

Kvalitativní a ekonomické aspekty laserového mikroobrábění při změnách vstupních parametrů

Bc. Ondřej Konopka

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Konopka**

Osobní číslo: **T12594**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Kvalitativní a ekonomické aspekty laserového mikroobrábění při změnách vstupních parametrů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studii na dané téma (CO2 lasery, modová struktura, rozlišení DPI)
2. Provedte experimentální obrábění vybraných polymerních materiálů při konstantních vstupních parametrech výkonu a posuvové rychlosti a změně rozlišení DPI 200, 500, 1000
3. Provedte měření hloubky řezu a statistické zpracování výsledků
4. Provedte ekonomický rozbor pro obrábění vzorků s rozdílným rozlišením

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucí práce

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

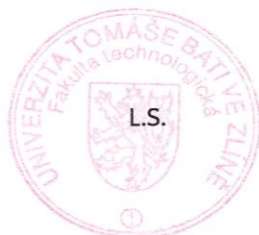
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 7.5.2014

Ondřej Konopka

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou technologie obrábění laserovým paprskem, charakteristiku a možností jeho využití. Práce je také zaměřena na oblast mikroobrábění v tomto případě materiálu PMMA a PP.

Experimentální část diplomové práce je směřována na obrábění desky z materiálu PMMA, PP, při rozlišení laseru 200DPI, při rozdílných technologických podmínkách. Následně je zhodnocena kvalita obrobeného povrchu při 200, 500 a 1000DPI.

V závěru práce je uvedena ekonomická analýza vlivu změn nastavení rozlišení při laserovém obrábění.

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

ABSTRACT

The thesis dissertation technology of laser ray machining is characteristics and use. The thesis also point at micro machining of PMMA and PP materials.

Experimental part of the thesis focuses on machining of PMMA, PP plate at laser resolution 200 DPI and different technological conditions. Afterwards the quality of the surface is at 200, 500, 1000 DPI.

In conclusion there is economic analysis of different resolution in laser machining.

Keywords: progressive technology, micro machining, DPI, PMMA, PP, laser

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

Na tomto místě bych chtěl poděkovat za odborné vedení a pomoc při zpracování této diplomové práce paní doc. Ing. Libuši Sýkorové Ph.D.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	13
1.1 KLASIFIKACE PROGRESIVNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění	14
1.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa.....	14
1.1.3 Podle předvídajícího mechanismu úběru materiálu	14
1.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PROGRESIVNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	15
1.2.1 Obrobitelnost materiálu.....	15
1.2.2 Tvarová komplexnost součástí	15
1.2.3 Automatizace výroby.....	15
1.2.4 Integrita povrchu a požadavku vysoké přesnosti.....	16
1.2.5 Miniaturizace dílců.....	16
2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY LASERŮ	17
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY Z KVANTOVÉ ELEKTRONIKY	17
2.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY TECHNOLOGICKÝCH LASERŮ.....	22
2.2.1 Princip Nd YAG a Nd laseru.....	22
2.2.2 Princip CO ₂ laseru.....	26
2.2.3 Princip diodového laseru.....	31
2.3 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY TECHNOLOGICKÝCH LASERŮ.....	33
2.3.1 Chemické lasery	33
2.3.2 Gazodynamické lasery.....	34
2.3.3 Excimerové lasery	36
2.3.4 Rentgenové lasery	36
2.3.5 Plazmové lasery.....	38
2.3.6 Gasery, phasery	39
3 APLIKACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ	40
3.1 APLIKAČNÍ MOŽNOSTI LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ	40
3.2 LASER JAKO UNIVERSÁLNÍ OBRÁBĚCÍ NÁSTROJ	42
3.2.1 Fotonové obrábění.....	42
3.2.2 Řezání.....	43
3.2.3 Vrtání.....	45
3.2.4 Svařování.....	46
3.2.5 Značkování a gravírování	47
3.2.6 Soustružení a dynamické vyvažování	48
3.2.7 Tepelné zpracování povrchu a vytváření povrchových vrstev	49
3.2.8 Laser pro účely metrologie a pokročilé měření geometrie	50
4 OBRÁBĚNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	51

4.1	SVAŘOVÁNÍ POLYMERŮ.....	51
4.2	VRTÁNÍ POLYMERU	51
4.3	ZNAČKOVÁNÍ A GRAVÍROVÁNÍ POLYMERŮ	52
4.4	DOKONČOVÁNÍ A ÚPRAVA POVRCHU POLYMERŮ.....	52
4.5	ŘEZÁNÍ POLYMERU A KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.....	52
4.5.1	Obrobitelnost plastů	52
4.5.2	Interakce polymerního materiálu s laserem.....	53
4.5.3	Metody řezání plastů laserem.....	54
5	POLYMERNÍ MATERIÁLY	56
5.1	ZÁKLADNÍ POJMY A ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	56
5.2	CHARAKTERISTIKY ZADANÝCH POLYMERŮ	57
5.2.1	PMMA (Polymethylmethakrylát).....	57
5.2.2	PP (Polypropylen)	59
6	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	62
II	PRAKTICKÁ ČÁST	63
7	POUŽITÉ PŘÍSTROJE PŘI MĚŘENÍ	64
7.1	MIKROSKOP LEICA DMI3000 M	64
7.2	LASER ILS 3NM.....	65
7.3	VÝŠKOMĚR PRO HODNOCENÍ HLOUBKY ŘEZU	67
7.4	MINOPROCESOR DP-1VR.....	68
8	CHARAKTERISTIKA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ	70
8.1	POLYMERNÍ VZORKY	70
8.2	PRÁCE NA LASERU, PŘÍPRAVA A POSTUP.....	71
9	NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA	75
9.1	POPIS MĚŘENÍ HLOUBKY	75
9.2	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	75
9.3	VYHODNOCENÍ STATISTICKÝCH PARAMETRŮ POMOCÍ BOX-PLOT DIAGRAMU.....	94
10	GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ROZDÍLU STRUKTURY	98
10.1	ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU PRO ZVĚTŠENÍ DVOUSETNÁSOBNÉ:.....	98
10.2	UKÁZKA ZOBRAZENÍ STRUKTURY POVRCHU PRO ZVĚTŠENÍ STONÁSOBNÉ POUŽITÉ MATERIÁLY PP, PMMA:	102
11	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	106
11.1	NÁKLADY NA JEDNU HODINU PRÁCE STROJE S OBSLUHOU.....	106
11.2	VÝPOČET CENY NAVRŽENÉHO VZORKU	108
	ZÁVĚR	113
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	115

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	116
SEZNAM OBRÁZKŮ	117
SEZNAM TABULEK.....	120

ÚVOD

Limitujícím faktorem úrovně strojírenské výroby je použitá technologie. Použitá technologie proto, že ona stanovuje nároky na spotřebu energie a určuje tedy energetickou náročnost výroby, spotřebu surovin a stupeň jejich využití. Také stanovuje funkční, užitkové, designové a komerční vlastnosti výrobků, a tím vlastně podmiňuje rozvoj celého počtu výrobních odvětví.

Technologie je soubor procesů, pravidel a návyků používaných při výrobě různých druhů výrobků v libovolné sféře výrobní činnosti. Uvádí se také, že technologie je vědní obor, odvětví lidských znalostí, kde se aplikují vědecké principy a praktické znalosti do fyzikální podstaty a systémů.

Současná úroveň výroby vyžaduje, aby aplikované materiály splňovaly ty nejnáročnější kritéria ať už z hlediska dlouhé životnosti, opotřebení či hlediska ekonomického. Vysoké požadavky na zpracování těchto materiálů jsme nuceni řešit aplikací nekonvenčních technologií, neboť klasické metody obrábění již často nesplňují požadavky kladené na rychlost a kvalitu zpracování. Proto se stále častěji setkáváme s metodami, které dovolují dosáhnout za kratší čas lepších výsledků. Přední místo mezi těmito technologiemi zaujímá nepochybně i laser [1].

Trendem budoucnosti je zmenšovat rozměry výrobků při zachování jejich užitných vlastností. Mezi množstvím metod, kterými je možné dosáhnout řádově mikrometrových rozměrů, má své velmi důležité postavení metoda mikroobrábění laserem. Tato technologie je vysoce přesná, rychlá, technologicky nenáročná, ekologická, s vysokou produktivitou výroby a efektivnosti. V tomto směru je laser díky svým vlastnostem optimální nástroj. Laserem lze obrábět téměř všechny druhy materiálů. Dosažitelné rozměry struktur závisí na laseru, parametrech laseru a materiálu. Nejmenší možné rozměry (pro struktury s velmi malou výškou) mohou být definovány na základě optického rozlišení, které je limitováno zdrojem laserového záření a optikou laseru - Nd:YAG 5 μm , excimer 0,5 μm [5].

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Název progresivní způsoby úběru materiálů se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů při úběru materiálů. Kvůli širokému spektru procesů se těžko zavádí stručná definice progresivních metod obrábění. V literatuře ale panuje shoda v tom, že do této skupiny patří procesy, které používají běžné formy energie novým způsobem nebo používají energie, která nebyla nikdy předtím použita.

Progresivních metod obrábění se využívá hlavně pro materiály, které jsou běžným mechanickým způsobem těžce obrobitelné nebo jsou neobrobitelné, jsou to např. Kompozitní materiály s kovovou maticí, monolitické a kompozitní keramické materiály, některé polymery apod. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich vysoké tvrdosti, křehkosti, nebo nevhodných tepelných vlastností, chemické reaktivity s řezným nástrojem.

Velkou výhodou při použití progresivních metod obrábění které používají k úběru materiálu jinou než mechanickou energii, je řešení problému s opotřebením nástrojů při obrábění.

Z hlediska opotřebenění nástrojů se vývoj progresivním metod ubírá dvěma směry:

1. Využívání elektrické, chemické a tepelné energie na podporu klasických metod obrábění s nástrojem jako geometrickým tělesem, které snižují intenzitu jeho opotřebenění.
2. Využívání elektrické, chemické a tepelné energie v soustředném energetickém svazku na opracování materiálu 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.

Dalšími důvody pro použití progresivních způsobů obrábění jsou také zvyšující se požadavky na přesnost, kvalitu, komplexnost tvaru, na dokončení povrchu atd. [2]

1.1 Klasifikace progresivních metod obrábění

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

1.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění

Dělení podle hlavního energetického zdroje úběru resp. podle použité energie je nejvíce rozšířené. Třídí jednotlivé technologie do hlavních skupin podle převládající energie, která je zdrojem úběru materiálů a to na:

- mechanické procesy
- chemické procesy
- elektrické nebo elektromechanické procesy
- tepelné nebo elektrotepelné procesy

1.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa

Dělení podle přítomnosti nástroje vychází ze směru vývoje technologií. Slovo nástroj je uvedeno 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 příčinou úběru materiálu, např. laserový nástroj. V tomto případě, ale nástrojem není tuhé geometrické těleso.
- nástroj jako tuhé geometrické těleso, které na rozdíl od klasické 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. Nástroj je jako podpůrného geometrického tělesa se používá v těchto procesech:
 - ultrazvukové obrábění
 - elektrochemické obrábění
 - elektrojiskrové obrábění

1.1.3 Podle předvídajícího 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. [2]

- procesy s tepelným účinkem na úběr materiálu: elektrojiskrové obrábění, laserové, plazmové a elektronové paprsky[2]

1.2 Základní charakteristiky progresivních technologií

Původně byly progresivní metody obrábění vyvinuté jako alternativní způsoby. V

současnosti představují v mnohých případech běžný způsob obrábění a v některých případech také jako jedinou možnost pro opracování daného materiálu. Jejich používání je podpořeno výhodami, mezi které patří:

1.2.1 Obrobitelnost materiálu

Tento pojem je charakteristický pro řezání a broušení materiálu a je založen na mechanických vlastnostech materiálů jako je tvrdost, pevnost a houževnatost. V případě progresivních metod obrábění ztrácí svůj význam. Důležitou úlohu zde hrají další vlastnosti jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, atomové číslo.

1.2.2 Tvarová komplexnost součástek

Zvyšující se požadavky na tvarovou složitost vyráběných dílců upřednostňují používání nových metod pro obrábění. Příkladem může být vrtání. Je snadné vyvrtat kruhový otvor konvenčním způsobem, ale čtvercový otvor nebo jiný nerotační tvar není možné zhotovit klasickým postupem. Zde se uplatňuje elektrojiskrové a elektrochemické obrábění.

1.2.3 Automatizace výroby

Automatizace výrobního systému a informační tok ve výrobním procesu redukuje výrobní časy, snižuje výrobní náklady atd. Tento aspekt účinně působí při použití NC a CNC strojů a zavádění CAD/CAM systémů do výroby s konečným vyústěním do počítačově integrované výroby CIM. Obecně platí, že zavádění progresivních metod obrábění do tohoto systému je jednodušší než u klasických metod obrábění. [2]

1.2.4 Integrita povrchu a požadavku vysoké přesnosti

Povrchy opracované řezáním nebo broušením vykazují stopy silného mechanického působení (zpevnění, povrchové napětí, mikronerovnosti...), které mohou mít nepříznivé účinky na užité vlastnosti obrobených povrchů. Také řezání a broušení materiálu jako je např. keramika nebo vláknové kompozity přináší řadu neřešitelných problémů. U těchto materiálů představují progresivní metody jedinou možnost opracování a dosažení požadovaného povrchu. Přesnosti úběru v oblasti atomových a molekulárních vrstev dokáže zabezpečit např. iontové a elektronové procesy.

1.2.5 Miniaturizace dílců

Trendy zmenšování rozměrů dílců zvyšují potřebu používání nových procesů, které umožňují úběr materiálů nejen v oblasti mikrorozměrů a dokonce úběr několika molekulárních a atomových vrstev. Ultra malé rozměry otvorů není možné vrtat běžnými technologiemi, ale technologie mikrochemického obrábění, obrábění svazkem elektronů a iontů řeší tyto problémy. Pro lepší představu jsou níže uvedeny charakteristiky jednotlivých progresivních technologií. [2]

2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY LASERŮ

2.1 Základní pojmy z kvantové elektroniky

V současně známém vesmíru jsou známy jen čtyři elementární síly:

- silná síla (díky níž drží pohromadě po hromadě elektricky neutrální neutron a kladně nabitý proton a tvoří tak atomové jádro),
- slabá síla (ta je naopak zodpovědná např. za β -rozpad jádra),
- gravitační síla a
- elektromagnetická síla.

Jediná síla, která má při vysvětlení principu funkce laseru reálný význam je síla elektromagnetická. To znamená, že naprosto veškeré děje, které probíhají při realizaci laserového efektu mají svůj základ v elektromagnetické interakci elektricky nabitých částic. Ve skutečnosti se obecným pojmem elektromagnetická interakce (nebo síla) chápe vysvětlení toho, jak je vlastně možné, že například elektron “ví o tom”, že má být v nějaké složité prostoročasové konfiguraci s nějakým protonem (jinými slovy, že se mají nějak v čase a prostoru přitahovat).

Sílu, kterou mezi sebou elektron a proton působí je nutno chápat jak proces, kdy s obrovskou frekvencí si tyto částice vyměňují informaci o tom “že se mají přitahovat” prostřednictvím tzv. virtuálních fotonů. Tyto virtuální fotony jsou “prostředníky” mezi elektronem a protonem. Bez těchto prostředníků by jednotlivé elektricky nabitě částice o sobě reálně nemohly vědět.

Samozřejmě, že tyto virtuální fotony nemají nic společného s “reálnými” fotony, které můžeme při jejich vhodné energii vnímat okem (nebo přístrojem) třeba jako červené světlo, a které se uvolní při přechodu elektronu s vyšší kvantové dráhy na nižší. Virtuální fotony nelze principiálně zachytit nebo detekovat žádnou technologií (souvisí to s tím, že mají celočíselný spin 0, 1 nebo 2).

Slovo laser je zkratkou anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, neboli zesílení světla pomocí vybuzečné emise záření. Laserové světlo je monochromatické (jednobarevné) koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (viz obr.1).

Z definice vyplývá, že laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), chemicky, elektricky a podobně. [1]



Obr. 1. Srovnání světla vyzařováním laserem se světlem žárovky

Elektromagnetická vlna se šíří ve vakuu rychlostí $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro vlnovou délku a frekvenci záření f platí vztah (1)

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (1)$$

Dnes známe elektromagnetické záření v široké škále vlnových délek. Od velmi dlouhých rádiových vln ($\lambda = 10^4 \text{ m}$) až po záření gama ($\lambda = 10^{-4} \text{ m}$). Ještě menší vlnovou délku než záření gama má pronikavé kosmické záření. Přehled vlnových délek a odpovídajících frekvencí elektromagnetického záření je na obr. 2.

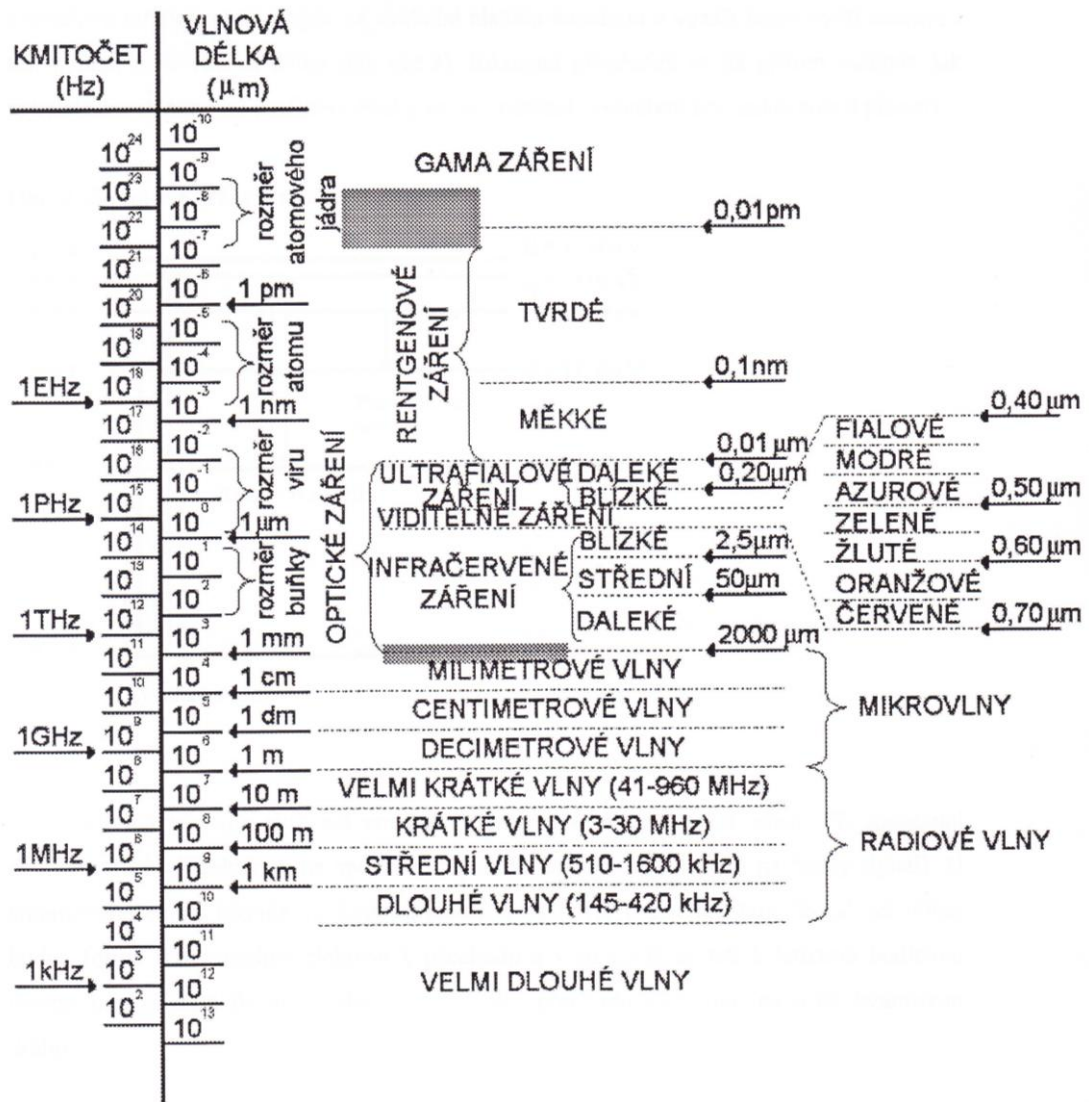
Vlivem vlnové délky se charakter záření zásadně mění a to zejména vzhledem k odpovídající energii fotonu $E = m(\lambda f)^2$. Zatímco dlouhé radiové vlny se ohýbají za kopce, světelný paprsek je již úzce směřovaný. Světelný paprsek se může ohýbat, pouze však za překážky velikostí srovnatelné s jeho vlnovou délkou.

Energie kvanta elektromagnetického záření – energie fotonu – E je dána rovnicí (2), hmotnost fotonu m je pak dána rovnicí (3)

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

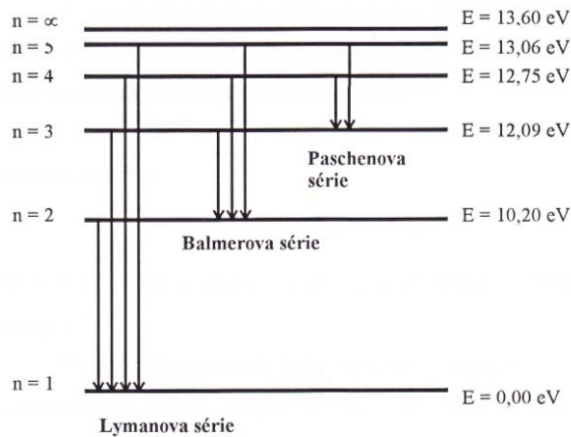
$$m = \frac{h}{c\lambda} \quad (3)$$

Je zřejmé, že čím menší je vlnová délka záření, tím větší je energie fotonu a hmotnost (hybnost) fotonu. Radiové vlny o frekvenci 100 MHz nedokáží vlivem své malé energie změnit vodivost např. u fotodiody, avšak světlo (430 – 750 THz) má již dostatek energie, aby změnu vodivosti provedlo. [1]



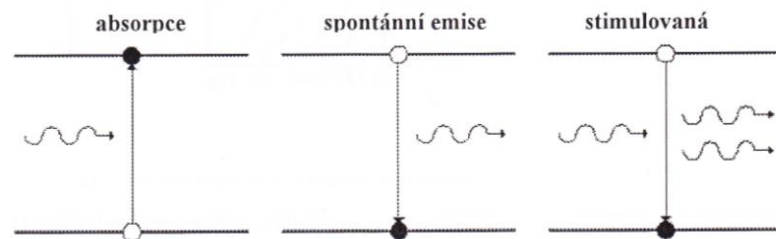
Obr. 2. Přehled vlnových délek a frekvencí známých oblastí elektromagnetického záření

Elektrony, které v atomech obíhají na kvantových drahách, mohou absorbovat energii, která má původ v jiném elektromagnetickém záření. Záleží na energii fotonu tohoto budícího zařízení. Čím je jeho energie větší, tím větší energii předá elektronu a ten se dostane na vyšší kvantovou dráhu. Pokud má dostatečně vysokou energii, může dojít až k ionizaci – oddělení elektronu od atomu. Na horní kvantové dráze setrvává elektron jen velmi krátce. Sestup na nižší dráhy je u čistých prvků dílem náhody. Může sestupovat postupně a vyzářuje tak fotony o malé energii (nebo jen fotony – kvanta kmitavé energie krystalové mřížky) nebo přejde na základní hladinu najednou a vyzáří foton vyšší energie a tím pádem nižší vlnové délky (viz obr. 3). Různými příměsemi lze ovlivnit, jak má elektron sestupovat a některé skoky se dají zakázat (vytváření tzv. zakázaných pásem). [1]



Obr. 3. Kvantové dráhy v atomu vodíku

Obr. 4 ukazuje absorpci energie, spontánní a stimulovanou emisi. Při spontánní emisi je přechod elektronu na spodní dráhy zcela samostatný (nečeká na žádný signál). U stimulované emise vybuzený elektron na horní dráze „čeká“ až přiletí budící foton, jenž stimuluje elektron k přechodu a v tu chvíli se k letícímu budícímu fotonu připojí i foton vyzářený v důsledku přechodu elektronu na nižší kvantovou dráhu.



Obr. 4. Absorpce, spontánní a stimulovaná emise

U stimulované emise záření je zřejmé, že vlivem stimulace jsou budící foton a stimulovaně emitovaný foton v časové koherenci a vyzářování je tak koherentní.

Aby mohlo dojít k většímu počtu stimulovaných přechodů, musí se vytvořit stav tzv. inverzní populace. Za normální teploty panuje v látce normální energetický stav, popsáný Boltzmannovým rovnovážným rozdělením. V kuse železa ohřátého na $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ pak absorpce převyšuje emisi (těleso přijímá teplo), v tělese je rovnovážný stav.

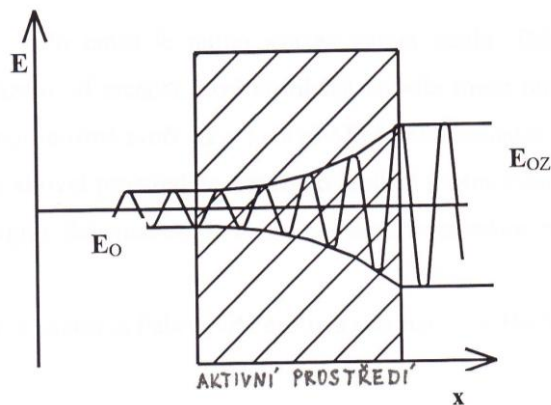
Při inverzní populaci dojde k tomu, že počet excitovaných kvantových soustav (pojem kvantová soustava může znamenat atom, molekulu, shluk atomů apod.) je větší než počet kvantových soustav v základním stavu.[14]

Lamber-Beerův zákon (4) popisuje změnu intenzity (snížení intenzity) záření při průchodu hmotou

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

kde $I(x)$ je intenzita záření v místě x , I_0 je intenzita záření v počátku a je koeficient absorpce.

Při čerpání energie do látky vhodného chemického složení může dojít (ovšem stále za předpokladu čerpání energie) ke stavu, kdy záření při průchodu látkou není zeslabováno (kladné), ale naopak zesilováno (záporné). Látko v takovém stavu se nazývá aktivní prostředí. Schematicky je proces zesílení v aktivním prostředí ukázán na obr. 5.



Obr. 5. Zesílení záření v aktivním prostředí

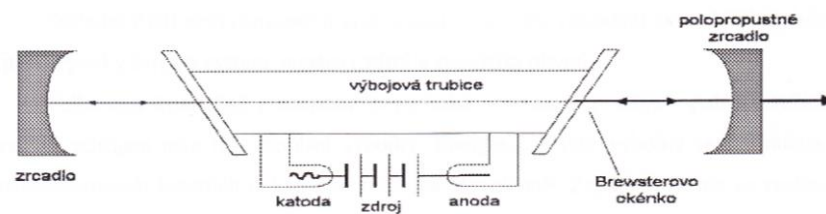
Používané zdroje energie pro buzení:

- a) ozáření nekoherentním světlem
- b) elektrickým výbojem
- c) energie uvolňovaná při chemických reakcích
- d) energie uvolňovaná při adiabatické expanzi
- e) stejnosměrného elektrického proudu
- f) čerpání radioaktivním zářením z jaderného reaktoru
- g) čerpáním svazkem elektronů
- h) čerpáním jaderným výbuchem aj.

Jak již bylo uvedeno, stimulované emise záření může proběhnout různým způsobem. Starší systémy jsou tzv. tříhodinové. Zde se ze základní hladiny 1 čerpá na horní hladinu 2, kde kvantové systémy mohou zůstat jen velmi krátkou dobu a přechází nezářivým přechodem na tzv. metastabilní hladinu 3. Zde je životnost kvantových systémů mnohem delší a mohou tak na sebe „počkat“ než jich bude dostatečné množství. Poté je emise vynucena náhodným přechodem jednoho elektronu. Přechod ostatních je okamžitý. [1]

Ideální systém je čtyřhodinový laser. Zde se čerpá na horní hladinu 2, ze které částice okamžitě přechází (za uvolnění fotonu) na metastabilní hladinu 3, zde se kumulují. Při hlavním přechodu přechází z hladiny 3 na hladinu 4, která je energeticky o trochu vyšší než základní hladina 1. Z této hladiny 4 přechází na základní hladinu opět jen nezářivým přechodem. Blíže budou energetické přechody vysvětleny až u konkrétních typů laserů.

Po emisi je nutno svazek záření zesílit. Děje se tak nejčastěji mnohonásobným odrazem od zrcadel. Dvě protilehlá zrcadla (mezi nimiž je aktivní prostředí), z nichž jedno je polopropustné tvoří tzv. Fabryův-Peronův rezonátor. Mnohonásobným průchodem svazku přes aktivní prostředí je dosaženo zesílení (nutno zdůraznit, že musí být neustále dodávána energie). Schematicky je Fabryův-Peronův rezonátor znázorněn na obr. 6. [1]



Obr. 6. Schéma Fabryova-Peronova rezonátoru v He-Ne laseru

2.2 Fyzikální principy technologických laserů

2.2.1 Princip Nd YAG a Nd laseru

Neodymové lasery jsou zástupcem pevnolátkových a převážně v pulsním režimu pracujících technologických laserů. Pevnolátkové (dielektrické) lasery využívají jako aktivní prostředí monokrystalické nebo amorfni látky. Tyto slouží jako substráty (nosiče) aktivních prvků. Kvanta energie se vyzařuje a absorbuje při změně energetických stavů příměsových atomů. Na aktivní látky se kladou následující požadavky: [6]

- a) musí obsahovat takový systém energetických hladin, aby bylo možno dosáhnout intenzivní inverzní populace
- b) musí mít široké absorpční spektrum (aby se dalo např. využít žárovky jako zdroje)
- c) musí vykazovat vysokou kvantovou účinnost (kvantová účinnost je poměr počtu emitovaných fotonů k počtu fotonů čerpaných ze zdroje, prakticky je vždy menší jak 1). [6]

Mezi vhodné aktivátory pevnolátkových laserů patří:

- a) prvky skupin železa: chrom Cr, nikl Ni, kobalt Co
- b) lanthanoidy: neodym Nd, samarium Sm, gadolinium Gd, holmium Ho
- c) aktionidy: uran U

Vhodné substáty jsou [6, 2]: yttrito-hlinitý granát (YAG), korund Al_2O_3 , fluorit CaF_2 , CaWO_4 , bornaté sklo (59% SiO_2 , 25% BaO , 15% K_2O , 1% Sb_2O_3) aj.

Při vlastní výrobě se nejprve krystal vysoké čistoty obohatí příměsovými atomy a potom se opracovává do konečné, velmi přesné podoby. Je tedy důležité splnit i technologické podmínky jako je dobrá opracovatelnost a lešitelnost aktivních materiálů. V praxi se uplatňují převážně tyto substráty:

- a) rubín (čím dál více vytlačován krystaly YAG) s aktivátory Cr^{3+}
- b) YAG (yttrito-hlinitý granát $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) s aktivátory Nd^{3+}
- c) wolframát vápníku CaWO_4 s aktivátory Nd^{3+}

Základní části pevnolátkových laserů jsou: rezonátor (obsahující aktivní látku), zdroj čerpání, optický čerpací systém, napájecí zdroj a spouštěcí obvod.

Velká část komerčně pracujících pevnolátkových laserů pracuje v pulsním režimu. Čerpacím zdrojem jsou impulsní výbojky. Energie pro tyto výbojky se akumuluje v kondenzátorových bateriích o kapacitě několika stovek mF. Zapálení výboje se realizuje prostřednictvím signálu ze spouštěcího obvodu. V zapalovacím obvodu se generuje vysokonapěťový impuls (10 – 50 kV) o velmi krátkém čase trvání. Vyzařovaná světelná energie se částečně pohlcuje v aktivním prostředí. Příměsové atomy se tak nabuzují do excitovaného stavu a za určitou dobu může populace horní úrovně překročit populaci v základní hladině. Vlivem

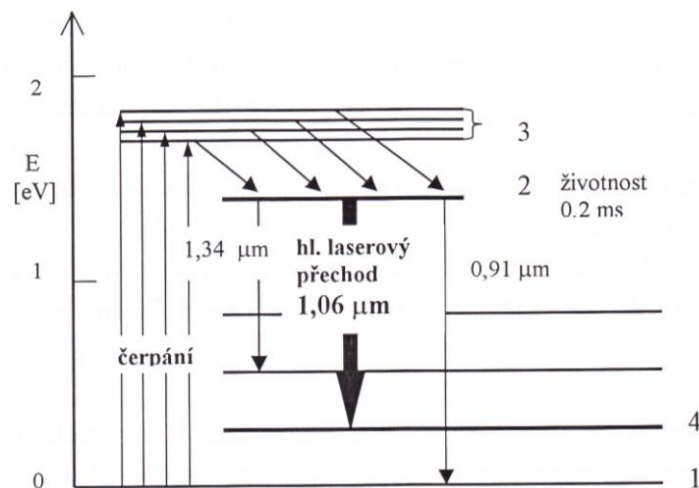
zářivých přechodů vznikají v rezonátoru oscilace. Přes polopropustné zrcadlo se část záření dostane ven ve formě laserového paprsku. [1]

Rubínový laser

Je to typický tříhodinový laser pracující s monokrystalem Al_2O_3 s příměsí iontů Cr^{3+} . V praxi je již dávno nahrazován YAG lasery a proto není zvlášť popisován.

Nd: YAG laser

Tento typ je především zástupcem čtyřhodinových laserů (čerpání, rychlá emise fotonu, hlavní laserová emise fotonu a opět rychlá emise fotonu na základní hladinu). Substrátem je zde krystal YAG a příměsí jsou neodymité ionty Nd^{3+}



Obr. 7. Energetické hladiny Nd: YAG laseru

Z obr. 7 jsou zřejmé procesy, které předchází hlavnímu laserovému přechodu. Čerpáním se ionty Nd^{3+} nabuzují a dostávají se na hladinu 3, která je tvořena několika energetickými hladinami. Zde je krátká životnost a nezářivými přechody (vyzářením fotonu – kvanta kmitavé energie krystalové mřížky) přechází na hlavní horní laserovou hladinu (metastabilní hladina 2). Na této hladině na sebe jednotlivé ionty počkají, jelikož je tu životnost asi 0,2 ms a naplnění hladiny je možné zabezpečit mnohem rychleji. Hlavní laserový přechod je mezi hladinami 2 a 4 a to na vlnové délce 1,06 μm . [4]

Základní úroveň 1 je při normální teplotě prakticky neobsazená a to vede ve svém důsledku k tomu (což je výhoda 4-hladinových laserů), že je možno dosáhnout laserového efektu při malé prahové populaci. Energie na čerpání může být získávána i ze silnější žárovky, což umožňuje i kontinuální provoz těchto laserů.

Krystaly YAG mají oproti jiným (např. CaWO_4) vyšší pevnost a optickou homogenitu a dobrou tepelnou vodivost. Na druhé straně čistota složek potřebných pro výrobu (Al_2O_3 Y_2O_3) musí být velmi vysoká, a proto s ohledem i na náročnost výroby se YAG krystaly vyrábí jen do průměru asi 10 mm a délky 100 mm. [1]

Nd: sklo laser

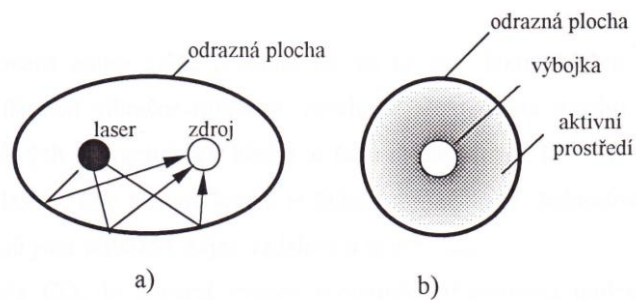
Princip je obdobný jako u Nd: YAG laseru. Substrátem pro příměs iontů Nd^{3+} je speciální neodymové laserové sklo. Základními složkami skla jsou oxidy křemíku, bária a draslíku.

Aktivační příměs Nd_2O_3 tvoří asi 1 – 6% z objemu aktivního prostředí.

Nevýhodou skla je jeho horší tepelná vodivost, substrát se zahřívá a není tak možno efektivně dosáhnout kontinuálního provozu laseru, avšak výhodou je mnohem jednodušší výroba skla než krystaly YAG, což umožňuje dosahovat až 10 krát větších rozměrů (délka 1 m, průměr 50 mm). Jednotlivé energetické hladiny jsou také rozšířeny vlivem amorfности skla. Sklo absorbuje v poměrně širokém spektru záření a je tak možno lépe využít budící záření (které není monochromatické).

U uvedených typů laserů musí samozřejmě dojít k zesílení paprsku laseru. Rezonátory jsou zde samostatné krystaly. Jednou z možností je opatřit konce krystalů tenkou vrstvou napařené kovu nebo dielektrika. Druhou možností je zkosit oba konce krystalu pod Brewstеровým úhlem a krystal umístit do vnějšího rezonátoru. Konce krystalů musí být opracovány s vysokou přesností (řádu vlnové délky laseru). Jen tak je možno dosáhnout mnohonásobného odražení paprsků v optické ose rezonátoru a tím jejich zesílení.[4]

Čerpání pevnolátkových laserů je řešeno nejčastěji pomocí xenonových výbojek. První lasery měly výbojky ve spirálovém tvaru. Dnes se používá např. eliptických odražečů, kde se výbojka umístí do jednoho ohniska a laserová trubice do druhého. Odrazem se dobře využije budícího záření výbojky (viz. obr. 8a). Jiná možnost je na obr. 8b, kde je schéma koaxiálního uspořádání výbojky a laserové trubice.



Obr. 8. Zvýšení účinnosti čerpání:

a) eliptické odražeče, b) koaxiální uspořádání

Aktivní látky jako Nd^{3+} mají maximum absorpce v oblasti viditelného a blízkého infračerveného spektra. Xenonové výbojky vykazují právě maximum svého vyzařování v těchto oblastech spektra. Nevyužitá energie způsobuje nepříjemné zvyšování teploty krystalů. U vyšších výkonů je tak nutno filtrovat budící záření.

Obecně jsou pevnolátkové lasery málo účinné, podle literárních údajů a studia komerčně vyráběných neohmových laserů určených zejména pro vrtání a značkování se jejich účinnost pohybuje kolem 1%. Tak např. u Nd: YAG laseru v CW provozu vhodného pro značkování při výkonu 50 W musíme počítat s příkonem kolem 5 kW. [4]

2.2.2 Princip CO_2 laseru

Lasery v pevné fázi pracují především v pulsním režimu. Lasery plynové se používají především v kontinuálním režimu.

Výkon prvního CO_2 laseru neoslnil ani svým výkonem, (1 W) ani světelnými efekty (vyzařuje v IČ oblasti na $10,6 \mu\text{m}$). Dnes je ale CO_2 laser jeden z nejpoužívanějších typů laserů pro technologické práce. CO_2 laser patří do skupiny tzv. molekulárních laserů.


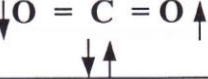


Molekulární lasery jsou charakteristické svými parametry:

- a) vysoká účinnost – až 50%
- b) velký kontinuální výkon záření – až 1 MW
- c) možnost vyzařování v širokém pásmu – 5 až $700 \mu\text{m}$
- d) velká stabilita frekvence – až 10^{-13}

Stimulovaná emise může probíhat jak na úrovni elektronových přechodů, tak na úrovni molekulárních vibračně-rotačních přechodů. Existuje však mnoho rozdílů, především energie jednotlivých energetických hladin je řádově menší (asi 10^{-1} eV v porovnání s pevnolátkovými lasery, kde energie hladin je řádu $10^0 - 10^1$ eV). Jednotlivé hladiny molekulárních přechodů jsou přibližně stejně vzdálené a je jich více.

Molekula CO_2 je lineární vysoce symetrická tříatomová molekula. Jak ukazuje tab. 1, může se vyskytovat ve třech vibračních módech. Laserového efektu je pak dosaženo přechodem z určitého nabuzeného módu do jiného módu v základním stavu. [4]

Tab. 1. Přehled vibračně-rotačních módů CO_2 a N_2

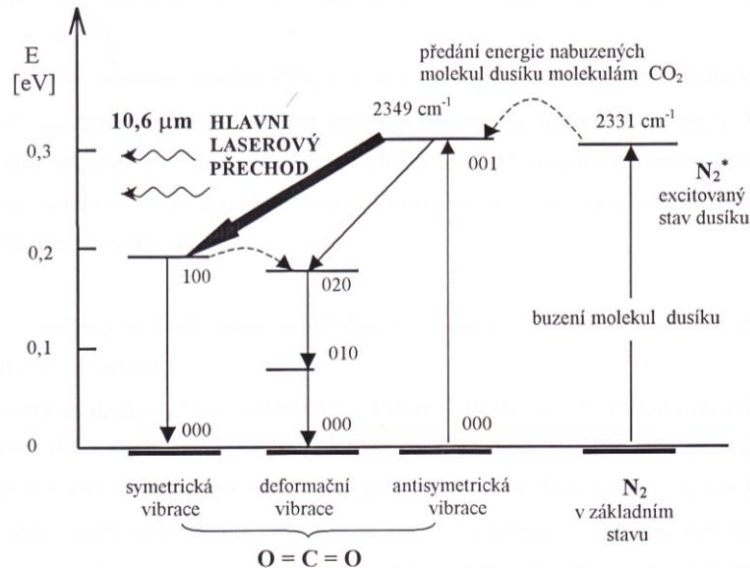
$\text{O} = \text{C} = \text{O}$ 	symetrické vibrace atomu kyslíku O vzhledem k atomu uhlíku C
$\uparrow\downarrow\text{O} = \text{C} = \text{O}\uparrow\downarrow$ 	deformační (příčné) vibrace všech atomů
$\text{O} = \text{C} = \text{O}$ 	nesymetrické vibrace atomů kyslíku O vzhledem k atomu uhlíku C
$\text{N} \equiv \text{N}$ 	vibrace v molekule dusíku N

Základní otázkou je buzení tohoto laseru. V podstatě se používají čtyři metody, při všech metodách se v plynu výrazně mění energetické poměry a atomy a molekuly zaujímají nové energetické postavení.

Technicky je možné uskutečnit u CO_2 laserů tyto metody buzení [4]:

- a) doutnavý výboj – je nejčastější a dochází při něm k dobrému rozložení hustoty náboje. Distribuce energie odpovídá přibližně Maxwell-Boltzmannovu rozdělení.
- b) proudem elektronů – dosahuje se intenzivní inverzní populace. Zdrojem proudu elektronů je např. urychlovač. Nemá zatím význam v technické praxi.
- c) adiabatickou expanzí – prudké ochlazení horkého plynu vede k dosažení inverzní populace. Blíže viz. Kapitola 2.3.2 Gazodynamické lasery.
- d) optické buzení – principiálně je možné buzení světlem, ale je málo účinné. Používá se ale buzení CO_2 laserů např. pomocí výkonných infračervených laserů.

Energetické hladiny pro CO₂ laser jsou na obr. 9. Symbolem 000 jsou označeny základní stavy všech vibračních módů molekuly CO₂. Symbolem 001 je pak označen excitovaný stav módu nesymetrických vibrací atd. (viz tab. 1). [4]



Obr. 9. Energetické hladiny vibračně-rotačních molekulárních přechodů CO₂

Na obrázku je zřetelně označen hlavní laserový přechod. Přechod mezi úrovněmi 001 (nabuzený stav nesymetrické vibrace) a 100 (základní stav symetrické vibrace) je základním zářivým přechodem laseru s molekulou CO₂ na vlnové délce 10,6 μm. Laserový přechod mezi úrovněmi 001 a 020 na vlnové délce 9,6 μm není významný.

Účinek příměsi dusíku je zřejmý z obrázku. Mezi excitovanou molekulou dusíku N₂ a molekulou CO₂ v základním stavu dochází snadno k přenosu energie. Snadnost přenosu energie je dána téměř stejnou energií excitované molekuly dusíku a posléze excitovanou molekulou CO₂ (energetický rozdíl je pouze 18 cm⁻¹). Takovýto rezonační přechod je mnohem pravděpodobnější než nerezonační. Tímto „buzením CO₂ přes dusík“ se dosahuje vyššího obsazení hladiny 001. Přenos energie můžeme vyjádřit rovnicí (5): [6]

$$\text{N}_2^* (\text{excit.}) + \text{CO}_2 (000 - \text{zákl. stav}) = \text{N}_2 (\text{zákl. stav}) + \text{CO}_2^* (001) - 18 \text{ cm}^{-1} \quad (5).$$

Podobným účinkem (zvyšováním výkonu) působí příměsi jako H_2O a O_2 . Hélium He také zvyšuje výkon, ale jiným mechanismem. Používá se k depopulaci nižších vrstev díky svému vysokému koeficientu tepelné vodivosti, čímž zvyšuje relativně inverzní populaci. Vyprazdňování spodních hladin se pak děje především přes deformační vibraci 010 (viz. Obr. 9). [6]

Doba životnosti molekul CO_2 v excitovaném stavu je několik ms. Jelikož je však možno načerpat hladinu 001 během několik s, mohou jednotlivé molekuly, které se postupně nabuzují, na sebe na hladině 001 „počkat“. Jakmile je dosaženo dostatečné inverzní populace, může dojít k hlavnímu laserovému přechodu. Literatura uvádí, že radiční rozpad stavu 001 trvá 4,7 s.

Používají se čtyři hlavní uspořádání CO_2 laserů, které se liší zejména možnostmi dosahovaných výkonů:

a) Lasery s výbojkou. Mají malé rozměry. Výkon je asi do 100W. výbojka má průměr asi 20 mm a délku do 200 mm. Většinou mají vodní chlazení. Materiál pro čočky je germanium a nebo GaAs. Zrcadla jsou dielektrická nebo germaniová. Proud ve výbojce je řádu desítek mA, napětí např. 300 V. Plyny jsou nastálo uzavřeny ve výbojce, kde dochází k doutnavému výboji a mají tak vlivem rozpadu CO_2 na CO malou životnost (asi 10 000 h)

b) Lasery s pomalým průtokem plynu. Průtok aktivního plynu na jedné straně umožňuje více odvádět teplo a dosahovat vyšších výkonů, ale na druhé straně vyžaduje složitější konstrukci. Během provozu se plynule spotřebovávají plyny. Běžně se používají klasické tlakové lahve. Láhev s He vydrží při 8-hodinovém provozu asi půl roku. Oxid uhličitý je levný a snadno dostupný. Místo dusíku je pak možno použít i vzduch.

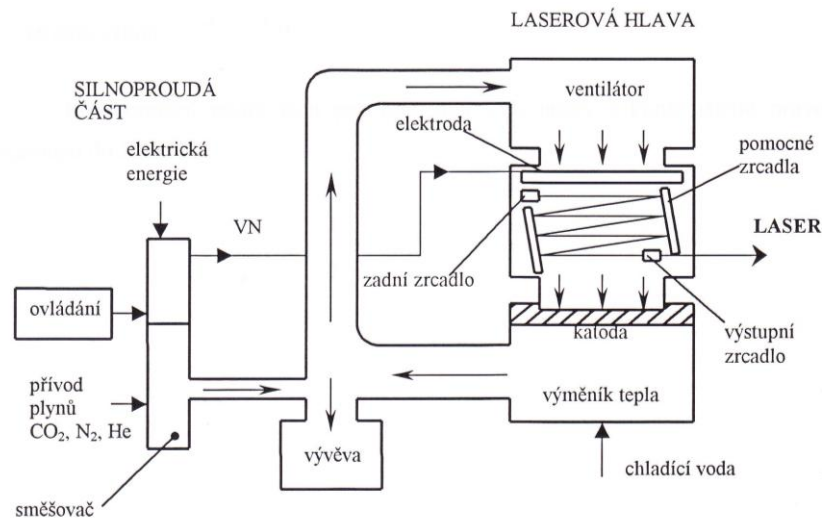
Rychlost plynu je kolem 1 ms^{-1} . Výkon je asi 50 – 70 W/m (na délku laseru). Výkon běžných laserů tohoto typu pro technologické práce je do 3,5 kW. [11]

c) Lasery s rychlým průtokem plynu. U těchto laserů je umožněn ještě intenzivnější odvod tepla a dosahují tak 3 – 4 x vyššího výkonu nežli v případě b). Průtok plynu se směřuje kolmo na optickou osu zesilovaného laserového svazku (viz obr. 10). Tyto typy laserů se již neobejdou bez výměníku tepla. Místo vývěvy se používá kompresor.

Objemový průtok plynu je zde až $400 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Výkon je tak až 1 kW/m. Literatura uvádí, že výkon komerčních technologických laserů tohoto typu je do 40 kW. [11]

Typické parametry těchto laserů jsou: výkon 1 kW, příkon 20 kW, rychlost plynu $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pracovní tlak 4 kPa, složení směsi CO_2 : N_2 : $\text{He} = 3 : 4,5 : 7,5$.

Typický příklad průtočného laseru, jenž se využívá pro technologické operace řezání a svařování kovů a plastů je na obr. 10. Jde o schéma komerčně vyráběného laseru Sylvania GTL 971. Má tyto parametry: spotřeba CO_2 2,2 l/h, směsi 10% O_2 + 90% N_2 11,2 l/h, průměr výstupního paprsku je 24 mm, výkon 1,2 kW. [10]



Obr. 10. Schéma kontinuálního CO_2 laseru Sylvania – model 971

d) TEA CO_2 laser. Jestliže chceme dále zvyšovat výkon CO_2 laserů, musí se nutně přejít k vyšším koncentracím částic, což znamená přejít z tlaků kolem 5 kPa na prakticky atmosferický tlak. Doutnavý výboj je možné uskutečnit pouze při nižších tlacích. V hustém plynu (odpovídající normálnímu tlaku 10^5 Pa) se proto místo doutnavého výboje používá impulsního výboje.

Výhodou TEA laserů (Transversal Excitation at Atmospheric Pressure) je, že nevyžadují náročnou evakuační techniku.

Obvykle mají CO_2 lasery poměrně velkou délku (5 – 20 m), jejich trubice jsou často zalomené (koncentrace částic v plynu je mnohem menší než u pevnolátkových laserů a proto je nutná větší délka). Nejčastěji se jedná o trubici jedenkrát zalomenou ve tvaru U.

CO_2 lasery mohou pracovat jak v kontinuálním, tak v impulsním režimu.

Typické parametry současných komerčních CO_2 laserů jsou tyto: [6,11]

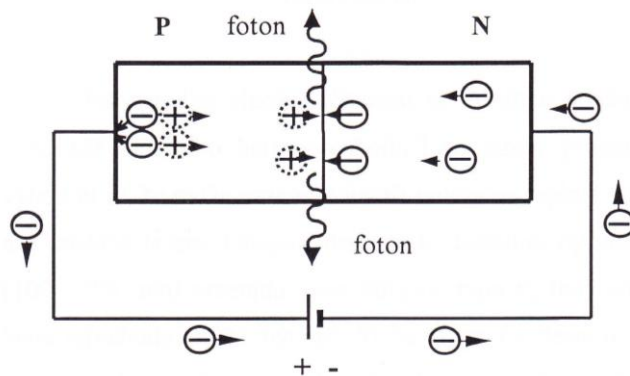
- vlnová délka: $10,6 \mu\text{m}$ nebo $9,6 \mu\text{m}$

- opakovací frekvence: 0,1 až 50 kHz
- délka pulsu: 100 ps až 1 ms
- energie impulsu. 10^{-7} J až 250 kJ
- účinnost: 20 – 40%
- střední výkon: 10^{-4} – 10^5 W

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

2.2.3 Princip diodového laseru

K realizaci inverzní populace je možno využít i polovodičové struktury. Zásadním jevem, ke kterému v laserových diodách dochází je rekombinací párů elektron – díra. Při rekombinaci se atom akceptoru mění na záporný iont a přebytkem energie (excitovaný iont). Přebytku energie se pak tento iont rychle zbavuje. Přitom se uvolňuje kvantum energie. Schematicky je rekombinace elektron (-) – díra (+) na přechodu PN zřejmá z obr. 11.



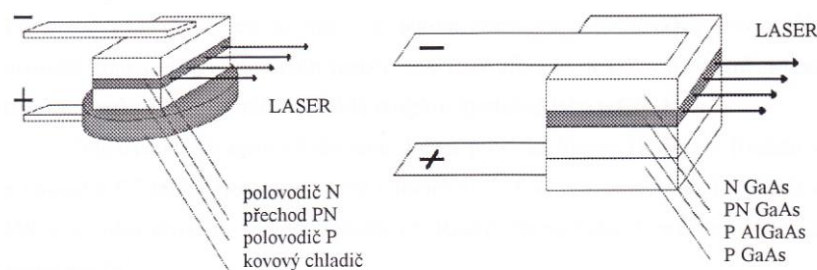
Obr. 11. Rekombinace párů elektron – díra

Energie se může uvolňovat: [6,7]

- a) nepřímým přechodem – elektron sestupuje na spodní hladinu po malých krocích, které představují nezářivé přechody (vyzáření fotonů – Si, Ge).
- b) přímým přechodem – dochází k vyzaření fotonu (zářivá rekombinace), typickým zástupcem je zde arzenid galia GaAs.

Důležité je si uvědomit, že počet rekombinací je přímo úměrný procházejícímu proudu (resp. proud je tvořen právě rekombinací). Základní materiál disponuje příslušnými energetickými hladinami (mezi nimi je zakázané pásmo). Příměsemi lze šířku tohoto zakázaného pásu změnit a tím změnit energii přechodu. Změnou této energie se pak mění vlnová délka zařízení a tím jeho barva. Toto vyzařování je nekoherentní, převládá zde spontánní emise, používá se ve světelných diodách. Stejněho principu však používají i diodové lasery.

První typ diodového laseru byl tzv. injekční laser. Byl velmi málo účinný a bylo ho nutno chladit tekutým dusíkem na teplotu -196 C . Pracoval na vlnové délce 840 nm a jeho výkon silně závisel na teplotě okolního prostředí. Schéma injekčního polovodičového laseru je na obr. 12. [1]



Obr. 12. Injekční diodový laser

Převratného zlepšení činnosti se dosáhne použitím tzv. heteropřechodu (obr. 13) nebo též dvojitého heteropřechodu, kdy lasery pracují na struktuře alias. Základní výhodou je, že může pracovat již při pokojové teplotě a zároveň dosahovat většího výkonu než injekční lasery. Obvykle dochází k vlastnímu zářivému přechodu na velmi tenké vrstvě ($100 - 200\text{ nm}$) arzenidu galia obvykle typu P, tedy na GaAs, typu P. Účinnost laserů s heteropřechody může být až 70% . Fabryův-Peronův rezonátor tvoří stěny samotného krystalu, ale vývoj v této oblasti je tak rychlý (jde prakticky o třetí nejvíce používaný technologický laser), že nelze vyloučit u současně vyráběných komerčních laserů jinou konstrukci.

Rozměry aktivních prvků diodových laserů jsou velmi malé např. $1 \times 0,1 \times 0,1\text{ mm}$. Zejména u GaAs dochází k velmi silnému zesílení na velmi malých vzdálenostech (řádově desetiny mm). Výkon u pulsu GaAs diodového laseru je až 100 W při vlnové délce záření $830 - 920\text{ nm}$. Pro technologické účely se proto běžně sdružují jednotlivé laserové diody do polí. Současné technologické diodové lasery tak mají výkon do 4 kW . [11]

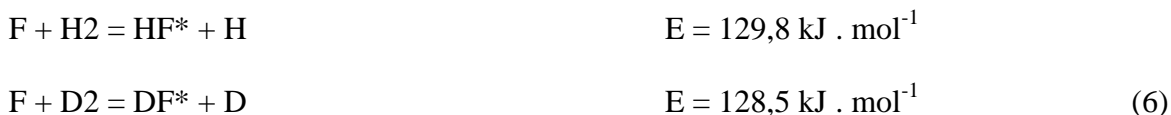
V kontinuálním provozu se osvědčují zejména diodové lasery na bázi arzenidu india InAs a $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Zejména lasery na bázi InAs, které pracují na vlnové délce kolem 660 nm produkují červené světlo při výkonu několik mW. Tyto lasery mají široké použití např. v CD přehrávačích, laserových ukazovátkách a zaměřovačích. [11]

2.3 Fyzikální principy technologických laserů

2.3.1 Chemické lasery

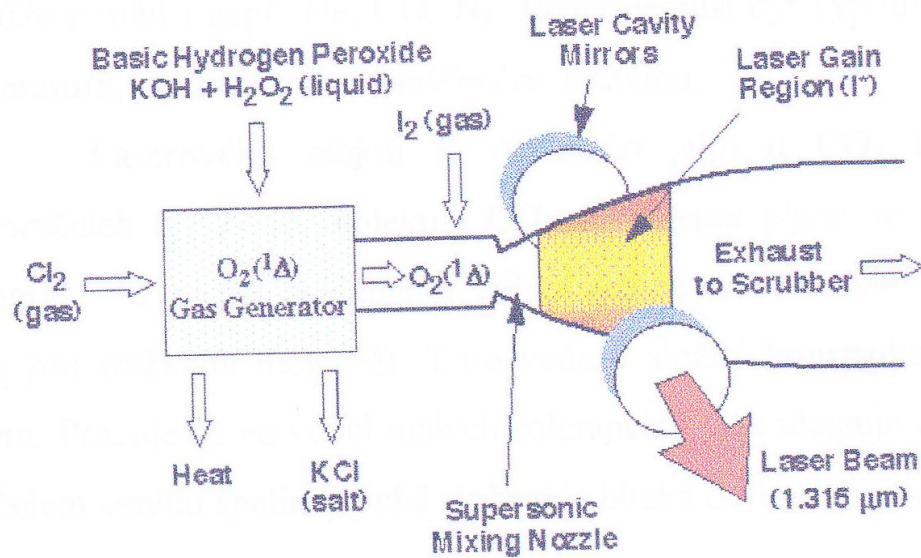
V chemických laserech vzniká energie chemickou reakcí vstupních komponent. Postatou vzniku inverzní populace je potom chemicky nerovnovážný stav v důsledku neustálé konkurence chemických reakcí. Laserový efekt je dosažen díky změnám energetických stavů vibračně-rotačních módů molekul (podobně jako u CO_2 laserů).

Intenzivním vývojem již dlouhou dobou prochází hlavně HF lasery (reakce vodíku a fluoru) a DF lasery (reakce deuteria s fluorem). V CW provozu dosahují výkonu mnoha kW a v pulsu dosahují energie několik kJ. Reakci chemického čerpání je možno popsat rovnicemi [6]:



Výzkum ukázal, že až 70% energie chemické reakce se využije na přechod vibračně-rotačních módů do excitovaných stavů, což vytváří podmínky pro vznik intenzivní inverzní populace. Účinnost chemických laserů se pohybuje kolem 10%.

Na obr. 13 je schéma vysoce výkonného chemického laseru COIL (Chemical Oxygen-Iodine Laser) o výkonu řádově 100 kW. Jeho funkce je založena na reakci H_2O , a jodu za přítomnosti hélia. Přechody na úrovni elektronových drah vyzařují na vlnové délce 1,35 μm . Podobným mechanismem jako u gazodynamických laserů expanduje horká směs reakčních komponent nadzvukovou rychlostí a dochází tak k silně nerovnovážnému stavu. Jeho výsledkem je intenzivní populace a laserový efekt. Tyto typy laserů již byly testovány. [12]

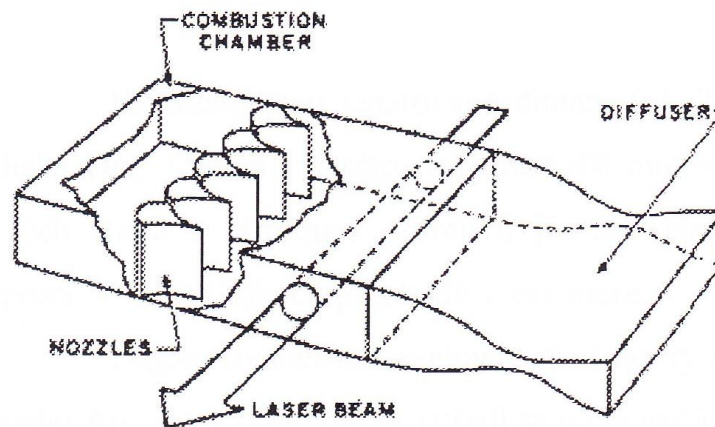


Obr. 13. Schéma chemického laseru COIL (12)

2.3.2 Gazodynamické lasery

V roce 1962 předpověděli Basov a Oraevskij (SSSR), že je možné dosáhnout v plynech populační inverze jejich rychlým ochlazením. Inverzní populace je tedy dosaženo termodynamickým buzením.

Nejznámější jsou CO₂ dynamické plynové lasery. Plyny jsou přiváděny z tlakových lahví nebo spíše vznikají při spalování. Expanzí při nadzvukových rychlostech v tzv. Lavalově trysce dochází k silnému ochlazení plynů a k vytvoření silně termodynamicky nerovnovážného stavu. Dochází k zamrznutí vyšších energetických úrovní. Výkon zařízení silně kolísá s mnoha parametry celého systému. Schéma takového gazodynamického CO₂ laseru je na obr. 14. [11]



Obr. 14. Schéma gazodynamického CO₂ laseru

Z obrázku je zřejmá komora pro vytváření směsi plynů. Přes vhodně tvarované Lavalovy trysky expanduje plyn do aktivní zóny, která má takové geometrické uspořádání, že pracuje jako rezonátor. Může zde být v podstatě uložen Fabryho-Perotův rezonátor. Laserový paprsek se generuje kolmo na směr proudění plynu. V difuzéru dochází ke snížení tlaku. Již z obrázku je zřejmé, že velký výkon laseru je generován na extrémně malé délce (na délce 25 cm může být získáno 2 – 4 kW).

Základní výhodou gazodynamických laserů je to, že jejich výkon je omezen jen difrakčními ztrátami paprsku. Dosahované výkony jsou proto velmi velké. Mimo CO₂ se může použít i např. He, CO, H₂. Plyny nemusí být vypouštěny do atmosféry, ale jak uvádí literatura, mohou být i v uzavřeném systému.

Laserového efektu je dosaženo jako u CO₂ laseru prostřednictvím rotačně-vibračních přechodů molekuly CO₂. Z objemu plyn se musí dostat maximální množství energie ve formě světelného záření (dříve než energie vibračních stavů zanikne vzájemnými srážkami molekul). Toto vede k složité konstrukci aktivního prostoru s rezonátorem. Pracuje se ve velmi malých tolerancích. Jak ukazuje obr. 14 lze použít hoření za účelem vzniku spalin, jejichž složení je blízké optimální plynové směsi.

Mimo CO₂ laseru se pracuje intenzivně na CO gazodynamickém laseru. Zde je však potřeba dosáhnout mnohem vyšší rychlosti expandujících plynů. To vede k extrémně vysokým tlakům (hmotové průtoky jsou až kg/s) před Lavalovou tryskou nebo ke změně konstrukce rezonátoru. [3,4]

Původně byl vývoj gazodynamických laserů řízen vládou USA, ale i v dnešní době je těžké se dostat ke konkrétnějším informacím o těchto typech laserů, jejichž použití při konstrukci zbraní fungujících dobře na velké vzdálenosti ve vzdušném prostoru a vesmíru, je zřejmé [4]

Dostupná literatura neuvádí žádné průmyslové aplikace těchto laserů. Jejich výkon se pohybuje ve stovkách kW.

2.3.3 Excimerové lasery

Epimery jsou excitované dimery. Takovým epimerem je pak např. molekula hélia He_2 . Ovšem i u této nejjednodušší molekuly je známo více jak 60 jejich elektronových stavů a struktur epimerů je tak velmi složitá. Laserového efektu je dosaženo pomocí energetických přechodů v excimerech. [6]

Nejpoužívanějšími lasery jsou lasery pracující s inerty jako Xe_2 , Kr_2 nebo Ar_2 . Jako aktivního prostředí se používají i halidy inertních plynů (ArF , KrF apod.).

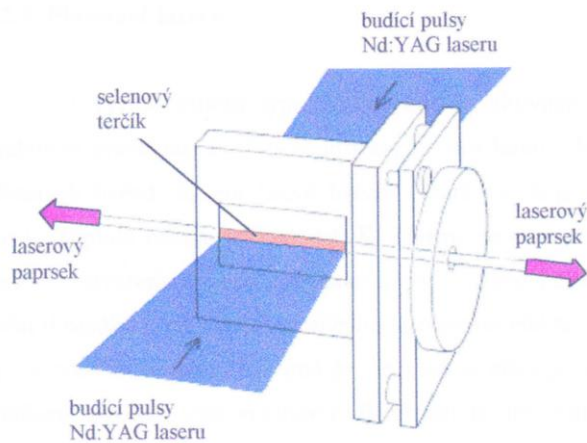
Pro čerpání se mohou používat jak výbojky, tak spíše intenzivní elektronový svazek nebo jaderné záření (proud neutronů). Lasery s halidy inertů laserují na UV vlnových délkách (200 – 350 nm). Při vysoké opakovací frekvenci pracují komerční excimerové lasery s výkonem řádu 10^1 W při účinnosti do 10%.

2.3.4 Rentgenové lasery

Měkké rentgenové záření má vlnovou délku 1 – 0,1 nm, tvrdé rentgenové záření má pak vlnovou délku 0,1 – 0,001 nm. Zesílení elektromagnetických vln v oblasti měkkého rentgenova záření byly hlášeny již v 70. letech. Ale teprve v roce 1985 Matthews z LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory, USA) uskutečnil laserový efekt v oblasti tvrdého rentgenova záření. [6, 3,7]

Rentgenové záření může vzniknout po odstranění vnějších elektronů z atomů. Jinou možností je využít plazmy – plynů ohřátých na řádově 10^6 K. Ve stavu plazmy jsou atomy silně ionizovány. Zbylé (jen vnitřní) elektrony přechází mezi vnitřními kvantovými drahami a vyzařují ve vlnových délkách odpovídacích rentgenových záření.

Schéma rentgenového laseru čerpaného výkonnými pulsními Nd:YAG lasery je uvedeno na obr. 15. Plazma vzniká po dopadu pulsu laseru na selenový terčik. Nejsou zde použity žádná zrcadla. Dostaneme tak dva paprsky laseru. [11]



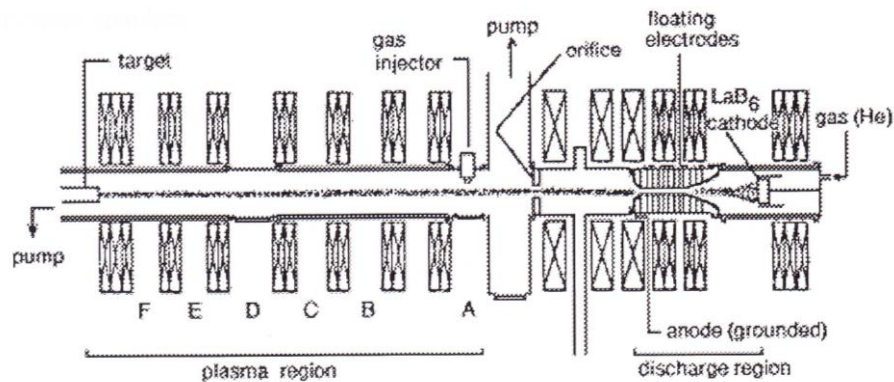
Obr. 15. Schéma rentgenového laseru

Selenová fólie po zásahu vysokou energií prakticky exploduje a vzniká plazma skládající se z iontů selenu. Životnost odpovídajících kvantových stavů na vnitřních kvantových drahách je velmi krátká (10^{-13} s). To vede k tomu, že je nutno dodávat při čerpání řádově 1000 krát více energie a zvýšit až 10 000 – krát frekvenci čerpacích pulsů oproti klasickým laserům, které pracují v oblasti viditelného spektra. Zcela obecným problémem je potom snižování účinnosti laserového efektu při snaze dosahovat malých vlnových délek. Jestliže pro excimerové lasery je účinnost řádově 10^0 (vlnová délka 100 – 700 nm), tak pro malé vlnové délky např. 1 nm (měkká RTG) můžeme počítat s účinností okolo 10^{-5} .

Přes všechny obtíže je RTG laser velmi zajímavý vzhledem k možným aplikacím. Těžko můžeme počítat s tím, že se v budoucích 10 letech setkáme s RTG laserovými obráběcími stroji pro opracování plastů. Velmi malá vlnová délka RTG laseru dává nám k dispozici především dokonalý nástroj pro práce odehrávající se v nanosvětě. Tyto nástroje jsou dnes požadovány zejména pro nanoelektroniku (rozměry řádově menší než u dnešní elektroniky postavené na polovodičích) a zejména v konstrukci nanorobotů. Současná technologie dává předpoklady pro výrobu součástí z materiálů, který je rozptýlen např. ve vodě a nanoroboti nám z něho vyrobí např. počítačový čip. Významnou aplikací je pak i možnost holografie molekul (vzhledem k malé vlnové délce). [3,6]

2.3.5 Plazmové lasery

U vývoje tohoto typu laseru, kde je aktivním prostředím plazma, se nechali výzkumní pracovníci inspirovat procesy vzniku laserového efektu, který probíhá v okolí některých hvězd. Kolem žhavé hvězdy, která vyvrhuje plazmu, rotuje chladný plynový oblak. Teplota oblaku může být 0 K. Plazma se chladným plynem rychle ochlazuje, což vede k vytvoření inverzní populace a dalším nerovnovážným efektům, které vedou ve svém důsledku k realizaci intenzivního laserového efektu. Na obr. 16 je schéma laseru, jak byl převzat z literatury. Zřejmé je, že plazma hélia je vedena do kontaktu s chladným vodíkem. Uvedený laser vyzářuje v UV oblasti na vlnové délce 164 nm. [13]



Obr. 16. Schéma plazmového laseru

Dimenze laboratorních laserů jsou oproti vesmírným měřítkům skromné, ale na druhé straně můžeme použít poněkud upraveného Fabryho-Perotova rezonátoru, který dovoluje velké zesílení. Toto velké zesílení je ale podmíněno (stejně jako u rentgenových laserů) dostatečnou energií a řádově větší frekvencí budících pulsů. Literatura uvádí, že největšího pokroku je ve vývoji plazmových laserů dosahováno zejména vlivem propracované konstrukce. Neméně důležitějším praktickým aspektem je co nejrychlejší odvedení nepotřebné ochlazené plazmy z aktivního prostředí. Problémem je též silně erozivní působení plazmy. Řešením zde je (jako u laseru na obr. 16) magnetické vedení plazmy.

Přes všechny tyto obtíže ve vývoji plazmových laserů velmi intenzivní. Ze studia literatury lze vypozařovat, že právě níže výkonné modifikace těchto laserů mohou být (díky svým převratným parametrům – zejména poměrem účinnost/rozměry) kandidáty pro náhradu konvenčních CO₂ laserů pro obrábění. [13]

2.3.6 Gasery, phasery

Gasery jsou zesilovače elektromagnetického záření v oblastech vlnové délky gama záření, tedy 10 fm – 0,1 pm . Snadno si můžeme vypočítat, že kvantum energie (foton) např. červeného světla (630 nm) je řádu 10^0 eV. Energie fotonu záření gama je 10^6 eV. Z tohoto prostého faktu plynou velké potíže s čerpáním takového laseru. [3,7]

Phasery jsou jiným názvem pro EIT lasery („Electromagnetically Induced Transparency“). Je to druh rentgenového laseru, které ale dosahuje oproti RTG laserům mnohem vyšší účinnosti. U těchto typů laserů dochází k laserovému efektu bez dosažení inverzní populace. [13]

3 APLIKACE LASEROVÝCH TECHNOLOGIÍ

3.1 Aplikační možnosti laserových technologií

Jen málokterý princip jako je stimulovaná emise záření, která dovoluje získat koherentní, monochromatické a málo rozbíhavé záření, má tak rozsáhlé uplatnění ve všech oborech lidské činnosti. Je až neuvěřitelné, jak často během dne využíváme zařízení pracujících s laserem. Od našich počítačů s CD-ROM mechanikami, laserovými tiskárnami, skenery, laserovými ukazovátky apod. Tyto téměř klasické aplikace byly již dávno promyšleny do velkých podrobností. Dnes se setkáváme s novými aplikacemi, které vznikají právě díky unikátním vlastnostem laserového zařízení. Zejména nástup výkonných laserových diod dovoluje aplikovat laserové zařízení v přímo miniaturních měřítkách (optické počítače, čidla vesmírných sond apod).

Před 59 lety zazářil v New Yorku za vedení Ch. H. Townese první maser – kvantový zesilovač v oblasti radiových vln. Mnoho vědců v 50. letech popíralo možnost technického provedení stimulované emise. Townes nedbal na důvody proč není možné zesilovač technicky uskutečnit a experimentoval. Za vývoj tohoto zařízení utratil 30 000 dolarů. Jeho zařízení bylo i v průběhu dalšího vývoje skepticky nazýváno „MASER – Means of Acquiring Support for Expensive Research“. Nicméně již v 60. letech se plně rozpracovaly možnosti aplikace laserů zejména do průmyslu a vojenství.

Neobyčejná šíře možností laseru souvisí s jeho parametry., které jsou proměnné v širokých mezích. [4]

vlnová délka – od IČ přes VIS až po RTG a záření gama,

výkon – v kontinuálním režimu od několika μW do MV,

energie – v impulsním režimu od kJ do několika stovek kJ v jednom pulsu,

doba trvání pulsu – od „dlouhých“ trvajících několik ms až do ultrakrátkých trvajících několik desítek fs.

Níže uvedený přehled aplikací představuje podstatnou část všech oblastí, kde se uplatňuje laserové zařízení. Průmyslovým aplikacím se věnuje podrobněji až následující kapitola.

Obory lidské činnosti, které využívají laserových technologií. [3,4,5,8,10]

a) kontrolní metody a měření – metrologie (měření rozměrů), meteorologie (rychlost vzduchu apod.), kalibrace (přístroje, nástroje, měřidla, obráběcí stroje), měření rychlosti proudění (plynů, kapalin jak v potrubích tak v např. buňkách), environmentální lidar, rozmisťování bójí na moři, měření velikosti částic, topografie, pevnostní analýza, sledování malých deformací (stavby, konstrukce, terén), měření vlastních frekvencí a tvarů

b) komunikace a informační technologie – přenos signálu (TV, data) v atmosféře a ve vesmíru, CD a DVD přehrávače, nahrazování výpočetní techniky na bázi polovodičů optoelektronickými prvky, čárový kód, kopírovací stroje, laserové tiskárny, skenery, fotolitografie, video

c) lékařství a medicína – plastické operace, zahlazování vrásek, dermatologie, kardiologie, endoskopie, mikrochirurgické zásahy, oftalmologické operace, „bezbolestná“ chirurgie, vrtání zubů

d) vizualizace dat – laserové ukazovátka, speciální efekty, laserové show, holografie, holografie molekul

e) vojenství – zaměřování, simulace střelby, konstrukce moderních gyroskopů, noční vidění, ničení cílů, vhodná zbraň do vesmírného prostoru

f) vědecký výzkum – astrofyzika (laserové efekty ve vesmírných tělesech), zaměřování, navádění a komunikace s vesmírnými sondami a raketoplány, výzkum nových zdrojů energie (řízená termojaderná reakce, studená fúze), přenos energie na velké vzdálenosti, separace izotopů (např. U^{235}), separace atomů a molekul (výroba chemických individuí), interferometrie, laserová spektroskopie, fotochemie, vytváření a zkoumání plazmy, zkoumání nových materiálů

g) průmyslové aplikace

1. obrábění a práce s materiálem – řezání, vrtání, svařování, soustružení, frézování dynamické vyvažování, značkování, gravírování, dekorace a dokončování povrchu, povrchové kalení, legování, nanášení super tvrdých vrstev, vytváření povrchových slitin, čištění povrchu materiálu. [8,10]

2. měření v oblasti strojů a výrobních zařízení – pokročilá měření geometrických charakteristik (měření přímosti, vodorovnosti, rovnost rámců, desek, válců), ověřování přesnosti obráběcích strojů, rozmístění strojů v sestavách a linkách (přesnost 0,001 mm). [4]

3.2 Laser jako universální obráběcí nástroj

3.2.1 Fotonové obrábění

Podstatou fotonového obrábění je ohřátí malého, přesně specifikovaného, objemu materiálu na tavicí, vypařovací nebo sublimační teplotu v důsledku absorpce koherentního, monochromatického a málo rozbíhavého svazku elektromagnetického záření o vysoké hustotě výkonu.

Elektromagnetické záření dopadající na materiál se z části odrazí, z části může projít materiálem a zbytek materiálu absorbuje. Hloubka proniknutí záření do materiálu R je popsána rovnicí (8).

$$R = 29000 \sqrt{\frac{\lambda}{\mu_r \gamma}} \quad (8)$$

Literatura uvádí, že běžně dosahuje hloubka proniknutí laserového záření do materiálu 0,01 – 1 μm . Z energie pulsu, průměru laserového svazku a hloubky průniku snadno přes tepelnou kapacitu materiálu vypočteme, že se materiál v místě dopadu ohřeje na řádově 10^5 až 10^8 K (ve skutečnosti u tak malých objemů materiálu a při velké dynamičnosti jevu má smysl mluvit spíše o nějaké efektivní teplotě). Třísky jsou z materiálu transportovány za dobu rovnou přibližně délce pulsu, tedy asi 10^{-3} – 10^{-4} s. [8, 9]

U materiálů s menší absorpcí proniká záření méně do materiálu a to vede k přehřívání povrchových vrstev materiálu na vysoké teploty. Důsledkem tohoto přehřívání je explozivní vytrhávání větších částí materiálu. Množství odstraněného a vypařeného kovu je potom větší, než odpovídá bilanci energie. To se projevuje zejména při řezání materiálu větších tloušťek.

Skutečné jevy probíhající při interakci hmoty a svazku energie jsou značně komplikované a těžce se modelují. [4]

3.2.2 Řezání

Rychlost ohřevu, malá tepelně ovlivněná oblast, nezávislost ohřevu na tvrdosti a pevnosti materiálu, malá šířka řezu, neopotřebovávání nástroje, prakticky neomezená složitost řezu – to jsou charakteristiky, které předurčují laserové dělení jako velmi efektivní dělení materiálu.

Samozřejmě, že nejčastěji používanými způsoby dělení kovů je řezání plamenem a nekovových materiálů (papír, dřevo, plasty, useň) pak konvenčním řezáním a vysekáváním. Ale dnes se čím dál více setkáváme, vzhledem k minimalizaci rozměrů konstrukcí, s materiály pevnějšími a tvrdšími než doposud. Stávají se tak tvrdší než konvenční obráběcí nástroje. Podobně lamináty a jiné vrstevné materiály na bázi reaktoplastů a termoplastů vyztužených aramidovými, skelnými, uhlíkovými nebo ocelovými vlákny jsou materiály, které se klasickým dělením zpracovávají špatně. [15]

Principiálně je možno obrábět cokoliv, ale pouze tam, kde nejsou vážnější problémy např. s kvalitou řezu, vrtaného otvoru nebo velkým odrazem je materiál označen křížkem. Běžně používané rezné rychlosti a dosahované šířky řezu u některých kovových i nekovových materiálů jsou v tab. 2. [10]

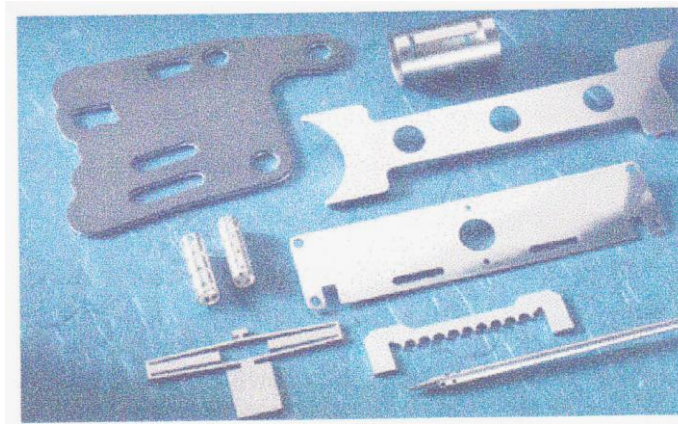
Výběr vhodného laseru a jeho výkonu musíme řešit s ohledem na požadovanou kvalitu řezu a rychlost řezání. Lasery Nd:YAG a Nd:sklo jsou vhodné pro menší tloušťky oceli, nerezů a barevných kovů. Výjimkou je hliník, ten lze dobře řezat jak Nd:YAG laserem, tak CO₂ laserem. Pro větší tloušťky nerez materiálů a oceli (3 – 20 mm) je ekonomičtější použití CO₂ laseru. Všeobecně jsou Nd: YAG lasery používány spíše pro jemnější práce.

V současné době jsou pro vlastní dělení používány tyto metody laserového dělení: sublimační, tavné a oxidační řezání.

U sublimačního řezání dochází k okamžitému odpaření materiálu po dopadu svazku laseru. Tento proces vyžaduje poměrně vysokou energii. Asistentní plyn slouží jen k vyfukování par kovů. U tohoto způsobu se docílí vyšší kvality řezu. Je možno dosáhnout hladkých ploch. Při tavném řezání je materiál laserovým paprskem natavován a asistentní plyn je vyfukován ze rezné spáry ven. Potřebný výkon je nižší než u sublimačního řezání.

Při oxidačním řezání je podporováno hoření materiálu přívodem kyslíku. Teplo z exotermní oxidační reakce se aduje. To vede k podstatnému zvýšení rychlosti řezání. Na druhé straně zde není možno očekávat takovou kvalitu řezu jako u sublimačního řezání (zejména hladkost povrchu a dodržení kolmosti řezu). Je vhodné pro hrubší dělení velkých plechů, desek apod.

Kvalitně a ekonomicky lze řezat ocel (hlavně třídy 11) od 0,1 do 25 mm, nerez oceli do 12 mm, slitiny Al do tloušťky 8 mm a materiály jako bronz a mosaz a některé exotické materiály do tloušťky 4 mm. [11]



Obr. 17. Možnosti vyřezávání laserovým paprskem

Tab. 2. Běžné řezné rychlosti a dosahovaná šířka řezu u některých materiálech

Materiál	Tloušťka [mm]	Řezná rychlost [m.min ⁻¹]	Řezná štěrbina [mm]
Hlubokotažný plech	1	3,5	0,1
	2	2,25	0,15
	3	1,2	0,2
Konstr. uhlíková ocel	3	1,5	0,2
Cr-Ni ocel	0,5	4,5	0,1
	1	2	0,1
	2	0,7	0,15
	3	0,2	0,2
Pozinkovaný plech	0,8	3,0	0,1
	1	2,7	0,1
	1,5	2,4	0,1
Ti slitiny	3	13	0,4
	10	2,8	1,5
	40	0,5	3,5
Olovo	2	2,5	0,2
	3	1,8	0,2
PES	3	0,1	0,2
Azbestocement	5	0,6	0,1
Křemenné sklo	1,9	0,6	0,2
Překližka	8	3,5	0,5

Samostatnou kapitolou je využití laserového vyřezávání v papírenském průmyslu.

Potřebujeme vyrábět velké množství skládaných papírových krabiček pro výrobu obalů pro potravinářský průmysl apod. Balící automaty krabičky z příslušného polotovaru složí, naplní a uzavřou. Papírenský průmysl musí zajistit výrobu miliónů kusů těchto krabiček, k jejichž výrobě potřebujeme překližkové nebo PMMA raznice s vyřezanými drážkami o otvory pro vysekávací a ohýbací nože. Tyto raznice se během stovek tisíc zdvihů opotřebovávají a je tedy nutno vyrábět nové. Dříve se drážky vyřezávaly lupenkovými pilami. Pracoviště vybavené CO₂ laserem výkonu 1 – 3 kW provede vyřezávání libovolně složitých zářezů desetkrát rychleji, kvalitněji a přesněji, raznice dosahují vyšší životnosti (až 200000 krabiček), celou výrobu raznic lze zautomatizovat, roste produktivita, klesá pracnost a navíc je z technologického procesu vyřazen člověk.

Řezání laserovým paprskem je efektivní zejména u menších a často se měnících sérií. [11]

3.2.3 Vrtání

Vrtání bylo prakticky první aplikací laserů v technologických pracích. Nejprve se vrtaly tenké fólie, později plechy a dnes můžeme vrtat otvory hloubky i nad 50 mm. Typickou

aplikací je vrtání rubínových ložiskových kamenů (do hodinek, ale především do měřících prostorů). Dnes se již rubíny nevrtají jinak. Na rozdíl od korundových, diamantových a jiných brusných nástrojů působí laser svým tepelným účinkem a tvrdost materiálu tak nehraje roli. Kvalita je dokonalá. Stejným způsobem se vrtají otvory do diamantových nebo karbidových průvlaků. Oproti klasickému postupu je proces laserového vrtání 300 až 500 krát rychlejší. [4]

K vrtání se dnes používají převážně pulsní lasery (často Nd:YAG). Např. laser JK704 firmy Lumonics umožňuje vrtat otvory až do hloubky 75 mm. Pro otvory hloubky větší jak 3 mm se používá CO₂ laserů, pro které je ovšem vrtání šikmých otvorů prakticky nemožné.

U pulsních laserů dochází k vyvrtání otvorů na několik pulsů (tzn. perkusním vrtáním je tak možno vyvrtat otvory o průměru 200-500 μm). Kontinuálně pracující lasery je možno k vyvrtání otvoru použít při malé tepelné vodivosti materiálu nebo je jich možno použít pro vyvrtání větších průměrů vykrajováním po obvodu (u děr průměru 10 mm může být dosažena kruhovitost kolem ± 50 μm). [16]

3.2.4 Svařování

Hlavní předností laserového svařování je kvalita sváru, podstatně vyšší hloubka průvaru, podstatně menší ovlivněná zóna, vysoká produktivita, snadnější možnost automatizace a v neposlední řadě též povrchový vzhled. Dnes již konstruktéři přímo na daná místa předepisují svaření laserem.

Velké hloubky průvaru je možno dosáhnout až při překročení tzv. mezní hustoty výkonu. Pro CO₂ laser a kruhové polarizaci je to asi 10⁶ W.m⁻². Při tomto procesu vytvoří laserový paprsek „kapiláru“, která má průměr 1,5 až 2 násobku průměru fokusovaného svazku. Uzavření této kapiláry je zabráněno proudem plynů a plazmy uvnitř této kapiláry. Mnohonásobným odrazem v této kapiláře se výrazně zvyšuje absorpce materiálu. Energie ze stěn kapiláry potom vniká do taveniny a okolního materiálu. Za touto kapilárou (plynovým kanálem) se taveniny obou materiálů spojují. [10,11]

Při svařování natupo je nutné, aby byly oba materiály ve stejné výšce. Při svařování přeplátováním je nutný dokonalý kontakt, protože spodní plát se ohřívá jen vedením. [10]

Co se týče čistoty materiálů, tak výhodné je zdrsnění povrchu a povlak oxidů (zvýšení absorpce), izolované dráty možno dokonce svářet přímo bez odstranění izolace. Při svařování

speciálních materiálů se ale doporučuje dokonalé očištění. Laserové svařování se může provést i ve vakuu (platí stejné zásady jako při svařování elektronovým paprskem).

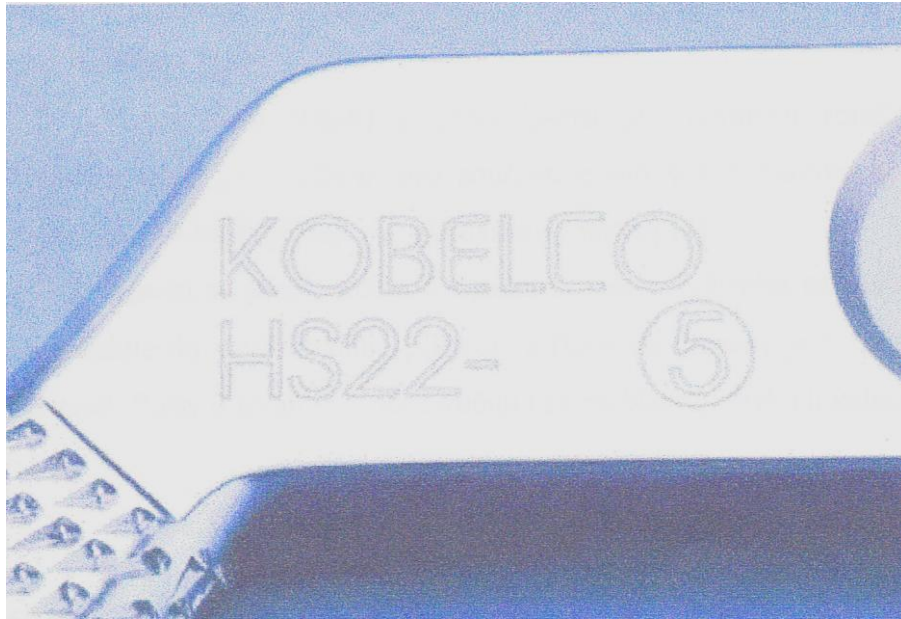
Vysoce legované Cr-Ni oceli o tloušťce do 15 mm se svařují výkonem 10 kW a výsledky jsou velmi dobré, titan a jeho slitiny při tloušťce 8 mm mají stejné výsledky. U hliníku je problém s pórovitostí. Extrémní tloušťky (50 – 100 mm) vyžadují kontinuální výkony CO₂ laserů kolem 100 kW.

Vlivem lokálnosti svazku je možno dosáhnout okamžitého ohřátí obou materiálů, přestože jsou jejich teploty tavení velmi vzdálené (plast – kov, keramika – kov, plomba – zub) nebo je možno svařovat velké kusy s malými díly (např. tenký drát s masivním dílem). Nefokovaný paprsek lze použít pro pájení.

Dnes má svařování laserem široké uplatnění zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. [4,10]

3.2.5 Značkování a gravírování

Pro vytváření nejrůznějších nápisů, značek a stupnic je možno použít svazku laseru s nižší energií. Výhodou je vysoká mechanická odolnost nápisů a přesnost, možnost dosažení velmi složitých tvarů, možnost značkovat i velmi tvrdé nástroje, absence přídavného materiálu (inkoust, páska, chemické látky, fólie, mechanické silové působení) apod. Klasickým nástrojem je diamant, který se však otupuje a dochází k nerovnoměrnému popisu. Pomocí Nd:YAG a CO₂ lze popsat prakticky libovolný kovový i nekovový materiál. Materiál může mít proměnnou výšku a různou povrchovou úpravu, kvalita povrchu (např. mazivo) nemá na kvalitu popisu prakticky význam. Hloubka popisu je od několika mikronů až po gravírování do větších hloubek. Příkladem použití laserového popisu je značení chirurgických nástrojů. Jak ukazuje obr. 20, je toto značení velmi elegantní. [11]



Obr. 18. Laserový popis chirurgických nástrojů je dnes standardem

Výrobce nejrůznějších výrobků, např. obráběcích strojů může použít k jednotnému popisu svých produktů. Značení stupnic měřících nástrojů je s přesností 0,005 mm. Dřevařský a sklářský průmysl využívá laserového popisu k dekoraci skleněných a dřevěných výrobků. K popisu se dne nejčastěji používají Nd:YAG lasery o výkonu kolem 100 W. [4]

3.2.6 Soustružení a dynamické vyvažování

Mimořádně tvrdé a teplu odolné keramické materiály bylo vždy obtížné obrábět s vysokou přesností. Soustružení s pomocí laseru je schopno nahradit konvenční broušení. Např. pomocí diodových laserů je možno úspěšně obrábět keramické materiály, které se uplatňují např. u ventilů motorů, průmyslových řezacích nástrojů, součástí turbín z nitridu křemíku apod. Oproti broušení může nový způsob laserového soustružení vytvářet obrysy podle jakékoliv specifikace a to jedním nástrojem. Operace je rychlejší, přesnější a dosahuje a lepšího povrchu než při broušení. Obráběcí nástroj je složen ze soustružnického nože, který je umístěn těsně před paprsek diodového laseru. Laser ohřívá plochu obrobku a materiál se tak těsně před řezem změkčuje. Metodika předehřevu povrchu tvrdých materiálů těsně před mechanickým odebráním třísky se rychle rozvíjí. Změkčení materiálu (např. u uvedeného nitridu křemíku jde o ohřátí na 800 až 1000 °C) vede k zmenšení opotřebení břitu, snížení práce potřebné na řez, zrychlení obrábění a vůbec k obrábění vysoce legovaných materiálů jinými metodami jen těžko obrobitelnými. [17,18]

Firma Ford (USA) používá laseru pro obrábění rotačních součástí z nitridu křemíku, který je používán pro součásti plynových turbínových motorů. Laser provede operaci až 10-krát rychleji než diamantový nástroj. [4]

Laseru se také používá k dynamickému vyvažování rotačních dílů. Laserový aparát se instaluje do vyvažovacího přístroje a řezanými impulsy je z „přetížených“ míst odebrán materiál. Pulsy o trvání 0,1 ms zaručují i za rychlého pohybu lokalizaci paprsku. [4,8]

3.2.7 Tepelné zpracování povrchu a vytváření povrchových vrstev

U součástí jako jsou palce, klikové hřídele, vačky, boky ozubených kol, válce motorů jsou kladeny maximální požadavky na odolnost vůči opotřebení a zároveň na mechanickou odolnost jádra, to musí být především houževnaté. Jak dokázal Glaubitz, opotřebení povrchu je funkcí jeho tvrdosti. Zvýšíme-li tvrdost z 56 na 62 HRC, sníží se hodnota měrného opotřebení 3-krát. Tvrdost povrchu vede k zamezení povrchových mikro deformací při kontaktu součástí. [19]

K prohřátí povrchu materiálu na austenitizační teplotu je třeba použít CO₂ laser o výkonu několika kW. Při rychlostí pohybu několik desítek mm za sekundu materiál vlivem dobré tepelné vodivosti materiálu okamžitě chladne a vytváří se tak do hloubky desítek um jemná martenzitická struktura. Pro menší plochy se pak stačí impulsní lasery, které dovedou jediným pulsem zakalit např. ostří nástroje z rychlořezné oceli [18].

Firma General Motors používá povrchového kalení u různých součástí automobilů. Tepelné náklady potřebné na zakalení se snížily o 80%. Laser se dostane do míst, které jsou nepřístupné pro indukční nebo tepelné kalení. Tvrdost ocelí používaných v automobilovém průmyslu vzroste po opracování laserem 3 až 4-krát. [5]

Legování povrchu je proces natavení materiálu a následné nasycení povrchu legurou. Tyto se na povrch součástí nanáší před aplikací laseru. Nános se děje plazmatem nebo nástřikem prášku do roztaveného kovu. Vstřikováním tvrdých práškových částic lze vytvářet heterogenní vrstvy s vysokou odolností proti oděru i na hliníku nebo titanu a obdobně lze vytvářet i povrchové vrstvy. TiN s vynikajícími vlastnostmi se zřetelem na odolnost proti dynamickému namáhání. [18]

Při tepelné úpravě povrchů laserem se cení vysoká lokalizace tepelné energie a tím pádem minimální tepelné deformace celku. Odpadá tak potřeba dalšího obrábění.

3.2.8 Laser pro účely metrologie a pokročilé měření geometrie

Klasické prostředky na seřizování, kalibraci, kontrolu a ustavování obráběcích strojů a zařízení celých linek jako jsou vodováha, struna a úhelník jsou daleko překonány použitím laserových měřících přístrojů.

Laserem se dříve kontrolovala např. přesnost soustruhů a frézek, přesnost pravítek apod. Dnes nalézá široké uplatnění při měření přímosti, vodorovnosti, kolmosti a rovnoběžnosti desek, válců, sloupů, loží apod. Můžeme jej použít k ustavování rozměrů strojních součástí a přesnému rozmístování strojů v linkách.

Přesnost je až 0,001 mm na vzdálenost 50 m. Např. 4 metrový soustruh se dá klasickými metodami proměřit za 5 – 8 hodin. Prostřednictvím laserových přístrojů je možno změřit kolmost a přímost lože a zkontrolovat sousost vřetene za 1 hodinu. [20]

4 OBRÁBĚNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

4.1 Svařování polymerů

Laserový svar u plastové součásti, desky nebo fólie se vyznačuje vysokou jakostí a pevností, velké flexibilitě a hospodárnosti. Stejně jako u kovů je zde zásadním faktorem přísná lokalizace tepelné energie, ovlivněná oblast je minimální (desetina mm), tepelné deformace také a nedochází k tepelnému poškození okolních částí. Klasickou metodou svařování plastů je svařování indukční, vysokofrekvenční a ultrazvukové. Na rozdíl od těchto metod, můžeme při použití laseru vytvářet libovolně složité svary, nejsme omezení malou tepelnou vodivostí jako u indukčního svařování a nejsme omezení na polární polymery jako u vysokofrekvenčního svařování. Laser se dá uplatnit jak pro mikro součásti, tak např. pro svařování automobilových plastových nádrží.

Svařuje se natupo, kde je energie dodávána do spáry a tlak taveniny spojí obě části nebo se svařuje přeplátováním. Zde je nutné, aby byl jeden materiál pro laserové zařízení dosti propustný (nejlépe transparentní) a spodní materiál, aby dobře absorboval. Dobré absorpce se běžně dosahuje přidáním vhodných barviv, které selektivně absorbují laserové záření. Vzniklý svar je hladký, bez pórů a vypouklin taveniny, má reprodukovatelnou pevnost. Díky vynikajícímu vzhledu mohou být švy svařovány i na viditelných místech. Svařovat můžeme i termoplasty s reaktoplasty, termoplast s pryží

Pro svařování plastů postačují výkony do 50 W. Nejlépe se osvědčují malé a kompaktní diodové lasery, jejichž níže vykonané varianty se používají v CD přehrávačích. Rychlost svařování může být až $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [24]

4.2 Vrtání polymeru

Platí zde stejné zásady jako při vrtání kovů a jiných nekovů. Uplatňuje se jak pulsní režim (perkurní vrtání s energií kolem 30 J/ms) nebo i vrtání kontinuálním laserem. Pro pulsní režim je možno použít Nd:YAG laser. V kontinuálním režimu pak dobře pracují zejména diodové lasery, které nahrazují CO₂ lasery. Jak již bylo uvedeno, podmínkou použití CW provozu je malá tepelná vodivost materiálu, což je u plastů splněno ($\lambda=10^{-1} \text{ W/mK}$).

Průměr vrtané díry a její kvalita závisí do značné míry na tloušťce materiálu. Průměr otvoru je 0,1 – 0,5 mm. Pro větší otvory musí laserový svazek přirozeně rotovat. [26]

4.3 Značkování a gravírování polymerů

Uplatňuje se zejména u nejrůznějších typů klávesnic (počítače, kalkulátory, přístroje), při popisu reklamních, propagačních a upomínkových předmětů.

Propisovací stroje (většinou Nd:YAG lasery) pracují většinou jak s kovy, tak i plasty.

4.4 Dokončování a úprava povrchu polymerů

Povrchová úprava nekovů není tak rozšířena jako u kovových materiálů. Nicméně tangenciálně směřovaný laserový paprsek může výrazně zlepšit povrch např. keramiky ale i platů a laminátů. U PMMA a nitridu křemíku je tak možno dosáhnout podmikronových drsností.

Zdroj [25] uvádí možnosti úpravy povrchu rotačně symetrických vzorků pomocí statického svazku laseru. Pro nerotační plochy je pak nutné řízení svazku. Je možno použít běžných galvanometrických vychylovačů, které se používají v laserových propisovačkách. Výsledky experimentů a simulace se shodují v následujících závěrech: čím větší je rychlost rotace, tím lepší povrch je dosažen, větší výkon laseru způsobuje větší vlny na povrchu, nejlepších výsledků je dosaženo při tangenciálním sklonu svazku. [26]

4.5 Řezání polymeru a kompozitních materiálů

4.5.1 Obrobitelnost plastů

Dělení plastů, reaktoplastů, polymerních slitin, kompozitů, laminátů a vrstevnatých materiálů vyztužených skelnými, aramidovými, uhlíkovými, ocelovými nebo titanovými vlákny představuje rozsáhlé pole působnosti laserových technologií.

Výzkum dělení polymerních materiálů paprskovými metodami byl původně iniciován potřebou obrábění vysocepevných a houževnatých kompozitů v leteckém a raketovém průmyslu. Kompozit s matricí na bázi PA, PC nebo PTFE a výztuží z kevlarových nebo titanových drátů představuje konstrukční materiál s vysokým poměrem pevnost/hmotnost (nebo tuhost/hmotnost). Polyblendy jako Triax (Monsanto, USA) což je slitina PA66/ABS 50 : 50 je zástupcem inženýrských plastů s nejvyšší houževnatostí. [26]

Klasické řezání pilou nutně znamená vytrhávání vláken. Kvalita řezu pak je nedostačující. Na snadě je tedy použití paprskových metod. V kapitole 3.3 jsou rozebrány možnosti, vý-

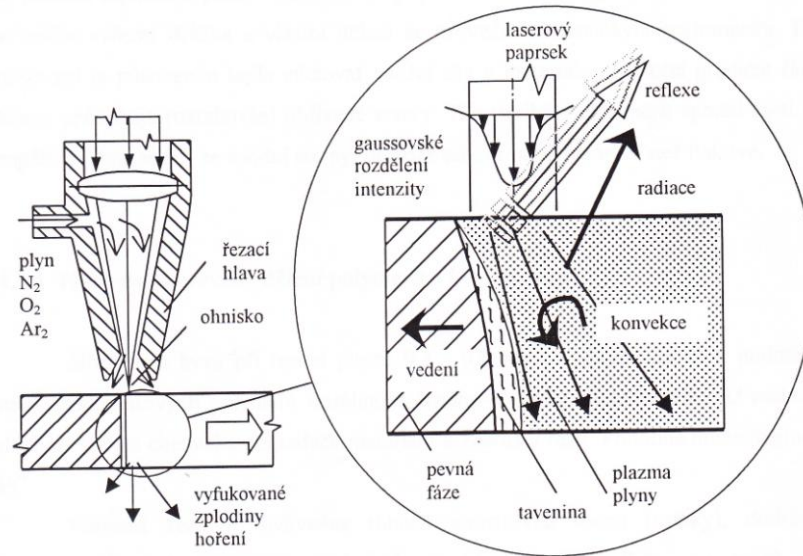
hody a nevýhody a efektivnost použití laseru a paseru. Práce dokazuje možnost efektivního použití laseru a paseru pro dělení plastů a kompozitů. Poukazuje též na možnost optimalizace řezného procesu volbou vhodných technologických parametrů laserového zařízení. [9]

Z hlediska fyzikálního principu tepelného dělení je obrobiteľnosť plastů obecně zaručena zejména malou tepelnou vodivostí. Jak již bylo ale zmiňováno, tak problémem je právě řezání tepelně ortotropních materiálů. To jsou zejména plasty nebo reaktoplasty vyztužené kontinuální dlouhovláknou výztuží z materiálu o řádově 100-krát větší tepelné vodivosti než plasty (zejména uhlíkové, ocelové a titanové vlákna). Jak ukazuje, tak množství odebraného materiálu za stanovených podmínek (poddajnost materiálu na laserové obrábění) je nepřímě úměrné tepelné vodivosti a měrného tepla. Tepelná vodivost plastů je 100-krát menší než je tepelná vodivost kovů. Na druhé straně je tepelná kapacita kovů menší než u plastů (u titanu 800 J/kgK, u wolframu 130 J/kgK a u železa 450 kJ/kgK, ale např. u PMMA je 1500 J/kgK, u PC 1200 kJ/kgK, u PA6 1700 J/kgK). Druhým faktorem, který zaručuje obrobiteľnosť je dobrá absorpce většiny plastů pro vlnovou déku 10,6 μ m CO₂ laseru. [8]

4.5.2 Interakce polymerního materiálu s laserem

Záření, které není odraženo nebo neprojde materiálem bez účinku se absorbuje. Absorpci popisuje vztah. Kvanta energie elektromagnetického záření laseru předávají svou energii elektronům atomů materiálu, které se vybuzují a následně přechází nezářivými přechody do základního stavu za vyzáření fotonů – kvant kmitavé energie krystalové mřížky. Energie fotonů laseru se též disipuje předáváním energie molekul látek. Tyto mění svoje vibračně-rotací módy. Výsledkem obou procesů je zvýšení kmitavé energie molekul tedy ohřátí látky.

Obr. 19 ukazuje procesy, které nastávají při řezání materiálu laserem. Laserové záření je z části odraženo a z části se absorbuje. Teplo vzniklé v řezu se z části odvádí do materiálu vedením, ale vzhledem k malé tepelné vodivosti převažuje u plastů odvod tepla radiací. Mezi parami a plazmou a taveninou polymeru a taveninou a stěnou tuhé fáze dochází k výměně tepla konvekcí. [4]



Obr. 19. Procesy probíhající při řezání materiál

4.5.3 Metody řezání plastů laserem

Při obrábění plastů rozlišujeme tyto metody řezání:

a) tavné řezání (GAC – Gas Asistent Cutting) – zde je materiál natavován a převážná část je z řezu vyfouknuta pomocí asistovního plynu (viz. Obr. 19). Jako asistovní plyn se používají inerty i vzduch, tlak je 0,15 – 3 MPa. Tavenina polymeru je v řezu tvarována proudem plynu. Na spodní části řezu mohou vznikat krátká vlákna. Tento typ řezání je realizován u PP, PE, ABS, PA. Průměr trysky je do 5 mm.

b) sublimační – zde je vyžadován větší výkon laseru nežli u a). K vypaření, resp. Sublimaci dochází zejména u akrylátových polymerů, PMMA, PMA a PAN. Akrylátové polymery jak známo snadno depolymerují na své monomery. Konverze může dosáhnout i 95%. Při působení intenzivní energie laseru dochází přirozeně ke vzniku různých vedlejších produktů (benzen, toluen, polycyklické aromatické hydrokarbonáty), ale 98% plynů v řezu tvoří methylmetakrylát). Tyto zbytky se spolupodílí na vzniku řezu.

c) chemickou degradací – reaktoplasty (pryž, melaninformaldehydové pryskyřice, polyestery, epoxidové pryskyřice, lamináty na bázi pryskyřic, fenoplasty aj.) jsou tvořeny trojrozměrnou zesíťovanou strukturou. Jsou tak netavitelné a nerozpustné. Působením tepla se rozkládají na různé odpadní zplodiny. Potřebujeme zde opět vyšší výkon než u a).

d) pomocí teplotních pnutí tato metoda je použitelná u křehkých materiálů. Do materiálu se může vyřezat drážka a vlastní dělení se provede mechanickým rozlomením. Druhou možností je působením tepla iniciovat vnitřní síly v materiálu. Teplotní gradient řádu 10^3 K/mm způsobuje roztahování ohřívané vrstvy. Tím vzniká v chladnější spodní části tahové napětí. Trhlina se šíří ze spodní strany, protože tahové napětí je vyšší než tlakové.

5 POLYMERNÍ MATERIÁLY

5.1 Základní pojmy a rozdělení polymerů

Plasty jsou materiály složené z makromolekulárních látek, polymerů. Teplem a tlakem je možné měnit jejich formu a tvar, tedy tvářet je či tvarovat. Polymery jsou přírodní nebo syntetické sloučeniny, v jejichž veliké molekule tzv. makromolekule se jako článek řetězce mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Představují tedy chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. Plastem se polymer stává až poté, co jej smísíme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování.

V této práci budeme dávat přednost obecnému termínu polymery. Ten totiž vyjadřuje, že se jedná o látky s velkými molekulami, v nichž, se jako článek řetězce, mnohokrát opakuje základní tzv. "monomerní" jednotka. Řecká předpona poly – znamená mnoho nebo také více. [13]

Zatímco polymer je chemická látka, plast je technický materiál, který musí vykazovat vhodné užitné vlastnosti. Polymery je možno dělit podle různých hledisek. Podle základních technických vlastností se polymery dělí na:

- elastomery, tj. polymery, které rychle obnovují původní tvar a rozměry, které měli před deformací malým napětím (kaučuky);
- plastomery (plasty), tj. polymery, které zůstávají deformovány, i když deformující napětí přestane působit (deformace je nevratná).

Dále se polymery dělí podle toho, jak se chovají při zahřívání na:

- termoplasty, při zahřátí měknou a postupně přecházejí ve viskózní taveninu. V tomto stavu je lze tvářet a různými technologiemi zpracovávat. Po ochlazení ztuhnou do formy, která má tvar konečného výrobku. Celý proces lze mnohokrát opakovat.
- reaktoplasty, na rozdíl od termoplastů při zahřátí dále tuhnou, jelikož vyšší teplota urychluje reakci - tvorbu jejich vnitřní struktury, trojrozměrné polymerní sítě. Takový plast je již poté nerozpustný a netavitelný. Mezi reaktoplasty se řadí různé typy syntetických pryskyřic - polyesterové, epoxidové a fenolformaldehydové. [13]

Další možností dělení polymerů, avšak málo užívanou je možnost klasifikace podle jejich postavení na trhu:

- komoditní polymery, ty představují největší objem výroby i spotřeby, ale současně jsou ze všech polymerů nejlevnější. Do této skupiny patří v podstatě jen čtyři základní skupiny polymerů, totiž polytheny (zejména nízkohustotní polyethylen PE-LD, vysokohustotní polyethylen PE-HD a další typy polyethylenu), polypropylen, polystyren a polvinylchlorid.

- konstrukční polymery, ty jsou oproti komoditním zřetelně dražší, ale nabízejí mnohem lepší užitné vlastnosti a také zřetelně vyšší teplotní odolnost. Do této skupiny patří polyamidy, kopolymery ABS a různé kompozity a směsi.

- speciální polymery, ty nabízejí unikátní užitné vlastnosti, ale jsou velmi drahé. Sem patří polysulfony, kapalně krystalické polymery a materiály pro lékařské aplikace. [1]

5.2 Charakteristiky zadaných polymerů

5.2.1 PMMA (Polymethylmethakrylát)

Monomerem je metylester kyseliny metakrylové, jedná se o čirou kapalinu.

Výroba:

PMMA se vyrábí radikálovou (blokovou, suspenzní nebo emulzní) polymerací.

- Bloková polymerace – průmyslová: V reaktoru dochází k předpolymeraci při teplotě mezi 60 - 100 °C, pak následuje ochlazení a filtrace.

Poté následuje dokončovací polymerace:

a) diskontinuální - do forem - ve skleněných deskách se stlačitelnou distancí. Mezi desky se nalije předpolymer, vloží se do horkého tunelu o teplotě 40 - 130 °C na dobu 4 - 9 h podle tloušťky stěny.

b) kontinuální - mezi ocelovými pásy s flexibilním utěsněním okrajů – nevýhodou je horší kvalita povrchu, která je závislá na úpravě ocelových pásů.

Bloková polymerace se používá především pro výrobu bloků a desek, případně polotovarů jiných tvarů. Použijeme-li rotační formy, lze tímto postupem vyrábět také trubky. Bloková

polymerace umožňuje dosáhnout vysokých hodnot polymeračního stupně. Tím se zlepšují mechanické vlastnosti desek.

- Suspenzní polymerace: se používá převážně pro výrobu termoplastických materiálu zpracovávaných vytlačováním a vstřikováním.

Polymerace probíhá v polymeračních kotlích opatřených vhodnými míchadly, přívody pro suroviny a pláštěm, který umožňuje temperování kotle. Polymerace probíhá při teplotě mezi 80 - 130 °C . Po ochlazení se granule promývají a suší.

- Emulzní polymerace: Produkty slouží jako nátěrové hmoty. Polymerace se v hlavních rysech podobá suspenzní, jen udržování rovnoměrné teploty je třeba věnovat větší pozornost a používané teploty bývají nižší.[13]

Vlastnosti PMMA:

Je to sklovitě čirý polymer, i v tlustých vrstvách, to umožňuje jeho dokonalou průhlednost ale i snadné vybarvování. Je to hmota bez chuti a zápachu. Částečně propouštějící UV záření, velmi odolný vůči povětrnostnímu stárnutí, je tvarovatelný při 130 - 140 °C, má velkou tepelnou roztažnost, velmi dobré elektroizolační vlastnosti, je pokovovatelný. Také se vykazuje vynikající tvarovou paměť, projevující se vrácením tvarové desky do původního stavu po zahřátí na T_m (teplotu tání).

Do 80 °C, dobře se mechanicky obrábí, je rozpustný v aromatických uhlovodících, esterech, ketonech a éterech. Odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. PMMA vyniká především vysokou tuhostí. Jeho modul pružnosti v tahu leží mezi 2300 až 3300 MPa.

Zpracování:

Zpracovává se vstřikováním při 170 - 220 °C (při vstřikování ovlivňuje velikost a doba dotlaku významně vlastnosti výstřiku, pro dosažení vysoce kvalitních výstřiků nesmí být teplota formy příliš nízká a musí být stálá), vytlačováním, tvarováním, mechanickým opracováním (jedná se o řezání, frézování, broušení, vrtání i leštění; rychlost obrábění je zapotřebí volit tak, aby nedocházelo k natavování materiálu; pro řezání lze s výhodou použít například paprsek laseru).

Použití:

Blokový typ se používá k výrobě desek, trubek, tyčí, profilů, částí svítidel, vstřikovaných výrobků domácí spotřeby, krytů kabin letadel, v zubní technice – protetika, kancelářských

potřeb, hodinkových sklíček. Ze suspenzního typu se vyrábí plnicí pera, tužky, knoflíky, tlačítka, ochranné kryty apod. Emulzního typu se užívá k výrobě latexových nátěrových barev. [1,4]

5.2.2 PP (Polypropylen)

Teprve od roku 1954, kdy G. Natta, zjistil, že vlivem některých katalyzátorů, jsme schopni polymerovat monomer (kterým je propylen, jež je jednou z nejdostupnějších petrochemických surovin získávanou z odpadního plynu z rafinerie, zemního plynu či kapalných uhlovodíků) na vysokomolekulární polymery s pravidelnou strukturou, vysokým bodem tání a dobrými mechanickými vlastnostmi, si našel polypropylen své uplatnění na trhu. Rozdíly ve vlastnostech různých polypropylenů jsou způsobeny prostorovým uspořádáním substituentů. Podle tohoto uspořádání se PP dělí na izotaktický (methylskupiny má na jedné straně a je značně krystalický), syndiotaktický (je má střídavě nad a pod rovinou proloženou základním řetězcem a má určitou krystalinitu) a ataktický (který má statistickou distribuci konfigurací a je to podstatě amorfni kaučukovitá hmota). Řetězce všech struktur jsou prakticky lineární bez větvení. Všechny uvedené struktury jsou zastoupeny ve vyrobeném PP, přičemž izotaktický podíl tvoří většinou více než 80 % celkové hmotnosti, syndiotaktický tvoří jen několik % hmotnosti a ataktické podíly by neměli přesahovat 10 %. Jednotlivé podíly lze od sebe oddělit frakční extrakcí.

Výroba:

Postup výroby se u různých firem liší, proto zde jako příklad výroby uvedu pouze výrobu PP v Chemopetrolu Litvínov a.s.

Propylen je před polymerací zbaven vodíku, ethanu, ethylenu a propanu destilací na koloň, pak se vápnem odděluje CO a CO₂ a molekulovými sítí se odstraní přebytečná voda. Katalyzátorem polymerace je modifikovaný chlorid titanitý. Polymerace probíhá ve třech reaktorech. Rozpouštědlem je hexan, teplota při polymeraci je 50 až 70 °C, tlak 0,7 až 1 MPa. Regulátorem molekulové hmotnosti je vodík. Suspenze polymeru v hexanu se z reaktoru vede do uvolňovací věže, odkud nezreagovaný monomer a hexan odcházejí k recyklaci. V uvolňovací věži se (rovněž hexanem) vypírá ataktický polypropylen (jehož podíl snižuje teplotu tání a zhoršuje mechanické vlastnosti a odolnost vůči rozpouštědlům). Suspenze polymeru se vede do dezaktivátoru, kde se zbytky katalyzátoru rozkládají methanolem za vzniku alkoholátů Ti, Al a chlorovodíku, který se neutralizuje roztokem NaOH.

Následně se odděluje methanol a suspenze se na odstředivkách dále odděluje od hexanu a potom se polymer suší ve fluidní sušárně. Prášek se smíchá s přísadami (zejména s antioxi- dačními stabilizátory) a může se granulovat na extruderech. Zefektivnění původních tech- nologií bylo umožněno pomocí vývoje nových katalyzátorů, kdy při jejich vysoké vytiže- nosti odpadá nutnost jejich odstraňování z výsledného produktu, což vede ke snížení inves- tičních a provozních nákladů. [1]

Vlastnosti:

Vzhledem ke své krystalinitě je PP neprůhledný. Má výborné elektroizolační vlastnosti v široké oblasti frekvencí. Vykazuje poměrně dobrou odolnost vůči opotřebení. Má nízkou hustotu (menší než voda), je to jeden z nejlehčích polymerů. Botná v ketonech, uhlovodí- cích a esterech. Nad 90°C se rozpouští v chlorovaných uhlovodících. Jeho tepelná použi- telnost je krátkodobě do 135 °C a dlouhodobě do 100 °C. Má vyšší pevnost a tvrdost, včet- ně odolnosti vůči trhlinám (vznikajících za napětí), ale má vyšší křehkost pod 0 °C. (1) U nestabilizovaného vzorku dochází již po několika týdnech na slunci ke křehnutí a praskání. Životnost PP se dá prodloužit pomocí stabilizátorů (absorbéry UV-záření, antioxidanty, saze pro zlepšení odolnosti vůči povětrnosti). Jeho vlastnosti kolísají s krystalinitou, závislou na způsobu zpracování. Zvýšení houževnatosti, transparency a flexibility lze tedy dosáhnout pomocí snížení stupně krystalinity.

Zpracování:

Před zpracování je potřeba polymer upravit přidáním vhodných tepelných a světelných sta- bilizátorů.

PP lze zpracovávat většinou zpracovatelských technologií a to vytlačováním na jednošne- kových nebo lépe na dvoušnekových vlačovacích strojích, vstřikováním, lisováním, žáro- vým stříkáním, nanášením a samozřejmě také obráběním. Dá se orientovat dlužením, což se provádí hlavně u vláken a fólií.

Vytlačováním se vyrábějí trubky, desky, fólie a profily při. Desky a bloky lze také lisovat z granulí. Desky a trubky se spojují svařováním polypropylenovým drátem (pistolí pro sva- řování horkým plynem). Fólie lze svařovat sálavým teplem nebo tepelným impulsem.

Použití:

Lze jej použít na výrobky, u kterých je vyžadována tuhost, mechanická pevnost a dobré elektroizolační vlastnosti. Uplatnění našel v automobilovém průmyslu jako vstříkované dílce přístrojových desek. Ve spotřebním průmyslu se používá jako součásti vysavačů, fé-nů, mixérů, hraček, kufrů. Dále pro výrobu chemicky odolných trubek a kanalizačních odpadů. Fólie z PP se užívají pro balení těstovin, bonbónů, mastných produktů a jiných potravin. Široké je i uplatnění při výrobě textilních vláken z PP, která jsou mechanicky pevná a schopná absorbovat deformační energii díky své elasticitě. Stříž z PP se používá do potahových látek, koberců, podlahovin a technických tkanin. [1,4]

6 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Diplomová práce se zaměří v praktické části na experimentální obrábění vybraných polymerních materiálů PMMA a PP při změně technologických parametrů (výkonu a posuvové rychlosti) a při změně rozlišení DPI 200, 500, 1000.

Následně bude provedeno měření hloubky řezu a statistické zpracování výsledků, dále bude zpracován ekonomický rozbor pro obrábění vzorků s rozdílným rozlišením.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 POUŽITÉ PŘÍSTROJE PŘI MĚŘENÍ

7.1 Mikroskop Leica DMI3000 M

Ke zkoumání plochy byl použit metalografický mikroskop Leica DMI3000 M. Optika přístroje je propojena s digitální kamerou a počítačem. Použité zvětšení je stonásobné a dvěstěnásobné.

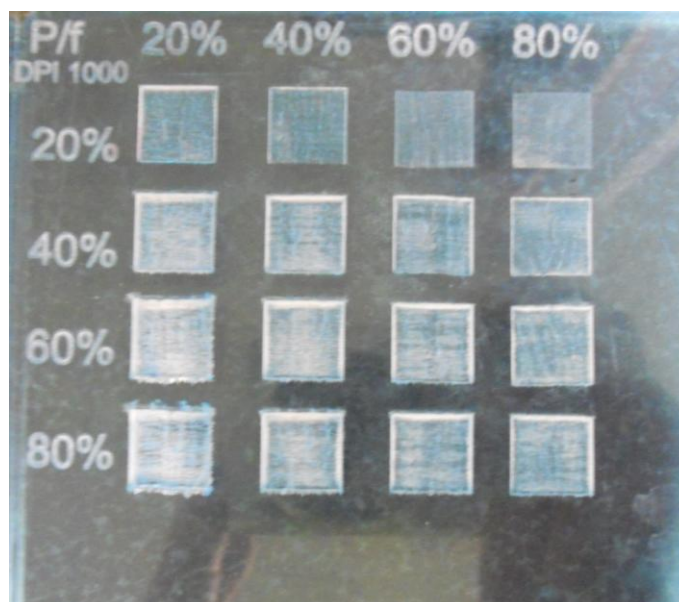


Obrázek 20 Metalografický Mikroskop Leica DMI3000 M

Tabulka. 3. Technické parametry mikroskopu Leica DMI3000 M

ZAOSTŘENÍ	ruční, hrubé a jemné nastavení
MAXIMÁLNÍ ZVĚTŠENÍ	1000x
DOPADAJÍCÍ SVĚTLO	spodní osvit, přímý osvit, diferenciální interferenční kontrast, fluorescence, polarizované světlo, fázový kontrast

Jelikož snímaná část musí být v úrovni pracovního stolu, tak nastal problém u ploch, které jsou hluboko obrobené, zde byly snímky rozmazané. Proto při sledování obrobených ploch se vyhodnocovaly první dvě řady, zde byly snímky zřetelné.



Obrázek. 21. Ukázka zkoumané vzorku PMMA DPI 1000

7.2 Laser ILS 3NM

ILS 3NM je plynový CO₂ laser vhodný pro řezání a gravírování především nekovových materiálů - akryláty (PMMA), polypropylen (PP), polyoxymetylen, nalepovací folie, syntetická vlákna, potažený textil, kůže, filtrační materiály, technické a izolační tkaniny, překližky, těsnění, textil, lepenka, papír, karton, korek. Povrch řezu je čistý, hladký, lesklý. Maximální rozměry obráběného materiálu jsou dány pracovním stolem, který má rozměry 660 x 495 mm, dají se obrábět i dlouhé desky, při otevření čelních dveří. Maximální tloušťka řezaného materiálu je 10 mm, výkon je 100 W. Zařízení je napojené na počítač, je kompatibilní se systémem Microsoft Windows. Pracuje s programem CorelDRAW, v kterém můžeme zpracovávat vektorové i rastrové data.



Obrázek. 22. Laser ILS 3NM

Tabulka. 4. Technické parametry ILS-3NM-100W

ZDROJ	100 W, vzduchem chlazený CO ₂ laser
MAX. RYCHLOST	1524 mm/s
DPI	1000,500,333,250,200,167
PRACOVNÍ PLOCHA	660(Délka) x 495(Výška)mm
Z - OSA	nastavitelná vzdálenost až 210 mm
MAX. VELIKOST OBROBKU	640 (Délka) x (Šířka) x 170 (Výška) mm

PAMĚŤ	64MB
POČÍTAČOVÉ ROZHRANÍ	Paralelní port, Ethernet port
SOFTWARE	CAD nebo grafický software
PROVOZNÍ REŽIM	Nastavení uživatelem či pomocí LCD panelu
ENERGIE	230 V, 10 A, 50 ÷ 60Hz
ROZMĚRY	970 (Délka) x 865 (Šířka) x990 (Výška) mm
CHLAZENÍ	Vzduchem

7.3 Výškoměr pro hodnocení hloubky řezu

Pro měření výškového profilu bylo použito zařízení Mitutoyo Linear Height Gage LH-600D.



Obrázek. 23. Mitutoyo LH-600D

Tabulka. 5. Technické parametry LH-600D

Měřicí rozsah	0-972 mm (0-38)
Rozlišení	0,0001mm/0,001mm/0,01mm/0,1mm 0,000001mm/0,00001mm/0,0001mm
Měřicí přesnost	0,0000049 μ m
Kolmost	0,0002 v 5 μ m
Pohon	Motor (5, 10, 20, 25, 30, 40 mm/s=7 kroků) /manuální
Měřicí síla	1N
Metody vyrovnání	Protiváhou
LCD	LCD grafika (320x240)
Rozměry	60 000, pro 1 program max. 30 000
Počet dat	240 x 287 x 1013mm

7.4 Minoprocessor DP-1VR

Pro zaznamenávání dat byla použita termotiskárna Mitutoyo DP-1VR, pracuje rychle a nehlukně, zařízení má výstup s případným připojením k PC a s daty dále pracovat.



Obrázek. 24. Miniprocessor Mitutoyo DP-1VR

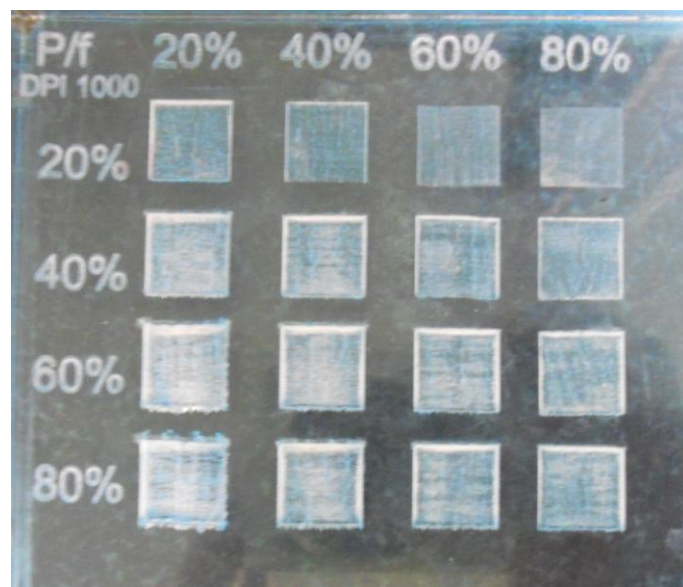
Tabulka. 6. Parametry použitého miniprocessoru

Metoda tisku	termotiskárna
Rozlišení tisku	384 bodů (8 bodů na mm)
Rychlost tisku	6,5 mm/s
Kapacita tisku	cca 6500 řádků při tisku velkých zna- ků
Intervaly snímání	0,25s, 1s, 5s, 30s, 1min, 30min,
Napájení	síťový adaptér 6V
Provozní teplota	Provoz se síťovým adaptérem 0-45°C

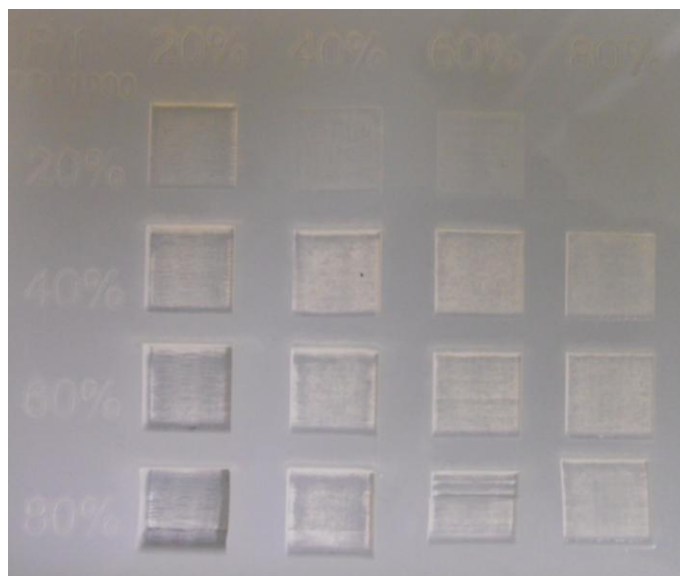
8 CHARAKTERISTIKA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ

8.1 Polymerní vzorky

Měřené vzorky byly v podobě kvádrů, do kterých byly zhotoveny obrobené výřezy ve tvaru čtverce. U každého ze zhotovených polí bylo použito různých podmínek při jejím obrábění - změna výkonu zařízení a posuvu. První ze vzorků transparentní materiál PMMA, a druhý použitý materiál PP, oba popsány v teoretické části.



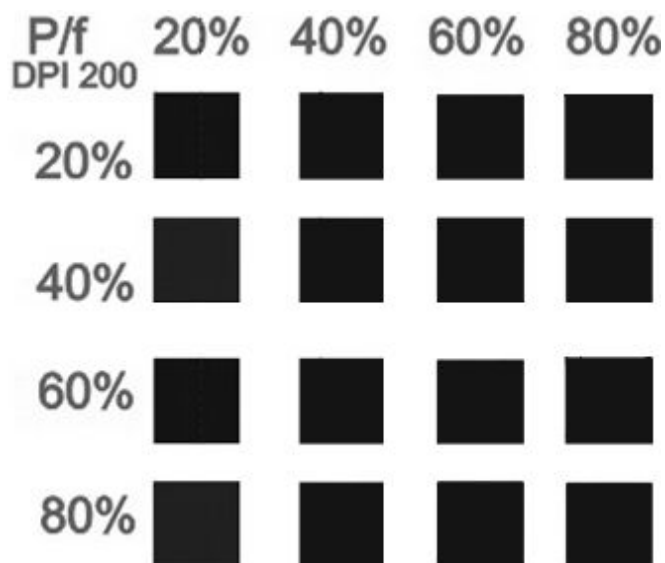
Obrázek. 25. Použitý materiál PMMA ukázka obrobené struktury DPI 1000



Obrázek. 26. Použitý materiál PP ukázka obrobenej struktury DPI 1000

8.2 Práce na laseru, příprava a postup

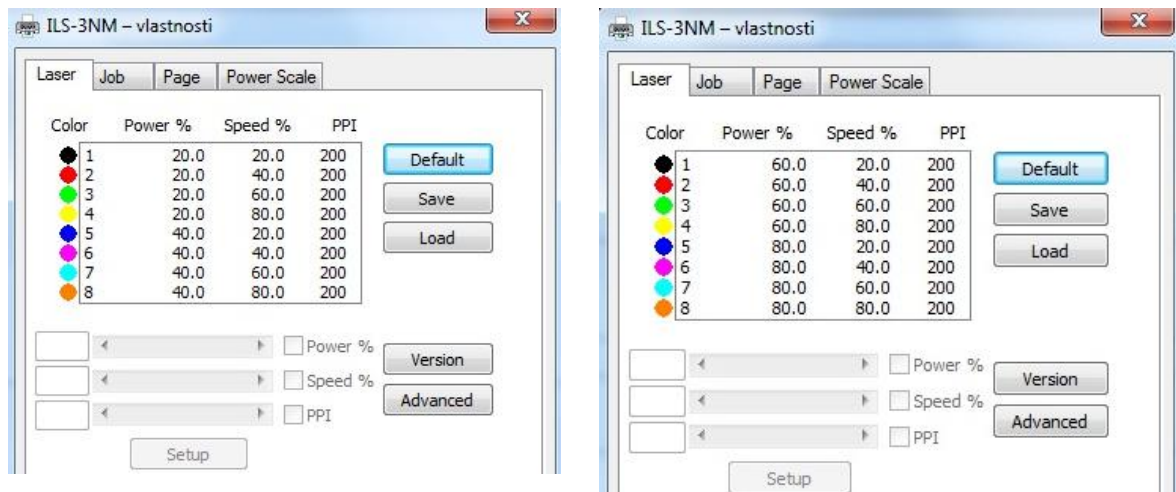
Následující obrázek představuje obráběnou entitu pro rozlišení DPI 200, 500, 1000 DPI. Hodnoty jsou udávány v % z maximálního výkonu pro dané zařízení, které je 100W představující 100% a hodnoty posunové rychlosti f jsou udávány v % z maximální rychlosti použitého zařízení, které je 1524 mms^{-1} .



Obrázek. 27. návrh obrobenej plochy pro jednotlivé parametry

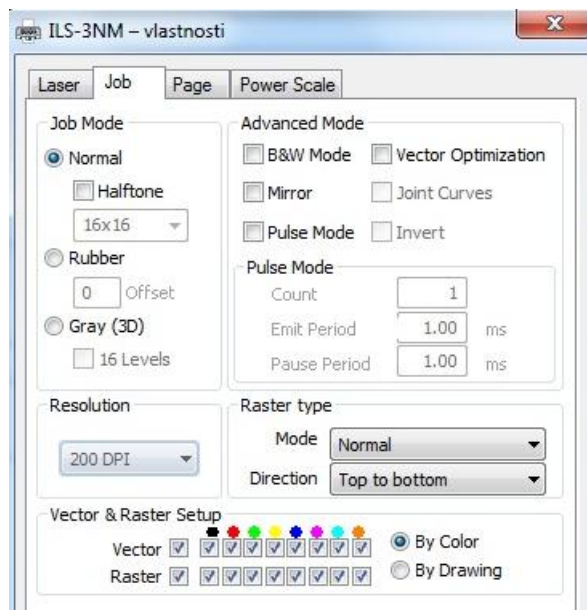
Samotná příprava je rozdělena na vytvoření programu a na práci s daným obrobkem. Rýsováním v programu CprelDraw nesouvisí s laserovým pracovištěm, data lze vytvořit na kterémkoliv PC a poté je přenést. Parametry se nastavují u laserového zařízení. Uvedené parametry řezání jsou přiděleny k daným barvám.

CorelDraw má osm základních barev.



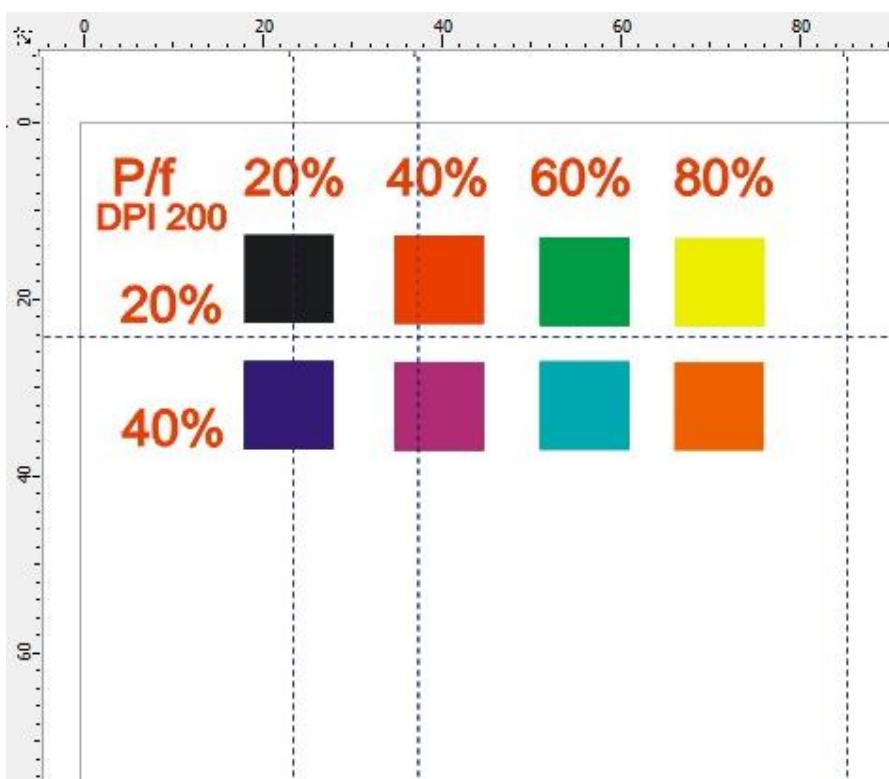
Obrázek. 28. Nastavení parametrů dle přiřazení barev

Po vybrání hodnoty DPI ze záložky Job a označení všech barevných variant. Po vybrání hodnoty DPI ze záložky se označí veškeré barevné možnosti, jak pro vektor a zároveň i pro rastr.

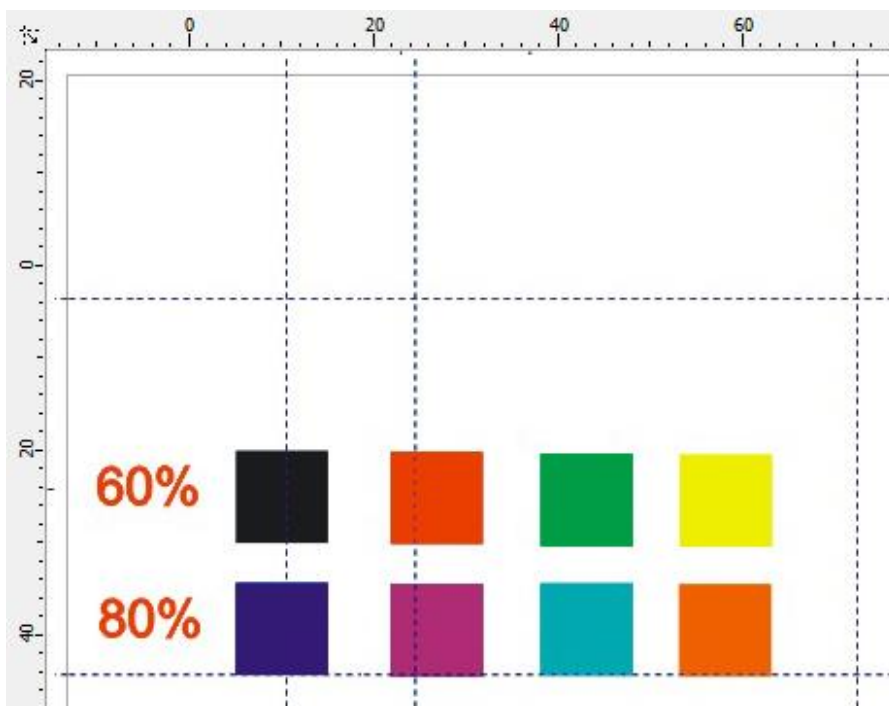


Obrázek. 29. Nastavení DPI a vektor & rastr

Pro nastavení 4 různých hodnot rychlosti posuvu a výkonu při zadaném rozlišení DPI bylo vytvořeno šestnáct možností. Z tohoto důvodu byl program rozdělen na část A a část B.



Obrázek. 30. Příprava výkresu část A



Obrázek. 31. Příprava výkresu část B

Po zadání se úplná data přepošlou na laser. Laser je nejvíce přesný v rohu pracovního stolu, kde je na desce ustaven. Za pomoci etanolu děláme fokusaci. Zplodiny, které jsou škodlivé, se musí zásadně odsávat. Zatlačením RUN je spuštěno obrábění a nastane obrábění desky. Po nastavení se veškerá data pošlou na laser. Na pracovní stůl se ustaví deska do rohu, jelikož zde je laser nepřesnější. Fokusaci provádíme pomocí etalonu. Pro odvod škodlivých zplodin se zapne odsávání. Samotné obrábění se spustí stlačením RUN a deska se začne obrábět.

9 NAMĚŘENÁ A VYHODNOCENÁ DATA

9.1 Popis měření hloubky

Hloubka obrobeného povrchu byla měřena již dříve uvedeným výškoměrem. Měření probíhalo tak, že po nastavení a určení nulového bodu v pravém horním rohu neobrobeného místa měřeného vzorku jsme v každém obrobeném poli udělali deset měření.

V následujících tabulkách je ve statistickém vyhodnocení výsledků uvedena střední hodnota, vyhodnocení výsledku pomocí box-plot diagramu, která určuje důležité statistické hodnoty.

Hodnoty naměřených hloubek obrobené plochy jsou uvedeny v tabulkách. Hodnoty výkonu P jsou udávány v % z maximálního výkonu pro dané zařízení, které je 100W. Hodnoty rychlosti posuvu f jsou udávány v % z maximální posuvové rychlosti zařízení, která je 1524 mm/s.

9.2 Statistické vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PP pro DPI 200:

Tabulka. 7. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,102	-0,01	-0,008	-0,021
2	-0,111	-0,055	-0,002	-0,016
3	-0,144	-0,081	0	-0,022
4	-0,135	-0,094	-0,001	-0,016
5	-0,175	-0,019	-0,026	-0,012
6	-0,059	-0,028	-0,026	-0,019
7	-0,063	-0,02	-0,038	-0,02
8	-0,106	-0,01	-0,032	-0,016
9	-0,079	-0,056	-0,003	-0,013
10	-0,133	-0,048	-0,002	-0,019
průměr	-0,111	-0,042	-0,014	-0,017

Tabulka. 8. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,335	-0,135	-0,039	-0,039
2	-0,334	-0,112	-0,037	-0,027
3	-0,334	-0,168	-0,067	-0,026
4	-0,305	-0,129	-0,06	-0,038
5	-0,295	-0,11	-0,049	-0,027
6	-0,267	-0,142	-0,04	-0,029
7	-0,331	-0,158	-0,059	-0,039
8	-0,309	-0,141	-0,066	-0,044
9	-0,335	-0,123	-0,08	-0,042
10	-0,306	-0,112	-0,076	-0,031
průměr	-0,315	-0,133	-0,057	-0,034

Tabulka. 9. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,443	-0,241	-0,051	-0,083
2	-0,449	-0,243	-0,094	-0,077
3	-0,488	-0,264	-0,082	-0,062
4	-0,462	-0,168	-0,099	-0,062
5	-0,513	-0,189	-0,082	-0,075
6	-0,493	-0,189	-0,103	-0,063
7	-0,411	-0,223	-0,089	-0,07
8	-0,467	-0,232	-0,102	-0,067
9	-0,46	-0,205	-0,088	-0,073
10	-0,434	-0,179	-0,065	-0,058
průměr	-0,462	-0,213	-0,086	-0,069

Tabulka. 10. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,578	-0,261	-0,208	-0,136
2	-0,579	-0,275	-0,148	-0,142
3	-0,603	-0,274	-0,187	-0,142
4	-0,574	-0,229	-0,169	-0,139
5	-0,594	-0,234	-0,161	-0,109
6	-0,602	-0,241	-0,178	-0,122
7	-0,659	-0,28	-0,141	-0,14
8	-0,553	-0,291	-0,162	-0,128
9	-0,624	-0,285	-0,151	-0,134
10	-0,611	-0,285	-0,186	-0,125
průměr	-0,598	-0,265	-0,169	-0,132

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PP pro DPI 500:

Tabulka. 11. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,321	-0,116	-0,021	-0,018
2	-0,328	-0,123	-0,015	-0,012
3	-0,337	-0,117	-0,018	-0,01
4	-0,318	-0,1	-0,013	-0,009
5	-0,34	-0,098	-0,015	-0,016
6	-0,336	-0,089	-0,005	-0,023
7	-0,356	-0,107	-0,022	-0,029
8	-0,354	-0,103	0,007	-0,022
9	-0,343	-0,102	-0,057	-0,019
10	-0,355	-0,121	-0,012	-0,012
průměr	-0,339	-0,107	-0,0172	-0,017

Tabulka. 12. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,785	-0,37	-0,209	-0,118
2	-0,794	-0,374	-0,209	-0,11
3	-0,755	-0,361	-0,204	-0,114
4	-0,801	-0,377	-0,214	-0,123
5	-0,83	-0,355	-0,218	-0,11
6	-0,802	-0,36	-0,215	-0,098
7	-0,728	-0,352	-0,219	-0,093
8	-0,757	-0,368	-0,185	-0,107
9	-0,779	-0,381	-0,193	-0,111
10	-0,821	-0,353	-0,204	-0,117
průměr	-0,785	-0,365	-0,207	-0,110

Tabulka. 13. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,175	-0,576	-0,382	-0,223
2	-1,151	-0,566	-0,369	-0,224
3	-1,15	-0,57	-0,361	-0,216
4	-1,17	-0,603	-0,382	-0,236
5	-1,14	-0,586	-0,391	-0,203
6	-1,149	-0,582	-0,388	-0,213
7	-1,183	-0,55	-0,374	-0,21
8	-1,134	-0,588	-0,369	-0,194
9	-1,153	-0,593	-0,387	-0,229
10	-1,155	-0,602	-0,362	-0,197
průměr	-1,156	-0,5816	-0,3765	-0,2145

Tabulka. 14. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,507	-0,747	-0,489	-0,34
2	-1,489	-0,742	-0,477	-0,333
3	-1,429	-0,744	-0,455	-0,328
4	-1,452	-0,72	-0,463	-0,338
5	-1,522	-0,724	-0,462	-0,313
6	-1,471	-0,709	-0,474	-0,336
7	-1,466	-0,71	-0,456	-0,321
8	-1,463	-0,708	-0,47	-0,332
9	-1,449	-0,71	-0,465	-0,33
10	-1,519	-0,749	-0,467	-0,337
průměr	-1,477	-0,726	-0,468	-0,331

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PP pro DPI 1000:

Tabulka. 15. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,601	-0,21	-0,041	-0,008
2	-0,618	-0,205	-0,05	-0,003
3	-0,627	-0,224	-0,051	-0,001
4	-0,613	-0,212	-0,076	-0,011
5	-0,599	-0,211	-0,085	-0,006
6	-0,596	-0,222	-0,05	-0,014
7	-0,596	-0,219	-0,079	-0,011
8	-0,608	-0,205	-0,047	-0,002
9	-0,593	-0,234	-0,079	-0,006
10	-0,583	-0,212	-0,048	-0,004
průměr	-0,603	-0,215	-0,061	-0,007

Tabulka. 16. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,188	-0,637	-0,348	-0,242
2	-1,273	-0,644	-0,336	-0,227
3	-1,321	-0,643	-0,365	-0,236
4	-1,294	-0,617	-0,335	-0,251
5	-1,17	-0,616	-0,361	-0,244
6	-1,23	-0,597	-0,322	-0,243
7	-1,258	-0,637	-0,341	-0,269
8	-1,238	-0,655	-0,361	-0,263
9	-1,226	-0,623	-0,335	-0,261
10	-1,263	-0,623	-0,361	-0,247
průměr	-1,246	-0,629	-0,346	-0,248

Tabulka. 17. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PP

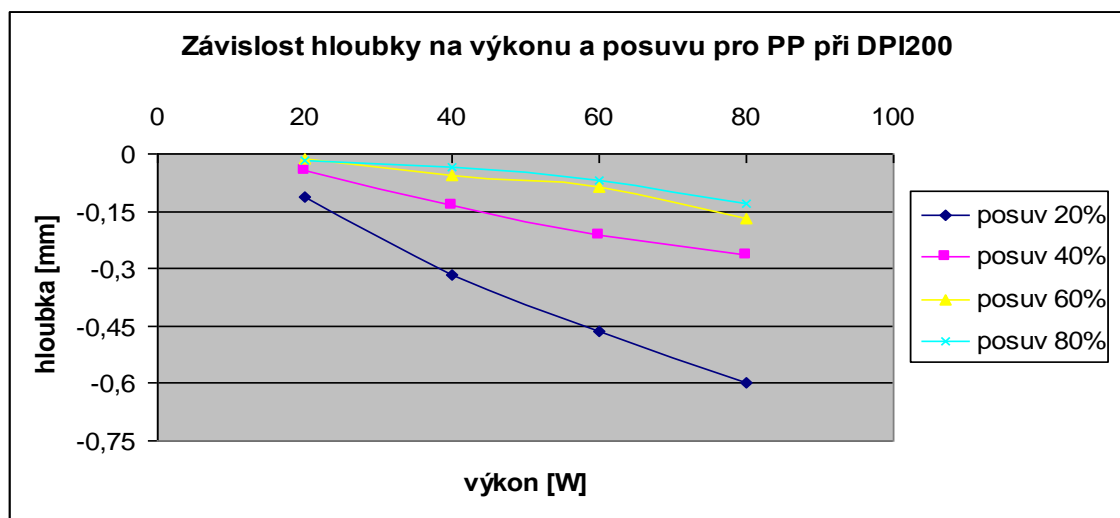
č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,9	-1,06	-0,608	-0,406
2	-1,923	-1,077	-0,62	-0,442
3	-1,959	-1,058	-0,594	-0,426
4	-1,962	-1,023	-0,657	-0,42
5	-1,969	-1,051	-0,64	-0,445
6	-1,932	-1,043	-0,631	-0,43
7	-1,92	-1,034	-0,633	-0,408
8	-1,919	-1,039	-0,623	-0,407
9	-1,991	-1,101	-0,645	-0,45
10	-1,948	-1,062	-0,629	-0,436
průměr	-1,942	-1,0548	-0,628	-0,427

Tabulka. 18. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PP

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-2,503	-1,378	-0,875	-0,638
2	-2,536	-1,394	-0,92	-0,594
3	-2,654	-1,402	-0,948	-0,571
4	-2,532	-1,323	-0,947	0,597
5	-2,514	-1,403	-0,912	-0,633
6	-2,516	-1,372	-0,928	-0,619
7	-2,485	-1,361	-0,943	-0,598
8	-2,508	-1,325	-0,927	-0,596
9	-2,607	-1,383	-0,942	-0,613
10	-2,458	-1,38	-0,892	-0,615
průměr	-2,531	-1,372	-0,923	-0,488

Tabulka .19. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 200

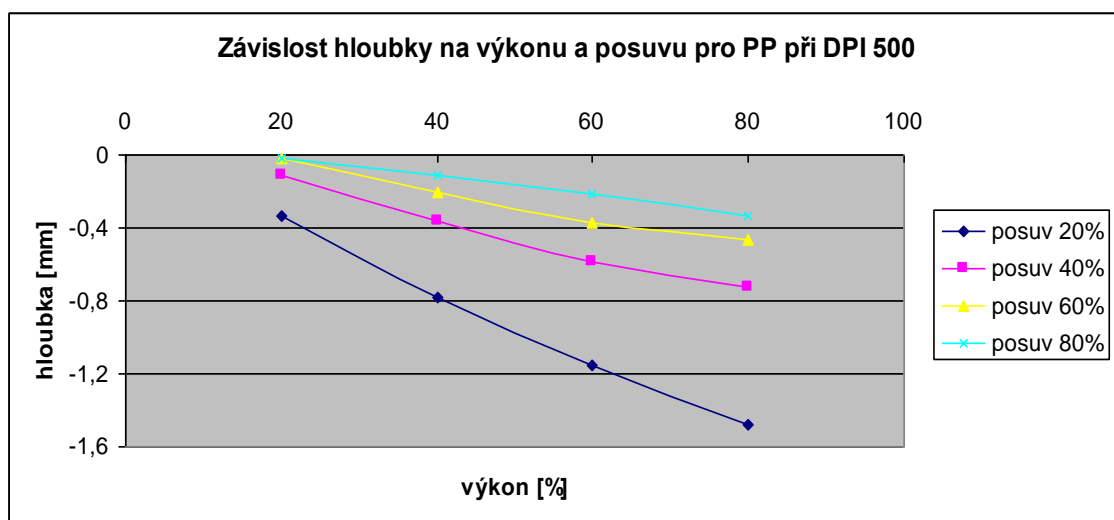
Posuv [%], (mm s^{-1})	výkon [%], (W)			
	20%	40%	60%	80%
20	-0,111	-0,315	-0,462	-0,598
40	-0,042	-0,133	-0,213	-0,266
60	-0,014	-0,057	-0,086	-0,169
80	-0,017	-0,034	-0,069	-0,132



Obrázek. 32. Graf závislosti hloubky obrobeneé plochy na výkonu a posuvu DPI 200,PP

Tabulka. 20. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 500

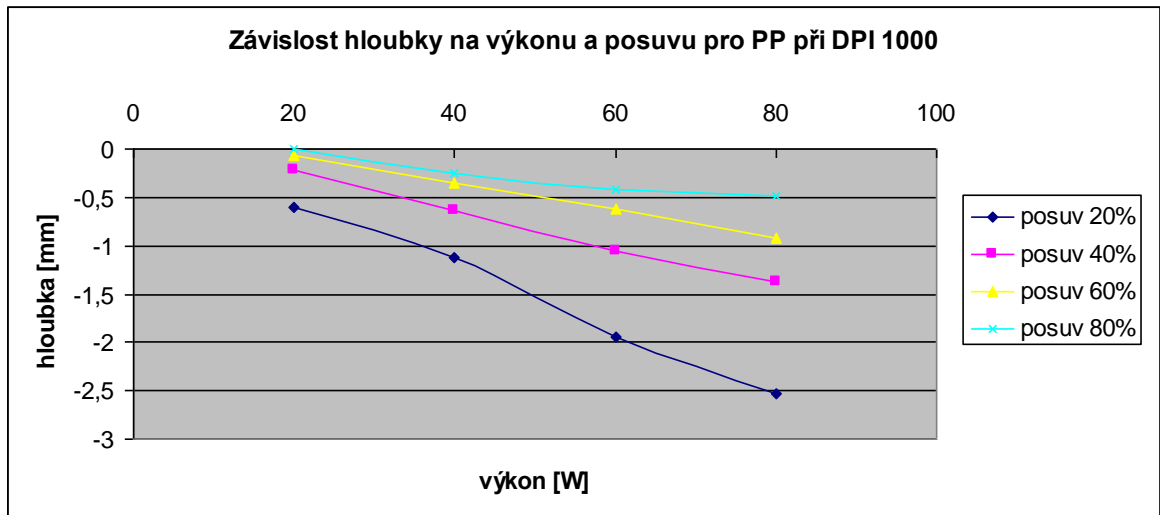
		výkon [%], (W)			
		20%	40%	60%	80%
Posuv [%],(mm s^{-1})	20	-0,339	-0,785	-1,156	-1,477
	40	-0,108	-0,365	-0,582	-0,726
	60	-0,017	-0,207	-0,376	-0,468
	80	-0,017	-0,110	-0,214	-0,331



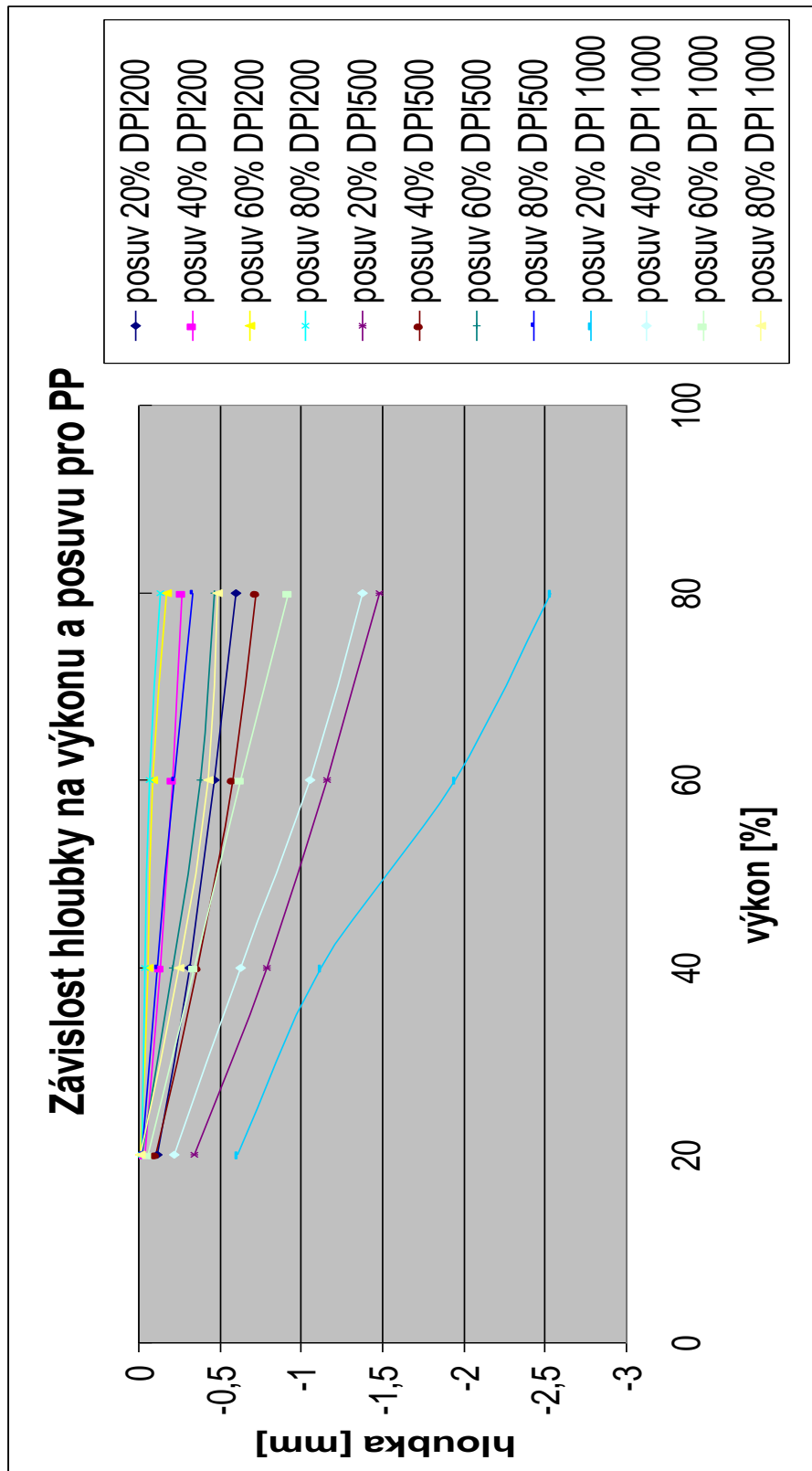
Obrázek. 33. Graf závislosti hloubky obrobeneé plochy na výkonu a posuvu DPI 500,PP

Tabulka. 21. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 1000

		výkon [%], (W)			
		20%	40%	60%	80%
Posuv [%],(mm s^{-1})	20	-0,603	-1,124	-1,942	-2,531
	40	-0,215	-0,629	-1,055	-1,372
	60	-0,061	-0,346	-0,628	-0,923
	80	-0,007	-0,248	-0,427	-0,488



Obrázek. 34. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu DPI 1000, PP



Obrázek. 35. Celkový graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu DPI 200, 500 1000, PP

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PMMA pro DPI 200:*Tabulka. 22. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PMMA*

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,01	-0,002	-0,002	-0,006
2	-0,021	-0,006	-0,001	-0,004
3	-0,016	-0,007	-0,003	-0,004
4	-0,021	-0,01	-0,004	-0,003
5	-0,013	-0,001	-0,001	-0,005
6	0	-0,002	-0,002	-0,004
7	-0,013	-0,007	-0,003	-0,004
8	-0,008	-0,005	-0,001	-0,005
9	-0,008	-0,002	-0,001	-0,009
10	-0,013	-0,007	-0,001	-0,008
průměr	-0,012	-0,005	-0,002	-0,005

Tabulka. 23. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,104	-0,045	-0,006	-0,004
2	-0,084	-0,04	-0,006	-0,006
3	-0,128	-0,018	-0,001	-0,006
4	-0,114	-0,011	-0,015	-0,006
5	-0,103	-0,032	-0,005	-0,001
6	-0,105	-0,027	-0,01	-0,005
7	-0,092	-0,002	-0,001	-0,006
8	-0,038	-0,024	-0,011	-0,008
9	-0,069	-0,008	-0,004	-0,001
10	-0,106	-0,012	-0,003	-0,001
průměr	-0,094	-0,022	-0,006	-0,004

Tabulka. 24. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,316	-0,103	-0,003	-0,028
2	-0,268	-0,076	-0,019	-0,018
3	-0,275	-0,059	-0,041	-0,01
4	-0,245	-0,125	-0,029	-0,015
5	-0,256	-0,075	-0,053	-0,009
6	-0,282	-0,096	-0,046	-0,029
7	-0,318	-0,058	-0,037	-0,024
8	-0,293	-0,107	-0,015	-0,033
9	-0,238	-0,116	-0,018	-0,023
10	-0,233	-0,072	-0,051	-0,013
průměr	-0,272	-0,089	-0,031	-0,020

Tabulka. 25. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,296	-0,035	-0,047	-0,046
2	-0,34	-0,034	-0,03	-0,052
3	-0,216	-0,058	-0,093	-0,036
4	-0,267	-0,116	-0,086	-0,045
5	-0,181	-0,093	-0,069	-0,041
6	-0,27	-0,124	-0,076	-0,035
7	-0,245	-0,094	-0,058	-0,033
8	-0,23	-0,11	-0,051	-0,043
9	-0,359	-0,134	-0,049	-0,059
10	-0,238	-0,096	-0,058	-0,063
průměr	-0,264	-0,089	-0,062	-0,045

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PMMA pro DPI 500:*Tabulka. 26. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PMMA*

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,239	-0,108	-0,049	-0,037
2	-0,305	-0,126	-0,062	-0,034
3	-0,27	-0,151	-0,042	-0,034
4	-0,254	-0,143	-0,048	-0,029
5	-0,251	-0,173	-0,057	-0,043
6	-0,203	-0,17	-0,103	-0,042
7	-0,182	-0,159	-0,079	-0,06
8	-0,2	-0,112	-0,076	-0,057
9	-0,203	-0,152	-0,08	-0,057
10	-0,263	-0,156	-0,055	-0,056
průměr	-0,237	-0,145	-0,065	-0,045

Tabulka. 27. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,611	-0,357	-0,226	-0,163
2	-0,677	-0,357	-0,239	-0,141
3	-0,677	-0,378	-0,214	-0,151
4	-0,706	-0,348	-0,198	-0,154
5	-0,689	-0,375	-0,211	-0,176
6	-0,635	-0,385	-0,218	-0,169
7	-0,673	-0,435	-0,209	-0,156
8	-0,663	-0,365	-0,212	-0,151
9	-0,64	-0,399	-0,233	-0,177
10	-0,674	-0,396	-0,232	-0,161
průměr	-0,665	-0,379	-0,219	-0,160

Tabulka. 28. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,021	-0,584	-0,393	-0,26
2	-1,021	-0,585	-0,395	-0,277
3	-1,021	-0,597	-0,379	-0,285
4	-1,021	-0,562	-0,388	-0,293
5	-1,021	-0,583	-0,395	-0,265
6	-1,021	-0,606	-0,37	-0,287
7	-1,021	-0,61	-0,385	-0,295
8	-1,021	-0,62	-0,379	-0,251
9	-1,021	-0,583	-0,396	-0,298
10	-1,021	-0,594	-0,375	-0,249
průměr	-1,021	-0,592	-0,386	-0,276

Tabulka. 29. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-1,077	-0,86	-0,493	-0,396
2	-1,077	-0,85	-0,488	-0,391
3	-1,077	-0,871	-0,501	-0,382
4	-1,077	-0,827	-0,496	-0,4
5	-1,077	-0,77	-0,494	-0,397
6	-1,077	-0,816	-0,5	-0,401
7	-1,077	-0,803	-0,525	-0,361
8	-1,077	-0,779	-0,498	-0,35
9	-1,077	-0,798	-0,523	-0,346
10	-1,077	-0,78	-0,512	-0,402
průměr	-1,077	-0,815	-0,503	-0,383

Vyhodnocení výsledku u vzorku z polymeru PMMA pro DPI 1000:*Tabulka. 30. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20 %, PMMA*

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,444	-0,252	-0,09	-0,05
2	-0,428	-0,245	-0,088	-0,047
3	-0,483	-0,238	-0,082	-0,045
4	-0,487	-0,223	-0,103	-0,04
5	-0,434	-0,245	-0,094	-0,02
6	-0,485	-0,247	-0,088	-0,033
7	-0,471	-0,221	-0,099	-0,029
8	-0,441	-0,246	-0,059	-0,016
9	-0,432	-0,228	-0,092	-0,022
10	-0,504	-0,206	-0,103	-0,019
průměr	-0,461	-0,235	-0,089	-0,032

Tabulka. 31. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,79	-0,682	-0,35	-0,173
2	-0,79	-0,649	-0,314	-0,201
3	-0,79	-0,639	-0,353	-0,198
4	-0,79	-0,632	-0,337	-0,199
5	-0,79	-0,622	-0,371	-0,203
6	-0,79	-0,617	-0,378	-0,203
7	-0,79	-0,647	-0,361	-0,182
8	-0,79	-0,626	-0,367	-0,191
9	-0,79	-0,63	-0,373	-0,193
10	-0,79	-0,624	-0,35	-0,201
průměr	-0,79	-0,637	-0,355	-0,194

Tabulka. 32. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60 %, PMMA

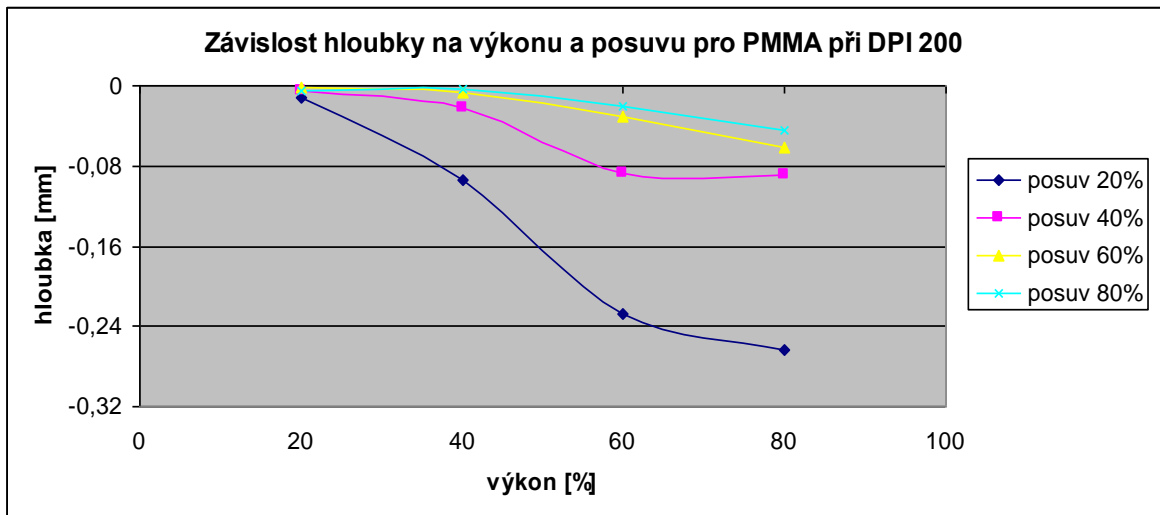
č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,817	-0,842	-0,601	-0,517
2	-0,817	-0,842	-0,59	-0,504
3	-0,817	-0,842	-0,576	-0,491
4	-0,817	-0,842	-0,628	-0,488
5	-0,817	-0,842	-0,626	-0,483
6	-0,817	-0,842	-0,635	-0,489
7	-0,817	-0,842	-0,633	-0,451
8	-0,817	-0,842	-0,588	-0,456
9	-0,817	-0,842	-0,573	-0,453
10	-0,817	-0,842	-0,57	-0,457
průměr	-0,817	-0,842	-0,602	-0,479

Tabulka. 33. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80 %, PMMA

č. měření	Posuv [%], z maximální hodnoty (1524 mm/s)			
	20%	40%	60%	80%
1	-0,804	-0,836	-0,767	-0,605
2	-0,804	-0,836	-0,785	-0,657
3	-0,804	-0,836	-0,805	-0,649
4	-0,804	-0,836	-0,83	-0,654
5	-0,804	-0,836	-0,83	-0,67
6	-0,804	-0,836	-0,83	-0,68
7	-0,804	-0,836	-0,809	-0,679
8	-0,804	-0,836	-0,771	-0,606
9	-0,804	-0,836	-0,777	-0,606
10	-0,804	-0,836	-0,83	-0,604
průměr	-0,804	-0,836	-0,8034	-0,641

Tabulka. 34. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 200

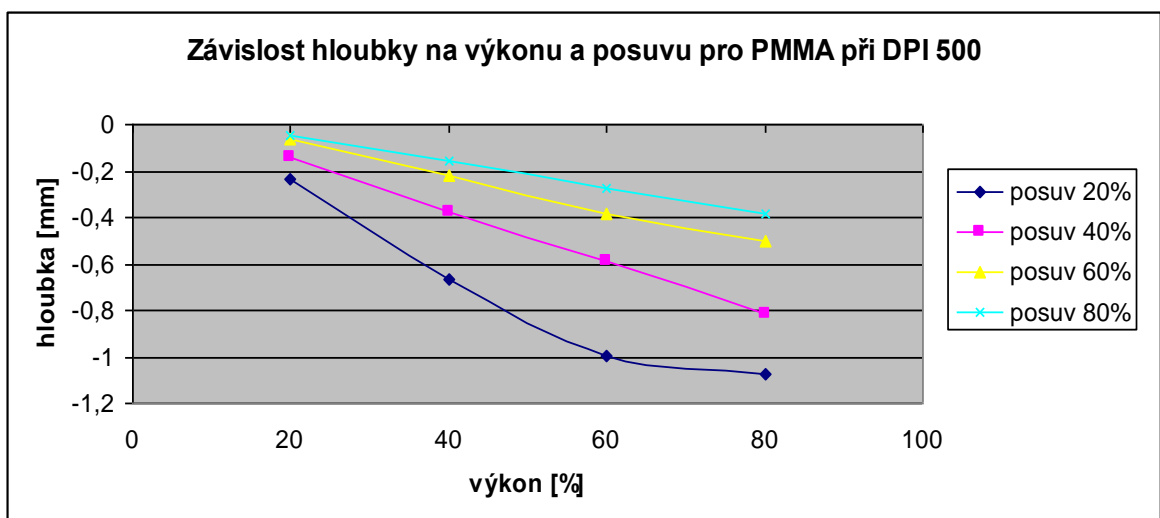
		výkon [%], (W)			
		20%	40%	60%	80%
Posuv [%],(mm ^s ⁻¹)	20	-0,012	-0,094	-0,272	-0,264
	40	-0,005	-0,022	-0,088	-0,089
	60	-0,002	-0,006	-0,031	-0,062
	80	-0,005	-0,004	-0,020	-0,045



Obrázek. 36. Graf závislosti hloubky obrobenej plochy na výkonu a posuvu DPI 200, PMMA

Tabulka. 35. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 500

		výkon [%], (W)			
		20%	40%	60%	80%
Posuv [%],(mm ^s ⁻¹)	20	-0,237	-0,665	-1,021	-1,077
	40	-0,145	-0,379	-0,592	-0,815
	60	-0,065	-0,219	-0,385	-0,503
	80	-0,045	-0,159	-0,276	-0,383

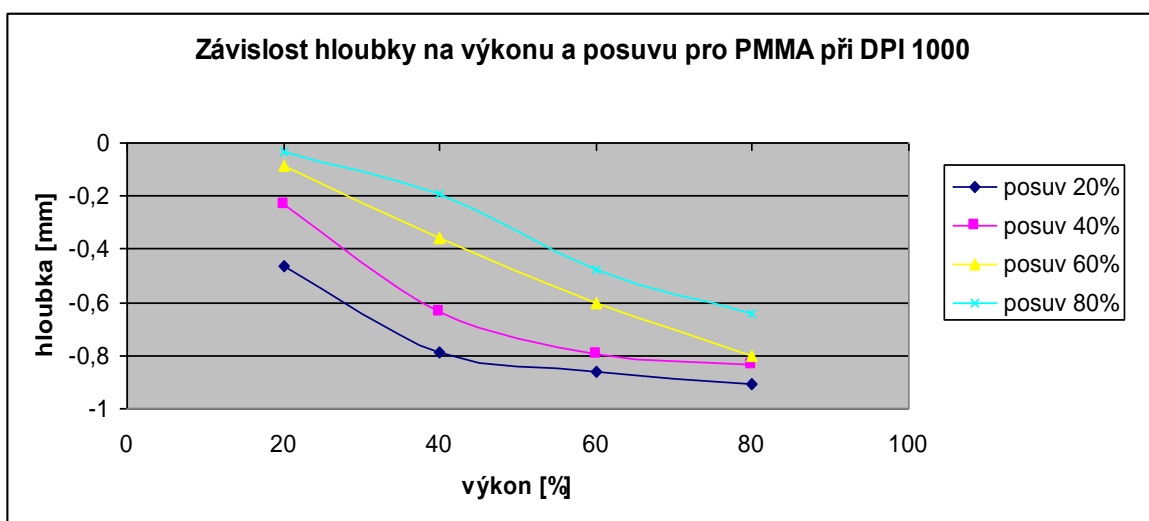


Obrázek. 37. Graf závislosti hloubky obrobenej plochy na výkonu a posuvu DPI 500, PMMA

Tabulka. 36. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při

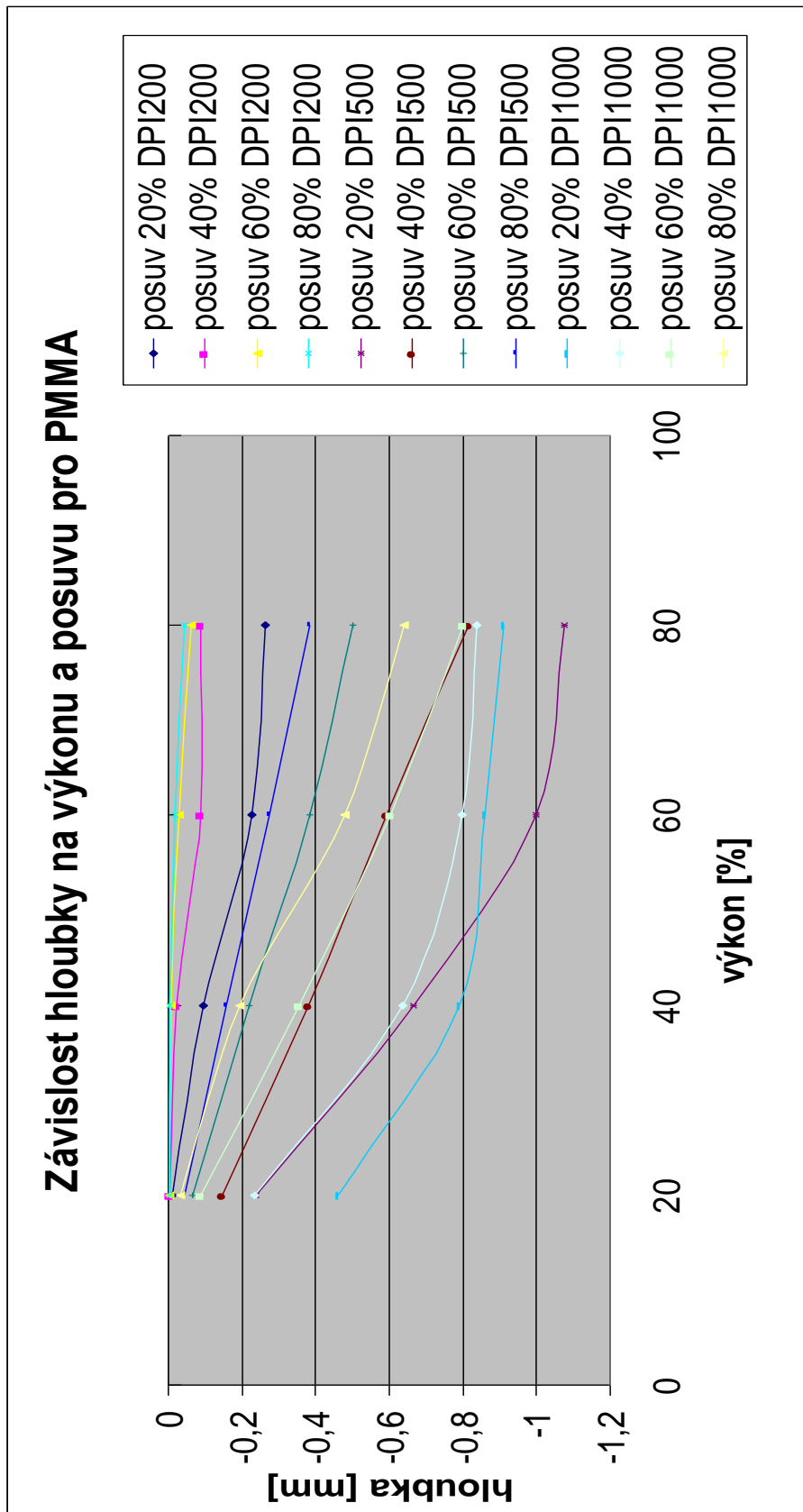
DPI 1000

		výkon [%], (W)			
		20%	40%	60%	80%
Posuv [%], (mms ⁻¹)	20	-0,461	-0,79	-0,817	-0,804
	40	-0,235	-0,637	-0,842	-0,836
	60	-0,089	-0,355	-0,602	-0,803
	80	-0,032	-0,194	-0,479	-0,641



Obrázek. 38. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu

DPI 1000, PMMA



Obrázek 59. Celkový graf závislosti hloubky obráběné plochy na

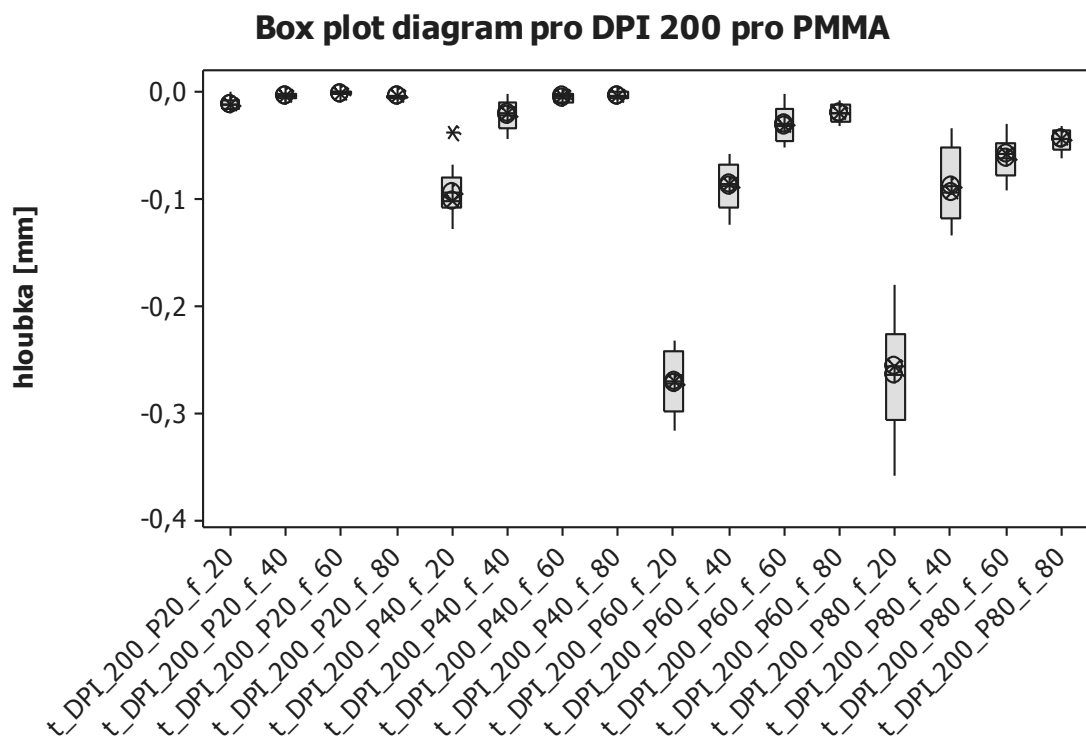
výkonu a posuvu DPI 200,500,1000 PMMA

Ze zpracovaných výsledků je možné konstatovat, že zásadní vliv na hloubku obrobene plochy má doba interakce laser – materiál a samozřejmě hodnota výkonu. Naměřené hodnoty hloubky drážky rostou při zvyšujícím se výkonu a nižší posuvové rychlosti, což je výsledkem delší doby působení koncentrované energie na polymerní materiál. Tento trend byl potvrzen u obou obráběných materiálů, tj. PMMA a PP.

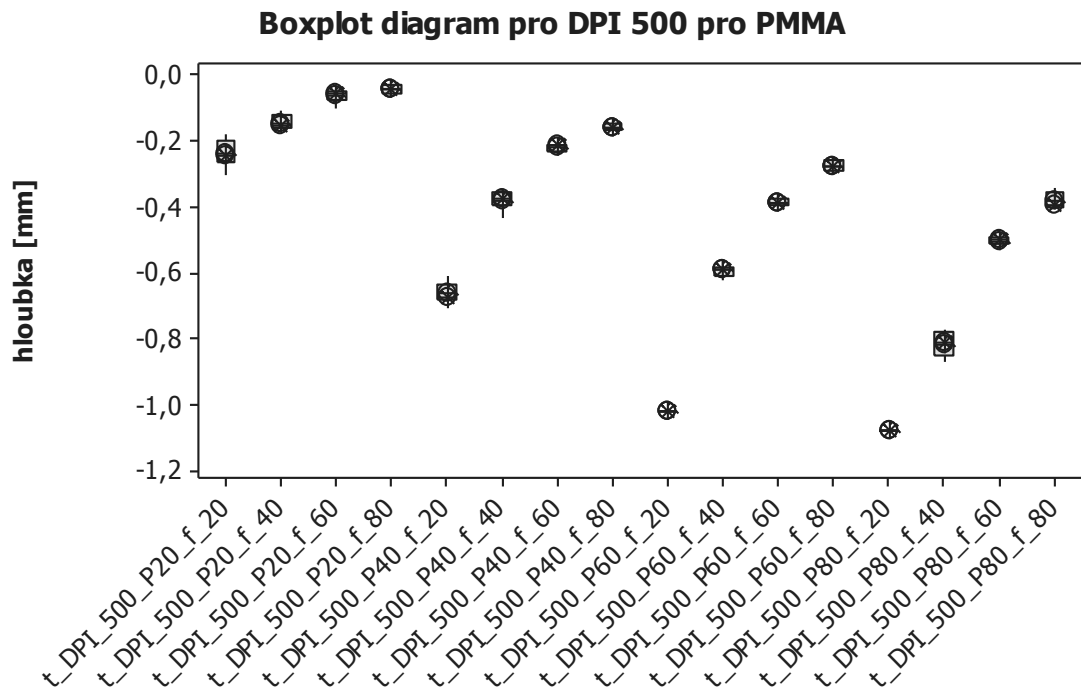
Pokud budeme porovnávat tyto hodnoty s ohledem na rozlišení DPI, potvrdil se předpoklad, že je možné korigovat hloubku při obrábění i tímto nastavením. Ze získaných dat vyplývá, že čím je vyšší hustota drah – tj. rozlišení, tím je vyšší hodnota obrobene hloubky, jak je zřejmé z (obr. č.35,39). Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu posuvu pro DPI 200, 500, 1000. Tato skutečnost platí pro oba obráběné materiály.

9.3 Vyhodnocení statistických parametrů pomocí box-plot diagramu

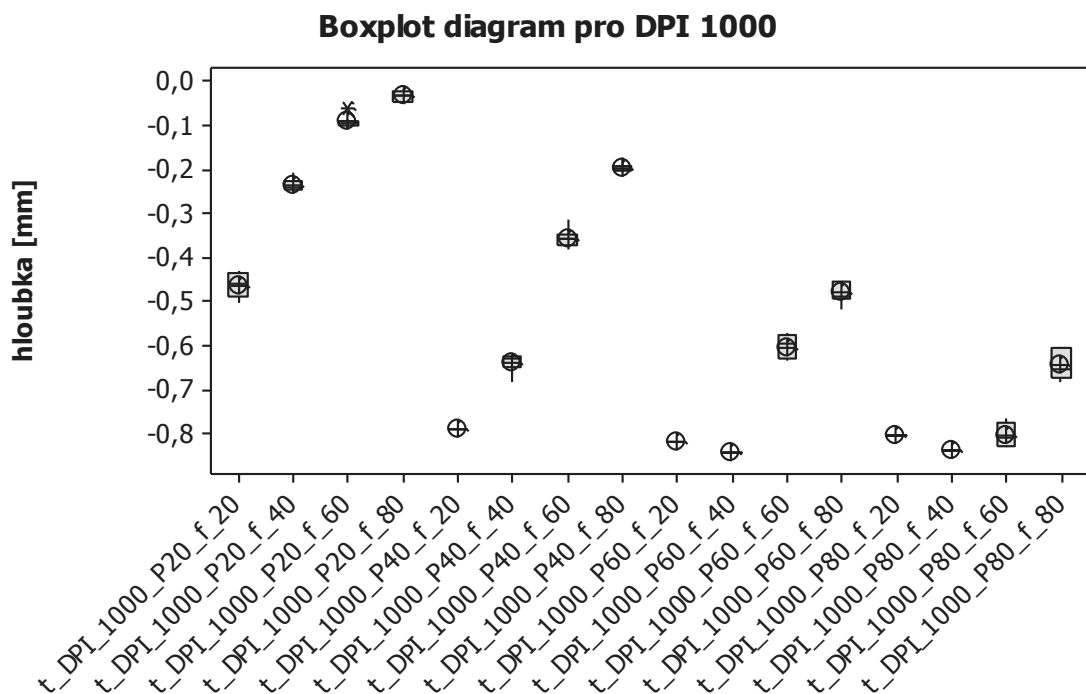
Zobrazení dat pomocí boxplot diagramu pro materiál PMMA:



Obrázek. 40. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu
DPI 200, PMMA

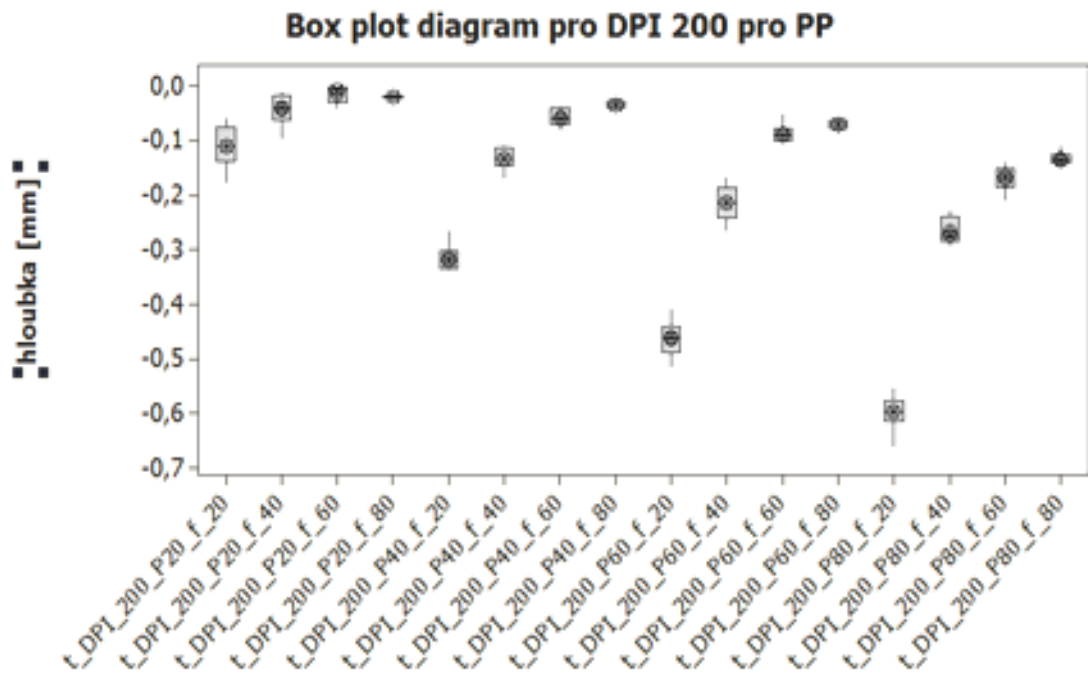


Obrázek. 41. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu
DPI 500, PMMA

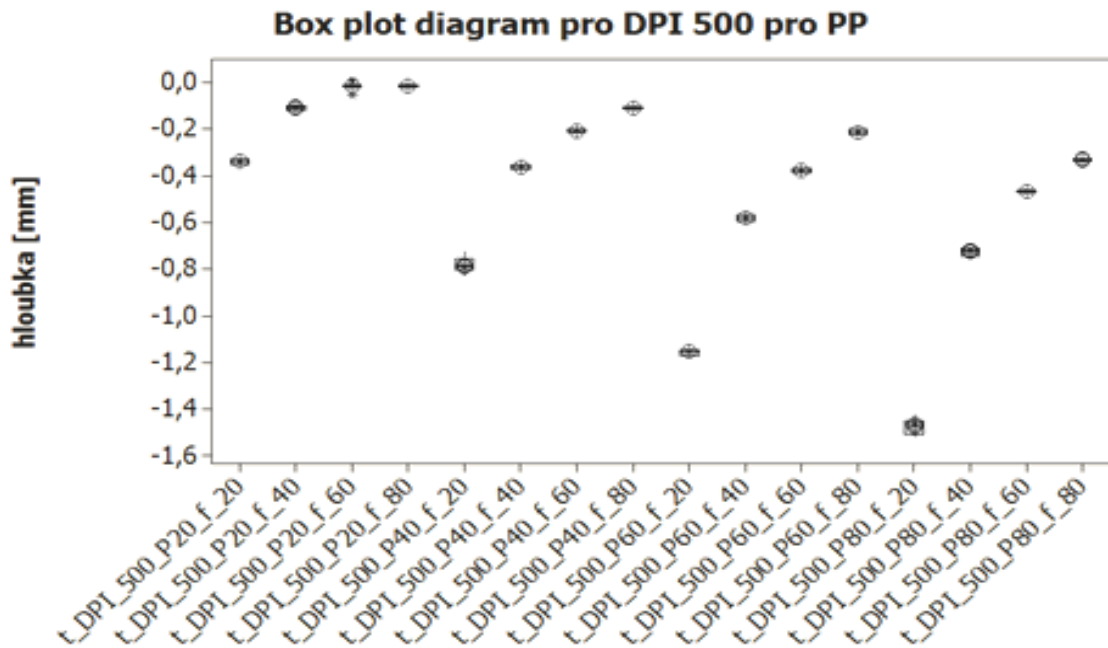


Obrázek. 42. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu
DPI 1000, PMMA

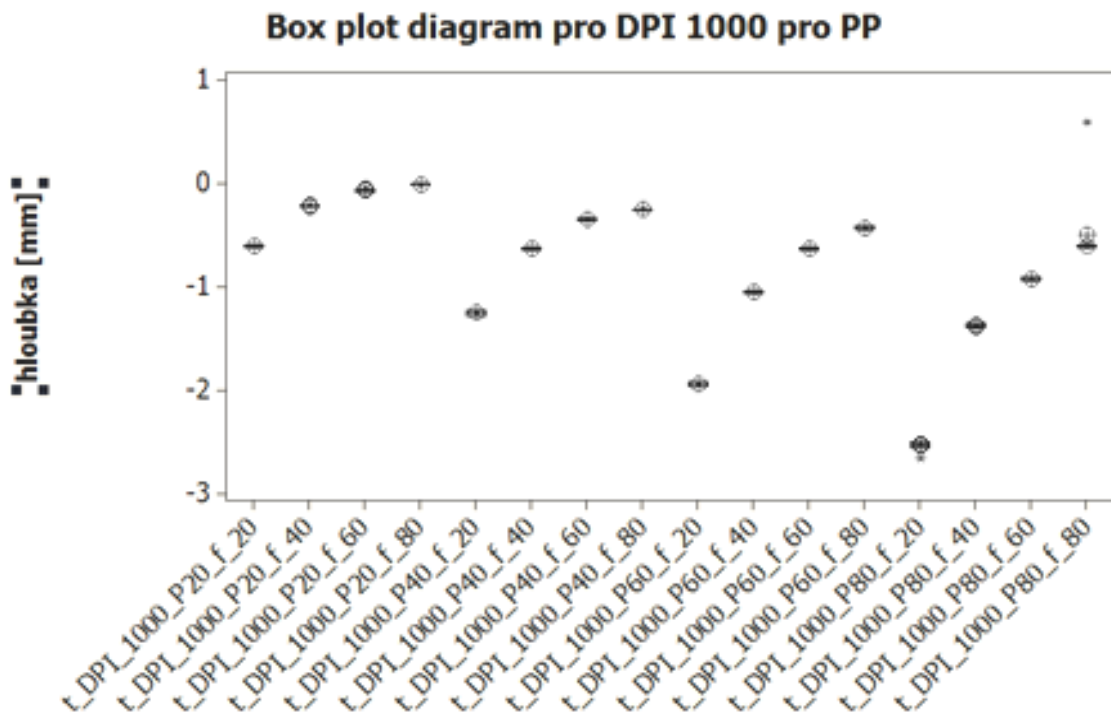
Zobrazení dat pomocí boxplot diagramu pro materiál PP:



Obrázek. 43. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu
DPI 200, PP



Obrázek. 44. Graf závislosti hloubky obrobene plochy na výkonu a posuvu
DPI 500, PP



Obrázek. 45. Graf závislosti hloubky obrobenej plochy na výkonu a posuvu

DPI 1000, PP

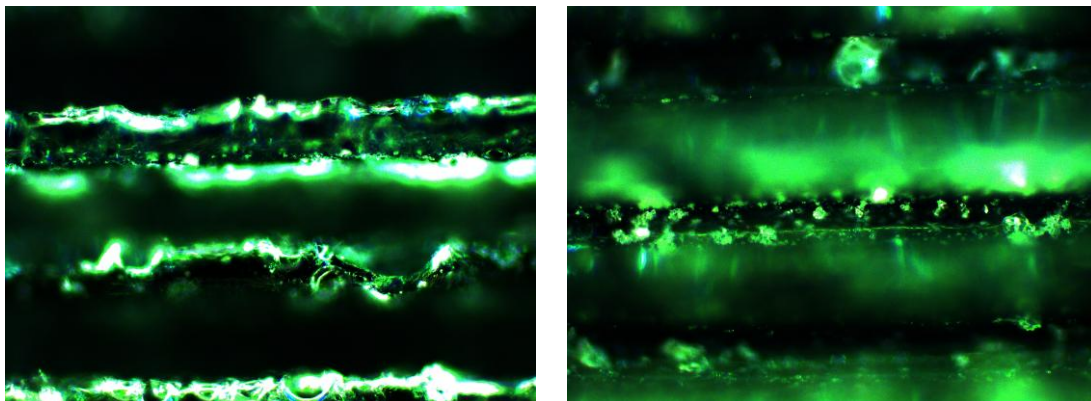
Graf závislosti hloubky obrobenej plochy na výkonu a posuvu pro DPI 200 – materiál PMMA (obr. 40) vykazuje značnou heterogenitu dat, především v oblasti rozptylu. Nicméně i z hlediska mediánu je možné vysledovat trendové složky a to především při vyšších výkonech. Z uvedeného tedy zcela zřetelně plyne, že nejvyšší hodnoty rozptylů a zároveň nejnižší hodnoty mediánu vykazují nejnižší hodnoty posuvu tj. 20%, kde se zvyšujícím se posuvem dochází k poklesu rozptylů a ke zvyšování hodnot mediánu.

Podobný trend ukazují i další grafy při hodnotách rozlišení DPI 500 a DPI 1000, avšak se zvyšujícím se hodnotou rozlišení nedochází k takové variabilitě rozptylů jako na obr. 40. v grafu závislosti hloubky obrobenej plochy na výkonu a posuvu pro DPI 200.

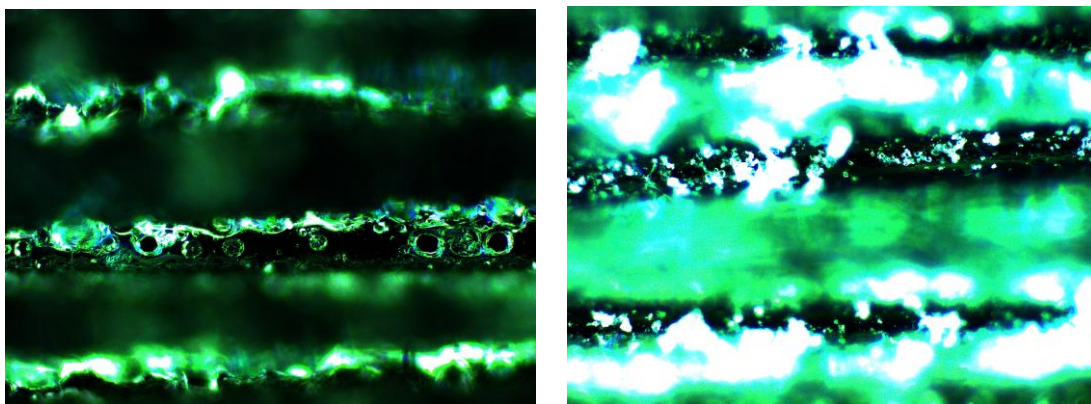
10 GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ROZDÍLU STRUKTURY

10.1 Zobrazení struktury povrchu pro zvětšení dvoustnásobné:

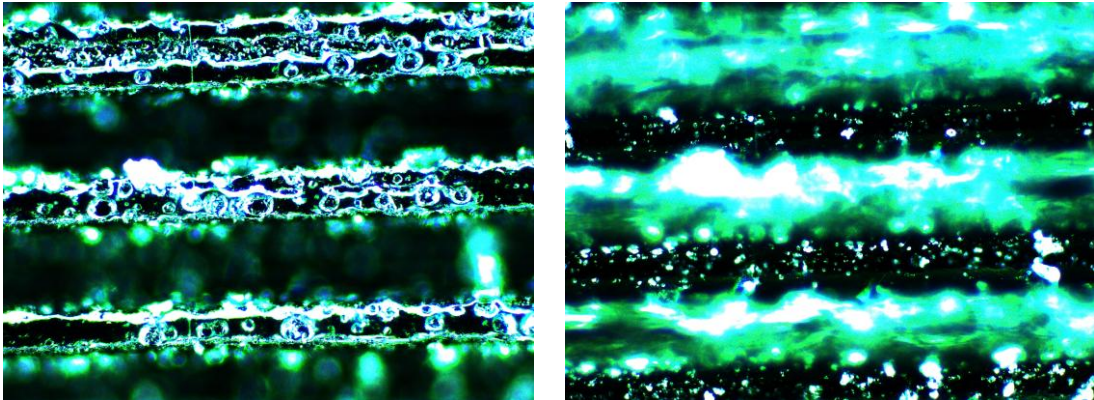
Pro ukázkou zvětšené struktury byl vybrán materiál z PMMA, pořízené obrázky z mikroskopu jsou zřetelnější. Na obrázcích vlevo jsou zaostřeny horní části struktury, na obrázcích vpravo je zaostřena struktura spodní části.



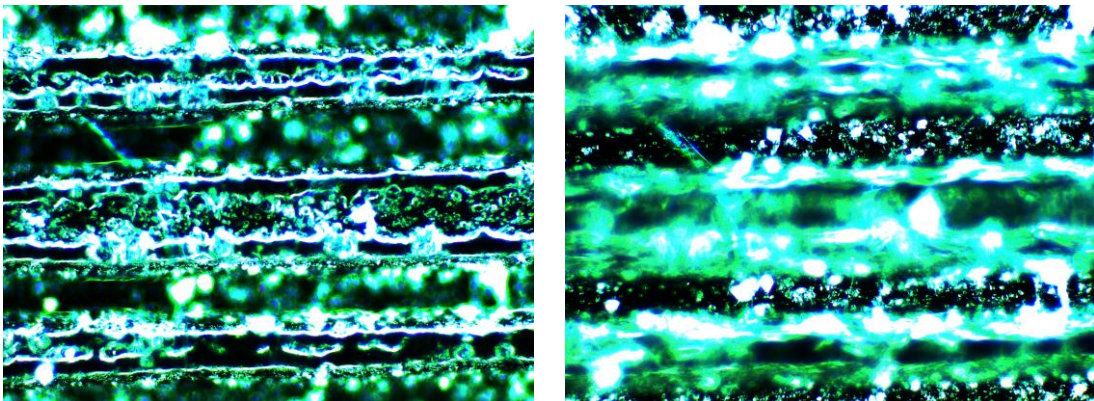
Obrázek. 46. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 20 %, PMMA



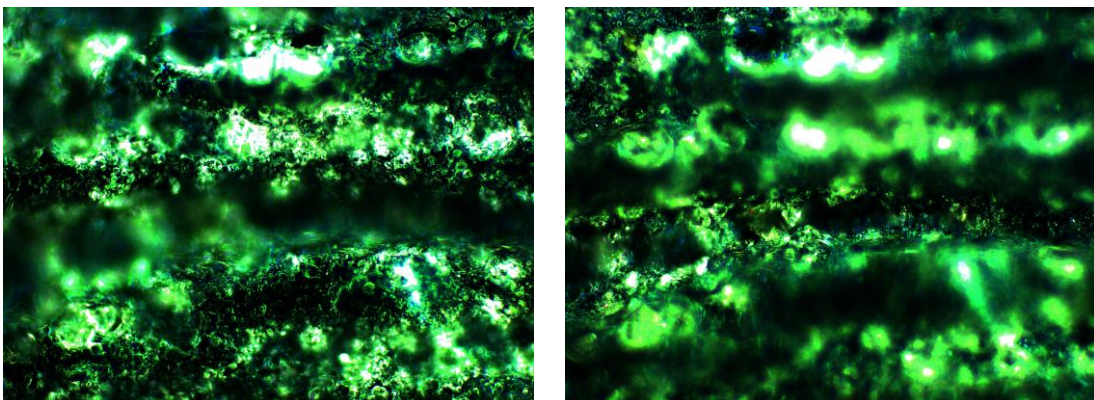
Obrázek. 47. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 40 %, PMMA



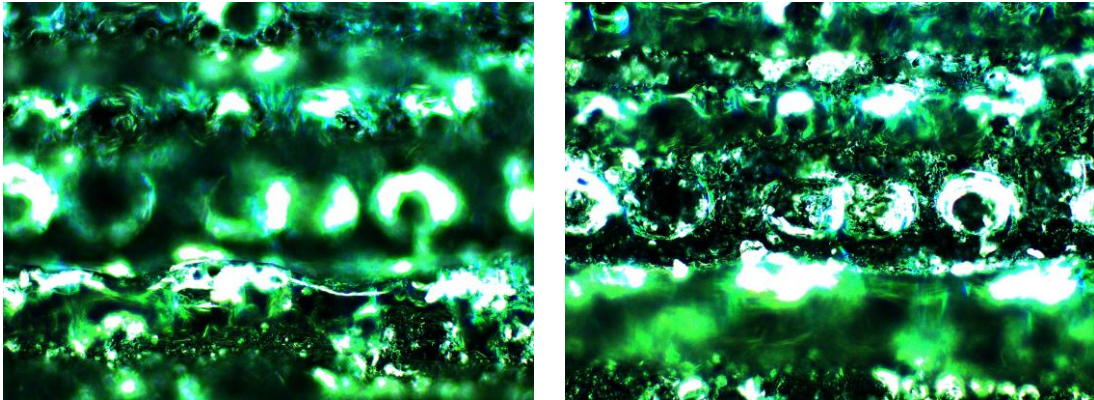
Obrázek. 48. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 60 %, PMMA



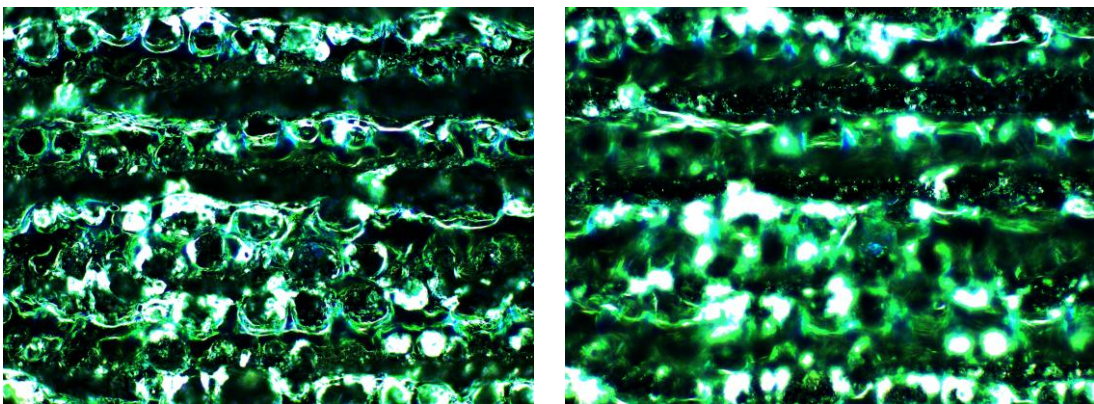
Obrázek. 49. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 80 %, PMMA



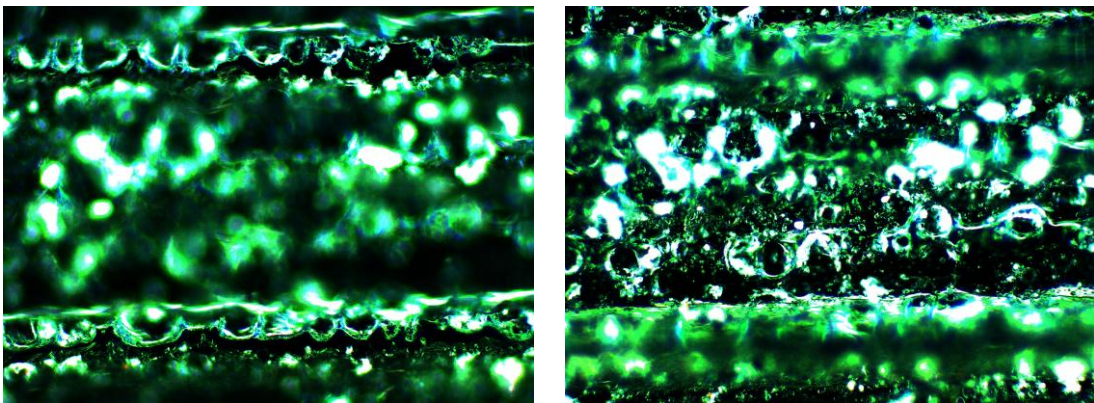
Obrázek. 50. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 20 %, PMMA



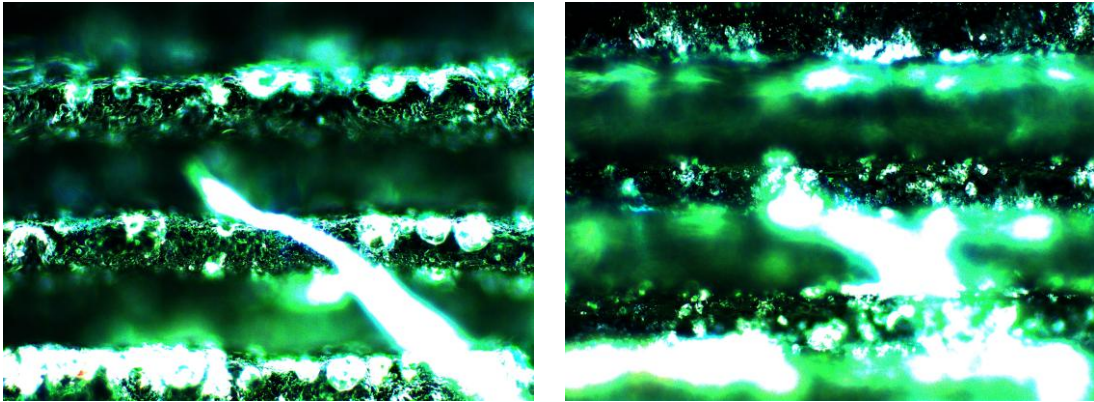
Obrázek. 51. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 40 %, PMMA



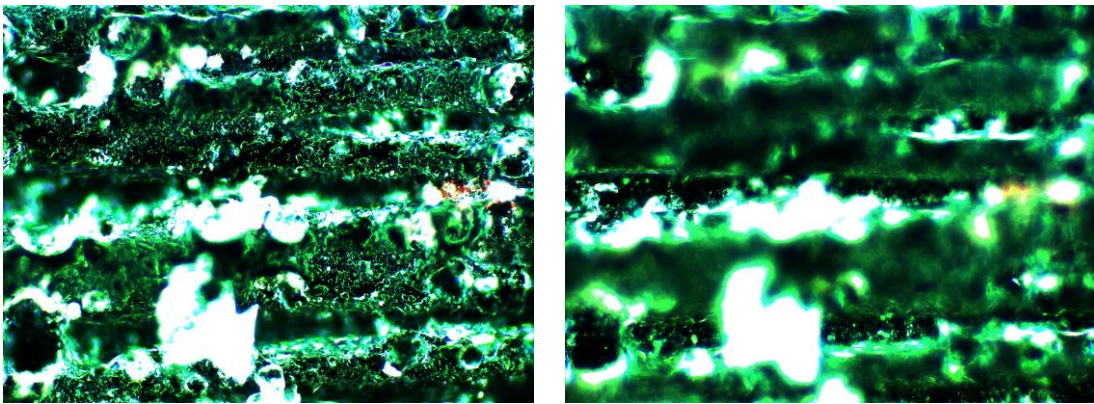
Obrázek. 52. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 60 %, PMMA



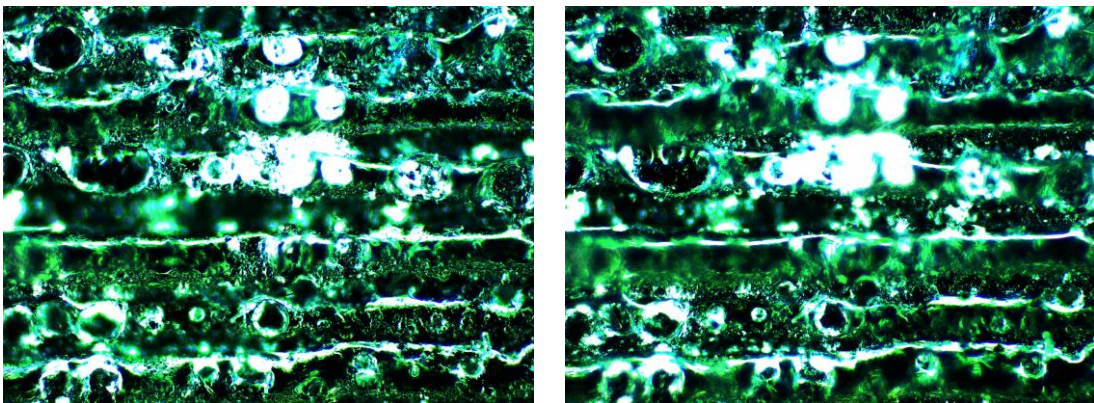
Obrázek. 53. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 80 %, PMMA



Obrázek. 54. Rozlišení DPI 1000, výkon 20 %, posuv 40 %, PMMA

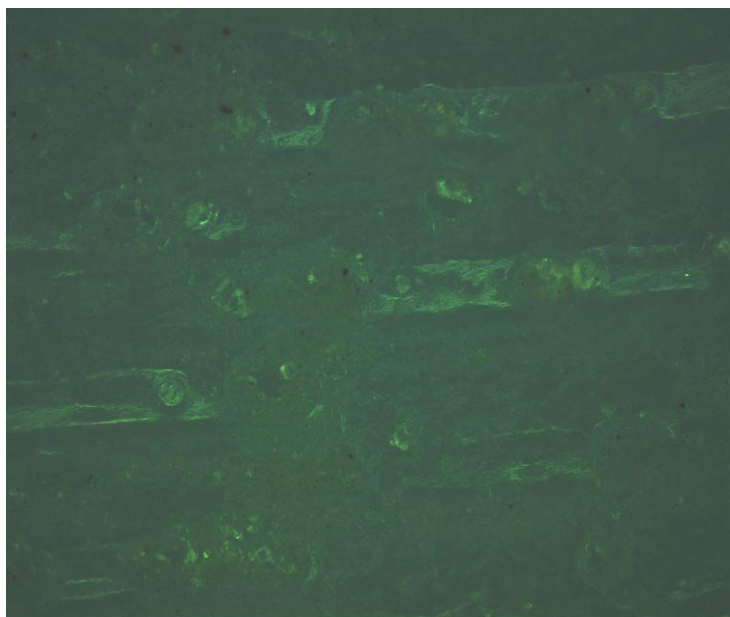


Obrázek. 55. Rozlišení DPI 1000, výkon 20 %, posuv 60 %, PMMA

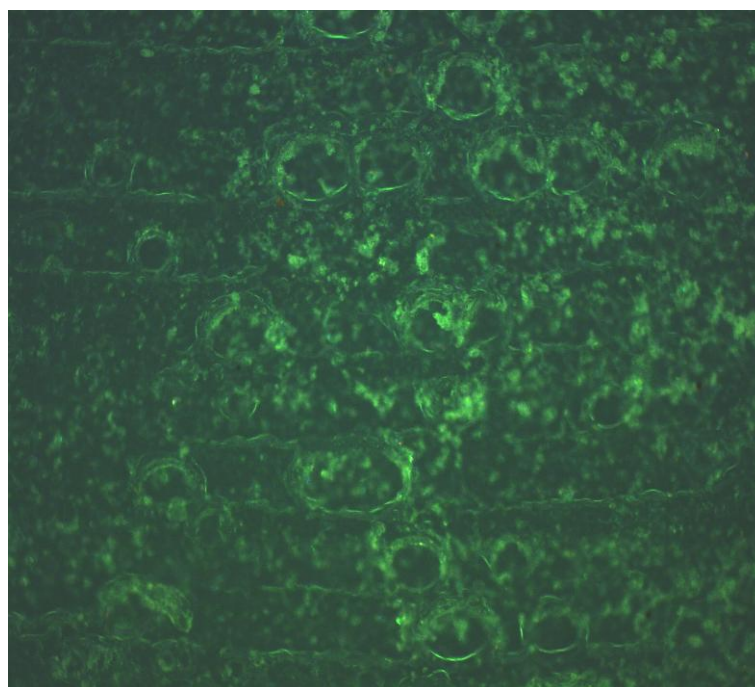


Obrázek. 56. Rozlišení DPI 1000, výkon 20 %, posuv 80 %, PMMA

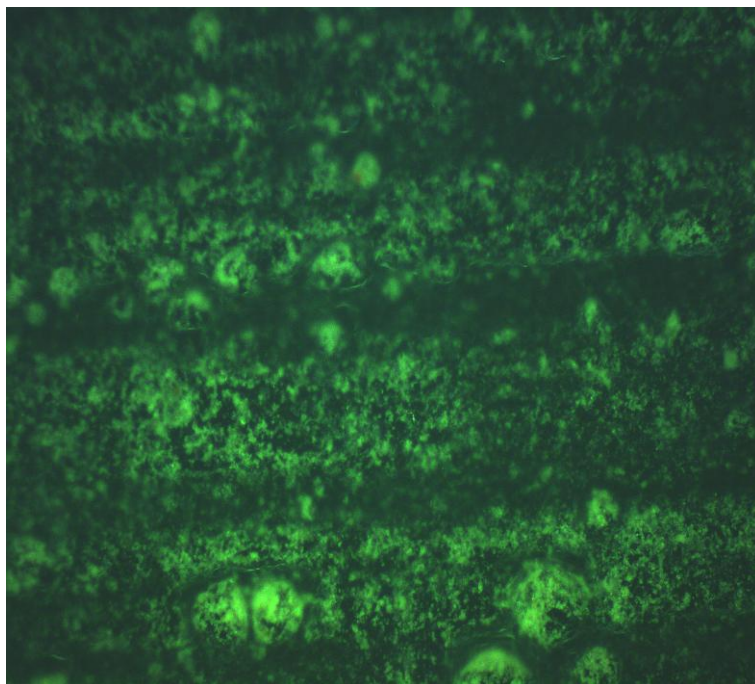
10.2 Ukázka zobrazení struktury povrchu pro zvětšení stonásobné použité materiály PP, PMMA:



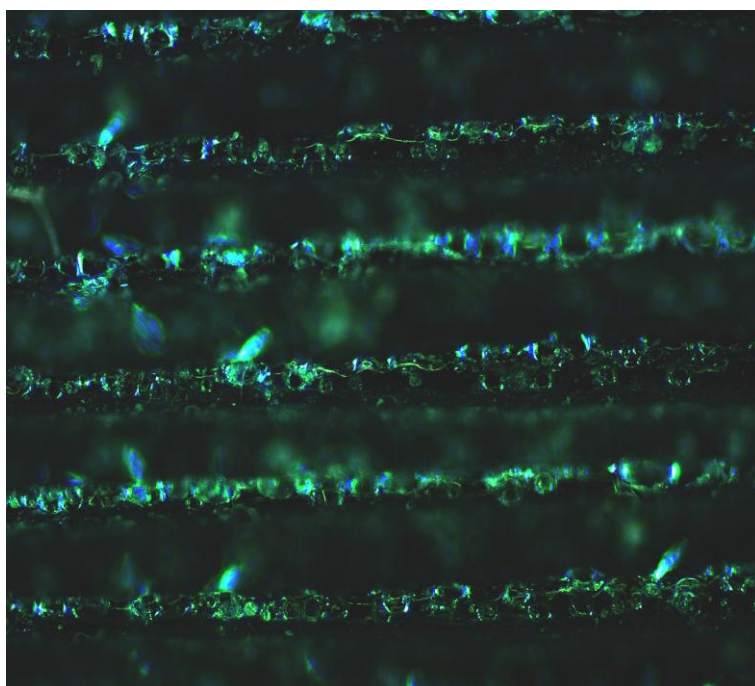
Obrázek. 17. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 40 %, PP



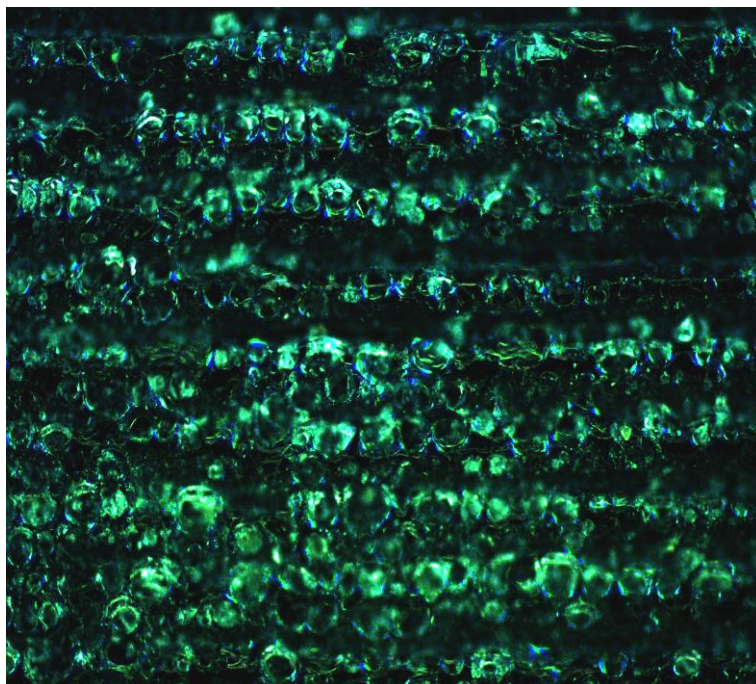
Obrázek. 58. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 40 %, PP



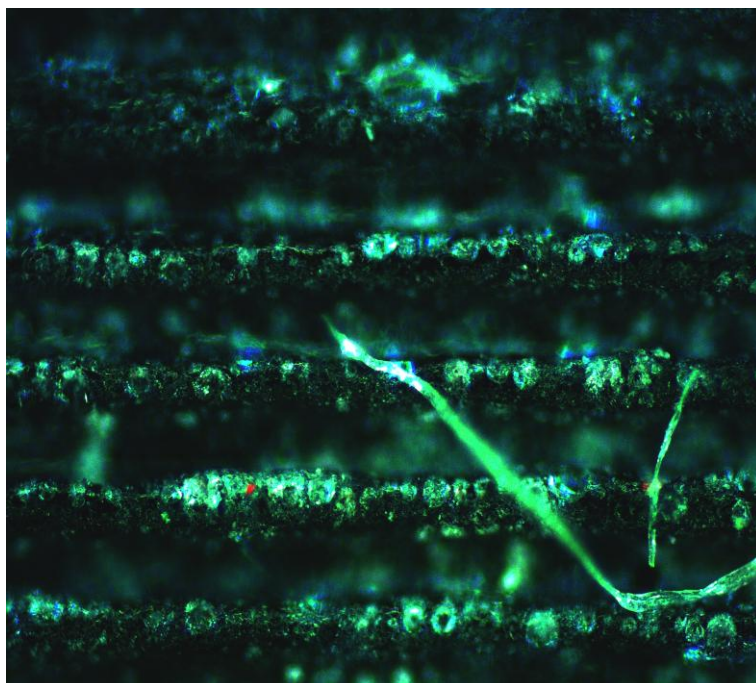
Obrázek. 59. Rozlišení DPI 1000, výkon 20 %, posuv 40 %, PP



Obrázek. 60. Rozlišení DPI 200, výkon 20 %, posuv 40 %, PMMA



Obrázek. 61. Rozlišení DPI 500, výkon 20 %, posuv 60 %, PMMA



Obrázek. 62. Rozlišení DPI 1000, výkon 20 %, posuv 40 %, PMMA

V závislosti na parametrech laseru a na druhu obráběného polymeru mohou být výsledné struktury vysoce přesné a s vysokou kvalitou povrchu. Velkým problémem je přecházení neodtransportovaného materiálu znovu do pevné fáze. To způsobuje zhoršování jak přesnosti rozměrů, tak snižování kvality povrchu. Dochází k tomu zejména při nižších hodnotách posuvu a vyšších výkonech. Čím je přejezd paprsku pomalejší, tím je více času na vyvrhování taveniny plyny kolem drážky, místo toho, aby materiál klidně po přejezdu paprsku přešel v drážce znovu do pevného skupenství. Důsledkem toho jsou i viditelné defekty, kavitační bubliny aj.

11 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Posledním cílem práce je posouzení rozdílného nastavení technologických parametrů rozlišení v souvislosti s ekonomickou náročností obrábění.

Níže uvedené ekonomické zhodnocení zachycuje rozdíl nákladů při různých nastavení DPI.

11.1 Náklady na jednu hodinu práce stroje s obsluhou

Vstupní parametry:

- pořizovací cena stroje Kč 850 000,- (odpisová skupina 1)
- mzda obsluhy 120,- Kč/hod.
- výrobní režie 80,- Kč/hod.
- zisk 10 %
- roční pracovní fond 253,-
- dvousměnný provoz, tj. 16 hodin, jednosměnný 8 hodin
- paušální částka za návrh Kč 500,-
- použití rovnoměrného odpisování

Tabulka. 37. Sazba pro rovnoměrné odpisování

Odpisová skupina	Sazba v prvním roce odpisování	Sazba v dalších letech odpisování
1	20%	40%

- Výpočet:

Odpis v 1.roce..... $(850\ 000/100)20 = 170\ 000,-$ Kč

Odpis v 2.roce..... $(850\ 000/100)40 = 340\ 000,-$ Kč

Odpis ve 3.roce..... $(850\ 000/100)40 = 340\ 000,-$ Kč

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

Odpis v 1. roce/pracovní dny za rok = $170\,000/253 = 672,-$

Hodinová práce za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda zaměstnan-
ce = $672/16 + 120 = 162$ Kč/hod.

Hodinová práce za den/hodiny v jednosměnném provozu + hodinová mzda zaměstnan-
ce = $672/8 + 120 = 204$ Kč/hod.

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

Odpis ve 2. roce/pracovní dny za rok = $340\,000/253 = 1344$ Kč/hod.

Hodinová práce stroje za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda za-
městnance = $1344/16 + 120 = 204$ Kč/hod.

Hodinová práce stroje za den/hodiny v jednosměnném provozu + hodinová mzda za-
městnance = $1344/8 + 120 = 288$ Kč/hod.

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

Odpis ve 3. roce/pracovní dny za rok = $340\,000/253 = 1344,-$

Hodinová práce stroje za den/hodiny ve dvousměnném provozu + hodinová mzda za-
městnance = $1344/16 + 120 = 204$ Kč/hod.

Hodinová práce stroje za den/hodiny v jednosměnném provozu + hodinová mzda za-
městnance = $1344/8 + 120 = 288$ Kč/hod.

Průměrná hodnota hodinové práce stroje s obsluhou pro dvousměnný provoz:

$(162+204+204)/3 = 190$ Kč/hod.

Průměrná hodnota hodinové práce stroje s obsluhou pro jednosměnný provoz:

$(204+288+288)/3 = 260$ Kč/hod.

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

Průměrná hodinová práce stroje pro dvousměnný provoz + výrobní režie =

$$= 190 + 80 = 270 \text{ Kč/hod.}$$

$$\text{Zisk (5\%)} \text{ z hodnoty } 270 = 13,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Celková hodinová práce (bez materiálu)} = 270 + 13,5 = 283,5 \text{ Kč}$$

$$\text{Průměrná hodinová práce stroje pro jednosměnný provoz + výrobní režie} =$$

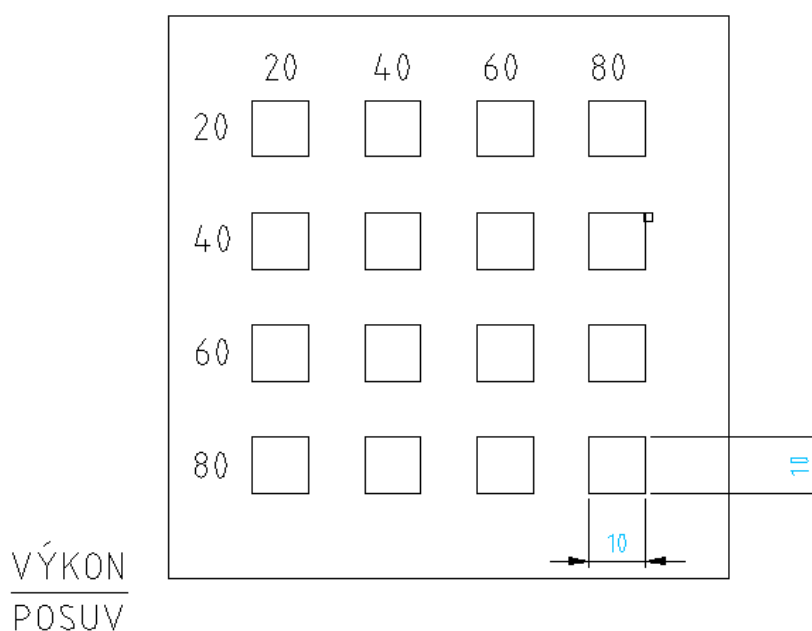
$$= 260 + 80 = 340 \text{ Kč/hod.}$$

$$\text{Zisk (5\%)} \text{ z hodnoty } 340 = 17 \text{ Kč}$$

$$\text{Celková hodinová práce (bez materiálu)} = 340 + 17 = 357 \text{ Kč}$$

11.2 Výpočet ceny navrženého vzorku

Při obrobení plochy o rozměrech 10x10 mm, laser při obrábění projede paprskem drážku každou 2x (tam i zpět) a urazí tedy dráhu 20mm.



Obrázek. 63. Schéma navržené mikrostruktury

Je zřejmé, že náklady pro obrobení šestnácti polí se bude lišit se změnou rozlišení DPI hustoty drah laseru. Proto provedeme výpočet pro každé z polí.

Výpočet ceny obrábění při rozlišení DPI 200:

Vstupní parametry:

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 200
- maximální rychlost posuvu je 1524 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 283,5 Kč pro dvousměnný provoz, 357 Kč pro jednosměnný provoz

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

- výpočet posuvu $0,8 \cdot 1524 = 1219,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
- počet drah v poli $\left(\frac{200}{25,4}\right) \cdot 10 = 78,7x$
- délka dráhy laseru $20 \cdot 78 = 1560 \text{ mm}$
- čas potřebný k obrobení plochy $\frac{1560}{852,8} = 1,71 \text{ s}$

Tabulka. 38. Doba potřebná vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80 (1219,2)	1,83
60 (914,4)	1,71
40 (609,6)	2,55
20 (304,8)	5,11
celkem	11,2

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony:

$$11,2 \cdot 4 = 44,8 = 45 \text{ s} = 0,0125 \text{ hod.}$$

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro dvousměnný provoz:

$$283,5 \cdot 0,0125 = 3,5 \text{ Kč}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

paušální částka + základní cena: $500 + 3,5 = 503,5$ Kč

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro jednosměnný provoz:

$357 \cdot 0,0125 = 4,5$ Kč

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

paušální částka + základní cena: $500 + 4,5 = 504,5$ Kč,-

Výpočet ceny obrábění při rozlišení DPI 500:

Vstupní parametry:

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 500
- maximální rychlost posuvu je 1524 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 283,5 Kč pro dvousměnný provoz, 357 Kč pro jednosměnný provoz

Tabulka. 39. Doba potřebná vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80 (1219,2)	3,23
60 (914,4)	4,3
40 (609,6)	6,46
20 (304,8)	12,93
celkem	26,92

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony:

$26,92 \cdot 4 = 107,68 = 107,7\text{s} = 0,0299$ hod.

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro dvousměnný provoz:

$$283,5 \cdot 0,0299 = 8,5 \text{ Kč}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$\text{paušální částka} + \text{základní cena: } 500 + 8,5 = 508,5 \text{ Kč}$$

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro jednosměnný provoz:

$$357 \cdot 0,0299 = 11 \text{ Kč}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$\text{paušální částka} + \text{základní cena: } 500 + 11 = \mathbf{511 \text{ Kč}}$$

Výpočet ceny obrábění při rozlišení DPI 1000:

Vstupní parametry:

- dráha pro vytvoření 1 drážky je 20mm
- počet drah na délce 25,4mm je 1000
- maximální rychlost posuvu je 1524 mms^{-1}
- celková hodinová práce je 283,5 Kč pro dvousměnný provoz, 357 Kč pro jednosměnný provoz

Tabulka. 40. Doba potřebná vyrobení mikrostruktury

Posuv [%], (mms^{-1})	Čas potřebný k výrobě mikrostruktury [s]
80 (1219,2)	6,45
60 (914,4)	8,6
40 (609,6)	12,9
20 (304,8)	25,79
celkem	53,74

Čas potřebný pro vyrobení mikrostruktury pro všechny výkony:

$$53,74 \cdot 4 = 214,96 = 215\text{s} = 0,0597 \text{ hod.}$$

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro dvousměnný provoz:

$$283,5 \cdot 0,0597 = 16,9 \text{ Kč}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$\text{paušální částka} + \text{základní cena: } 500 + 16,9 = 517 \text{ Kč}$$

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury pro jednosměnný provoz:

$$357 \cdot 0,0597 = 21,5 \text{ Kč}$$

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu):

$$\text{paušální částka} + \text{základní cena: } 500 + 21,5 = \mathbf{521,5 \text{ Kč}}$$

Ekonomický rozbor nám potvrdil, že při rozlišných nastaveních DPI dojde ke změnám nákladů na jejich obrobení.

Ceny na výrobu navrženého vzorku při různých rozlišeních se liší:

pro DPI 200 je základní cena mikrostruktury 505 Kč,

pro DPI 500 je základní cena mikrostruktury 511 Kč,

pro DPI 1000 je základní cena mikrostruktury 522 Kč.

I když se může zdát rozdíl v cenách mikrostruktur zanedbatelný, je nutné si uvědomit, že doba obrábění zkušebních vzorků byla velmi krátká. Při obrábění složitějších struktur či dílců však může tento rozdíl v cenách při různých rozlišeních hrát velmi významnou roli v konečné ceně výrobku.

ZÁVĚR

V práci jsou zkoumány možnosti mikroobrábění polymerních materiálů laserem, konkrétně se zabývá vlivem změny technologických parametrů výkonu a posuvu na výslednou hloubku obrobené plochy při rozdílných hodnotách nastavení kroku laserového paprsku DPI u polymerních materiálů.

V teoretické části je podán přehled progresivních technologií, dále je tato část zaměřena na fyzikální principy laserů, jejich dělení dle příslušných kategorií, shrnuje současné obráběcí možnosti laseru a věnuje se i některým aspektům konstrukce laserových zařízení a efektivnosti jejich použití v současných vědních odvětvích. Závěr teoretické části práce je věnován charakteristice a vlastnostem materiálu PMMA a PP, které byly vybrány pro experimentální obrábění.

Pro obrábění zkušebních vzorků byl použit plynový CO₂ laser ILS 3NM s maximálním výkonem 100 W a posuvovou rychlostí 1524 mm/s. Pro měření výškového profilu bylo použito zařízení MitutoyoLinearHeightGage LH-600D a pro zpracování dat MitutoyoLinearHeightGage. Rovněž bylo provedeno optické posouzení obrobených ploch za použití metalografického mikroskopu Leica DMI3000 M. Optika přístroje byla propojena s digitální kamerou a počítačem. Použité zvětšení bylo stonásobné a dvěstěnásobné.

Za účelem posouzení vlivu změny technologických parametrů, především rozlišení DPI bylo prováděno experimentální obrábění pro PMMA a PP. Dle výsledných naměřených hodnot hloubky drážky byly sledovány optimální konfigurace nastavení výkonu a posuvu vedoucí k dosažení hodnot hloubky drážky pro plochy obrobené s krokem posuvu laserového paprsku na 200 DPI, 500 DPI a na 1000 DPI.

Ze zpracovaných výsledků je možné konstatovat, že zásadní vliv na hloubku obrobené plochy má doba interakce laser – materiál a samozřejmě hodnota výkonu. Naměřené hodnoty hloubky drážky rostou při zvyšujícím se výkonu a nižší posuvové rychlosti, což je výsledkem delší doby působení koncentrované energie na polymerní materiál. Tento trend byl potvrzen u obou obráběných materiálů, tj. PMMA a PP.

Pokud budeme porovnávat tyto hodnoty s ohledem na rozlišení DPI, potvrdil se předpoklad, že je možné korigovat hloubku při obrábění i tímto nastavením. Ze získaných dat vyplývá, že čím je vyšší hustota drah – tj. rozlišení, tím je vyšší hodnota obrobené hloubky. Tato skutečnost platí pro oba obráběné materiály.

V závěru práce je proveden ekonomický rozbor, který potvrdil předpoklad, že při rozličných nastaveních DPI dojde ke změnám nákladů na obrábění. Při obrábění složitějších struktur či dílců může tento rozdíl v cenách při různých rozlišeních kroku posuvu hrát významnou roli v konečné ceně výrobku.

Z provedených experimentů plyne, že změna technologických podmínek – především DPI má při obrábění polymerních materiálů významný vliv na výslednou hloubku obrobené plochy. Na základě výše uvedeného tedy lze konstatovat, že nadefinováním vhodné kombinace parametrů posuvu f , výkonu P a nastavení jemnosti kroku posuvu laserového paprsku (DPI) lze dosáhnout požadované hloubky obrobené plochy pro konkrétní praktickou aplikaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KLEJMAN, H.: Masery a lasery. Bratislava, Alfa 1969
- [2] BLABLA, J., ŠIMEČEK, T., TRKAL, V.: Kvantové generátory (lasery a masery). Praha
- [3] STRUMBAN, E. J., ŠTOLL, I.: Lasery a optoelektronika. Praha, Panorama 1989
- [4] ENGST, P., HORÁK, M.: Aplikace laserů. Praha, SNTL 1989
- [5] LETOCHOV, V. S., UNSTINOV, N. D.: Výkonné lasery a jejich použití. Bratislava
- [6] HABOVČÍK, P.: Lasery a fotodetektory. Bratislava, Alfa 1989
- [7] MAŤÁTKO, J.: Kvantové generátory světla. Praha, IDEA SERVIS 1998
- [8] SADOWSKI, A., KREHLIK, R.: Lasery v obrábění a metrologii. Praha, SNTL 1998
- [9] LUKOVICS, I., MAŇAS, M.: Plasty a kaučuk, 33, 1996, s.228
- [10] TURŇA, M.: Špeciálne metody zvarania. Bratislava, Alfa 1989
- [11] DUNOVSKÝ, J., KOŘÁN, P.: Kam směřují lasery. Technik, 2, 1999, s.19
- [12] [Http://www.de.afrl.af.mil/pa/Factsheets/coil.html](http://www.de.afrl.af.mil/pa/Factsheets/coil.html)
- [13] [Http://www.achilles.net/jtalbot/history/plasma.html](http://www.achilles.net/jtalbot/history/plasma.html)
- [14] [Http://www.achilles.net/jtalbot/history/lasers.html](http://www.achilles.net/jtalbot/history/lasers.html)
- [15] Water-Jet and Laser Cutters Také on Tough Materials. Plastics Technology
- [16] ŠMÍD, J.: Vyřezávání laserem v kooperaci ČSSR-NDR. 1985.
- [17] Soustružení laserem místo broušení. Technik, 10, 1999, s.10
- [18] Tepelné ovlivnění povrchových vrstev. Technik, 2, 1999, s.21
- [19] KORDULIAK, D.: Výzkum nových metod zvyšování otěruvzdornosti. FT VUT, 1995
- [20] Shaft 2000 a Digilaser. Revoluční měřicí systém pro ustavení a polohování. Technik, 2
- [21] Laserové svařování plastů. Technik, 2, 1999, s.24

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PMMA	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
DPI	Rozlišení (počet bodů)
ECM	Elektrochemické obrábění
LBM	Technologie laserového paprsku
USM	Ultrazvukové obrábění
PAM	Obrábění plazmovým paprskem
EBM	Obrábění elektronovým paprskem
WJM	Obrábění vodním paprskem
CAD/CAM	Computer aided design/ komputer aided manufacturing
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = zesilování světla pomocí stimulované emise záření
Nd:YAG	Neodymem (Nd^{+3}) dopovaný ytriho hlinitým granátem
SiO_2	Oxid křemičitý
Al_2O_3	Oxid hlinitý
T_m	Teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
E	Energie elektronu [J]
E_0	Základní elektronická hladina elektronu [J]
E_1	Excitovaná energetická hladina elektronu
s	Rychlost posuvu [mms^{-1}]
h	Hloubka obrábění plochy [mm]
P	Výkon [W], [%]
f	Posuv [mms^{-1}], [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Srovnání světla vyzařováním laserem se světlem žárovky.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2. Přehled vlnových délek a frekvencí známých oblastí elektromag. záření.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3. Kvantové dráhy v atomu vodíku.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4. Absorpce, spontánní a stimulovaná emise.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 5. zesílení záření v aktivním prostředí.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6. Schéma Fabryova-Peronova rezonátoru v He-Ne laseru.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 7. Energetické hladiny Nd: YAG laseru.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8. Zvýšení účinnosti čerpání.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9. Energetické hladiny vibračně rotační molekulárních přechodů CO₂.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 10. Schéma kontinuálního CO₂ laseru Sylvania – model 971.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 11. Rekombinace párů electron díra.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 12. Injekční diodový laser.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 13. Schéma chemického lasru COIL.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 14. Schéma gazodynamického CO₂ laseru.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 15. Schéma rentgenového laseru.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 16. Schéma plazmového laseru.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 17. Možnosti vyřezávání laserovým paprskem.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 18. Laserový popis chirurgických nástrojů.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 19. Proces probíhající při řezání materiálu.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 20. Metalografický Mikroskop Leica DMI3000 M.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 21. Ukázka zkoumané vzorky PMMA DPI 1000</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 22. Laser ILS 3NM.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 23. Mitutoyo LH-600.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 24. Miniprocessor Mitutoyo DP-1VR.....</i>	<i>68</i>

<i>Obr. 25. Použitý materiál PMMA ukázka obrobené struktury DPI 1000.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 26. Použitý materiál PP ukázka obrobené struktury DPI 1000.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 27. Návrh obrobené plochy pro jednotlivé parametry.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 28. Nastavení parametrů dle přiřazení barev.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 29. Nastavení DPI a vektor a rastr.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 30. Příprava výkresu část A.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 31. Příprava výkresu část B.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 32. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 200,PP.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 33. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 500,PP.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 34. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 1000,PP.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 35. Celkový graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI200 500,1000,PP.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 36. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 200,PMMA....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 37. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 500,PMMA....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 38. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 1000,PMMA..</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 39. Celkový graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI200 500,1000,PMMA.....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 40. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 200,PMMA....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 41. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 500,PMMA....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 42. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 1000,PMMA..</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 43. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 200,PP.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 44. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 500,PP.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 45. Graf závislost hloubky obrobené plochy na výkonu a posuvu DPI 1000,PP.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 46. Rozlišení DPI 200, výkon 20%, posuv 20%, PMMA.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 47. Rozlišení DPI 200, výkon 20%, posuv 40% PMMA.....</i>	<i>98</i>

<i>Obr. 48. Rozlišení DPI 200 výkon 20%, posuv 60% PMMA.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 49. Rozlišení DPI 200 výkon 20%, posuv 80% PMMA.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 50. Rozlišení DPI 500 výkon 20%, posuv 20% PMMA.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 51. Rozlišení DPI 500 výkon 20%, posuv 40% PMMA.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 52. Rozlišení DPI 500 výkon 20%, posuv 60% PMMA.....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 53. Rozlišení DPI 500 výkon 20%, posuv 80% PMMA.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 54. Rozlišení DPI 1000 výkon 20%, posuv 40% PMMA.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 55. Rozlišení DPI 1000 výkon 20%, posuv 60% PMMA.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 56. Rozlišení DPI 1000 výkon 20% posuv 80% PMMA.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 57. Rozlišení DPI 200 výkon 20%, posuv 40%, PP.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 58. Rozlišení DPI 500 výkon 20%, posuv 40%, PP.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 59. Rozlišení DPI 1000 výkon 20% posuv 40% PP.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 60. Rozlišení DPI 200 výkon 20% posuv 40% PMMA.....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 61. Rozlišení DPI 500 výkon 20% posuv 60% PMMA.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 62. Rozlišení DPI 1000 výkon 20% posuv 40% PMMA.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 63. Schéma navržené mikrostruktury.....</i>	<i>108</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled vibračně rotačních modů CO₂ a N₂.....</i>	26
<i>Tab. 2. Běžné řezné rychlosti a dosahovaná šířka řezu u některých materiálů.....</i>	44
<i>Tab. 3. Technické parametry mikroskopu Leica DMI 3000 M.....</i>	63
<i>Tab. 4. Technické parametry ILS-3NM-100W.....</i>	65
<i>Tab. 5. Technické parametry LH-600.....</i>	67
<i>Tab. 6. Parametry použitého miniprocessoru.....</i>	68
<i>Tab. 7. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20%, PP.....</i>	74
<i>Tab. 8. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PP.....</i>	75
<i>Tab. 9. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PP.....</i>	75
<i>Tab. 10. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PP.....</i>	76
<i>Tab. 11. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20% PP.....</i>	76
<i>Tab. 12. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PP.....</i>	77
<i>Tab. 13. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PP.....</i>	77
<i>Tab. 14. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PP.....</i>	78
<i>Tab. 15. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20% PP.....</i>	78
<i>Tab. 16. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PP.....</i>	79
<i>Tab. 17. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PP.....</i>	79
<i>Tab. 18. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PP.....</i>	80
<i>Tab. 19. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 200.....</i>	80
<i>Tab. 20. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 500.....</i>	81
<i>Tab. 21. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 1000.....</i>	81

<i>Tab. 22. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20% PMMA</i>	84
<i>Tab. 23. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PMMA</i>	84
<i>Tab. 24. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PMMA</i>	85
<i>Tab. 25. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PMMA</i>	85
<i>Tab. 26. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20% PMMA</i>	86
<i>Tab. 27. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PMMA</i>	86
<i>Tab. 28. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PMMA</i>	87
<i>Tab. 29. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PMMA</i>	87
<i>Tab. 30. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 20% PMMA</i>	88
<i>Tab. 31. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 40% PMMA</i>	88
<i>Tab. 32. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 60% PMMA</i>	89
<i>Tab. 33. Hloubka vzorku při konstantním výkonu 80% PMMA</i>	89
<i>Tab. 34. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 200</i>	89
<i>Tab. 35. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 500</i>	90
<i>Tab. 36. Celková závislost hloubky na výkonu a posuvu laserového paprsku při DPI 1000</i>	91
<i>Tab. 37. Sazba pro rovnoměrné odpisování</i>	106
<i>Tab. 38. Doba potřebná k vytvoření mikrostruktury</i>	109
<i>Tab. 39. Doba potřebná k vytvoření mikrostruktury</i>	110
<i>Tab. 40. Doba potřebná k vytvoření mikrostruktury</i>	111