je pouze několik procent. Při kontinuálním provozu je nutné účinné chlazení celého zařízení. Schéma rubínového laseru můžeme vidět na (Obr.5) [2,12,20]



Obr. 5. Schéma laseru s rubínovým monokrystalem [12]

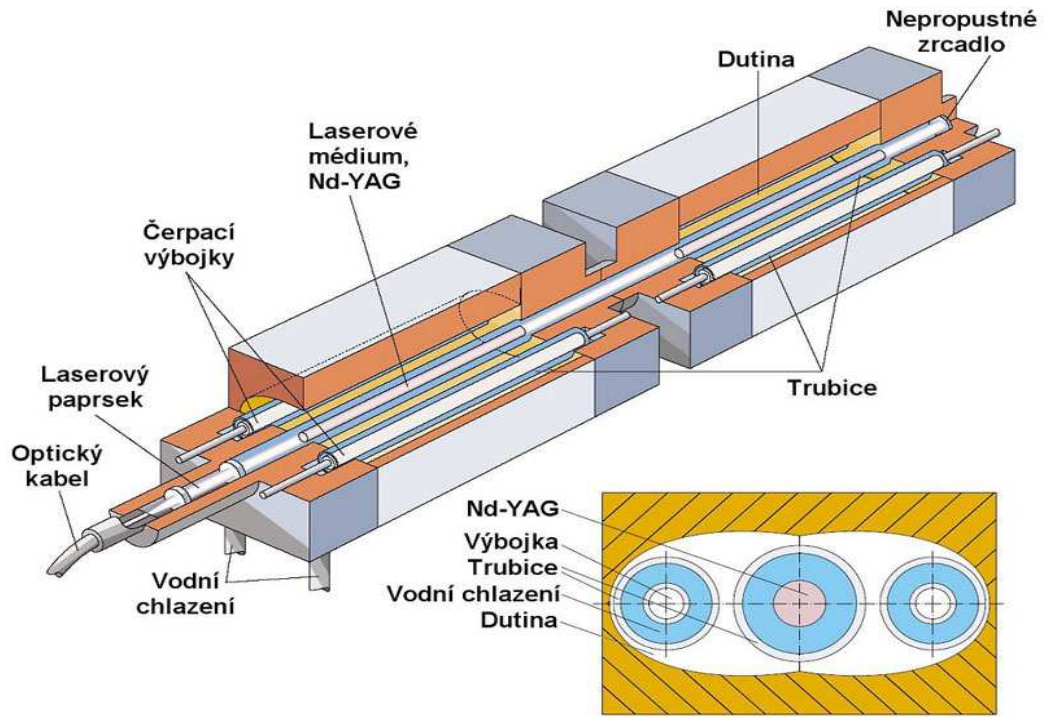
2.2.2.1.2 Neodymový laser

Neodym je vedle chromu další nejpoužívanější aktivní prvek v laserech s pevnou fází. Pro své výhodné krystalografické a chemické vlastnosti byl ze všech prvků vyzkoušen snad v největším počtu nosných prostředí. Přestože neodymový laser je schopen pracovat na řadě infračervených vlnových délek, ležících blízko sebe, využívá se intenzivní vlnové délky $1,06 \mu\text{m}$. Výhodou neodymového laseru je funkční čtyřhladinový mechanismus, a tedy nízká prahová energie pro dosažení funkce laseru.

Yttrito-hlinitý granát (YAG) tvoří nosné prostředí pro neodymové ionty Nd^{3+} . Krystal Nd:YAG má relativně nízký práh buzení, tj. budící výkon, při němž laser začíná generovat. Laser Nd-YAG, jehož znázornění můžeme vidět na (Obr.6), může poskytnout kontinuální výkony záření převyšující 1 kW. Převážná část energie výbojky se však transformuje na teplo, které je nutno odvádět, nemá-li dojít k přehřátí krystalu i výbojky.

Aktivní prostředí může tvořit také amorfni materiál - sklo, v němž jsou rozptýleny ionty Nd^{3+} . Předností tohoto materiálu je mnohem snazší výroba oproti technologii výroby monokrystalů. Navíc s ohledem na dobrou optickou homogenitu skel bývá účinnost laserů s aktivním prostředím ze skelných materiálů větší než účinnost laserů s krystaly. Jejich nevýhodou je však malá tepelná vodivost skel. Lasery z dopovaných skel se proto nehodí pro generaci impulsů s vysokou opakovací frekvencí nebo pro kontinuální režim. [20]

K absorpci a emisi prostředí z neodymového skla dochází v prakticky stejném spektrálním oboru jako YAG laseru. Přechod od krystalického k amorfniému prostředí se projeví jen větším rozšířením absorpčních a emisních čar.



Obr. 6. Schéma pevnolátkového laseru s Nd-YAG krystalem [2]

2.2.2.2 Plynové lasery

Zatímco lasery s pevnou fází pracují především v pulsním provozu, využívá se plynových laserů zejména jako zdrojů kontinuálního stimulovaného záření v daleko širším spektrálním oboru a na relativně mnohem větším počtu vlnových délek. Zdrojem budící energie je stejnosměrný, vysokofrekvenční nebo mikrovlnný generátor, který slouží k zapálení elektrického výboje v trubici naplněné plynem. Mnohdy se používá též pulsní nebo kontinuální výbojky, jejíž energie je soustředěna pomocí odrazné čerpací dutiny do aktivního prostředí, jako u laserů s pevnou fází.

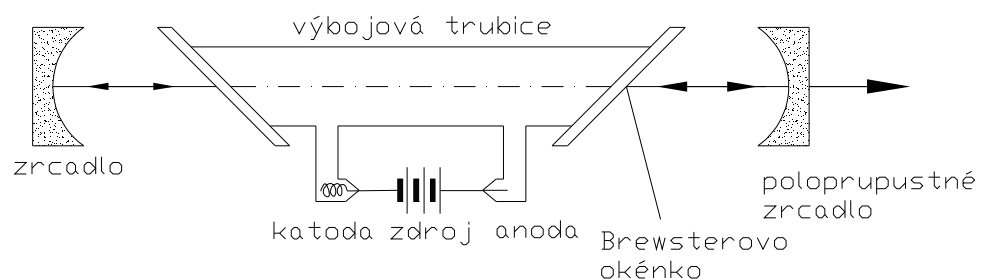
Úlohu aktivního prostředí u plynových laserů hrají atomy plynu uzavřené ve směsi s dalšími vhodnými plyny ve skleněné trubici. Vzniká zde určitá potíž s nastavováním zrcadel. Pokryjeme-li odrazovou vrstvou přímo konce trubice, vzniknou problémy jak zrcadla přesně nastavovat a vyloučit vnitřní odrazy. Pomohl zde jiný fyzikální jev. Dopadá-li

světlo na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, potom je-li polarizováno kolmo k rovině dopadu, prochází rozhraním bez odrazu. Zkosíme –li tedy konce trubice pod tímto úhlem, bude (polarizovaný) laserový paprsek vycházet z trubice, aniž by se na koncích odrazil a rezonátor můžeme vytvořit soustavou vnějších nastavitelných zrcadel. [20]

2.2.2.2.1 Helium-neonový laser

Tento typ laseru je jedním z nejpoužívanějších kontinuálních zdrojů stimulovaného záření. První typ tohoto laseru byl sestaven v roce 1961 v laboratořích firmy Bell Telephone (USA). Současné typy laserů, jejichž schéma vidíme na (Obr.7), se od sebe liší výstupním výkonem, spektrem záření, rozměry atd. Lze je rozdělit na tyto skupiny:

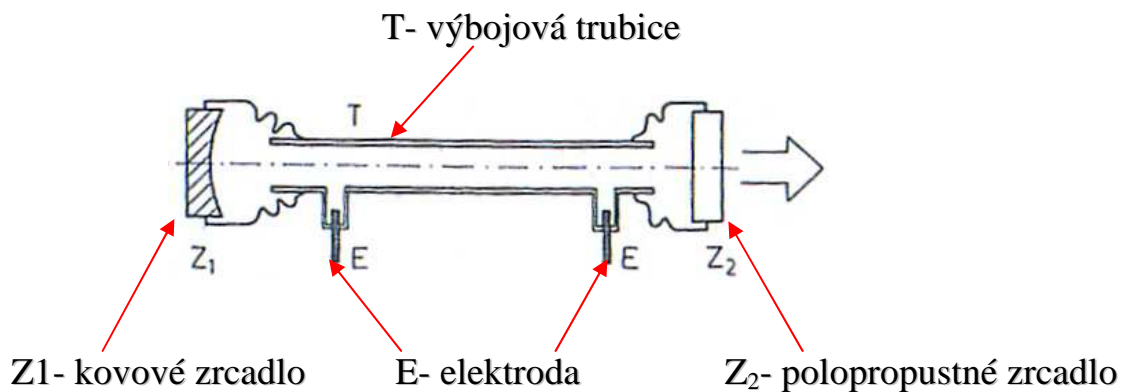
- lasery s malým výkonem (0,1 až 2 mW), pracují většinou na vlnové délce 0,633 μm
- lasery se středním výkonem (2,5 až 15 mW), které pracují na vlnových délkách 0,63 a 1,15 μm
- lasery s větším výkonem (20 až 60 mW). Mohou pracovat na vlnových délkách 0,63 ; 1,15 a 3,39 μm [12]



Obr. 7. Schéma laseru He-Ne [12]

2.2.2.2.2 CO₂ lasery

Nejvýkonnějšími z plynových laserů se staly lasery s oxidem uhličitým (CO₂ laser). Laser s oxidem uhličitým generuje infračervené záření na vlně 10,6 mikrometru, tedy právě uprostřed atmosférického okna. Vzhledem k velikosti trubice může podávat vysoké výkony (až 100 Kw). CO₂ laser je nejtypičtějším představitelem molekulárních laserů. Při vybuzení čistého CO₂ dostává každá úroveň podíl elektronů, ale nižší stavy dostávají většinu, takže populační inverze nenastává. Proto se aktivní prostředí CO₂ laseru skládá ze směsi plynů CO₂ + N₂ + He. Aktivními molekulami jsou molekuly oxidu uhličitého. Elektrický výboj se zapaluje ve směsi plynů CO₂, N₂ a He. V klasickém konstrukčním uspořádání, jenž vidíme na (Obr.8), bývá základem CO₂ laseru výbojová trubice T s vnitřním průměrem několika centimetrů naplněná směsí plynů CO₂:N₂:He v poměru 1:2:8 při tlaku několika kPa. Jejich většímu rozšíření brání jedovatost CO₂. Nejdůležitější faktor, ovlivňující výstupní výkon je rychlost odvádění tepla z trubice. Výměnu tepla s okolím zajišťuje helium srážkami s trubicí. Je možné chladit trubicí vzduchem, ale vede to ke snížení účinnosti laseru. Předností těchto laserů je možnost získání vysoce monochromatického světla. [2,12]

Obr. 8. Schéma klasického konstrukčního provedení CO₂ laseru [12]

V dnešní době se používají čtyři hlavní uspořádání CO₂ laserů, které se liší zejména možnostmi dosahovaných výkonů:

- a) lasery s výbojkou – mají malé rozměry, výkon je asi do 100 W, výbojka má průměr asi 20 mm a délku do 200 mm, většinou mají vodní chlazení, vlivem rozpadu CO₂ na CO mají malou životnost (asi 10000 h),
- b) lasery s pomalým průtokem plynu – průtok aktivního plynu znamená na jedné straně více odvádět teplo a dosahovat vyšších výkonů, ale na druhé straně znamená složitější konstrukci. Rychlost plynu je kolem 1 m.s⁻¹, výkon je asi 50-70 W/m (na délku laseru),
- c) lasery s rychlým průtokem plynu – dovolují ještě intenzivnější odvod tepla a dosahují tak 3 – 4 krát vyššího výkonu než-li lasery s pomalým průtokem plynu, neobejdou se již bez výměníku tepla, místo vývěvy se používá kompresor,
- d) TEA CO₂ laser (z anglického názvu „Transversal Excitation at Atmospheric Pressure“, což znamená: příčná excitace při atmosférickém tlaku) – výhodou je, že nevyžadují náročnou evakuační techniku, doutnavý výboj je možné uskutečnit pouze při nižších tlacích.

Typické parametry současných CO₂ laserů:

- vlnová délky: 10,6 μm nebo 9,6 μm
- opakovací frekvence: 0,1 až 50 Hz
- délka pulsu: 100 ps až 1 ms
- energie impulsu: 10⁻⁷ J až 250 kJ
- účinnost: 20 – 40 %
- střední výkon: 10⁻⁴ – 10⁵ W

Pro obrábění plastů jsou pak optimální CO₂ lasery s kontinuálním provozem s výkonem do 2,5 kW.

2.2.2.2.3 Dusíkový laser

Dusíkový laser je nejjednodušší laser buzený výbojem, objevený C. G. Heardem v roce 1964. Jako laserové aktivní prostředí zde slouží molekulární dusík, ale ke generaci postačí i vzduch, který obsahuje kolem 80 % dusíku.

Tyto lasery mají úplně shodné principy jako lasery pevnolátkové s tím rozdílem, že zde není přítomna budící dutina, ani vnější výbojka. Proto jsou tyto lasery také o mnoho levnější, spolehlivější, a výkonnější. Ale i přes všechny tyto klady je tu jeden, který vítězí nad všemi, a to ten fakt, že tyto lasery mohou pracovat v kontinuálním režimu.

Molekula N_2 může být využita ke generaci záření na několika přechodech. Doba života horní hladina je však velmi krátká (kolem 50 ns), zatímco dolní asi 500 krát větší. V důsledku toho nelze použít pomalu se tvořícího doutnavého výboje k dosažení inverzní populace mezi hladinami. Zesílení v dusíkovém laseru je veliké, 60 dB/m, což znamená, že záření je na dráze 1 m zesíleno více než 100 000 krát. Při tak velikém zesílení může laser pracovat superradiačně, tzn., že jediný průchod aktivním prostředím postačí k tomu, aby stimulovaná emise mnohonásobně převýšila spontánní emisi. [20]

2.2.2.3 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou z převážné části roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Aktivním prostředím jsou ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jakými jsou např. voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen, benzen, aceton, cyklohexan, glycerin a další. Nejznámějším a prakticky nejdůležitějším aktivním prostředím barvivových laserů je Rhodamin 6G. Patří ke skupině xanthenových barviv. Významnou charakteristikou barvivových laserů je šířka čáry generované vzhledem k šířce čáry luminiscenční. Tak jako u pevnolátkových laserů i barvivové lasery mají šířku absorpční a luminiscenční čáry v okolí 0,1 μm . Šířka generované laserové čáry ovšem může být až řádu 10-4 μm nebo menší. Generovaná vlnová délka může být tedy měněna spojitě uvnitř hranic daných šířkou lumini-

cenční čáry. Lasery, u kterých generovaná vlnová délka může být plynule měněna, nazýváme lasery přeladitelnými.

Pro buzení barvivových laserů se užívá optického záření. Optické buzení těchto laserů je nekoherentní nebo koherentní, pulsní nebo kontinuální a příčné nebo podélné. Při koherentním buzení je barvivové aktivní prostředí ozařováno zářením pomocného laseru na kmitočtu odpovídajícím absorpčnímu pásmu daného barviva. Účinnost barvivových laserů buzených koherentně zářením pomocného laseru dosahuje řádu desítek procent. Při nekoherentním čerpání se pro buzení barvivových laserů užívá podobného uspořádání jako u pevnolátkových laserů. Účinnost nekoherentně čerpaných barvivových laserů dosahuje maximálně 10%. [20]

2.2.2.4 Polovodičové lasery

Funkce polovodičového laseru je založena na vzniku stimulované emise záření v aktivním polovodičovém materiálu při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu a na existenci zářivé rekombinace nosičů náboje (elektronů a děr). Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. V polovodičovém aktivním prostředí je možno dosáhnout velkého optického zesílení (až 10^4 cm^{-1}). Vzhledem k tomu jsou rozměry aktivního elementu polovodičového laseru mnohem menší než u ostatních laserů (délka rezonátoru je cca 50 μm až 1 mm). Inverze populace se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje přechodem P-N (injekční laser), obecně lze však použít i jiných prostředků buzení, jako např. optického, elektronového svazku, lavinového jevu v polovodičích. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50%), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek od $\lambda = 0,3 \mu\text{m}$ až po $\lambda = 30 \mu\text{m}$. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Chlazení je jedním z vážných problémů polovodičových laserů. Velká rozbíhavost a vějířovitý svazek je charakteristický pro všechny polovodičové lasery a je spolu s velkou teplotní závislostí hlavní nevýhodou polovodičových laserů.

Polovodičový laser buzený svazkem elektronů – aktivní prostředí je tvořeno vlastním polovodičem. Laser může být buzen fotony. Mnohem častěji je místo fotonů užito k buzení svazku elektronů. Rychlé elektrony procházejí polovodičovým vzorkem a iniciují přechody z pásu valenčního do pásu vodivostního. Mezi takto buzené aktivní materiály patří galium arsenidový (GaAs) polovodičový laser, kadmium sulfidový (CdS) a kadmium selenidový (CdSe) polovodičový laser. Teplotní závislost je natolik velká, že tyto polovodičové lasery generují záření pouze při nízkých teplotách. [20]

2.2.2.5 *Excimerové lasery*

Tato skupina laserů využívá jako aktivního prostředí zvláštního druhu molekul, excimerů, vytvářených za účasti atomů vzácných plynů. Tyto molekuly, jinak nestabilní, mohou existovat jen za zvláštních podmínek, například v plynovém výboji, s atomy ve vysoce vybuzených, excitovaných stavech. Při rozpadu těchto exotických molekul vzniká ultrafialové záření. První excimerový laser byl realizován v roce 1970. Šlo o laser s kapalným xenonem buzený elektronovým svazkem. V roce 1976 se pak objevily plynové excimerové lasery s excimery XeF, KrF, ArF, tedy molekulami tvořenými atomy vzácných plynů a fluoru.

Aktivní prostředí je buzeno elektrickým výbojem. Hlavním důvodem použití těchto laserů je velmi krátká vlnová délka (157 nm, 193 nm, 248 nm) umožňující vysoce přesné obrábění. Energie pulzu těchto laserů dosahuje desetin až desítek joulů, výkon bývá maximálně stovky wattů, rozmezí pulzu 10-040 ns. Účinnost těchto laserových systémů se pohybuje kolem 10 %. Náklady na milion pulzů jsou asi 25 euro a elektrody je nutné měnit po několika stovkách pracovních hodin.

Tyto lasery našly široké uplatnění ve fotolitografii a jiných metodách mikroobrábění. Hlavní nevýhodou je složitá údržba, velmi nákladný provoz a rovněž značně vysoká pořizovací cena. [2]

2.2.3 **Rozdělení podle způsobu čerpání**

Aby elektrony v atomech aktivního prostředí (což může být pevná látka, plyn, kapalina) přešly na vyšší energetickou hladinu, je třeba dodat jim energii – vybudit je. Podle odlišných způsobů buzení rozlišujeme lasery na :

- opticky čerpané
- čerpané elektrickým výbojem
- chemickou reakcí
- elektronovým svazkem
- radioaktivním zářením

2.2.4 Rozdělení laserů podle vlnové délky generovaného laserového paprsku

Aktivní látka, která generuje záření, určuje spektrum laseru. V důsledku struktury energetických hladin, mezi nimiž dochází k přechodům, může být spektrum čárové s pevně danými vlnovými délkami na nichž laser září nebo může být v určitém rozsahu nastavitelné. Podle tohoto kritéria tedy dělíme lasery dále pak na :

- infračervené
- viditelné
- ultrafialové
- rentgenové

2.3 Klasifikace procesu mikroobrábění

Mikroobrábění patří do skupiny procesů výroby součástí malých rozměrů. Výrobní požadavky směřují k neustálé minimalizaci rozměrů výrobků. V tomto směru je laser díky svým vlastnostem optimální nástroj. Obvykle jsou pro technologii mikroobrábění používány UV-lasery a některé pevnolátkové lasery. Proces ablace (neboli odstraňování) materiálu je složitá kombinace procesu fotochemického a fototermického. Při dopadu záření dochází jednak k porušení chemických vazeb absorpcí kvant energie a jednak porušením vazeb termicky (zvýšením teploty). Rozměry a tvary jakékoliv laserem obrobené struktury závisí na optice a mechanice laserového zařízení a také na vlastnostech obráběného polymeru. Nejdůležitějšími parametry jsou „f-číslo“ (poměr hloubky ohniska a ohniskové vzdálenosti f-theta objektivu) a vlnová délka laseru. Čím je vlnová délka laseru nižší a čím má obrábě-

ný polymer nižší tepelnou vodivost, tím lépe je obráběn. Pro konkrétní aplikace jsou pak důležité parametry jako výkon laseru, posuv a počet přejezdů paprsku ve stejné drážce. [2]

UV-lasery pracují ponejvíce v pulsním režimu a vytváří pulzy v trvání několik nanosekund. Vlivem malé vlnové délky a fotochemické ablace je dosaženo menších rozměrů a přesnějších tvarů obráběných struktur. Pokud dojde k fototermické ablaci, tak je jí ovlivněn jenom velice malý objem materiálu díky nanosekundovým pulsům. Nicméně tyto pulsy způsobují nerovnoměrné odebrání materiálu a také jsou UV-lasery poměrně drahá zařízení.



Obr. 9. Princip laserového mikroobrábění [2]

Obyčejně se mikroobrábění používá na:

- opracování elektronických součástek,
- na označování dílů výrobními čísly. Označování laserem je vhodný nástroj v systému kontroly kvality např. v automobilovém průmyslu, na automatické čtení výrobních značek.
- na opravu a renovaci zbytkových defektů na masce pro integrované obvody přímým ozářením a následným odstraněním defektu pomocí pulsního laseru, který je fokusovaný do kolmého tvaru [2]

2.4 Využití laseru v technologii

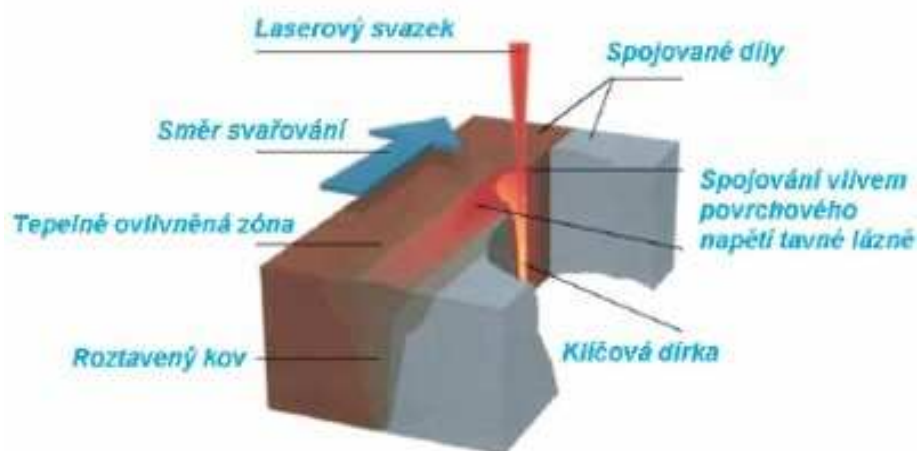
2.4.1 Laserové svařování

Laserové svařování je efektivní metodou spojování kovových konstrukčních materiálů. Laserové svařování se vyznačuje vysokými svařovacími rychlostmi, minimálními deformacemi spojovaných dílů a velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí. Umožňuje řešit řadu svařovacích operací s možností automatizace a robotizace. Jednou z mála nevýhod jsou zatím vysoké investiční náklady spojené s instalací laserového systému, které tuto technologii předurčují pro sériovou výrobu. Pulzní YAG lasery s malým výkonem jsou používány pro vytváření svarů malých rozměrů a pro spojování dílů s extrémní přesností (mikrosvařování). YAG lasery s vysokým výkonem vystupují jako konkurent pro ostatní svářecí postupy s potřebou vysokých rychlostí svařování, hlubokých závarů, malých deformací a podobně. Dalším typem svařovacích průmyslových laserů, využívaným dnes takřka masově také pro tepelné dělení materiálů, jsou CO₂ lasery. Ty, pracující na vlnové délce 10,6 μm, obecně zahrnují relativně široké rozmezí výkonů – řádově do 45 kW. Běžné průmyslové výkony CO₂ se pohybují od 6 do 8 kW, v některých případech 12 kW. Existují tři základní, v praxi používané konstrukční typy:

- s rychlým axiálním prouděním aktivního prostředí,
- s příčným prouděním aktivního prostředí (TEA),
- SLAB lasery s deskovým aktivním prostředím.

Aktivní prostředí je ve všech těchto případech tvořeno třemi základními komponenty: oxidem uhličitým, dusíkem a heliem a případně dalšími složkami. Vzhledem k plynné formě aktivního prostředí a možnosti jeho kontinuální obměny při činnosti laseru lze i při velmi nízké účinnosti CO₂ laserů (10 %) dosáhnout velkých výkonů snáze než u pevnolátkového aktivního prostředí. Svazek nelze vzhledem k vlnové délce transportovat optickým vláknem, využívá se odrazných zrcadel. Další vývoj v oblasti laserových zdrojů směřuje k polovodičovým laserům, které vykazují vyšší účinnost, vhodné vlnové délky, ale velmi špatnou kvalitu svazku, která neumožňuje dosahovat vysokých hustot energie. To polovo-

dičové lasery předurčuje k zpracovávání materiálů s nízkou teplotou tavení (plasty) a tam, kde není nutný hluboký průvar, ale naopak široká stopa dopadu (navařování). [4]



Obr. 10. Princip laserového svařování [4]

Vytváření svarových spojů :

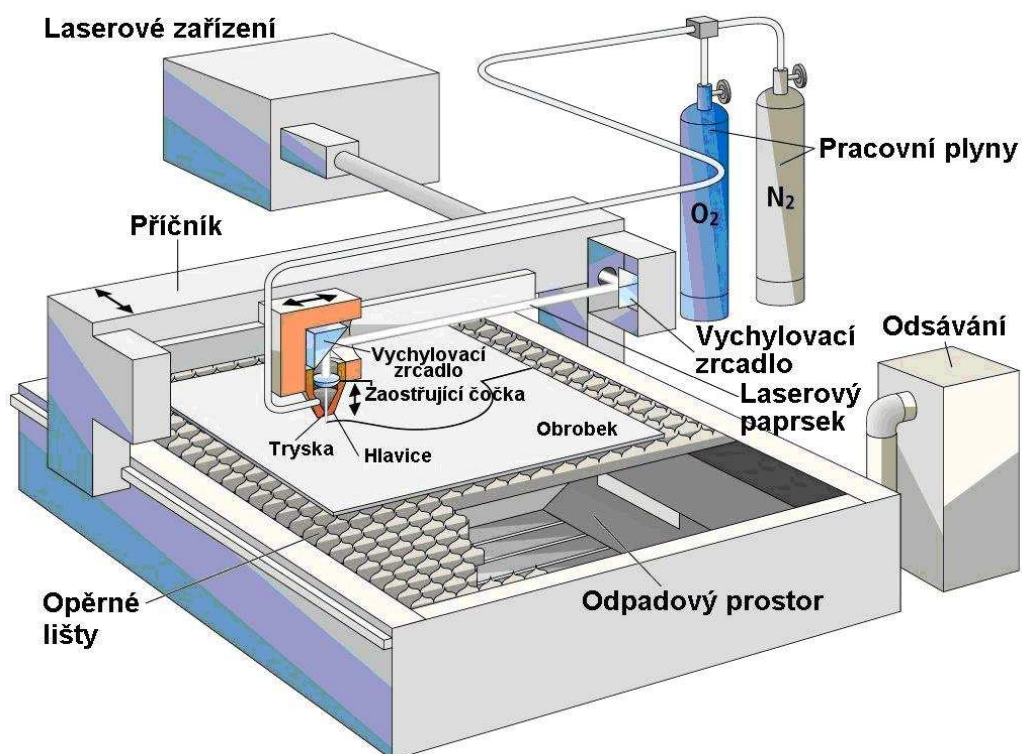
- a) pulzním svařováním s nízkou opakovací frekvencí, přičemž mezi jednotlivými pulzy ztuhne (úplně nebo částečně) svarová lázeň. Svarovou housenku pak tvoří mnoho za sebou jdoucích a vzájemně se překrývajících bodů. Tak se vytváří svarové spoje zejména na menších tloušťkách materiálu, v malosériové a kusové výrobě, při spojování obtížně svařitelných materiálů a tam, kde nelze kvůli konstrukčnímu uspořádání svařovaných dílů efektivně použít jinou metodu.
- b) druhá možnost je založena na využití vysoké hustoty výkonu v dopadové ploše pro vznik tzv. klíčové dírky. Jde o kapiláru naplněnou ionizovanými kovovými výparů o vysoké teplotě (Obr.10). Stěny kapiláry tvoří roztavený kov. Kapilára hraje důležitou úlohu, neboť umožňuje přenášet energii přímo dovnitř materiálu podél svarových ploch. Jamka je přesouvána mezi díly určenými ke spojení rychlostí svařování. Při posuvu svazku ve směru svařování dochází vlivem povrchového napětí roztaveného kovu k opětovnému spojení svarového kovu za „klíčovou dírkou“. Tento efekt umožňuje svařování tupých svarů různých tloušťek bez úpravy svarových ploch, bez přídavného materiálu a na jeden průchod – a to s plným, nebo částečným průvarem. [4,13]

2.4.2 Laserové vrtání

Laserové vrtání je založeno na odstraňování materiálu jeho odpařováním. Teplo potřebné pro toto odpařování dodává zfokusovaný laserový paprsek o velké hustotě výkonu. Po jeho dopadu na materiál vzniká na jeho povrchu kráter, který se dále prohlubuje krátkými mikroexplozemi doprovázenými odpařováním přehřátého materiálu. Intenzita záření optického svazku pro laserové vrtání musí být vyšší než pro jiné aplikace, a proto se pro tento účel používá impulsních laserů s délkou impulsu menší než 2 ms. První laserové vrtání bylo provedeno již v roce 1965, kdy byl rubínový laser použit pro vrtání otvorů v diamantových průvlacích pro tažení drátů. V současné době se pro laserové vrtání využívá dalších pevnolátkových iontových laserů, jako Nd:YAG laser a laser s neodymovým sklem. Výhodou laserového vrtání je možnost vytváření velmi přesných malých otvorů o průměru od 10 μm do 100 μm i v místech, kde to je pomocí jiných metod obtížné či nemožné. Otvory je možno vrtat i do nekovových materiálů, např. do rubínových ložisek. V průmyslu se pro vrtání děr používají především Nd:YAG lasery o výstupním výkonu 100 až 500 W. Nd:YAG lasery se používají pro vrtání děr o menším průměru, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025 mm. Pro vrtání děr do keramiky se používají lasery excimerové. [13,20]

2.4.3 Laserové řezání

Tato technologie se využívá v případě, kdy je nutné oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Při laserovém řezání je snahou odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Nejpoužívanějšími lasery v tomto oboru jsou opět kontinuální CO_2 lasery se středním výkonem do 15 kW. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny, jako např. kyslík. Dochází pak k exotermické reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a nerezové oceli. Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a dřevo, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo. Výhodou laserového řezání je velká rychlost, řezání různých tvarů, možnost automatizace, bezkontaktní působení, dobrá kvalita řezu a malá zóna tepelného působení. [13, 20]



Obr. 11. Schéma laserového řezacího přístroje [2]

2.4.4 Dekorace skla laserem

Dekorace skla laserem je jistou modifikací laserového řezání. V místě dopadu zfokusovaného laserového záření na povrch skla dojde k částečnému odpaření skloviny a k jejímu povrchovému popraskání. Na vzniklých trhlinách dochází k rozptylu světla a tím se docílí zářivého vzhledu dekoru. Pro dekoraci skla se využívá laserů, jejichž záření je sklem dobře absorbováno, např. kontinuálního CO₂ laseru. Novinkou v dekoraci skla laserem je prostorový popis do skla. Laser vytváří ve skle vysoce efektní trojrozměrné objekty pulsním Nd:YAG laserem o výkonu v pulsu až 1 MW. Předlohy se navrhují pomocí modelovacího 3D programu. Ukázkou prostorového popisu vidíme na (Obr.12) [20]



Obr. 12. Prostorový popis skla laserem

2.4.5 Laserové značkování a gravírování

Laser na povrchu materiálu s vysokou přesností vytváří stálý, mechanicky odolný a velmi kontrastní popis. Laserové značení je založeno na místním odpaření materiálu na povrchu daného předmětu. Laserový svazek v tomto případě prochází maskou, ve které jsou vyříznuty znaky (písmena, číslice). Při dopadu záření na povrch materiálu vzniká na povrchové vrstvě obrazec daný předlohou. Další možností je pohyb svazku laserového záření po povrchu značkováného materiálu nebo pohyb značkováného předmětu. Znaky sloužící k identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové, keramické a kovové povrchy, dále na papír, sklo, plasty, feritové elementy atd. Výška znaků je obvykle rovna zlomkům až jednotkám milimetrů, tloušťka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů. Pro tuto aplikaci se používají výkonové impulsní lasery s energií v impulsu až desítky joulů nebo kontinuální lasery (Nd:YAG laser, excimerové lasery). Předností laserového značkování je bezkontaktní zhotovování znaků a tím vyloučení případných deformací a napětí ve značkováném materiálu. Změnou parametrů laseru lze spojitě přecházet od povrchového popisu v několikamikronové vrstvě materiálu až po laserové gravírování do větší hloubky.

Gravírování se používá pro vytváření jednoduchých i velmi složitých reliéfů, především do kalených ocelí (např. do forem pro stříkání plastů a zápustek), keramických materiálů, dřeva, gumy apod. Podstatou metody je odpařování materiálu v místě, kde působí

paprsek laseru. Gravírování může být v rovině, v několika různých hloubkách nebo lze vytvářet prostorové reliéfy. Pro gravírování do kovových a keramických materiálů se používají především Nd:YAG lasery, pro gravírování do dřeva a gumy jsou vhodné CO₂ lasery. Příklad označování předmětu gravírováním laserovým paprskem můžeme vidět na (Obr.13) [13,20]



Obr. 13. Nuž označený laserovým gravitováním

2.4.6 Laserové kalení

Laserové kalení je tepelné zpracování kovů, kde se využívá optického záření laserů k rychlému ohřevu materiálu. Výhodou oproti jiným způsobům ohřevu je opět možnost lokalizovaného tepelného zpracování i na místech jinými způsoby nepřístupných a prakticky bezdeformační zpracování. V průmyslu se především používá této metody pro tzv. transformační zpevňování některých namáhaných automobilových součástí. Používá se zpravidla kontinuálních CO₂ laserů o výkonu několika kilowattů. Kalit lze např. drážku v díře, vnitřní dosedací plochy apod. Nově se používá při kalení vysoce výkonových diodových laserů. Jsou vzhledem ke tvaru emitovaného paprsku (obdélník nebo čtverec) a k rozdělení energie záření v průřezu paprsku velmi vhodné pro kalení. Diodové lasery mají vyšší účinnost než ostatní používané lasery. Prakticky byl diodový laser využit pro kalení torzní pružiny používané u dveřních pantů automobilů. [13]

2.5 Využití laseru ve světě

Laser se za dobu čtyřiceti let od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, při různých technologických operacích ve výrobě, v astronomii, geodesii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, v energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, ve vojenské technice, v automatizaci a dálkovém řízení.

2.5.1 Laser v medicíně

Léčivou moc slunečních paprsků znali lidé odedávna. Avšak teprve koncem 18. století začaly být soustavně shromažďovány údaje o vlivu slunce na lidský organismus. Podnětem k tomu byly významné objevy v oblasti optiky. V roce 1961 byl rubínový laser použit k přivaření odchlípnuté sítnice a bylo vyzkoušeno působení laseru na kůži a kožní nádory. V téže době byl použit laser k odstranění „ohně“ (červených skvrn na kůži). V roce 1965 Hugh Beckman ukázal, že laserem lze provádět i operace duhovky. V témže roce G.J.Jako demonstroval využití Nd skleněného laseru jako chirurgického nože. V roce 1964 byl C.K.N.Patelem ověřen první chirurgický CO₂ laser. Laserového světla se užívá v očním lékařství pro velmi složité operace. Operace jsou rychlé, méně bolestivé a lze je provádět i ambulantně. Následovala řada dalších objevů – začal rozvoj nového odvětví vědy i aplikací tzv. laserová medicína. Prvně použitý rubínový laser byl při operacích sítnice nahrazen kvazikontinuálním argonovým laserem, pro operace předního pouzdra čočky se používá nejvíce ND:YAG pulzní laser. Laser pronikal a proniká postupně do mnoha odvětví: oftalmologie, dermatologie, plastické chirurgie, neurochirurgie, otolaryngologie, urologie, gynekologie a dalších. Zájem lékařů o tento nový druh světelného záření je pochopitelný a plyne z unikátních vlastností laserového záření, kterými jsou: monochromaticnost, koherence, minimální rozbíhavost, vlastnosti, které umožňují oproti původním zdrojům světla lepší přesnost zásahu a větší účinek daný mnohonásobným výkonem laserového světla. [20]

2.5.2 Laser v mikroelektronice

Od počátku sedmdesátých let se začaly objevovat technologie jako doladování jmenovitých hodnot odporů, kondenzátorů a elektrických filtrů. Laserové doladování spočívá ve vyřezávání korigující drážky v odporové vrstvě, což změní hodnotu elektrického odporu. Soustředěný laserový svazek dopadající na vrstvu způsobí její místní odpaření. Laserového rýhování se dnes běžně používá pro dělení podložek z keramiky, křemíku nebo arsenidu galia. Laserové rýhování se provádí zejména pro docílení snadného a definovaného dělení základního substrátu integrovaných obvodů.

Další aplikací, při které dochází ke změně struktury materiálu v důsledku místního ohřevu, je laserové žíhání. Používá se zejména pro rekrystalizaci krystalické mřížky substrátu mikroelektronických obvodů poškozených při iontové implantaci.

Všechny uvedené technologie jsou založeny na odstranění tenké vrstvy materiálu formou jeho vypaření, k čemuž dochází následkem ozáření intenzivním laserovým svazkem. Laser se používá k opravě polovodičových pamětí, kdy jsou laserem odpojeny poškozené obvody a místo nich připojeny jiné. Rozvíjejí se metody laserového dopování příměsí do substrátu: zářením je rozložen nad povrchem substrátu plyn obsahující dopující příměs, při současném místním roztavení podložky. Zářením uvolněný dopad pak difunduje do podložky.

Laserem jsou opravovány poškozené matrice pro litografii. Litografie je technologický proces, který umožňuje přenesení obrazu půdorysného uspořádání určité optické, optoelektronické nebo mikroelektronické struktury součástky popřípadě obvodu na polovodičovou nebo dielektrickou podložku. Laserová litografie používá pro exponování fotocitlivé vrstvy materiálu laserového záření. Dále jsou laserem odstraňovány nečistoty s povrchu materiálu, iniciován růst křemíku na izolační vrstvě SiO_2 atd. Nové typy mikroelektronických součástek lze vytvářet laserovou dispozicí tenkých vrstev, kdy je materiál terče odpařen laserovým svazkem, přičemž páry kondenzují na podložce a vzniklá tenká vrstva je stechiometricky shodná s materiálem terče. Jsou deponovány supravodivé, feromagnetické vrstvy a vícevrstvé struktury. Z vrstev jsou zhotovovány např. nové druhy nedeaktivních pamětí, supravodivé kvantové magnetometry atd. [20]

2.5.3 Laser v astronomii, geodézii, geofyzice a ekologii

Velmi brzy po uvedení laseru do provozu byl laser použit v systému radaru jako vysílač záření. Pomocí tohoto tzv. laserového radaru jsou měřeny vzdálenosti k objektům, které odrážejí laserové záření zpět do směru přicházejícího svazku. Pro zvětšení intenzity do radaru se vracejícího záření se umísťují na měřené objekty tzv. laserové odražeče, např. koutové hranoly, jejichž charakteristickou vlastností je odraz přicházejícího záření do zpětného směru. Podle využití laserového radaru se tyto odražeče umísťují na pozemní cíle, družice nebo na povrch Měsíce. Určení vzdálenosti je založeno na měření časového intervalu, který uplyne mezi vysláním impulsu optického záření a od měřeného objektu. Velikost dosahu laserového radaru plyne z energetické kalkulace přijatého signálu. Dosah laserového radaru je do 20 km při měření pozemních objektů, oblačnosti, letadel, lodí apod. (tj. většinou objektů bez laserových odražečů). Vzdálenost 10 000 km byla dosažena při měření umělých družic Země a nejbližším objektem měřeným laserovým radarem jsou laserové odražeče umístěné na povrchu Měsíce (asi 380.000 km). Přesnost měření vzdálenosti laserovým radarem je dána dosažitelnou přesností změření časového intervalu, geometrií měřeného objektu, konstrukcí a umístěním odražečů, přesností matematického modelu šíření optického záření atmosférou. Hodnota přesnosti se pohybuje od několika decimetrů při měření objektu bez odražečů, až několika milimetrů při měření umělých družic Země. Výsledky těchto měření poskytují přesné hodnoty délek stran trojúhelníků pro astronomická úhlová měření, slouží dále ke studiu dynamiky Měsíce a umělých družic Země.

V geodézii byl vyhodnocením dlouhodobých laserových družicových měření určen tvar zemského geoidu s přesností na 10 cm. V geofyzice umožnila tato měření určit vzájemný pohyb částí pevnin (vzájemný pohyb kontinentů dosahuje rychlosti 4 až 5 cm za rok). Výsledky těchto měření jsou významné také pro seismologii. Jako laserové vysílače se v laserových radarech používají impulsní pevnolátkové lasery rubínové a Nd:YAG. V geodézii našly uplatnění také lasery helium-neonové: používají se pro vytyčování tras na Zemském povrchu i v podzemí.

V ekologii se laserové radary používají k měření znečištění ovzduší (lidary), vody apod. Lidary využívají k měření několika fyzikálních principů. Vyslaný laserový impuls je při průchodu atmosférou rozptylován přítomnými molekulami a aerosoly. Část záření rozptýleného ve zpětném směru je soustředována teleskopem a detekována fotodetektořem.

Přijatý signál, jehož amplituda je v každém okamžiku úměrná intenzitě rozptýleného záření, je zaznamenáván jako funkce času, což umožní určit vzdálenost rozptylujícího útvaru. Lidar slouží k monitorování rozložení a směru pohybu dýmových vleček, měření spodní hranice oblačnosti a profilu mraků, turbulence atmosféry, rozložení a profilu výskytu různých látek v ovzduší atd. Laseru se využívá i při analýze průběhu proudění kapalin a plynů. Využívá Dopplerův jev při sledování pohybu vypařujících částic. Při obvyklém měření se po ozáření laserem sleduje rozdíl frekvence vyslaného a zpětně rozptýleného záření, který je úměrný složce rychlosti rozptylujících částic do směru pozorování. Firma Polytec vyvinula ke měření polovodičový laser se 2 laserovými diodami o různé vlnové délce a výkonem 30 a 100 mW. Vedle měření rychlosti proudění je vhodný i při sledování jeho turbulentního, nebo laminárního průběhu a pro analýzu rozptýlených částic. [20]

2.5.4 Laserová spektroskopie

Spektroskopie je obor fyziky zaměřený na studium spektra, která vzniká v procesu interakce mezi látkou a elektromagnetickým vlněním. Prostřednictvím spektroskopie lze studovat kvantové přechody a usuzovat na energetické hladiny atomů, molekul a makroskopických soustav, a tak získat informaci o stavbě a vlastnostech látky (např. lze analyzovat prvky obsažené ve vzorku látky, získat informace o složení hvězd a galaxií atd.).

Laserová spektroskopie využívá laserového záření pro vyvolání kvantových přechodů ve zkoumaných látkách. Velká směrovost laserového záření umožňuje provádět spektroskopické studie na délku (používá se zejména při detekci znečištění ovzduší). Podle druhu interakce dělíme laserovou spektroskopii na lineární a nelineární. V infračervené spektroskopii se využívá molekulární plynové lasery, polovodičové lasery a kapalinové lasery. Ve viditelné oblasti se používají zejména barvivové lasery, v ultrafialové oblasti lasery excimerové. [20]

2.5.5 Laserová separace izotopů

Laserová separace izotopů je fotofyzikální metoda rozdělení izotopů, využívající optického posuvu v absorpčním spektru, při níž jsou atomy jednoho z izotopů převedeny monochromatickým laserovým zářením zdroje do vzbuzeného stavu, zatímco atomy ostatních izotopů zůstávají v základním stavu. Vzbuze­né atomy se ionizují např. opticky, elektrickým polem, srážkou s jinou částicí apod. a ionty separují pomocí vnějšího elektrického pole. Výhodou laserové separace je skutečnost, že energie vynaložená na separaci jednoho atomu je ve srovnání s jinými metodami poměrně malá. Nevýhodou laserové separace izotopů je nutnost separace v plynné fázi. Praktické využití metod laserové separace izotopů se předpokládají především pro potřeby jaderné energetiky, např. pro separaci izotopů uranu, vodíku a lithia a pro separaci izotopů stopových prvků. [20]

2.5.6 Využití laseru v holografii

Hologram vzniká tak, že ze zdroje vychází laserový paprsek, rozšíří se na silnější svazek, ten se rozdělí polopropustným zrcadlem na dva – jeden ozařuje snímáný předmět, druhý paprsek (referenční) se odráží od zrcadla a osvětluje záznamovou desku. Světlo odražené od předmětu kříží referenční paprsek a vytváří tzv. interferenční pole, které se zachycuje na záznamovou desku. Ta se vyvolá, ale ještě není nic vidět. Záznam se musí rekonstruovat. Deska se tedy ozáří laserovým paprskem a před námi se objeví plastický, trojrozměrný obraz předmětu. Holografický záznam zvaný hologram je prvek, který usměrní pomocí ohybu světla dopadající paprsek tak, aby vytvořil obraz předmětu a to buď tím, že světlo jím prochází (transmisní hologramy, pro jejichž rekonstrukci je třeba laserového paprsku) nebo odráží (reflexní hologram, které pro rekonstrukci laser nepotřebují). Holografie se využívá např. u hudebních nástrojů k zobrazení kmitů zvuku. Holografie dovede zviditelnit i pohyb o 0,001 mm. Metodou holografické interferometrie odhalíme i sebemenší deformace, třeba i několik desetitisícin milimetru. [20]

3 VLASTNOSTI A CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU PMMA

3.1 Charakteristika materiálu

Polymethylmetakrylát je průhledná tuhá hmota známá pod různými názvy, jako je Umaplex, Plexiglas, Perspex aj. Vyrábí se radikálovou polymerací metylmetakrylátu (methyl- esteru kyseliny metakrylové), který je kapalinou zvláštního zápachu s bodem varu 100,6 °C. Kromě „organického skla“, jež se vyrábí blokovou polymerací ve skleněných formách, se používá i jako stříkací hmoty, především v podobě suspenzního polymeru. Dá se však připravit i emulzní nebo roztokovou polymerací. Emulze některých jeho kopolymerů mají jistý význam jako šlichtovací prostředky pro syntetická vlákna, roztoků se dá použít jako nátěrových hmot. Polymethylmethakrylát je křehký materiál. Směšováním nebo roubovací polymerací s polybutadiénem nebo jinými elastomery lze tuto vlastnost potlačit a vyrobit houževnaté materiály. Bohužel tím se ztrácí kvalitní optické vlastnosti a takový PMMA se stává mléčně zakaleným. Některé základní vlastnosti PMMA můžeme vidět v následující tabulce:

Tabulka I. Základní vlastnosti materiálu PMMA [11]

Vlastnost		Hodnota
měrná hmotnost	kg.m ⁻³	1 180
pevnost v tahu při přetržení	MPa	65 - 70
tažnost	%	2,5
modul pružnosti	MPa	1,4.10 ³
pevnost v tlaku	MPa	120 - 140
rázová houževnatost	J.m ⁻²	15 000
vrubová houževnatost	J.m ⁻²	2 000 - 3 000
teplota skelného přechodu T _g	°C	100
odolnost za tepla podle Vicata	°C	100 - 120
teplota rozkladu	°C	220
rozsah teploty při použití	°C	-60 až +100
měrný vnitřní odpor	Ω.m	10 ¹² - 10 ¹³
elektrická pevnost	MV.m ⁻¹	30 - 45
permitivita		2,7 - 3,2
ztrátový součinitel	800 Hz	0,045

3.2 Způsob výroby

Bloková polymerace probíhá tak, že se v monomeru rozpustí asi 0,1% dibenzoylperoxidu jako iniciátoru, přidají se další přísady a při 70°C se vytvoří nejdřív předpolymer a asi za 30 minut ve formě viskózní kapaliny obsahují 5% polymeru. Tato kapalina se nalije do formy, nejčastěji mezi dvě skleněné, pečlivě vybroušené desky, vzdálené od sebe žádanou tloušťku budoucí desky a vloží se do sušárny, kde se vyhřívají teplým vzduchem na polymerační teplotu, která bývá 40 - 130°C podle postupující konverze. Potom se skleněné desky ochladí ponořením do vody, sklo se odstraní, oříznou přetoky a okraje. Představiteli jsou typy označované: Akrylon, Diakon, Perspex, Plexiglass, Umaplex a jiné.

Suspenzní polymerací se vyrábí vstřikovací granuláty polymetylmetakrylátu. Upravené granuláty je možné zpracovávat také vytlačováním. Z těchto materiálů jsou známy Plexigum, Lucite, Rohagum a jiné.

Suspenzní polymerací se vyrábí také velmi jemné práškové (perličkové) polymery. Zpracovávají se také vstřikováním nebo jako odlévací. Zalévací hmoty jsou dvousložkové. Jednu složku tvoří polymer s dávkou polymerizačního katalyzátoru, druhou složku monomer. Polymer se v monomeru rozpouští, čímž vzniká viskózní hmota, která účinkem katalyzátoru polymerizuje ve formě, do které se odlévá.

Emulzní polymerace se v hlavních rysech podobá suspenzní, místo stabilizátoru suspenze se přidávají emulgátory a používají se iniciátory rozpustné ve vodě. Podmínky polymerace jsou podobné jako při suspenzní technice, udržování rovnoměrné teploty je třeba věnovat pozornost. Používané teploty bývají nižší, zpravidla nepřevyšují bod varu monomeru za normálního tlaku. Takovýmto způsobem se používá k získání latexu, využívaného k výrobě latexových nátěrů.

Roztokový způsob je vhodný pro přípravu polymerů s nižšími molekulovými hmotnostmi. Technika je obvyklá, iniciátor se přidává do roztoku monomeru. Získá se zpravidla 10% roztok polymeru. Důvodem pro použití tohoto způsobu je skutečnost, že odpadá poměrně nesnadné rozpouštění PMMA při přípravě jeho roztoků.

Technicky nejvhodnější je emulzní polymerace při katalyzačním účinku 0,3 % persulfátu draselného, při teplotě 70 až 80 °C. [11]

3.3 Způsoby zpracování a použití

Z vlastností metylmetakrylátových polymerů vyplývají široké možnosti zpracování. Způsoby zpracování se mění podle druhu polymerů (blokový, suspenzní) a podle druhu polotovaru. Blokový polymer se vyrábí v deskách a tyčích různých tloušťek a průměrů. Obvyklé tloušťky jsou v mezích 1 – 10mm a velikosti 750x1000mm.

Tyto materiály je možno:

- obrábět (dělením, vrtáním, broušením, frézováním atd.)
- tvarovat (převážně vakuově, ale i lisováním apod.)
- svařovat
- a jinak spojovat (lepit, mechanicky spojovat)
- povrchově upravovat (vakuové a galvanické pokovování)

Přednosti polymethylmethakrylátu jsou následující:

- vysoká tvrdost, tuhost a pevnost,
- homopolymery jsou křehké, kopolymery houževnaté,
- vysoká kvalita povrchu: vysoký lesk, odolnost proti poškrábání, možnost leštění,
- výborné optické vlastnosti, především vysoká průzračnost; kopolymery jsou mírně nažloutlé,
- vysoká tepelná odolnost,
- dobré elektrické a dielektrické vlastnosti,
- odolnost proti slabým kyselinám a louhům, nepolárním rozpouštědlům, tukům, olejům a vodě,
- vysoká odolnost proti povětrnostnímu stárnutí, lze jej dobře zpracovávat i následně mechanicky opracovávat.

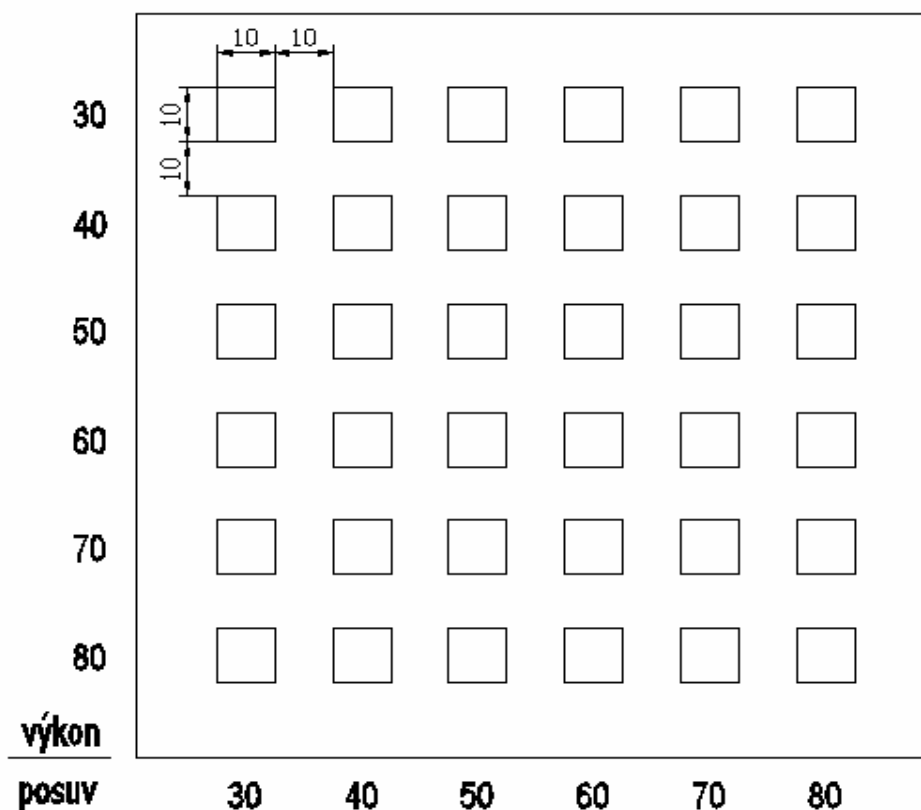
4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

V teoretické části byla uvedena problematika obrábění laserovým paprskem, jeho princip a využití ve světě. Praktická část této diplomové práce bude zaměřena na měření drsnosti povrchu a hloubky řezu v desce z materiálu PMMA obrobene laserem, při rozlišení DPI 200 a při změnách technologických podmínek. Následně pak bude provedeno vyhodnocení vlivu změny technologických podmínek a také zhodnocení vlivu změny rozlišení při hodnotách 200, 500 a 1000 DPI na jakost obrobene plochy. Na závěr bude vypracována ekonomická analýza laserové procesu a srovnání nákladů na obrábění pro rozlišení DPI 200, 500 a 1000.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 ZKUŠEBNÍ VZOREK

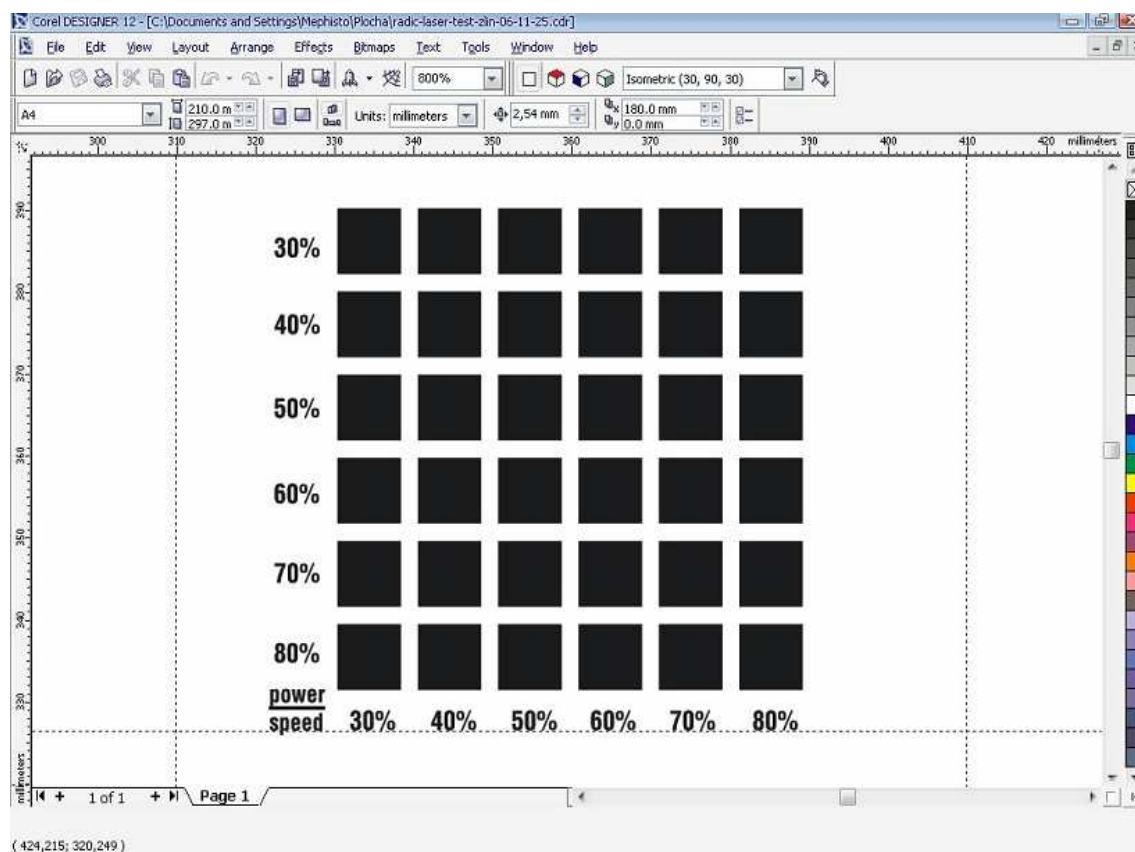
Zkušební vzorek použitý pro experiment byl vyroben z běžně dostupného konstrukčního materiálu PMMA ve formě desky. Pro vyhodnocení vlivu změny technologických parametrů na kvalitu obrobené plochy byla na zkušebním vzorku zhotovena matice polí o rozměru 10x10mm, přičemž každé pole je obrobeno za jiných technologických podmínek. Rozložení polí na zkušebním vzorku můžeme vidět na (Obr.14).



Obr. 14. Matice obrobených plošek na PMMA desce

Čísla ve vertikálním sloupci označují nastavení výkonu laseru v procentech a obdobně čísla v horizontální poloze označují nastavení rychlosti posuvu v procentech. Hodnoty menší než 30% výkonu a posuvu nemají pro tento typ zkoumání význam, protože laser odpaří tak malou část materiálu, že se měření může pohybovat v rozmezí statistické chyby. Podobně i při obrábění nad 80% výkonu a posuvu má laser snahu materiál spalovat a výsledky měření pak nejsou korektní. Z tohoto důvodu byly tyto krajní hodnoty vypuštěny – při měření v rozmezí hodnot 30 – 80% jsou výsledky přesnější a změna rozdílu DPI je více patrná.

V následujícím obrázku je znázorněna mikrostruktura zkušební vzorku, sestavená v programu Corel Draw. Takto je pak přesně vymezena poloha jednotlivých polí při obrábění na desce zkušební vzorku. Obsluha pak musí dbát na to, aby každé pole bylo obráběno správnou kombinací výkonu a posuvu laserového paprsku, které jsou u jednotlivých polí uvedeny.



Obr. 15. Schéma obráběné mikrostruktury v programu Corel Draw

6 ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCI

6.1 CO₂ laser MERCURY L-30

Pro obrobení zkušebního vzorku z PMMA byl použit komerční CO₂ laser Merkury L30 vyráběný firmou LaserPro (viz Obr.16). Tento laser byl zvolen pro jeho dostupnost a výkon odpovídající potřebám pro zkoumání zadaných veličin.

Zkoušky byly provedeny ve firmě Mechanika Prostějov. Výkon a posuv laserového systému lze libovolně měnit. Posuv i výkon se nastavují v procentech maximálních hodnot. Paprsek laseru je možné fokusovat automaticky na průměr stopy $d = 185 \mu\text{m}$. Maximální hodnota hustoty energetického toku je $q = 1,1 \text{ GWm}^{-2}$. Laser pracuje pomocí softwaru Corel Draw, jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole. Laserem MERCURY L-30 lze popisovat, gravírovat a řezat širokou škálu materiálů, například plasty, pryž, kůži, sklo, povlakovaný kov, kámen, dřevo, keramiku.[3]

Tento typ laseru je určen především ke komerčnímu gravitování, ale lze jej použít i pro 3D obrábění.



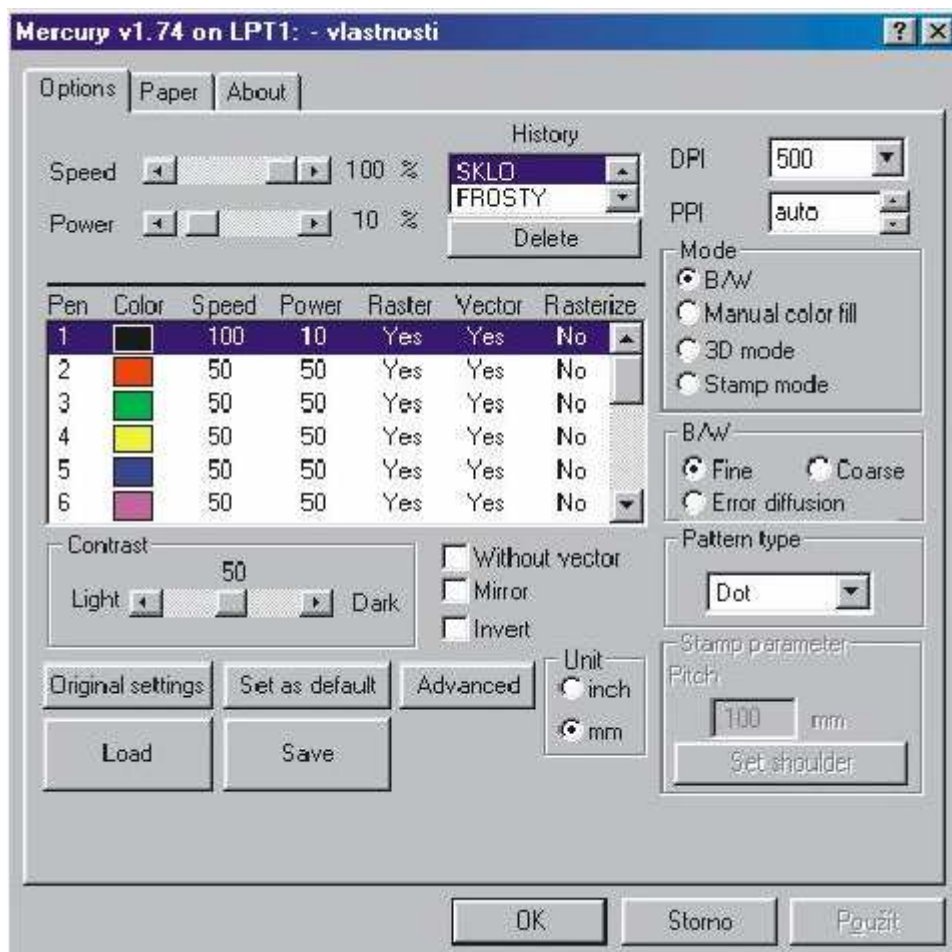
Obr. 16. CO₂ Laser Merkury L-30

Laser Merkury L30 disponuje těmito parametry:

Tabulka II. Vlastnosti a parametry CO₂ laseru Merkury L-30 [12]

Výkon	30W
Pracovní plocha	635 x 457mm
Maximální velikost obrobku (š x h x v) - při uzavřených čelních dvířkách	800 x 570 x 183mm
Maximální velikost obrobku (š x h x v) - při otevřených čelních dvířkách	680 x bez limitu x 165
Pracovní plocha	790 x 530mm
Celkové rozměry	1125 x 720 x 1005mm
Posuv laserové hlavy	DC servo pohon
Řízení rychlosti posuvu	Nastavitelné od 1 do 1066 mm/sec
Řízení výkonu laseru	Nastavitelné od 0 do 100% výkonu
Nastavení ohniskové vzdálenosti	Automatické
Rozlišení	200, 250, 300, 500, 600, 1000 DPI
Komunikační rozhraní	LPT nebo COM port PC
Integrovaná paměť	Základní 16MB rozšiřitelná až na 64MB
Čočka	Standardně 2“ – volitelně 1,5“, 2,5“, 4“
Ovládací panel	4 řádkový LCD display
Napájení	~110 / ~240 V
Příkon	900W
Chlazení	Vzduchové / kapalinové

Laserové zařízení je ovládáno přes počítač pomocí softwaru Corel Draw. Pomocí tohoto programu lze nastavit polohu obráběných polí matice. Dále tento program obsahuje možnost nastavení parametrů laseru, jež vidíme na (Obr. 17).



Obr. 17. Nastavení laseru pomocí programu Corel Draw

Na obrázku vidíme možnosti nastavení parametrů laseru. V levém horním rohu nachází nastavení výkonu a rychlosti posuvu laseru. V pravém horním rohu je pak nastavení hustoty drah laseru, což je důležitá hodnota pro náš experiment. V této tabulce je také možné nastavení kontrastu barev. Pro obrábění laser je nastavena základní barva černá. Pomocí nastavení různých odstínů černé barvy je pak možno provádět i 3D mikroobrábění.

6.2 Drsnoměr – SJ 301

Po obrobení desky z PMMA bylo zapotřebí zjistit drsnost a kvalitu povrchu jednotlivých polí a k tomu byl použit přístroj Surftest SJ 301 od firmy Mitutoyo (viz Obr.18). Přístrojem SJ-301 lze charakterizovat obrobenou plochu řadou parametrů podle různých národních a mezinárodních norem (JIS, DIN, ISO, ANSI). Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na obrazovce přístroje. Drsnost povrchu se počítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu. Vlastní měření probíhá tak, že se měřící hrot, který je upevněn na ramenu položí na měřenou plochu a po zapnutí přístroje je rameno s hrotem posouváno automaticky po měřené ploše. Tím se dosáhne konstantních podmínek pro všechna měření. Při posuvu ramene přes měřený povrch dochází ke zdvihu hrotu, který je přenášen na rameno a tento zdvih je měřen a zaznamenán jako drsnost. Parametry přístroje můžeme nalézt v Tabulce III.

Tabulka III. Technické parametry drsnoměru Surftest SJ 301 [12]

Měřicí rozsah [μm]	300
Délka pojezdu hrotu [mm]	0,25; 0,8; 2,5; 8
Rychlost posuvu [mms^{-1}]	0,25; 0,5
Rozlišení [μm]	0,01
Měřicí síla [N]	4
Parametry	$R_a, R_z, R_p, R_f, R_{pc}, R_{rm}, R_s, R_{sm}$
Filtr	2RC, PC75, GAUSS
Poloměr snímacího hrotu [mm]	5



Obr. 18. Drsnoměr SJ 301 od firmy Mitutoyo

6.3 Lineární výškoměr LH – 600B

Při měření hloubky povrchu obrobených polí byl použit lineární výškoměr od firmy Mitutoyo LH – 600B. Tento přístroj nabízí široké možnosti použití a následného vyhodnocení naměřených hodnot. Pracuje v režimu kdy obsluha pouze nastaví měřený objekt k měřicímu hrotu a dojezd dotyku. Dráhu potřebnou pro změření rozměru vykoná přístroj sám. Parametry lineárního výškoměru LH – 600B můžeme nalézt v Tabulce IV.

Tabulka IV. Technické parametry výškoměru LH – 600B[12]

Měřicí rozsah [mm]	0 – 972 (600mm zdvih)
Měřicí krok [mm]	0,0001; 0,001; 0,01; 0,1
Přípustná délková odchylka [mm]	$(2+L/600)/L$ L – měřená délka v mm
Pohyb přístroje	plovoucí/poloplovoucí vzduch. ložiska
Počet jazyků menu	13
Počet programů	max. 50
Počet hodnot	60 000
Hmotnost [kg]	24

6.4 Mikrokamera ProScope HR

Ke zvětšení a obrazovému zdokumentování tvaru a povrchu obrobených ploch byla použita mikrokamera ProScope HR (viz Obr.19) od firmy ProScope CSI. K přístroji je připojeno i příslušenství které obsahuje sadu objektivů pro různá zvětšení. Námí použité zvětšení bylo 400 násobné. Tato mikrokamera ovládá i automatické doostřování obrazu. Po přiložení přístroje na zkoumaný zkušební vzorek je tedy možné zachytit záznam z mikrokamery ve formě obrázku nebo videa. A to při rozlišení 640x480 nebo 320x240 pixelů. Spuštění videozáznamu či zachycení obrázku je možné 2 způsoby a to tlačítkem na přístroji nebo přes program v PC který umožňuje práci s přístrojem. Hlavní parametry mikrokamery nám ukazuje Tabulka V.

Tabulka V. Technické parametry přístroje ProScope HR

Zobrazovač	¼ palcový CCD (počet obrazových elementů – 330k pixelů)
Rozhraní	USB
Zvětšení	50x (při zobrazení na 14" monitoru)
Rozměry [mm]	156 (délka), 46 (šířka)
Váha [g]	200
Spotřeba energie	400 mA
Video zobrazení [px]	640x480 (VGA); 320X240 (CIF)
Pracovní teplota [°C]	5 - 40

Obr. 19. Přístroj ProScope HR



6.5 Metalografický mikroskop

Druhý přístroj, který byl použit ke zvětšení a obrazovému zdokumentování tvaru a povrchu obrobených ploch byl metalografický mikroskop XJP-6/6A (viz Obr.20). Na tomto přístroji bylo použito 100 násobného zvětšení. Vlastní postup měření na tomto mikroskopu probíhal tak, že po zaostření struktury povrchu obrobeného pole byla k přístroji připojena kamera. Tato kamera byla připojena také k počítači a byl pořízen videozáznam struktury, který byl následně pomocí programů operačního systému Microsoft Windows převeden na formu obrázku. U obrázky pořízené pomocí tohoto přístroje byly horší kvality z toho důvodu, že materiál PMMA je transparentní a zařízení je určeno pro metalografické použití.



Obr. 20. Metalografický mikroskop XJP-6/6A

7 MĚŘENÍ HODNOT MATERIÁLU OBROBENÉHO PŘI ROZLIŠENÍ 200 DPI

7.1 Měření drsnosti

Jako drsnost povrchu označujeme rozměrově nepatrné nepravidelnosti povrchu (trhliny, vyvýšeniny atd.) Drsnost povrchu posuzujeme podle druhu, tvaru a hloubky stop, které zůstanou na povrchu součásti po nástroji při obrábění. Rozlišujeme dva druhy drsností a to podélnou a příčnou. Příčnou drsností se rozumí drsnost měřená kolmo na dráhu pohybu nástroje. Podélná drsnost je pak měřena ve směru pohybu nástroje a je způsobená chvěním nástroje při posuvu.

Při měření drsnosti byly vyhodnocovány tyto základní hodnoty :

a) střední aritmetická úchylka profilu R_a - aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek profilu (Y_i) uvnitř vztažné dráhy.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx, \quad (1)$$

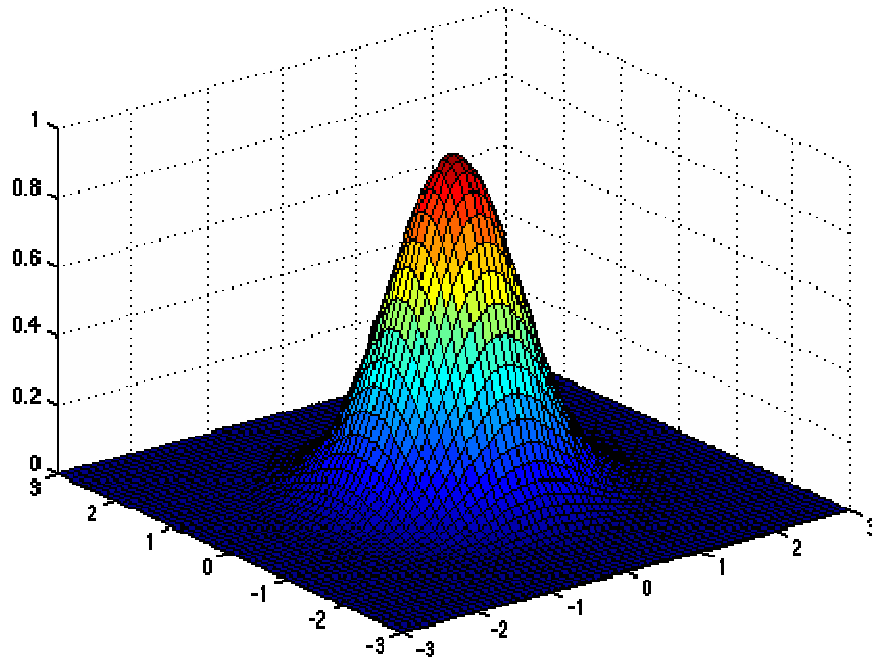
b) maximální výška profilu R_z - je součet výšky Y_p nejvyššího vrcholu od střední čáry a hloubky Y_v od nejnižšího bodu od střední čáry.

$$R_z (JIS) = Y_p + Y_v, \quad (2)$$

Při výpočtu parametrů drsnosti používá přístroj filtry (λ_s - filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu) k potlačení vlnitosti. Je rozlišen základní profil (P - profil), který reprezentuje základnu pro číslicové zpracování profilu pomocí λ_s filtru a pro výpočet parametrů profilu. Dalším je profil drsnosti (R - profil), který je odvozený ze základního profilu potlačěním dlouhovlnných složek použitím filtru λ_s . [3]

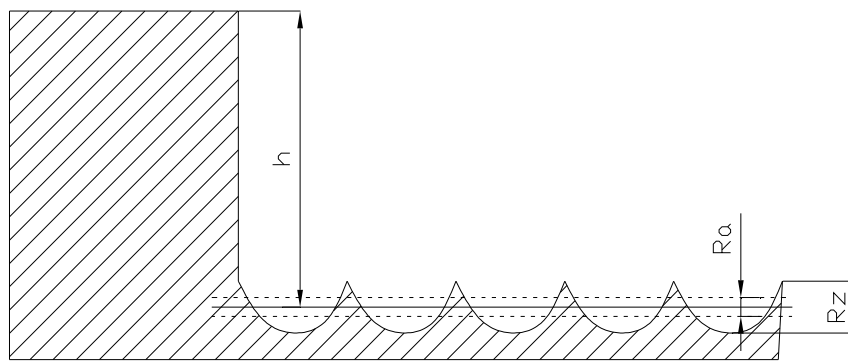
Při obrábění PMMA laserem vznikají na obráběné ploše drážky ve směru pohybu paprsku. Tyto nerovnosti jsou způsobeny především rozdělením výkonu po průřezu laserového paprsku a použitým módem laseru. Laser Merkury L30 pracuje v módu TEM₀₀

a výkon je tedy rozdělen po průřezu paprsku podle Gaussovy křivky četnosti, kdy maximum výkonu je uprostřed paprsku a směrem k okraji se výkon snižuje.[12]



Obr. 21. Tvar laserového paprsku v modu TEM₀₀

V této práci byla měřena příčná drsnost obrobených polí materiálu. Při obrábění laserem vznikají v materiálu drážky, jejichž tvar je opačný než Gaussova křivka. Toto vidíme na (Obr.22) :



Obr. 22. Příčný profil drsnosti po obrábění laserovým paprskem [12]

Při měření hodnot příčné drsnosti, byla každá hodnota naměřena 10x a poté vypočítána její střední hodnota:

Tabulka VI. Drsnost při konstantním výkonu 30%(9W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	Ra[μm]	36,23	35,33	36,39	36,80	35,18	34,87	35,94	36,81	35,29	35,65	35,85
		Rz[μm]	141,86	145,12	142,52	142,83	141,73	143,88	143,77	141,86	142,28	141,38	142,72
	40 (426,4)	Ra[μm]	30,50	31,70	31,05	33,38	32,62	30,64	30,88	31,94	32,56	31,91	31,72
		Rz[μm]	136,87	138,68	138,28	139,55	138,97	136,52	137,84	138,76	139,20	137,36	138,20
	50 (533)	Ra[μm]	30,96	30,52	30,25	29,82	28,80	29,15	28,98	29,48	28,74	31,09	29,78
		Rz[μm]	130,59	129,12	129,65	131,66	132,94	130,78	131,37	129,95	133,30	132,22	131,16
	60 (639,6)	Ra[μm]	25,42	25,84	23,21	23,30	25,62	26,85	26,15	24,26	25,22	24,42	25,03
		Rz[μm]	121,66	125,14	124,39	123,23	123,35	121,74	123,58	124,93	122,45	121,63	123,21
	70 (746,2)	Ra[μm]	22,11	23,01	24,43	24,05	23,76	23,51	23,22	23,43	23,50	24,72	23,57
		Rz[μm]	126,17	126,14	125,31	125,59	126,84	125,81	124,77	125,54	126,67	124,98	125,78
	80 (852,8)	Ra[μm]	20,91	19,87	20,70	20,94	21,90	20,49	22,63	19,68	20,26	21,24	20,86
		Rz[μm]	101,60	124,00	100,10	98,98	116,90	123,20	107,30	130,50	96,17	140,60	113,94

Tabulka VII. Drsnost při konstantním výkonu 40%(12W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	Ra[μm]	37,70	39,42	38,75	39,75	36,96	37,83	36,97	36,56	37,34	37,65	37,89
		Rz[μm]	152,32	152,68	154,74	153,72	152,87	152,56	153,70	153,32	152,57	153,03	153,15
	40 (426,4)	Ra[μm]	35,03	35,57	34,88	33,69	34,13	34,84	35,05	35,57	34,42	35,50	34,87
		Rz[μm]	145,87	146,73	146,83	146,62	147,86	146,90	146,26	147,54	147,33	146,55	146,85
	50 (533)	Ra[μm]	32,79	31,76	32,46	32,24	33,86	33,48	32,52	31,13	33,09	33,52	32,69
		Rz[μm]	128,15	128,35	127,67	126,08	127,40	127,63	127,33	128,31	127,24	128,40	127,66
	60 (639,6)	Ra[μm]	24,82	25,53	25,31	26,69	26,02	25,46	26,77	24,83	24,99	26,67	25,71
		Rz[μm]	134,50	136,51	136,10	137,21	137,39	137,03	136,45	134,14	135,32	136,40	136,11
	70 (746,2)	Ra[μm]	27,41	27,81	28,65	28,71	29,84	26,36	27,44	27,80	29,95	29,94	28,39
		Rz[μm]	143,35	143,89	142,77	141,51	143,91	143,64	142,53	142,96	142,20	142,75	142,95
	80 (852,8)	Ra[μm]	22,47	22,82	23,92	24,82	23,51	23,29	23,53	22,27	21,38	23,60	23,16
		Rz[μm]	121,29	122,80	121,89	120,95	121,98	120,22	119,31	121,27	122,14	120,20	121,21

Tabulka VIII. Drsnost při konstantním výkonu 50%(15W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%], (mm ^{s⁻¹})	30 (319,8)	Ra[μm]	38,71	38,16	38,42	40,22	39,36	39,21	38,18	38,24	40,12	39,64	39,03
		Rz[μm]	159,86	158,83	157,44	159,66	160,85	158,26	156,13	157,26	157,03	157,23	158,26
	40 (426,4)	Ra[μm]	36,65	35,02	37,69	36,12	37,66	35,80	35,60	36,14	35,12	35,36	36,12
		Rz[μm]	154,58	153,25	153,30	154,57	155,74	153,19	153,51	153,31	152,92	152,03	153,64
	50 (533)	Ra[μm]	32,89	32,94	33,13	32,85	32,11	31,56	32,73	31,22	31,15	31,23	32,18
		Rz[μm]	144,13	144,32	143,01	143,76	143,28	142,39	143,26	142,18	141,16	143,22	143,07
	60 (639,6)	Ra[μm]	30,02	30,51	30,57	30,59	29,68	29,32	30,26	31,03	31,56	30,95	30,45
		Rz[μm]	139,84	139,75	140,18	141,50	141,43	141,39	139,78	140,93	140,64	139,87	140,53
	70 (746,2)	Ra[μm]	27,78	27,02	26,29	27,72	29,60	28,54	27,83	28,60	27,61	27,76	27,88
		Rz[μm]	137,41	137,88	138,53	137,73	140,09	139,24	137,15	137,69	137,36	137,15	138,02
	80 (852,8)	Ra[μm]	27,29	27,54	28,15	26,35	25,58	24,31	25,67	27,05	26,29	26,03	26,43
		Rz[μm]	123,05	122,57	123,98	122,27	121,24	121,83	122,35	123,61	122,54	122,19	122,56

Tabulka VIII. Drsnost při konstantním výkonu 60%(18W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%], (mm ^{s⁻¹})	30 (319,8)	Ra[μm]	39,06	38,65	38,75	39,25	38,36	37,15	38,72	38,48	37,43	37,81	38,37
		Rz[μm]	165,19	167,26	164,21	164,23	165,66	164,58	164,53	164,56	165,27	165,15	165,06
	40 (426,4)	Ra[μm]	35,79	34,63	34,50	34,31	35,48	36,25	35,64	36,51	37,02	36,38	35,65
		Rz[μm]	160,39	158,81	159,42	157,41	157,77	157,92	159,16	159,43	160,61	158,49	158,94
	50 (533)	Ra[μm]	32,76	33,08	33,28	34,16	34,17	32,48	32,35	33,67	35,63	33,24	33,48
		Rz[μm]	144,68	145,62	146,31	144,81	145,64	146,52	146,92	147,54	145,72	144,85	145,86
	60 (639,6)	Ra[μm]	29,57	30,41	29,03	31,20	28,44	29,62	31,53	30,42	30,83	29,55	30,06
		Rz[μm]	143,46	142,29	143,33	141,99	143,35	143,23	142,19	142,44	141,15	141,66	142,51
	70 (746,2)	Ra[μm]	30,54	31,36	30,76	30,06	29,25	27,96	28,74	28,51	30,28	29,83	29,73
		Rz[μm]	140,42	139,23	139,33	138,31	138,12	139,56	138,38	138,18	138,01	137,38	138,69
	80 (852,8)	Ra[μm]	28,51	27,35	27,19	26,10	27,86	30,93	29,04	28,75	28,29	27,47	28,15
		Rz[μm]	133,68	131,26	132,77	133,24	132,72	132,57	132,32	131,57	132,16	132,45	132,47

Tabulka IX. Drsnost při konstantním výkonu 70%(21W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%], (mm ^{s⁻¹})	30 (319,8)	Ra[μm]	38,70	37,43	38,26	36,96	35,92	36,75	35,78	36,73	36,66	35,25	36,84
		Rz[μm]	170,52	169,17	169,34	167,71	167,74	167,84	167,41	168,18	169,72	169,91	168,75
	40 (426,4)	Ra[μm]	41,23	40,86	39,20	40,24	40,39	41,67	41,63	38,65	39,39	39,25	40,25
		Rz[μm]	164,31	163,57	162,49	160,37	161,38	160,92	159,23	162,74	163,88	161,23	162,01
	50 (533)	Ra[μm]	34,01	34,18	33,60	32,89	34,31	32,72	32,76	33,58	33,94	34,01	33,60
		Rz[μm]	155,02	155,31	153,42	153,67	154,32	153,48	154,53	153,42	155,28	154,37	154,28
	60 (639,6)	Ra[μm]	32,48	34,13	35,41	33,34	32,86	31,72	33,43	32,92	33,93	34,85	33,51
		Rz[μm]	149,33	152,69	152,83	152,88	151,60	152,45	152,58	149,86	148,93	150,72	151,39
	70 (746,2)	Ra[μm]	31,46	30,81	31,12	28,73	28,51	29,81	29,53	30,19	31,08	31,23	30,25
		Rz[μm]	147,98	146,76	146,52	145,78	146,59	146,48	146,25	147,72	146,89	146,14	146,71
	80 (852,8)	Ra[μm]	28,42	29,30	27,64	26,44	27,56	28,23	29,42	31,01	28,18	26,75	28,30
		Rz[μm]	138,87	140,93	139,56	137,89	136,74	137,64	138,62	137,91	139,97	138,77	138,69

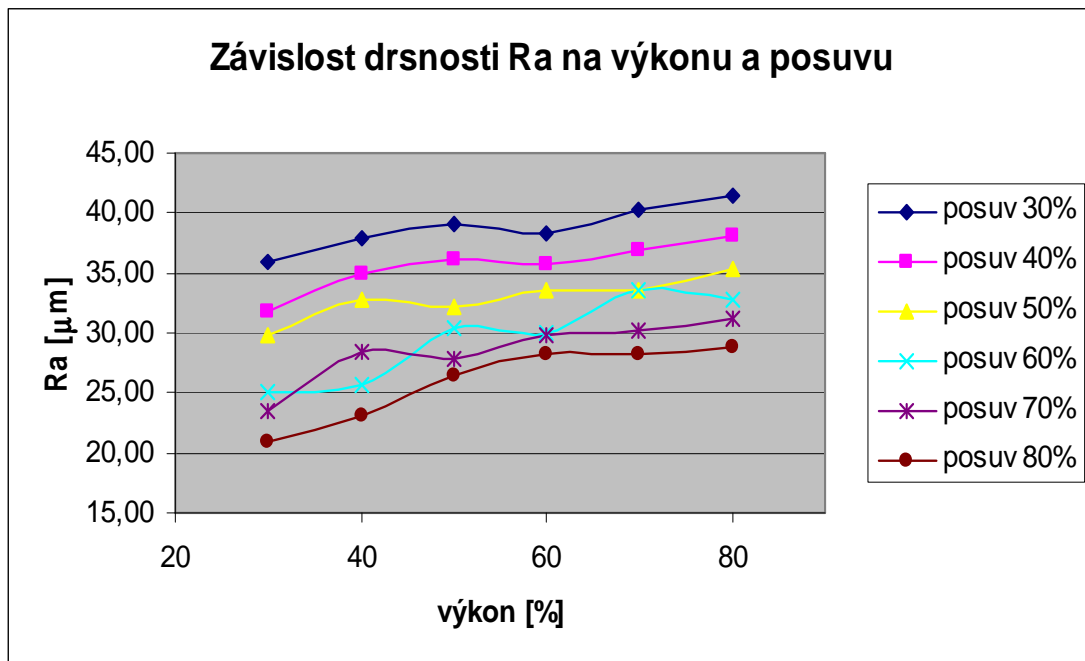
Tabulka X. Drsnost při konstantním výkonu 80%(24W)

		číslo měření										průměr	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
posuv [%], (mm ^{s⁻¹})	30 (319,8)	Ra[μm]	40,19	38,38	37,20	39,16	39,09	38,38	39,42	38,13	40,54	41,03	39,15
		Rz[μm]	168,51	169,45	168,29	166,05	167,54	165,82	167,51	168,47	165,70	166,77	167,41
	40 (426,4)	Ra[μm]	41,06	41,52	42,71	42,98	41,37	39,42	41,73	40,88	41,65	41,71	41,50
		Rz[μm]	159,28	161,19	159,82	157,34	157,13	158,32	158,29	157,48	156,74	158,13	158,37
	50 (533)	Ra[μm]	36,27	34,21	34,22	35,04	35,23	36,49	37,82	34,16	34,86	34,46	35,28
		Rz[μm]	151,94	150,82	152,63	148,11	150,48	149,74	151,93	148,88	147,53	147,12	149,92
	60 (639,6)	Ra[μm]	32,32	33,16	34,92	33,20	32,33	31,97	34,08	32,56	33,37	30,69	32,86
		Rz[μm]	154,51	153,80	154,71	155,02	153,35	152,16	151,54	153,42	154,86	155,41	153,88
	70 (746,2)	Ra[μm]	31,63	30,43	31,31	29,46	31,82	32,07	31,42	29,89	31,63	32,18	31,18
		Rz[μm]	149,15	150,25	148,37	149,43	148,71	147,84	146,26	148,33	149,57	147,55	148,55
	80 (852,8)	Ra[μm]	29,85	30,81	29,73	28,50	28,59	27,37	26,21	29,67	28,49	29,74	28,90
		Rz[μm]	145,19	144,28	143,80	143,88	143,68	145,74	143,54	146,98	143,18	145,03	144,53

Dále byly vypracovány tabulky celkové závislosti drsnosti Ra a Rz na výkonu a posuvu :

Tabulka XI. Celková závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu laseru

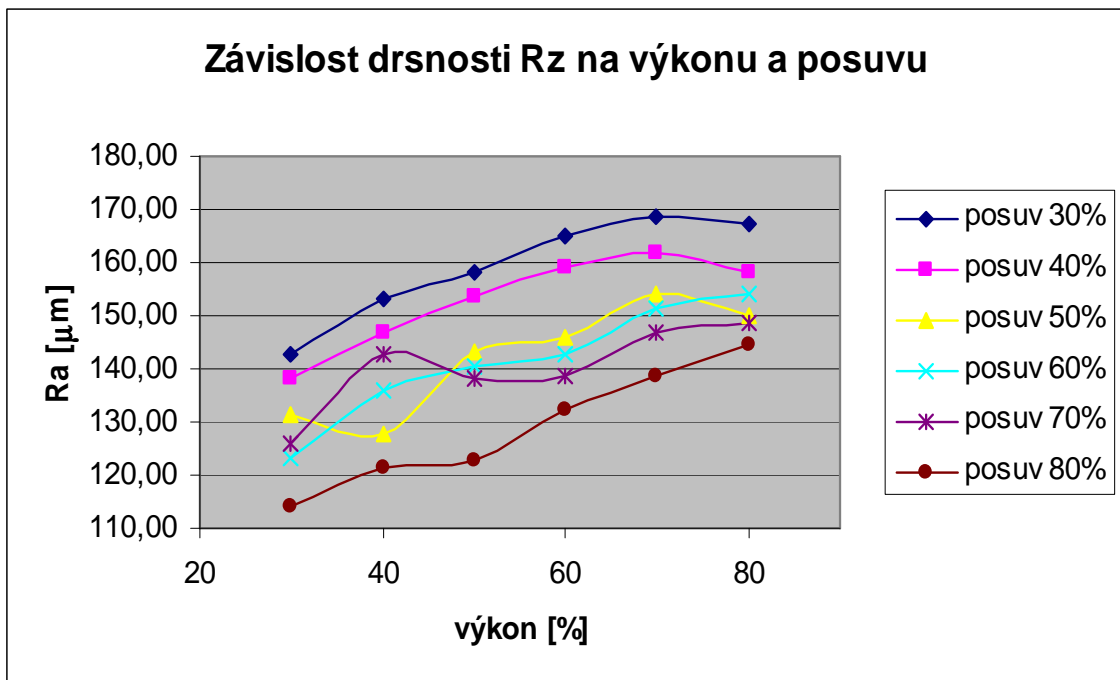
		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	35,85	37,89	39,03	38,37	40,25	41,50
	40 (426,4)	31,72	34,87	36,12	35,65	36,84	38,15
	50 (533)	29,78	32,69	32,18	33,48	33,60	35,28
	60 (639,6)	25,03	25,71	30,45	30,06	33,51	32,86
	70 (746,2)	23,57	28,39	27,88	29,73	30,25	31,18
	80 (852,8)	20,86	23,16	26,43	28,15	28,30	28,90



Obr. 23. Graf závislosti drsnosti Ra na výkonu a posuvu

Tabulka XII. Celková závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu laseru

		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	142,72	153,15	158,26	165,06	168,75	167,41
	40 (426,4)	138,20	146,85	153,64	158,94	162,01	158,37
	50 (533)	131,16	127,66	143,07	145,86	154,28	149,92
	60 (639,6)	123,21	136,11	140,53	142,51	151,39	153,88
	70 (746,2)	125,78	142,95	138,02	138,69	146,71	148,55
	80 (852,8)	113,94	121,21	122,56	132,47	138,69	144,53



Obr. 24. Graf závislosti drsnosti Rz na výkonu a posuvu

7.2 Měření hloubky

Jak bylo již dříve uvedeno, hloubka obrobeného povrchu byla měřena lineárním výškoměrem LH – 600B. Postup měření probíhal tak, že po určení a nastavení nulového bodu na neobrobené ploše, jsme provedli v každém obrobeném poli 10 měření. Ve výsledné tabulce je pak uvedena jejich střední hodnota. Hodnoty hloubky obrobeného povrchu jsou v následujících tabulkách uvedeny v [mm].

Tabulka XIII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 30%(9W)

č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,096	0,081	0,064	0,051	0,041	0,028
2	0,095	0,083	0,067	0,053	0,045	0,025
3	0,099	0,081	0,074	0,054	0,045	0,024
4	0,098	0,078	0,064	0,055	0,044	0,028
5	0,101	0,078	0,070	0,055	0,042	0,029
6	0,099	0,079	0,069	0,056	0,044	0,028
7	0,102	0,081	0,072	0,054	0,041	0,024
8	0,098	0,083	0,065	0,053	0,040	0,026
9	0,097	0,082	0,071	0,052	0,043	0,027
10	0,099	0,082	0,072	0,053	0,042	0,026
Průměr	0,098	0,081	0,069	0,054	0,043	0,027

Tabulka XIV. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40%(12W)

č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,121	0,096	0,080	0,065	0,048	0,027
2	0,119	0,097	0,079	0,062	0,050	0,029
3	0,121	0,099	0,081	0,060	0,052	0,031
4	0,122	0,098	0,075	0,061	0,053	0,032
5	0,122	0,095	0,074	0,064	0,054	0,032
6	0,120	0,094	0,079	0,064	0,051	0,030
7	0,118	0,095	0,080	0,062	0,051	0,028
8	0,119	0,097	0,073	0,063	0,053	0,029
9	0,121	0,096	0,077	0,062	0,052	0,029
10	0,122	0,095	0,072	0,063	0,053	0,031
Průměr	0,121	0,096	0,077	0,063	0,052	0,030

Tabulka XV. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 50%(15W)

č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,144	0,115	0,100	0,089	0,063	0,050
2	0,143	0,115	0,103	0,092	0,067	0,048
3	0,147	0,113	0,099	0,094	0,067	0,043
4	0,148	0,111	0,105	0,091	0,069	0,048
5	0,151	0,113	0,096	0,092	0,071	0,049
6	0,149	0,116	0,099	0,090	0,073	0,045
7	0,150	0,115	0,102	0,088	0,069	0,045
8	0,148	0,112	0,103	0,089	0,068	0,048
9	0,149	0,113	0,098	0,091	0,067	0,050
10	0,147	0,115	0,100	0,092	0,065	0,047
Průměr	0,148	0,114	0,101	0,091	0,068	0,047

Tabulka XVI. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60%(18W)

č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,172	0,141	0,117	0,101	0,075	0,058
2	0,175	0,142	0,120	0,106	0,074	0,061
3	0,177	0,139	0,115	0,107	0,072	0,063
4	0,177	0,138	0,123	0,107	0,071	0,062
5	0,175	0,138	0,113	0,109	0,072	0,059
6	0,174	0,137	0,118	0,106	0,073	0,057
7	0,173	0,135	0,115	0,103	0,071	0,059
8	0,175	0,136	0,110	0,101	0,075	0,062
9	0,176	0,138	0,121	0,103	0,073	0,064
10	0,174	0,137	0,120	0,106	0,074	0,062
Průměr	0,175	0,138	0,117	0,105	0,073	0,061

Tabulka XVII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 70%(21W)

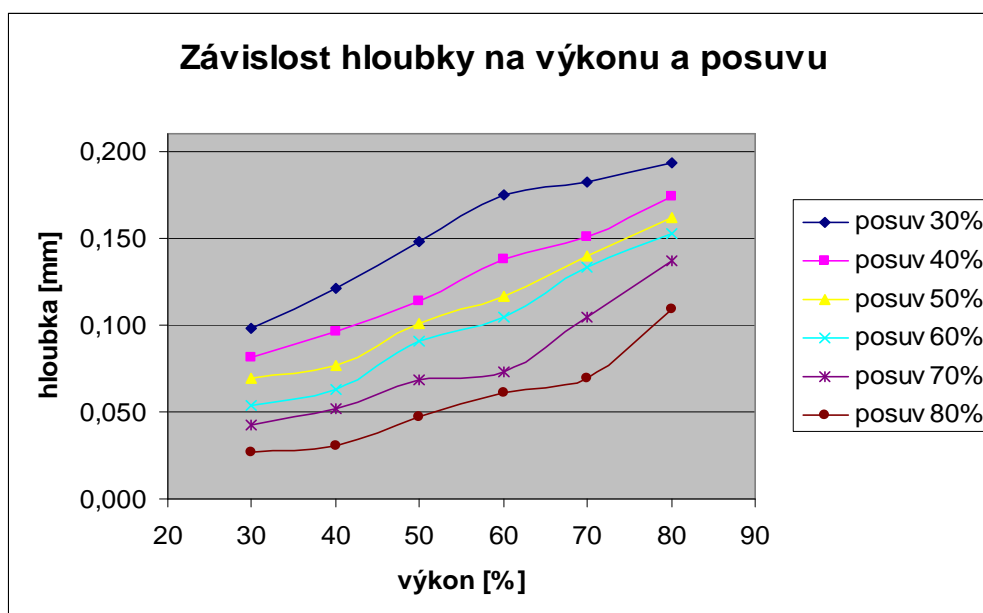
č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,181	0,149	0,141	0,135	0,099	0,072
2	0,182	0,151	0,136	0,132	0,102	0,070
3	0,183	0,154	0,139	0,134	0,104	0,068
4	0,184	0,155	0,143	0,132	0,107	0,069
5	0,185	0,153	0,144	0,136	0,107	0,069
6	0,183	0,149	0,145	0,133	0,109	0,071
7	0,184	0,147	0,138	0,128	0,106	0,072
8	0,182	0,150	0,137	0,132	0,104	0,069
9	0,180	0,152	0,138	0,133	0,103	0,068
10	0,179	0,154	0,142	0,136	0,106	0,065
Průměr	0,182	0,151	0,140	0,133	0,105	0,069

Tabulka XVIII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% (24W)

č.měření	posuv [%],(mms ⁻¹)					
	30(319,8)	40(426,4)	50(533)	60(639,6)	70(746,2)	80(852,8)
1	0,197	0,166	0,161	0,153	0,134	0,106
2	0,195	0,170	0,164	0,154	0,136	0,109
3	0,195	0,173	0,161	0,156	0,138	0,111
4	0,194	0,174	0,162	0,152	0,141	0,112
5	0,191	0,177	0,160	0,150	0,139	0,109
6	0,192	0,178	0,162	0,155	0,138	0,108
7	0,191	0,178	0,165	0,154	0,135	0,109
8	0,193	0,173	0,161	0,154	0,135	0,107
9	0,194	0,172	0,159	0,151	0,138	0,106
10	0,191	0,174	0,160	0,153	0,136	0,108
Průměr	0,193	0,174	0,162	0,153	0,137	0,109

Tabulka XIX. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku

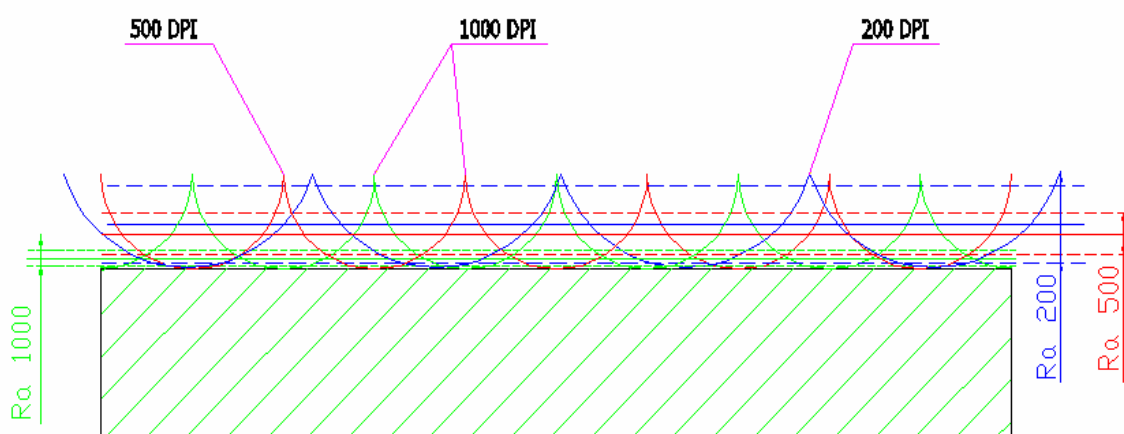
	posuv [%], (mms ⁻¹)	výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
	30 (319,8)	0,098	0,121	0,148	0,175	0,182	0,193
	40 (426,4)	0,081	0,096	0,114	0,138	0,151	0,174
	50 (533)	0,069	0,077	0,101	0,117	0,140	0,162
	60 (639,6)	0,054	0,063	0,091	0,105	0,133	0,153
	70 (746,2)	0,043	0,052	0,068	0,073	0,105	0,137
	80 (852,8)	0,027	0,030	0,047	0,061	0,069	0,109



Obr. 25. Graf závislosti hloubky obroběné plochy na výkonu a posuvu

8 ZHODNOCENÍ VLIVU ZMĚNY DPI NA JAKOST OBRÁBĚNÉ PLOCHY

Při obrábění materiálu laserem, má na kvalitu obrobenej plochy vliv více faktorů, jako např. výkon laseru, mód laseru, průměr laserového paprsku atd. Jedním z těchto faktorů je i nastavení DPI (drah hustoty paprsku). V této části se budeme zabývat zkoumáním rozdílů jakosti obráběné plochy při DPI 1000, 500 a 200. DPI v tomto případě udává počet drážek, které laserový paprsek vytvoří na dráze o délce 1" (25,4mm). Předpokladem tedy je, že drsnost obráběného povrchu by měla být nejnižší při rozlišení 1000DPI a s narůstajícím DPI by měla stoupat i hodnota drsnosti, což můžeme názorně vidět na (Obr. 26).



Obr. 26. Rozdíl drsností materiálu při změně nastavení rozlišení

Při zvýšení rozlišení dojde k odstranění vrcholů mezi jednotlivými drahami, které laserový paprsek vypaluje do obráběného materiálu. Tím dojde ke snížení výsledné drsnosti povrchu. Teoreticky by se také měla zvětšit hloubka obrobenej ploch. Při experimentu byly všechny 3 matice s různými rozlišeními obrobenej ve stejné desce z materiálu PMMA, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků změnou chemické struktury nebo zpracováním desky. Následující grafy ukazují rozdíly hloubky a drsnosti při různém nastavení DPI. Pro lepší přehlednost byli vybrány vždy 3 křivky posuvů při konstantním výkonu od každého rozlišení.

8.1 Srovnání drsnosti

Tabulka XX. Drsnost Ra v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI

		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	19,18	21,21	22,97	24,11	24,21	23,23
	40 (426,4)	19,22	24,43	18,15	21,49	21,98	22,32
	50 (533)	18,15	20,46	20,23	23,39	22,15	24,03
	60 (639,6)	12,37	14,72	17,13	17,11	19,68	19,30
	70 (746,2)	14,33	14,34	16,94	18,13	18,47	19,74
	80 (852,8)	12,12	13,63	16,82	16,28	17,38	18,53

Tabulka XXI. Drsnost Rz v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI

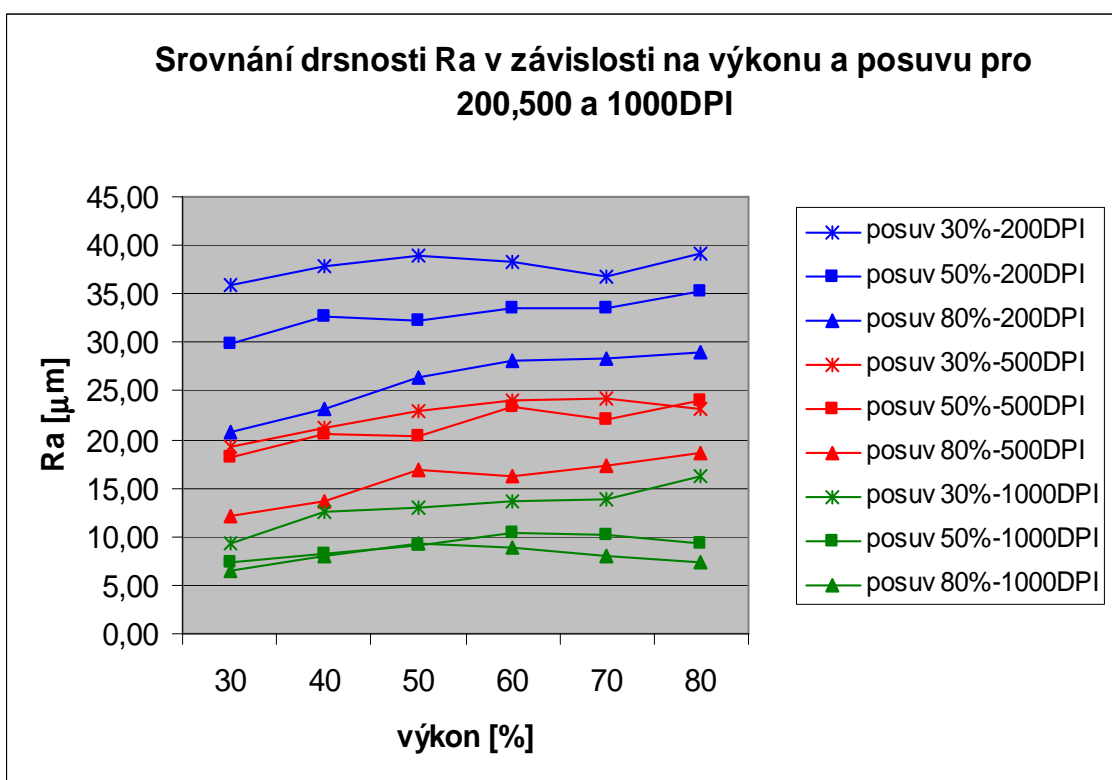
		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	102,13	116,08	124,31	130,25	124,71	135,50
	40 (426,4)	101,96	113,90	106,21	118,79	120,55	123,89
	50 (533)	89,30	106,65	108,35	125,61	126,80	126,60
	60 (639,6)	72,90	79,91	94,78	98,13	95,34	100,51
	70 (746,2)	78,20	89,29	96,88	98,35	113,44	108,36
	80 (852,8)	68,86	77,75	94,10	94,26	110,30	104,47

Tabulka XXIII. Drsnost Ra v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI

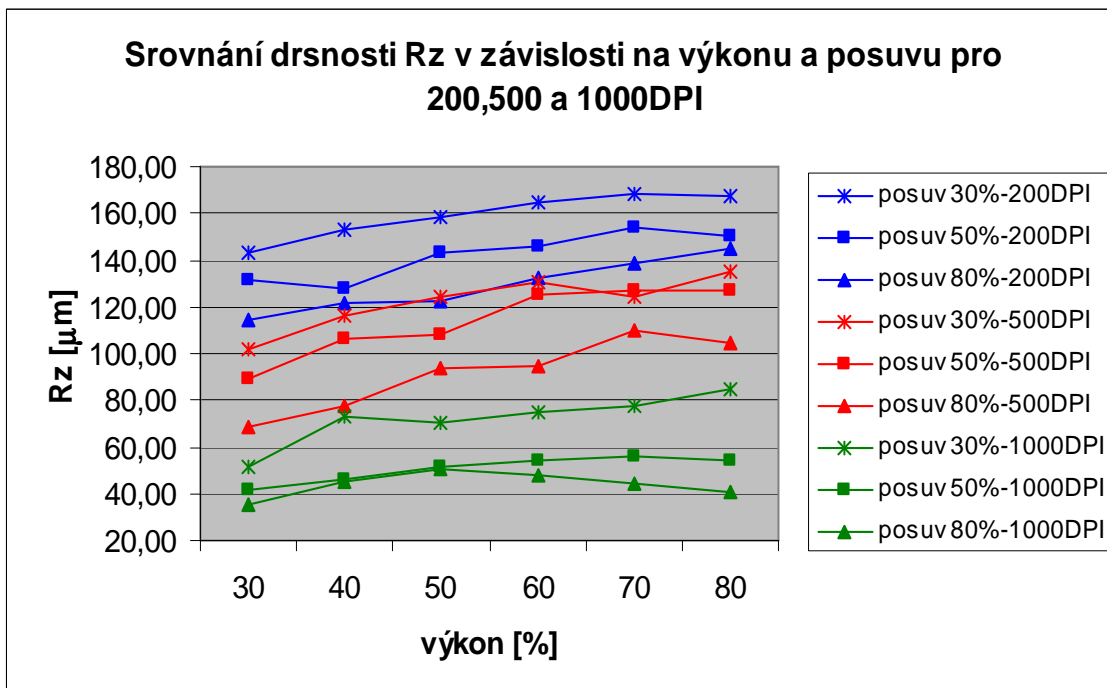
		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms ⁻¹)	30 (319,8)	9,33	12,59	13,06	13,63	13,75	16,24
	40 (426,4)	9,81	10,73	11,54	11,49	10,84	14,78
	50 (533)	7,33	8,19	8,99	10,34	10,07	9,30
	60 (639,6)	7,02	8,72	9,49	9,14	9,98	9,50
	70 (746,2)	6,69	8,16	11,67	10,13	8,80	9,27
	80 (852,8)	6,44	8,01	9,28	8,84	8,08	7,36

Tabulka XXIV. Drsnost Rz v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI

		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%],(mms-1)	30 (319,8)	51,64	72,62	70,22	75,17	77,85	84,66
	40 (426,4)	52,81	59,43	63,81	63,23	59,93	78,73
	50 (533)	41,14	46,03	51,07	54,33	56,23	53,87
	60 (639,6)	39,24	46,44	53,07	49,78	57,11	53,38
	70 (746,2)	36,82	44,30	64,76	51,86	48,22	48,22
	80 (852,8)	35,23	44,84	50,14	47,52	44,35	40,53



Obr. 27. Srovnání drsnosti Ra v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení



Obr. 28. Srovnání drsnosti Rz v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení

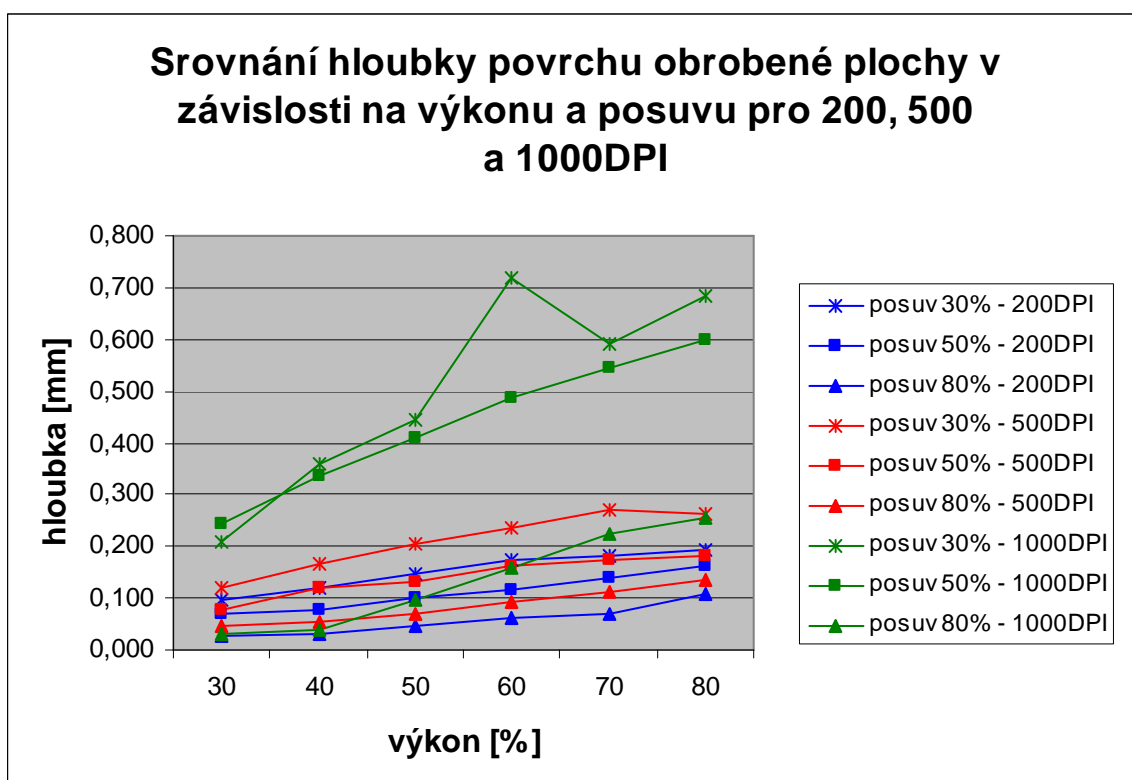
8.2 Srovnání hloubky povrchu obrobene plochy

Tabulka XXII. Hloubka v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI

		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%], (mms ⁻¹)	30 (319,8)	0,121	0,167	0,203	0,237	0,269	0,263
	40 (426,4)	0,086	0,135	0,141	0,182	0,216	0,228
	50 (533)	0,078	0,121	0,133	0,162	0,172	0,183
	60 (639,6)	0,055	0,077	0,091	0,106	0,128	0,137
	70 (746,2)	0,051	0,058	0,063	0,087	0,119	0,128
	80 (852,8)	0,045	0,056	0,069	0,092	0,113	0,135

Tabulka XXV. Hloubka v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI

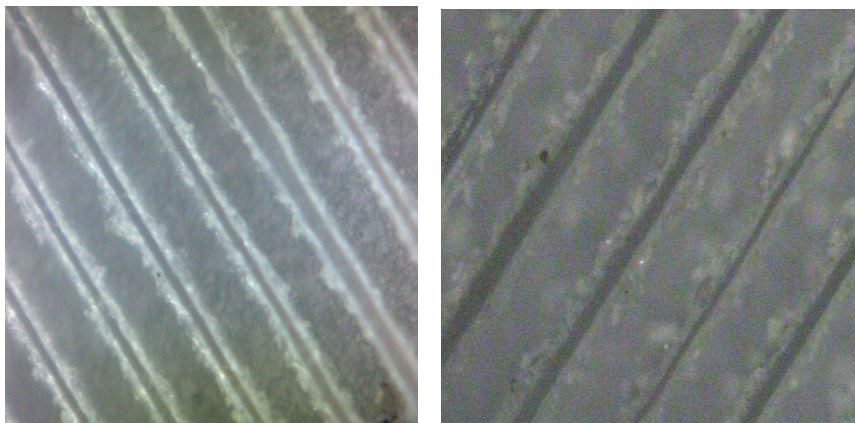
		výkon [%],(W)					
		30(9)	40(12)	50(15)	60(18)	70(21)	80(24)
posuv [%], (mms ⁻¹)	30 (319,8)	0,210	0,361	0,444	0,720	0,592	0,685
	40 (426,4)	0,187	0,292	0,451	0,541	0,601	0,667
	50 (533)	0,245	0,338	0,411	0,487	0,547	0,598
	60 (639,6)	0,332	0,112	0,188	0,305	0,258	0,369
	70 (746,2)	0,008	0,073	0,125	0,202	0,258	0,317
	80 (852,8)	0,029	0,037	0,096	0,158	0,226	0,255



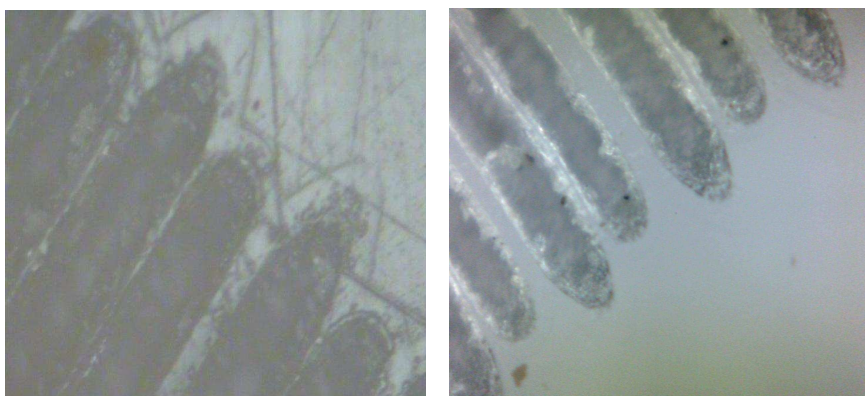
Obr. 29. Srovnání hloubky v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení

Dále byly pro grafické porovnání vybrány 4 mezní hodnoty. Tyto hodnoty byly pomocí metalografického mikroskopu a mikrokamery ProScope zvětšeny a zdokumentovány. Dva přístroje byly použity pro lepší grafické srovnání. U každého rozlišení, byla u těchto 4 polí zdokumentována struktura uprostřed pole a okraj pole.

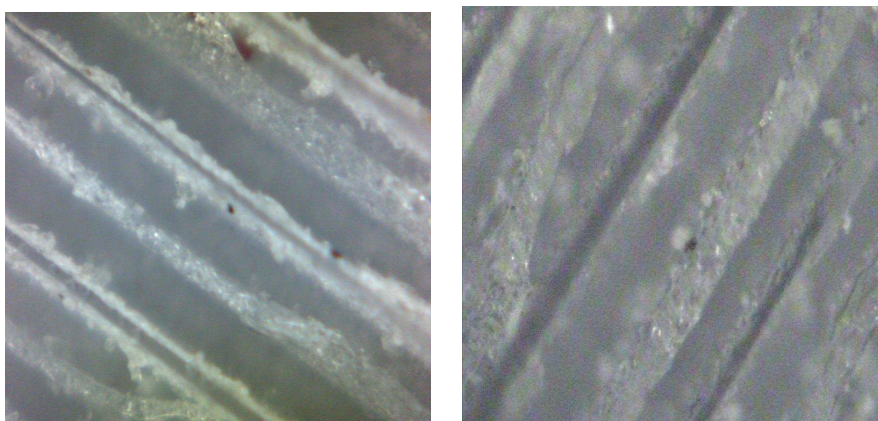
8.3 Grafické zhodnocení rozdílů struktury



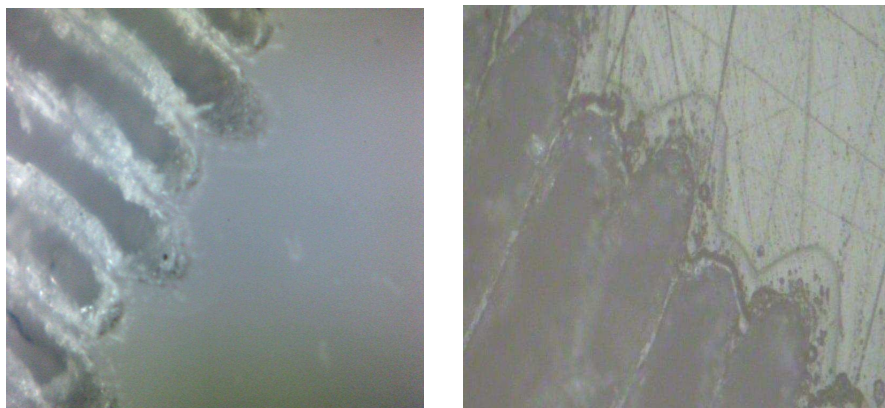
Obr. 30. Rozlišení **200DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



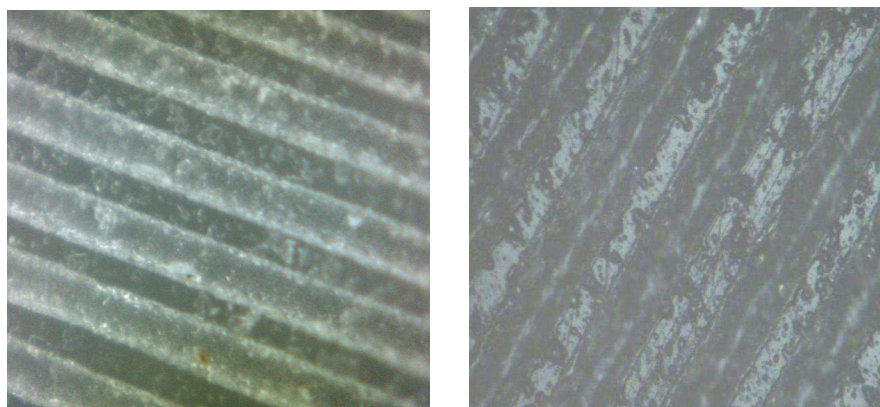
Obr. 31. Rozlišení **200DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura okraje



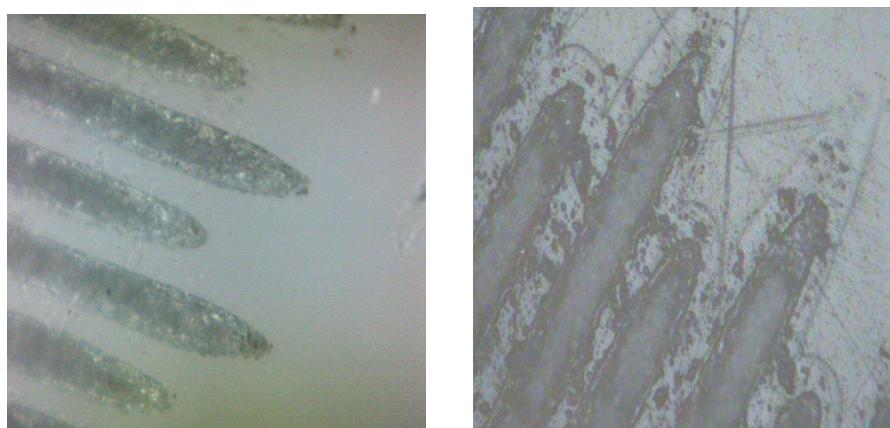
Obr. 32. Rozlišení **200DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



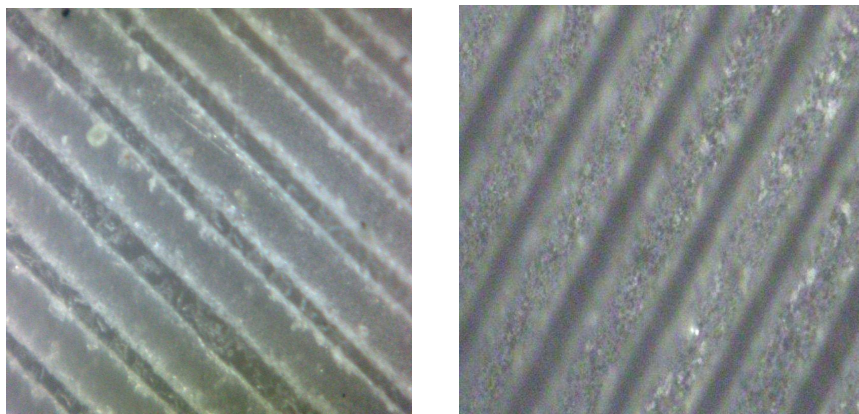
Obr. 33. Rozlišení **200DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura okraje



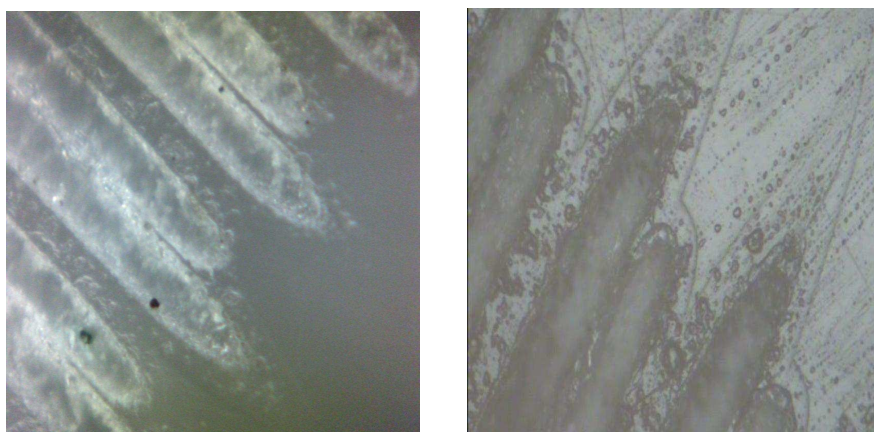
Obr. 34. Rozlišení **200DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



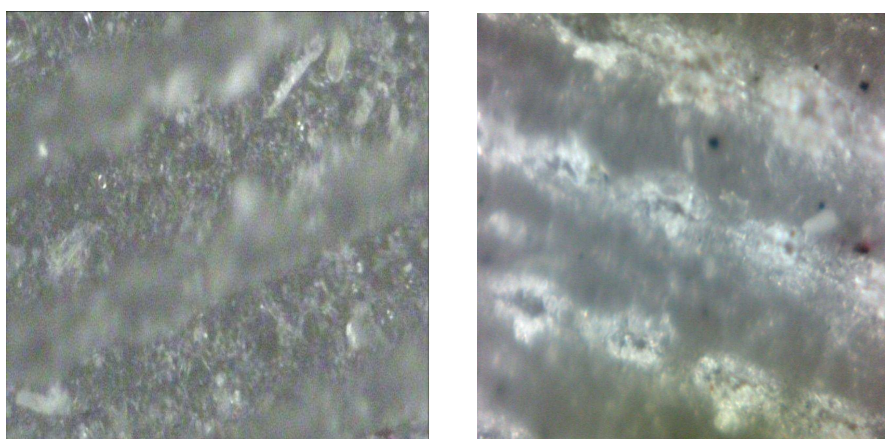
Obr. 35. Rozlišení **200DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura okraje



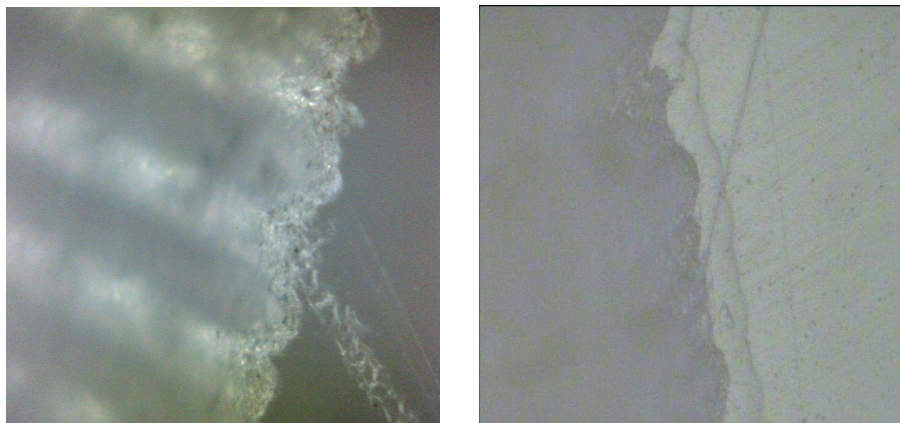
Obr. 36. Rozlišení **200DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



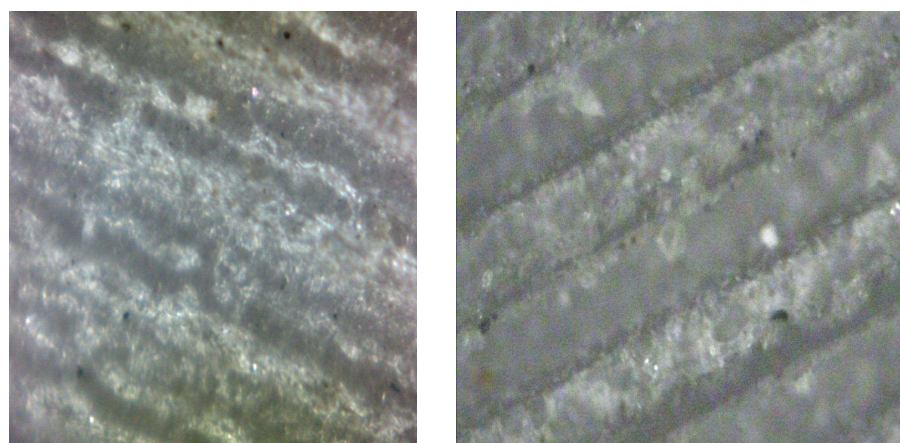
Obr. 37. Rozlišení **200DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura okraje



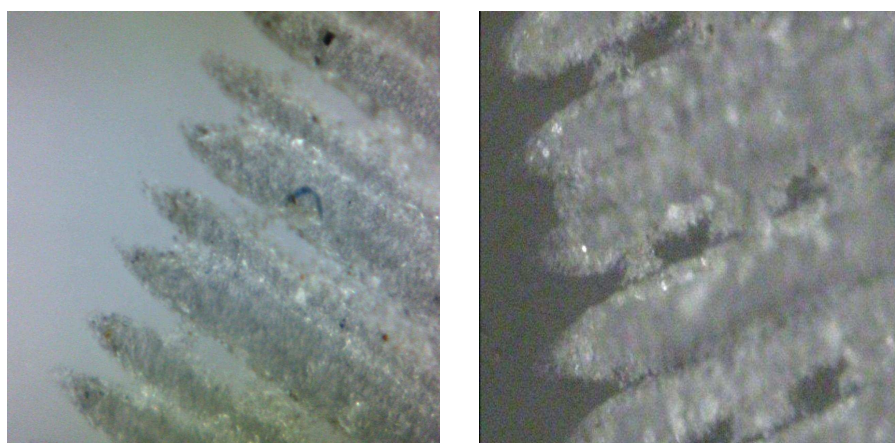
Obr. 38. Rozlišení **500DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



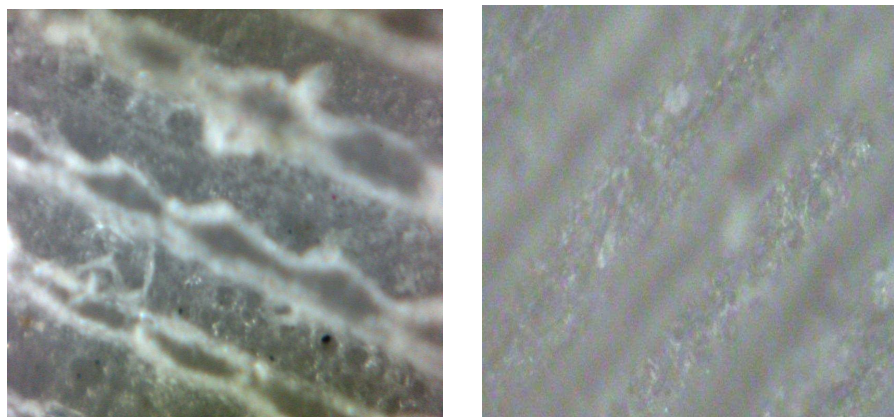
Obr. 39. Rozlišení **500DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura okraje



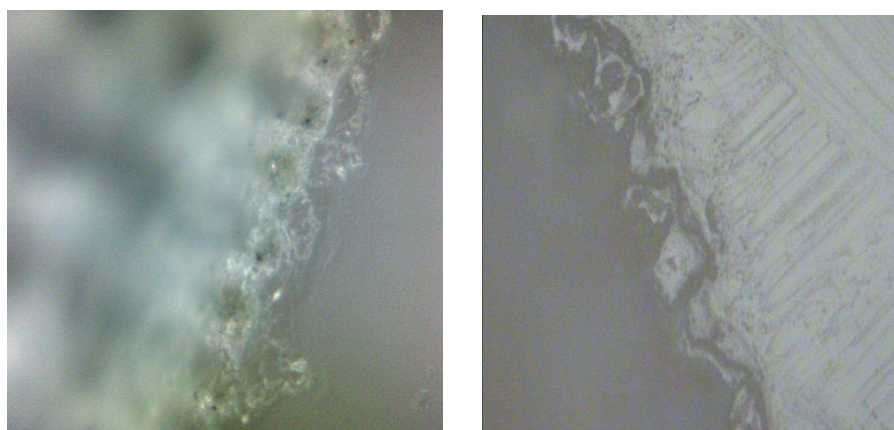
Obr. 40. Rozlišení **500DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



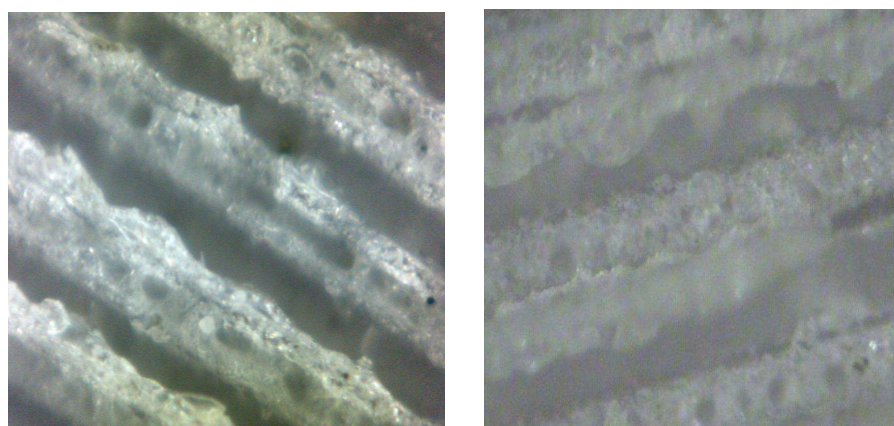
Obr. 41. Rozlišení **500DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura okraje



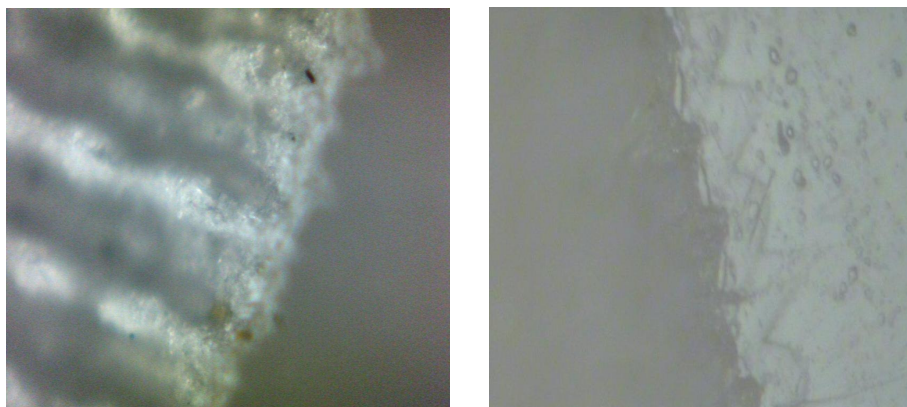
Obr. 42. Rozlišení **500DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



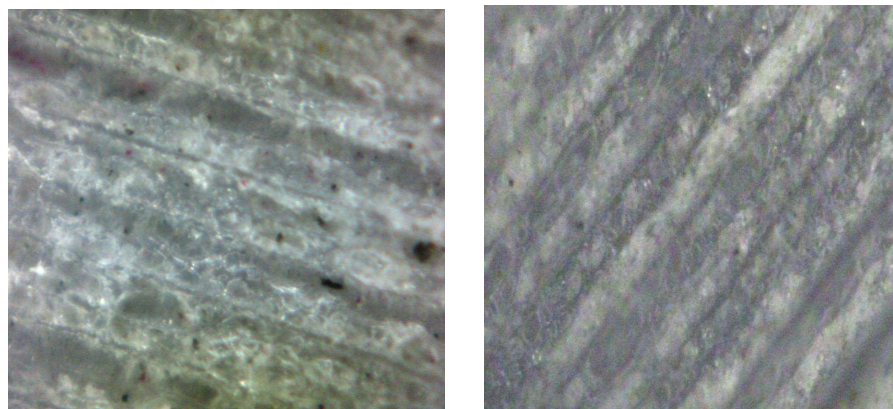
Obr. 43. Rozlišení **500DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura okraje



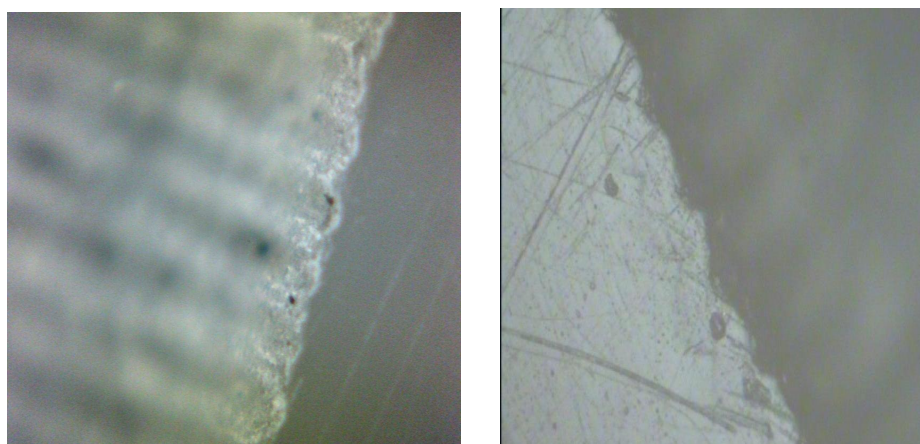
Obr. 44. Rozlišení **500DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



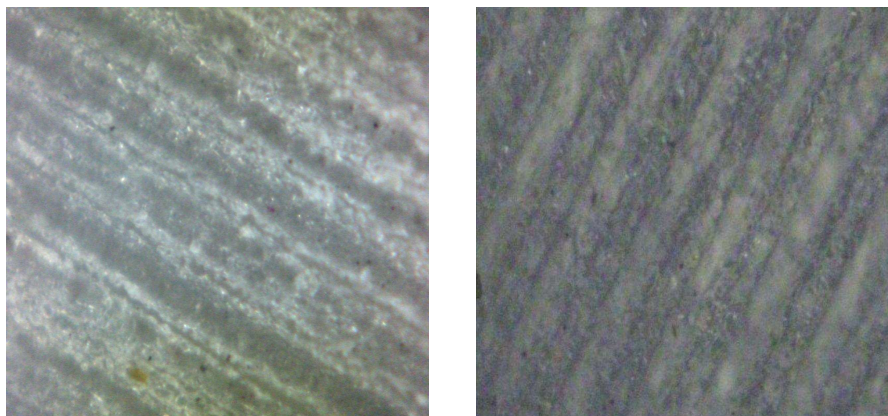
Obr. 45. Rozlišení **500DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura okraje



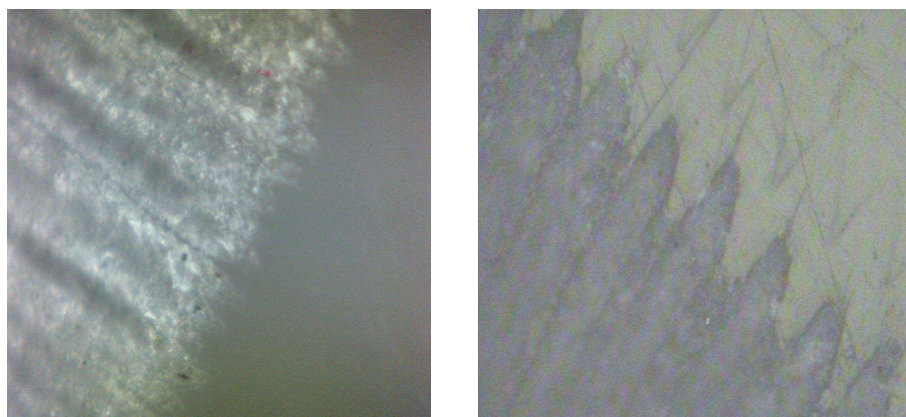
Obr. 46. Rozlišení **1000DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



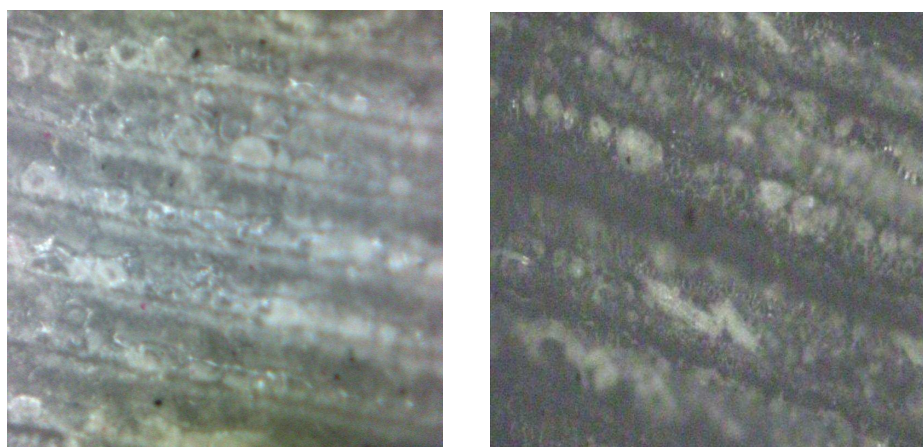
Obr. 47. Rozlišení **1000DPI**, výkon **30%**, posuv **40%** - struktura okraje



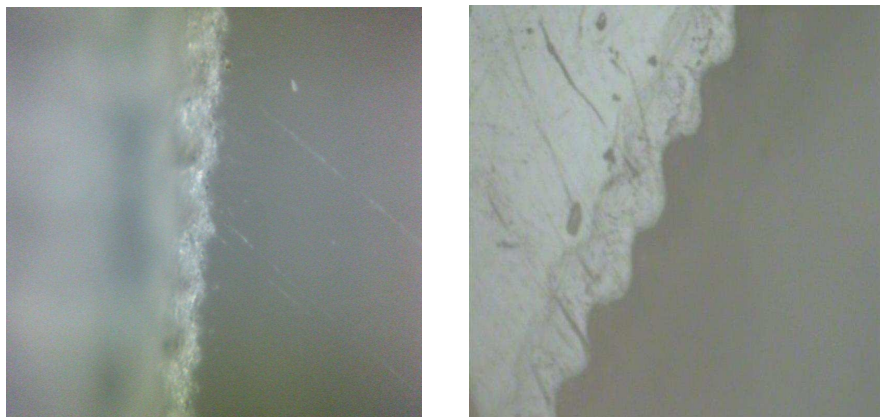
Obr. 48. Rozlišení **1000DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



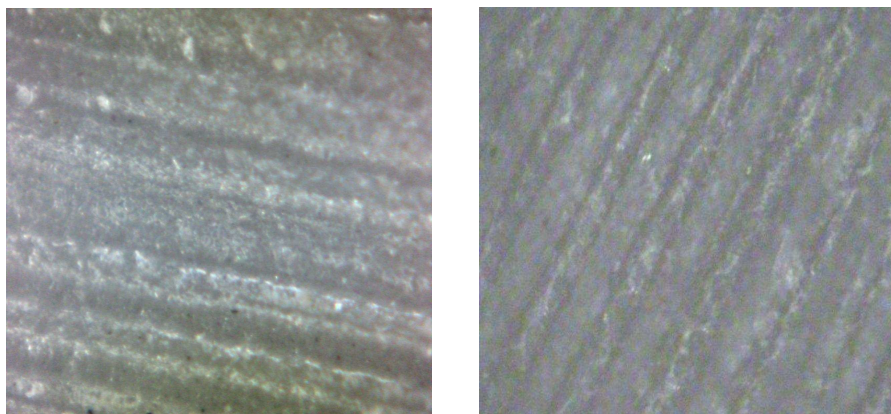
Obr. 49. Rozlišení **1000DPI**, výkon **30%**, posuv **80%** - struktura okraje



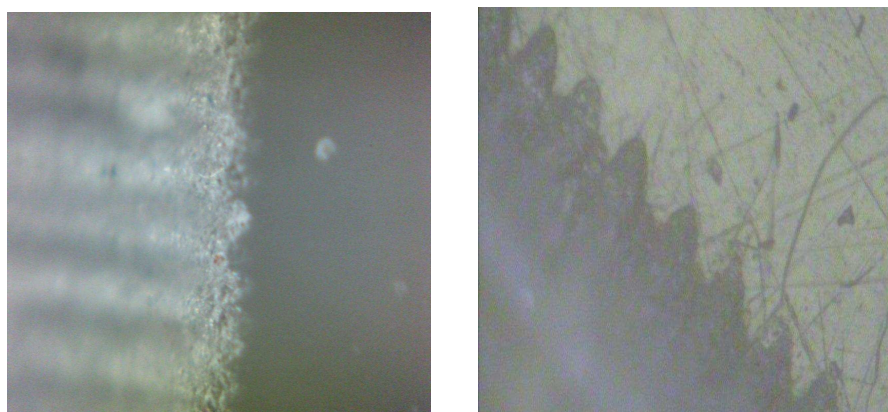
Obr. 50. Rozlišení **1000DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura uprostřed



Obr. 51. Rozlišení **1000DPI**, výkon **80%**, posuv **40%** - struktura okraje



Obr. 52. Rozlišení **1000DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura uprostřed



Obr. 53. Rozlišení **1000DPI**, výkon **80%**, posuv **80%** - struktura okraje

9 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Důvodem využití technologie mikroobrábění laserem v průmyslu, jsou jeho nesporné výhody při zvýšení produktivity práce a větší přesnosti obrábění. Dalšími výhodami jsou také lepší pracovní podmínky (nehlučný provoz), úspora pracovních sil a výrobních ploch.

Cílem této práce je provést zhodnocení vlivu změny technologických parametrů na kvalitu obrobené plochy. V předešlé kapitole byl popisován rozdíl v jakosti obrobené plochy při změně nastavení hustoty drah laseru. Tyto rozdíly nastavení se projevují i po ekonomické stránce. Například pokud je laser nastaven pro obrábění v nejvyšší kvalitě, trvá celý pracovní cyklus podstatně déle, což má za následek vyšší spotřebu energie a pro obsluhu stroje větší časovou náročnost. Z toho plyne předpoklad, že při změně nastavení rozlišení laseru se budou měnit také náklady na práci a obsluhu stroje. Jakým způsobem se budou tyto náklady lišit při jednotlivých nastaveních DPI, je předmětem následujícího ekonomického zhodnocení.

9.1 Náklady na jednu hodinu práce stroje s obsluhou

Vstupní parametry :

- pořizovací cena stroje Kč 750 000,- (odpisová skupina 1)
- mzda pracovníka 100,- Kč/h
- výrobní režie 40,- Kč/h
- zisk 5 %
- pracovní dny za rok 253
- dvousměnný provoz, tj. 16 hodin
- paušální částka za návrh Kč 500,-
- použití rovnoměrného odpisování

Tabulka XXVI. Sazby pro rovnoměrné odpisování [3]

Odpisová skupina	Sazba v prvním roce odepisování	Sazba v dalších letech odepisování
1	20	40

- Výpočet:

Odpis v 1. roce..... $(750\ 000/100)20 = 150\ 000,-$ Kč

Odpis v 2. roce..... $(750\ 000/100)40 = 300\ 000,-$ Kč

Odpis ve 3. roce..... $(750\ 000/100)40 = 300\ 000,-$ Kč

- Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou v 1. roce:

Odpis v 1. roce/pracovní dny za rok = $150\ 000/253 = 593$ Kč/den

Hodinová práce stroje za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda zaměstnance = $593/16 + 100 = 137$ Kč/h

- Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou ve 2. roce:

Odpis ve 2. roce/pracovní dny za rok = $300\ 000/253 = 1186$ Kč/den

Hodinová práce stroje za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda zaměstnance = $1186/16 + 100 = 174$ Kč/h

- Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou ve 3. roce:

Odpis ve 2. roce/pracovní dny za rok = $300\ 000/253 = 1186$ Kč/den

Hodinová práce stroje za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda zaměstnance = $1186/16 + 100 = 174$ Kč/h

Průměrná hodnota hodinové práce stroje s obsluhou: 162 Kč/h

- Celková hodinová práce (tj. stroj + obsluha, výrobní režie, zisk):

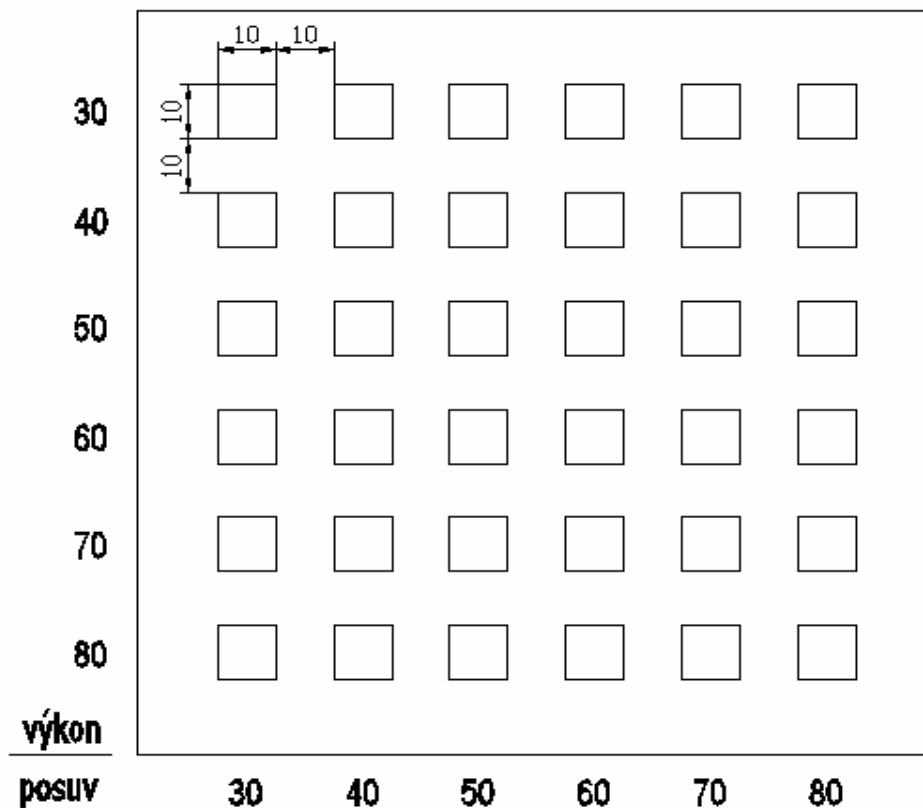
Průměrná hodinová práce stroje + výrobní režie = $162 + 40 = 202$ Kč/h

Zisk (5 %) z hodnoty 202 = 10 Kč

Celková hodinová práce (bez materiálu) = $202 + 10 = \underline{212}$ Kč

9.2 Výpočet ceny navržené mikrostruktury

Při obrábění mikrostruktury z (Obr.54), laser při obrábění pole 10x10 mm projede každou drážku 2x. To znamená, že pro vytvoření jedné drážky urazí dráhu 20mm.



Obr. 54. Schéma navržené mikrostruktury

Je patrné, že náklady pro obrobení matice polí se budou lišit s každým nastavením hustoty drah laseru. Proto nyní provedeme výpočet pro každé rozlišení zvlášť.

9.2.1 Výpočet ceny obrábění při rozlišení 200DPI

Vstupní parametry :

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 200
- maximální rychlost posuvu je 1066 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 212 Kč,-

Výpočet času potřebného k obrobení jednoho pole při posuvu 80% :

- výpočet posuvu $0,8 \cdot 1066 = 852,8 \text{ mms}^{-1}$
- počet drah v poli $\left(\frac{200}{25,4}\right) \cdot 10 = 78,7x$
- délka dráhy laseru $20 \cdot 78 = 1560$
- čas potřebný k obrobení $\frac{1560}{852,8} = \underline{\underline{1,83s}}$

Tabulka XXVII. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80(852,8)	1,83
70(745,2)	2,09
60(639,6)	2,44
50(533)	2,93
40(426,4)	3,66
30(319,8)	4,88
Celkem	17,83

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony :

$$17,83 \cdot 6 = 106,98 = 107 \text{ s} = \underline{\underline{0,0297 \text{ hod.}}}$$

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury :

$$212 \cdot 0,0297 = \underline{\underline{6 \text{ Kč}}}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$\text{paušální částka} + \text{základní cena: } 500 + 6 = \underline{\underline{506 \text{ Kč,-}}}$$

9.2.2 Výpočet ceny obrábění při rozlišení 500DPI

Vstupní parametry :

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 500
- maximální rychlost posuvu je 1066 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 212 Kč,-

Tabulka XXVIII. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80(852,8)	4,60
70(745,2)	5,26
60(639,6)	6,13
50(533)	7,36
40(426,4)	9,19
30(319,8)	12,26
Celkem	44,80

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony :

$$44,8 \cdot 6 = 268,8 = 269 \text{ s} = \underline{\underline{0,0747 \text{ hod.}}}$$

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury :

$$212 \cdot 0,0747 = \underline{\underline{16 \text{ Kč}}}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$500 + 16 = \underline{\underline{516 \text{ Kč,-}}}$$

9.2.3 Výpočet ceny obrábění při rozlišení 1000DPI

Vstupní parametry :

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 1000
- maximální rychlost posuvu je 1066 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 212 Kč,-

Tabulka XXIX. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80(852,8)	9,22
70(745,2)	10,55
60(639,6)	12,29
50(533)	14,75
40(426,4)	18,43
30(319,8)	24,58
Celkem	89,82

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony :

$$89,82 \cdot 6 = 538,9 = 539 \text{ s} = \underline{0,15 \text{ hod.}}$$

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury :

$$212 \cdot 0,15 = \underline{32 \text{ Kč}}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$500 + 32 = \underline{\underline{532 \text{ Kč,-}}}$$

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

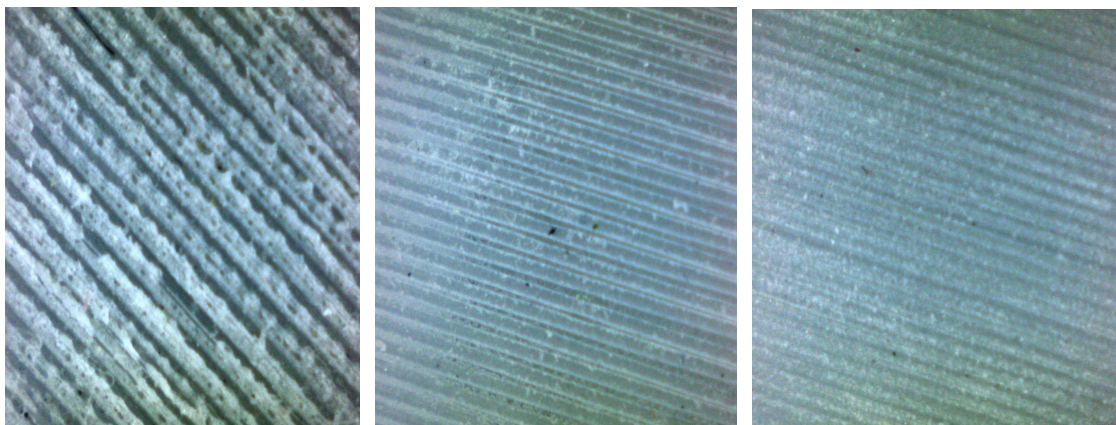
Experimentální část prokázala, že vliv změny nastavení technologických parametrů laseru má na kvalitu obráběné plochy zkušebního vzorku značný vliv. Při změnách výkonu a posuvu se nemění pouze hloubka obrobené drážky, ale dochází také k výrazné změně povrchu obrobené plochy. Stejně tak při změně nastavení rozlišení laseru vznikají rozdíly v kvalitě a hloubce obráběného povrchu.

10.1 Měření drsnosti povrchu a hloubky drážky

Při měření drsnosti byl potvrzen předpoklad, že při zvyšujícím se výkonu a snižujícím se rychlostí posuvu laserového paprsku roste hodnota hloubky obrobené plochy a také se zvyšuje povrchová drsnost. V některých případech se drsnost nebo hloubka plochy nezvyšuje lineárně s přibývajícím výkonem. To může být způsobeno nepřesností měření či nedokonalou homogenitou materiálu.

10.2 Zhodnocení vlivu změny DPI na kvalitu obrobené plochy

Změna hustoty drah laseru má také významný podíl na výsledné drsnosti a kvalitě povrchu. S přibývajícím počtem drah na stejnou délkovou jednotku se snižuje drsnost obrobené plochy, ale roste její hloubka. Tento fakt je zapříčiněn tím, že při vytváření drážek, zůstává mezi těmito drážkami neobrobený materiál a to se v příčném řezu jeví jako vrcholky nerovností (viz Obr.26.). Na těchto vrcholcích je možnost také ulpívání materiálu, který nebyl laserovým paprskem odpařen a tento jev také zhoršuje kvalitu obrobené plochy. Při zvýšení DPI se tyto vrcholky podstatně snižují a tím klesá drsnost obráběné plochy a roste kvalita obrobení povrchu. Rozdíl mezi počtem drah je po zvětšení dobře patrný i pouhým okem, jak můžeme vidět na obrázku (Obr.55). Tento obrázek znázorňuje plochu PMMA obrobenou při výkonu laseru 80%(24kW) a rychlosti posuvu 80%(852,8 mms⁻¹). V levé části obrázku je plocha obrobená při rozlišení 200DPI, uprostřed při 500DPI a vpravo je plocha obrobená při 1000DPI.



Obr. 55. Závěrečné vizuální rozdělení struktury rozlišení 200, 500 a 1000DPI

Pro srovnání byly v experimentální části použity 3 hodnoty nastavení výkonu a posuvu pro každé ze 3 rozlišení paprsku laseru. Z grafů, na obrázcích 27 a 28, sestavených pomocí těchto hodnot vyplývá, že hodnota drsnosti skutečně stoupá se snižující se hodnotou posuvu a počtem hustoty drah. To znamená, že nejnižší drsnost povrchu mělo pole s 1000DPI a 80% posuvem a naopak nejvyšší drsnost mělo pole s 200DPI a 30% posuvem. Z grafu srovnání hloubky povrchu obrobenej plochy, který je na obrázku 29 lze vyčíst, že pro rozlišení 200 a 500DPI není patrný tak velký rozdíl hloubky jako pro 500 a 1000DPI. Pro tento případ má největší hloubku pole s rozlišením 1000DPI a posuvem 30%.

Ekonomické zhodnocení prokázalo, že změna rozlišení DPI se také projeví v nákladech na výrobu dané mikrostruktury. Pro mikrostrukturu obrobenu při 200DPI byla základní cena na výrobu 6 Kč, při rozlišení 500DPI byla ta samá struktura 16 Kč a při 1000DPI byla tato cena 32 Kč. Rozdíl mezi námi zadanými mikrostrukturami není tak značný, ale i přesto je mezi obrábění při rozlišení 200DPI a 1000DPI rozdíl 1/5 ceny. A tato skutečnost by se mohla při obrábění složitějších struktur negativně odrazit v nákladech firmy.

Výsledkem práce je tedy potvrzení předpokladu, že při obrábění při rozlišení 1000DPI je výsledkem kvalitnější povrch obrobenej plochy o menší drsnosti a větší hloubce, ale také za podstatně vyšší náklady než je to u rozlišení 200DPI.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byl zkoumán vliv změny nastavení rozlišení laserového paprsku na výslednou jakost obrobeného povrchu. V teoretické části této práce bylo provedeno rozlišení hlavních druhů progresivních technologií, popsán základní princip laseru, rozdělení laserů podle příslušných kategorií a využití laseru v současných vědních odvětvích. Dále pak byla uvedena charakteristika a vlastnosti materiálu PMMA z něhož byl vyroben zkušební vzorek pro tuto práci. Náplní praktické části byla vlastní výroba mikrostruktury na laserovém pracovišti ve firmě PV Mechanika a dále pak vyhodnocení hloubky a drsnosti jednotlivých polí našeho zkušební vzorku, jenž byl obroben při rozlišení 200DPI. Následně pak byly porovnány rozdíly s povrchy vzorků obrobenými při 500 a 1000DPI. Ekonomický rozbor potvrdil předpoklad, že při různých druzích nastavení DPI dochází i ke změně nákladů na jejich obrobění.

Výsledky prokázaly, že při změně DPI dochází ke změně kvality a hloubky obroběné plochy, ale také v nákladech na výrobu dané struktury. Při obrábění s rozlišením 200DPI je drsnost povrchu podstatně větší ve srovnání s povrchem obrobeným při 1000DPI, ale také cena nákladů se zvýšila o 1/5. V praxi to znamená, že pokud bude nutno vyrobit strukturu s kvalitním povrchem, tak bude nejvhodnější použít rozlišení 1000DPI, za předpokladu, že náklady na výrobu základní struktury vzrostou o 1/5 ceny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [2] MAŇKOVÁ, I.: Progresivní technologie, Viena, Košice 2000
- [2] HUMÁR, A.: Technologie obrábění – 3.část, VUT Brno 2005
- [3] DOSEDĚLOVÁ, P.: Výzkum procesu laserového popisování polymerních materiálů – Diplomová práce, UTB, Zlín 2005
- [4] <http://www.konstrukce.cz/clanek/650-laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita>
- [5] <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [6] http://www.welding.cz/vyvoj/svar_98/98_2-4.htm
- [7] <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/node8.html>
- [8] PETROVÁ, L.: Optimalizace procesu laserového řezání plastů – Diplomová práce, UTB, Zlín 2005
- [9] HÁBOVČÍK, P.: Lasery a fotodetektory, Alfa, Bratislava 1990
- [10] ŽÍDEK, D.: Optimalizace vstupních parametrů pro laserové popisování desek knižních vazeb – Bakalářská práce, UTB, Zlín 2005
- [11] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o polymerech II, VUT Brno 1980
- [12] SUKUP, M.: Mikroobrábění polymerních materiálů na CO₂ laseru – Mechanika Prostějov – Diplomová práce, UTB, Zlín 2006
- [13] <http://www.mmspektrum.com/index.php?m=2&sub=5&rel=0607&idcl=060732>
- [14] <http://www.nanotechnologie.cz/index.php?1=1&s=122>
- [15] STRUMBAN, E.J., ŠTOLL, I.: Lasery a optoelektronika, Panorama, Praha 1989
- [16] http://technik.ihned.cz/c4-10002530-13608860-800000_d-soucasne-trendy-pouziti-laseru
- [17] <http://www.proscopehr.com>
- [18] HENDRYCHOVÁ, B.: Výzkum mikroobrábění polymerních materiálů laserem – Diplomová práce, UTB, Zlín 2003
- [19] Sochor V.: Lasery a koherentní svazky, Praha, ČSAV 1990
- [20] <http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DPI	rozlíšení (počet bodů - dráh na palec čtvereční)
ECM	elektrochemické obrábění
USM	ultrazvukové obrábění
LBM	technologie laserového paprsku
WJM	vodní paprsek
AJM	obrábění proudem brusiva
EDM	elektrojiskrové obrábění
EBM	obrábění elektronovým paprskem
PAM	obrábění plazmovým paprskem
CAD/CAM	computer-aided design/computer-aided manufacturing
DPI	rozlíšení (počet bodů - dráh na palec čtvereční)
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
PMMA	polymethylmetakrylát
Nd:YAG	Neodymem (Nd^{+3}) dopovaný yttrito-hlinitým granátem
$\text{TEM}_{m,n}$	Transverse Electromagnetic Mode – Mód laserového paprsku
SiO_2	oxid křemičitý
Al_2O_3	oxid hlinitý
T_m	teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
He:Ne laser	helium neonový laser
E	energie elektronu [J]
E_0	základní energetická hladina elektronu [J]
E_1	excitovaná energetická hladina elektronu [J]
s	rychlost posuvu [mms^{-1}], [%]

h	hloubka obrobené plochy [mm]
P	výkon [W], [%]
R_a	aritmetická úchylka profilu [μm]
R_z	maximální výška profilu [μm]
λ_s	filtr k potlačení vlnitosti
λ	Vlnová délka [μm]
a_0	poloměr svazku (radiální vzdálenost od osy svazku)
q	hustota energetického toku [GWm^{-2}]
CW	kontinuální vlnové záření
f	rezonanční frekvence záření [Hz]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozdíl mezi běžným zdrojem světla a světelným paprskem [2]	17
Obr. 2. Schematický princip laseru [2]	20
Obr. 3. Modální struktura paprsku [2]	21
Obr. 4. Kontinuální a pulsní režim provozu laseru [2]	22
Obr. 5. Schéma laseru s rubínovým monokrystalem [12].....	25
Obr. 6. Schéma pevnolátkového laseru s Nd-YAG krystalem [2].....	26
Obr. 7. Schéma laseru He-Ne [12].....	27
Obr. 8. Schéma klasického konstrukčního provedení CO ₂ laseru [12].....	28
Obr. 9. Princip laserového mikroobrábění [2]	34
Obr. 10. Princip laserového svařování [4]	36
Obr. 11. Schéma laserového řezacího přístroje [2].....	38
Obr. 12. Prostorový popis skla laserem	39
Obr. 13. Nuž označený laserovým gravitováním.....	40
Obr. 14. Matice obrobených plošek na PMMA desce	51
Obr. 15. Schéma obráběné mikrostruktury v programu Corel Draw	52
Obr. 16. CO ₂ Laser Merkury L-30	53
Obr. 17. Nastavení laseru pomocí programu Corel Draw.....	55
Obr. 18. Drsnoměr SJ 301 od firmy Mitutoyo	57
Obr. 19. Přístroj ProScope HR.....	58
Obr. 20. Metalografický mikroskop MOM6-M.....	59
Obr. 21. Tvar laserového paprsku v modu TEM ₀₀	61
Obr. 22. Příčný profil drsnosti po obrábění laserovým paprskem [12].....	61
Obr. 23. Graf závislosti drsnosti Ra na výkonu a posuvu.....	65
Obr. 24. Graf závislosti drsnosti Rz na výkonu a posuvu.....	66
Obr. 25. Graf závislosti hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu	69
Obr. 26. Rozdíl drsností materiálu při změně nastavení rozlišení	70
Obr. 27. Srovnání drsnosti Ra v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení	72
Obr. 28. Srovnání drsnosti Rz v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení	73
Obr. 29. Srovnání hloubky v závislosti na výkonu, posuvu a změně rozlišení	74
Obr. 30. Rozlišení 200DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura uprostřed	75
Obr. 31. Rozlišení 200DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura okraje	75

Obr. 32. Rozlišení 200DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura uprostřed	75
Obr. 33. Rozlišení 200DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura okraje	76
Obr. 34. Rozlišení 200DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura uprostřed	76
Obr. 35. Rozlišení 200DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura okraje	76
Obr. 36. Rozlišení 200DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura uprostřed	77
Obr. 37. Rozlišení 200DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura okraje	77
Obr. 38. Rozlišení 500DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura uprostřed	77
Obr. 39. Rozlišení 500DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura okraje	78
Obr. 40. Rozlišení 500DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura uprostřed	78
Obr. 41. Rozlišení 500DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura okraje	78
Obr. 42. Rozlišení 500DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura uprostřed	79
Obr. 43. Rozlišení 500DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura okraje	79
Obr. 44. Rozlišení 500DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura uprostřed	79
Obr. 45. Rozlišení 500DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura okraje	80
Obr. 46. Rozlišení 1000DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura uprostřed	80
Obr. 47. Rozlišení 1000DPI, výkon 30%, posuv 40% - struktura okraje	80
Obr. 48. Rozlišení 1000DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura uprostřed	81
Obr. 49. Rozlišení 1000DPI, výkon 30%, posuv 80% - struktura okraje	81
Obr. 50. Rozlišení 1000DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura uprostřed	81
Obr. 51. Rozlišení 1000DPI, výkon 80%, posuv 40% - struktura okraje	82
Obr. 52. Rozlišení 1000DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura uprostřed	82
Obr. 53. Rozlišení 1000DPI, výkon 80%, posuv 80% - struktura okraje	82
Obr. 54. Schéma navržené mikrostruktury	85
Obr. 55. Závěrečné vizuální rozdělení struktury rozlišení 200, 500 a 1000DPI.....	90

SEZNAM TABULEK

Tabulka I. Základní vlastnosti materiálu PMMA [11].....	46
Tabulka II. Vlastnosti a parametry CO ₂ laseru Merkury L-30 [12]	54
Tabulka III. Technické parametry drsnoměru Surfrest SJ 301 [12].....	56
Tabulka IV. Technické parametry výškoměru LH – 600B[12]	57
Tabulka V. Technické parametry přístroje ProScope HR.....	58
Tabulka VII. Drsnost při konstantním výkonu 40%(12W).....	62
Tabulka VIII. Drsnost při konstantním výkonu 60%(18W)	63
Tabulka XI. Celková závislost drsnosti Ra na výkonu a posuvu laseru	65
Tabulka XII. Celková závislost drsnosti Rz na výkonu a posuvu laseru	66
Tabulka XIII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 30%(9W).....	67
Tabulka XIV. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40%(12W).....	67
Tabulka XV. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 50%(15W).....	68
Tabulka XVI. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60%(18W).....	68
Tabulka XVII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 70%(21W)	68
Tabulka XVIII. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80%(24W)	69
Tabulka XIX. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku	69
Tabulka XX. Drsnost Ra v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI.....	71
Tabulka XXI. Drsnost Rz v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI.....	71
Tabulka XXIII. Drsnost Ra v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI	71
Tabulka XXIV. Drsnost Rz v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI.....	72
Tabulka XXII. Hloubka v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 500DPI.....	73
Tabulka XXV. Hloubka v závislosti na výkonu a posuvu při rozlišení 1000DPI	74
Tabulka XXVI. Sazby pro rovnoměrné odpisování [3].....	84
Tabulka XXVII. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury.....	86
Tabulka XXVIII. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury	87
Tabulka XXIX. Doba potřebná k vyrobení mikrostruktury	88