

Výzkum procesu laserového popisování polymerních materiálů

Bc. Petra Dosedělová

Zadání

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří přispěli k dokončení této práce. Především velmi děkuji své vedoucí Ing. Libuši Sýkorové, PhD. za její odborné vedení a rady. Dále panu Ing. Martinovi Radičovi z firmy Mechanika Prostějov za možnost uskutečnění experimentálních zkoušek na CO₂ laseru.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala.

Ve Zlíně, 24. 05. 2005

.....

jméno diplomanta

Abstrakt

V diplomové práci je popsána funkce a druhy laseru a jejich použití v oblasti mikro-
obrábění. Podrobně je zde popsán laserový paprsek a jeho vliv na různé druhy polymerních
materiálů. Je zde posuzována kvalita obrobené plochy (hloubka drážky a drsnost)
v závislosti na přesně nastavených parametrech výkonu a posuvu laserového systému.

I the diploma thesis are presented laser technologies and possibility of theirs using for
micro-machining applications. In detail is here researched laser beam and its using on
different types of polymeric materials. The quality of microstructures is depended on CO₂
laser set-up.

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1.1 NEKONVENČNÍ ZPŮSOBY OBRÁBĚNÍ.....	8
1.2 VZNIK A PRINCIP LASERU	9
1.2.1 Tvar průřezu laserového svazku	12
1.2.2 Charakteristika laserového svazku	13
1.3 TYPY LASERŮ	20
1.3.1 Pevnolátkové lasery	22
1.3.2 Plynové lasery	24
1.3.3 Kapalinový laser	27
1.3.4 Chemický laser	27
1.3.5 Polovodičový laser	27
1.3.6 Excimerový laser	28
1.3.7 Lasery pracující v pulsním provozu	29
1.3.8 Lasery pracující v kontinuálním provozu	29
1.4 MIKROOBRÁBĚNÍ PLASTŮ.....	30
1.4.1 Fotonové obrábění plastů	30
1.4.2 Proces laserového mikroobrábění polymerních materiálů.....	32
1.4.3 Možnosti mikroobrábění laserem	33
1.5 MATERIÁLY	40
1.5.1 Polyamid 6 (PA6).....	40
1.5.2 Polymethylmetakrylát (PMMA).....	40
1.5.3 Polypropylen (PP)	41
1.5.4 Polystyren (PS).....	42
1.5.5 Polymery ABS.....	42
1.5.6 Polyoxometylen (POM).....	43
1.6 SHRUTÍ POZNATKŮ Z LITERATURY A STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE44	
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	45
2.1 MATERIÁLY	45
2.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ	45
2.3 POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	47
2.3.1 Vstříkací stroj Demag ERGOtech 50-200 Systém NC 4.....	47
2.3.2 CO ₂ laser MERCURY L-30	47
2.3.3 Přístroj na měření drsnosti SJ-301	48
2.3.4 Optické mikroskopy	49
2.3.5 Číselníkový úchylkoměr.....	49
2.4 PROVEDENÍ ZKOUŠEK	50
2.4.1 Obrábění zkušebních vzorků na CO ₂ laseru MERCURY L-30.....	50
2.4.2 Měření rozměrů a tvarů obrobených drážek	51
2.4.3 Zkoumání kvality obrobené plochy	51
2.4.4 Měření drsnosti obrobené plochy	51
2.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY A ZÁVISLOSTI.....	53
2.5.1 Rozměry obrobených drážek	53
2.5.2 Naměřené hodnoty drsnosti obrobené plochy	60
2.5.3 Vizuální porovnání působení laserového paprsku na povrch polymerních materiálů ..	66
2.5.4 Vyhodnocení drsnosti obrobené plochy	74
2.5.5 Optimální parametry CO ₂ laseru MERCURY L-30 pro použité materiály	75
2.6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ LASERU PŘI MIKROOBRÁBĚNÍ.....	76
2.6.1 Náklady na jednu hodinu práce stroje s obsluhou	76
2.6.2 Výpočet ceny navržené mikrostruktury.....	78

3 DISKUZE VÝSLEDKŮ	80
3.1 VIZUÁLNÍ VYHODNOCENÍ PŮSOBNÍ LASEROVÉHO PAPRSKU NA POVRCH POLYMERŇÍCH MATERIÁLŮ	80
3.2 ZÁVISLOST HLOUBKY DRÁŽKY A DRSNOSTI OBROBNÉ PLOCHY NA PARAMETRECH OBRÁBNÍ LASEROVÉHO SYSTÉMU	81
3.2.1 ABS	82
3.2.2 PA 6	83
3.2.3 PS	84
3.2.4 PP	84
3.2.5 POM	85
3.2.6 PMMA	85
3.3 KVALITA OBRÁBNÍ CO ₂ LASEREM	86
ZÁVĚR.....	87
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	88
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	91
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	93
SEZNAM TABULEK	97
SEZNAM PŘÍLOH.....	99

ÚVOD

Objev laseru patří mezi nejdůležitější události minulého století. Takový objev ovlivňuje široké spektrum nejrůznějších vědních oborů a trvale vstupuje do našeho všedního života. Lasery se používají všude tam, kde se něco měří a dávkuje, na laseru je postavena holografie, používají se v telekomunikacích, v tiskárnách, ovládly řadu postupů v medicíně. Laser se stal nástrojem pro řadu průmyslových aplikací, ať již jde o svařování, řezání nebo o v poslední době se rozvíjející mikro-obrábění. Jednou z možností aplikace laseru při mikro-obrábění je popisování polymerních materiálů, kterým se zabývá i tato diplomová práce. Popisování laserem je technologie vysoce přesná, rychlá, ekologická, technologicky nenáročná, s vysokou produktivitou výroby a efektivností. Ve srovnání s jinými technikami popisu a značení výrobků nabízí laserový popis řadu výhod. Tato technologie patří mezi tzv. nekonvenční technologie obrábění. Jako nekonvenční metody označujeme zpravidla ty způsoby obrábění, u kterých nedochází k úběru materiálu v důsledku využití mechanické práce. Tyto metody využívají některého z fyzikálních nebo fyzikálně - chemických principů úběru materiálu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Nekonvenční způsoby obrábění

Původně byly tyto způsoby úběru materiálu určené pro zvláštní použití. Většina těchto metod byla vyvinuta pro řešení speciálních úloh v leteckém a kosmickém průmyslu v letech 1950 - 1960. Dnes většina z nich nachází široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích.

Vývoj nekonvenčních technologií, které používají jiné zdroje energie, než je čistě mechanická energie, pomáhá při řešení problémů s opotřebením nástroje při obrábění. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění je na obr. 1. (1)

MECHANICKÉ PROCESY	- Obrábění ultrazvukem - Obrábění proudem brusiva - Obrábění vodním paprskem	USM (Ultrasonic Machining) AJM (Abrasive Jet Machining), AFM (Abrasive Flow Machining) WJM (Water Jet Machining), AWJM (Abrasive Water Jet Machining)
CHEMICKÉ PROCESY	- Chemické obrábění - Fotochemické obrábění	CM (Chemical Machining) PCM (Photochemical Machining)
ELEKTROCHEMICKÉ A ELEKTRICKÉ PROCESY	- Elektrochemické obrábění - Elektrochemické broušení	ECM (Electrochemical Machining) ECG (Electrochemical Grinding)
ELEKTROTEPELNÉ A TEPELNÉ PROCESY	- Elektrojiskrové obrábění - Laserové obrábění - Obrábění elektronovým paprskem - Obrábění iontovým paprskem - Obrábění paprskem plazmy	EDM (Electrodischarge Machining) LBM (Laser Beam Machining) EBM (Elektron Beam Machining) IBM (Ion Beam Machining) PAM (Plasma Arc Machining)

Obr. 1. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění (1)

1.2 Vznik a princip Laseru

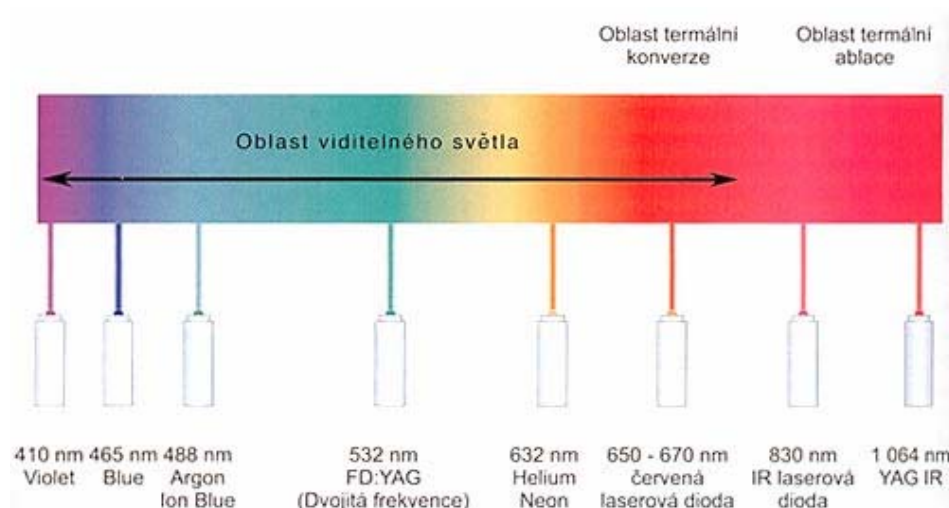
Obrábění laserem patří k jedné z mnoha průmyslových aplikací laserového paprsku.

Simulovaná emise byla teoreticky předpovězena již roku 1917 Albertem Einsteinem. Avšak až začátkem 50. let minulého století byly položeny základy nového oboru - kvantové elektroniky a byly realizovány zařízení generující a zesilující elektromagnetické záření na principu simulované emise záření. První rubínový laser byl zkonstruován T. H. Maimanem roku 1960. Slovo „LASER“ je akronymem anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, přeloženo jako „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního (vnitřně uspořádaného) optického záření, které vyniká extrémní monochromatickostí, nízkou rozbíhavostí svazku a vysokou hustotou přenášeného výkonu či energie. Žádné jiné záření než záření generované laserem tyto vlastnosti nemá. (1)

U laserů rozeznáváme tři základní parametry. Tím prvním je vlnová délka (udávaná v nanometrech). Vlnová délka určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Jak víme, vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky se také dělí lasery na termální (IR), u kterých je vlnová délka vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle (380 - 630 nm) a lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm). Dalšími dvěma parametry určujícími kvalitu laseru jsou pak výkon a v neposlední řadě životnost. (2)

Laserovým paprskem v současnosti s nejnižší vlnovou délkou v oblasti viditelného spektra je fialový laser (violet, 395 - 410 nm). Jde o laserovou diodu s velmi nízkou energetickou náročností (asi 5 mW). Druhou laserovou diodou s velmi nízkou vlnovou délkou a podobnou energetickou náročností je modrý laser (blue, 465 nm). Oba tyto druhy jsou žhavými favority v oblasti viditelného spektra. Nejnižší vlnovou délku mezi plynovými lasery má argonový laser (Argon Ion Blue 488 nm). Tohoto laseru využívají CtP zařízení ECRM, Scangraphics, Screen nebo Barco. Jedním z nejběžněji používaných laserů je krystalový Nd:YAG laser se zdvojenou frekvencí o vlnové délce 532 nm s energetickou náročností okolo 100 mW. Tento typ laseru využívá většina výrobců, mezi nimi například Agfa, Cymbolic Sciences a Purup Eskofot. Dalším používaným laserem je plynový 632 Helium Neon laser. Na vlnové délce 650 nm začíná skupina červených laserových diod, emitujících na vlnových délkách 650, 670, 680 nebo 780 nm. Pro CtP

systemy s vnějším válcem se pak používají výkonné laserové diody s vlnovou délkou 830 a 870 nm. Zařízení s vnitřním válcem používají hlavně Nd:YAG lasery s vlnovou délkou 1 064 nm. (2)



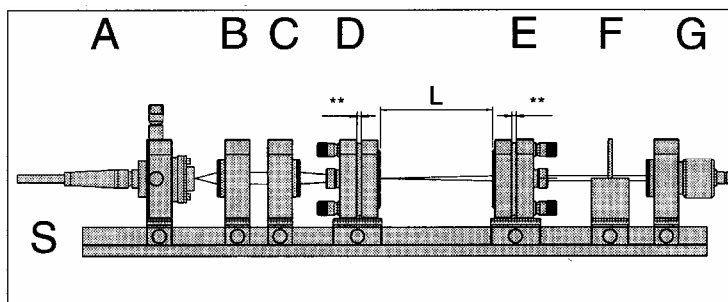
Obr. 2. Vlnové délky různých typů laserů (2)

Činnost laseru je založena na principu indukované emise, který Albert Einstein předpověděl již v roce 1916.

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

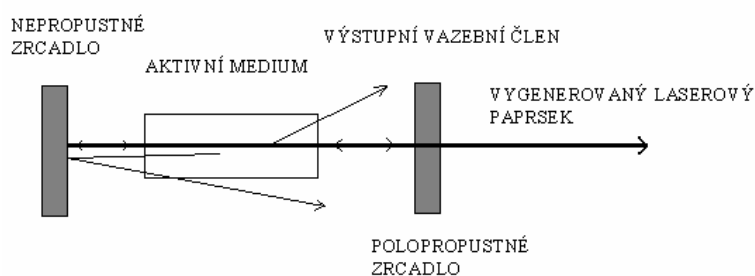
1. Inverze populace: Situace, při které je na vybuzené hladině více elektronů než na hladině základní. Toto se může docílit vhodným čerpáním aktivní látky. Toto čerpání může být optické (výbojka nebo dioda), elektrické (výboj nebo proud procházející p-n přechodem), chemické (chemické reakce vytvářející vhodné molekuly nebo ionty), čerpání jadernými reakcemi a.j.
2. Aktivní prostředí: Látka, ve které se elektrony nebo molekuly dají vhodným čerpáním vybudit na požadovanou pracovní hladinu, ze které pak můžou emitovat záření. Pracovní látkou může být plyn (He:Ne laser , oxid uhličitý), kapalina (Rhodamin-barvivo) ,krystal (rubín, Nd:YAG, Er:YAG), polovodič (GaAs, GaAsN), molekuly (XeCl, XeF) nebo plazma (C^{5+}).
3. Otevřený rezonátor (obr. 4): Dutina, do které se vkládá aktivní látka a která zajišťuje jev zpětné vazby. Většinou je tvořena dvěma zrcadly, ze kterých je jedno polopropustné a druhé odrazné. V podstatě jde o to, že emitovaná vlna z aktivní látky se odráží nazpět a při zpětném přechodu vzbuzuje další a další vynucené emise fotonů.

Pro realizaci laseru je třeba zvolit takové aktivní prostředí, ve kterém lze vytvořit inverzi populace energetických hladin elektronů a současně zabezpečit pomocí otevřeného rezonátoru kladnou zpětnou vazbu pro zesilování generovaného záření. (4)



Obr. 3. Schéma laseru (4)

S - optická lavice, **A** - laserová dioda, **B** - spojná čočka, **C** - sférická spojná čočka, **D** - Nd:YAG krystal, **D-E** - optický rezonátor, **G** - detektor výstupního záření



Obr. 4. Schéma rezonátoru (13)

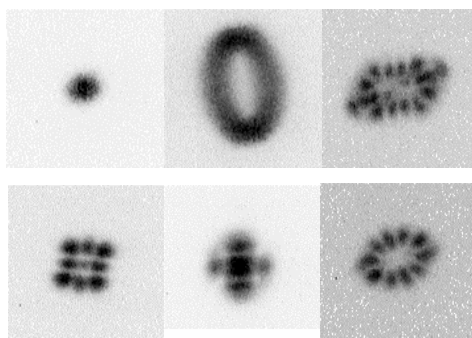
Od záření běžných světelných zdrojů (plynové výbojky, žárovky) se laserové světlo liší svými vlastnostmi (obr. 5): záření je prostorově koherentní (vlny emitované z různých míst aktivního prostředí mají pevný fázový vztah); záření se v prostoru nešíří všemi směry, ale v úzkém svazku - fokusací na malou plochu lze dosáhnout extrémně vysoké hustoty výkonu (přibližně 10^{14} Wcm^{-2}); záření je časově koherentní (laser emituje postupné vlnění se zanedbatelnými fázovými nestabilitami). S tím souvisí vysoká přesnost frekvence záření (monochromaticnost). Laser umožňuje generovat extrémně krátké světelné impulsy. Při použití pulzního laseru lze v úzké oblasti vlnových délek uvolnit optický výkon o hodnotách od 10^{10} do 10^{13} W . (3, 7)



Obr. 5. Srovnání světla vyzařovaného laserem se světlem žárovky (10)

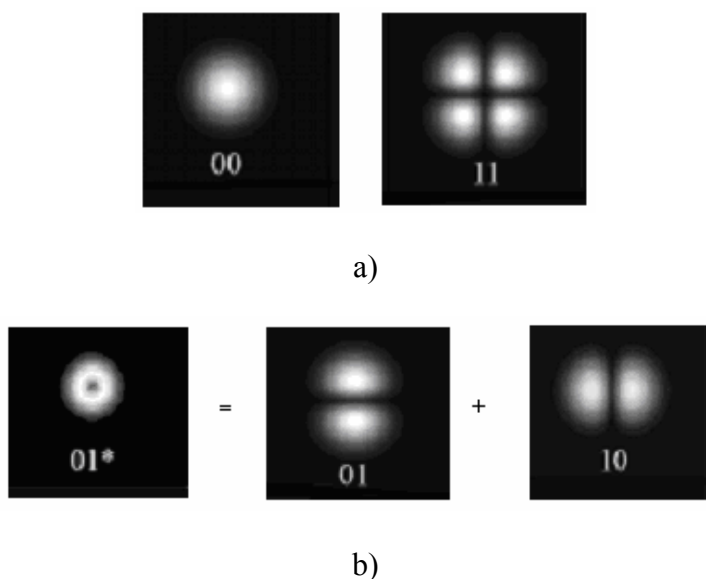
1.2.1 Tvar průřezu laserového svazku

Laserové záření vygenerované v rezonátoru má určitou hustotu energie. Tvar průřezu svazku záření je významně závislý nejen na vlnové délce fotonů, ale též na souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice (u CO₂ laserů výbojové trubice). Tvar průřezu svazku, neboli mód, je označován TEM (Transverse electromagnetic). Teoreticky může být vytvořeno nekonečné množství módů, ale jen některé mají praktické průmyslové uplatnění. V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu - základní mód - anebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci - mód - v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru, obr. 6. (1, 18)

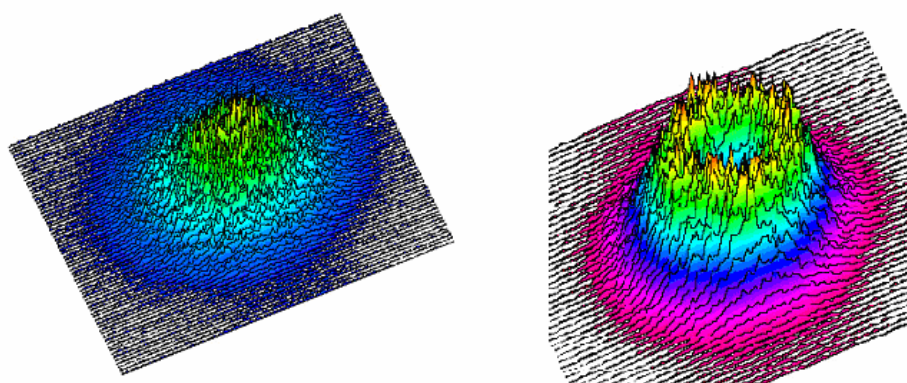


Obr. 6. Příčné struktury svazků zachycené CCD kamerou (4)

Vybrané módy jsou uvedeny na obr. 7. Na obr. 7 a) jsou příklady osově symetrických módů. V symbolech $TEM_{m,n}$ vyjadřují indexy m, n počty minim intenzity ve směrech dvou na sebe kolmých os. Na obr. 10 b) jsou příklady středově symetrických módů. V symbolech $TEM_{m,n}$ potom značí: m - počet minim intenzity ve směru radiusu příčného řezu svazkem, n - polovinu počtu minim intenzity po obvodu příčného řezu svazkem. Módy označené symboly $TEM_{m,n}$ jsou superpozicemi dvou stejných módů $TEM_{m,n}$, vzájemně pootočených o 90°. (19)

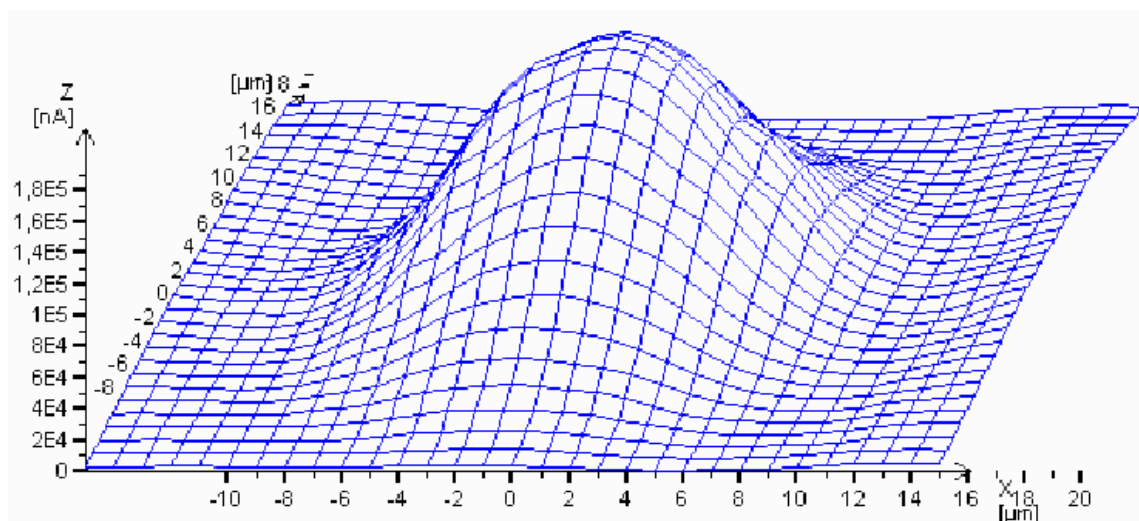


Obr. 7. Vybrané módy TEM s a) osou, b) středovou symetrií (18)

Obr. 8. Laserový mód TEM_{00} a TEM_{01} (21)

1.2.2 Charakteristika laserového svazku

Při definování pracovních podmínek laseru jsou významnými faktory nejmenší fokusovaný průměr svazku, jeho divergence a hloubka ostrosti. V tzv. základním módu - TEM_{00} - má rozložení energie svazku tvar Gaussovy křivky četnosti, viz obr. 9, s jedním maximem uprostřed svazku. Svazek vystupující ze zdroje je rovnoběžný s optickou osou (jeho rovinná vlnoplocha bude kolmá na směr šíření), má nejmenší divergenci a vytváří stopu o velmi malém průměru a vysoké hustotě výkonu. Odchyłky reálného od ideálního gaussova průběhu způsobují především nerovnoměrnosti v rozměrech aktivní vrstvy. (17, 18)



Obr. 9. Profil fokusovaného laserového svazku v jeho ohnisku (17)

Vlny, jejichž normály vlnoploch svírají s optickou osou (osou z) malý úhel, se nazývají paraxiálními vlnami. Tyto vlny musejí splňovat rovnici

$$\nabla_{\text{T}}^2 A - j2k \frac{\partial A}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

kde

$$\nabla_{\text{T}}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

je příčná část Laplaceova operátoru, z je souřadnice podélné osy, k značí vlnové číslo a A je intenzita vlnění.

Jedním z řešení rovnice (1) je Gaussův vlnový svazek. Výkon Gaussova svazku je soustředěn do úzkého kužele. Rozložení intenzity v libovolné příčné rovině je dáno kruhově symetrickou Gaussovou funkcí, přičemž osa symetrie je totožná s optickou osou. Šířka Gaussova svazku je minimální v tzv. krčku (v tomto místě má vlna rovinnou vlnoplochu)

a od krčku se postupně zvětšuje na obě strany (vlnoplochy se postupně zakřivují, ve velké vzdálenosti jsou téměř kulové).

Jak již bylo řečeno, příčné rozložení elektrické intenzity základního vidu TEM_{00} je popsáno Gaussovou funkcí (nejvyšší intenzita je na ose svazku a zmenšuje se k okrajům):

$$E(x, y) = E_{\text{max}} \exp \left(-\rho^2 / a_0^2 \right) = E_{\text{max}} \exp \left[-(x^2 + y^2) / a_0^2 \right], \quad (2)$$

kde ρ značí radiální vzdálenost bodu (x, y) od osy svazku a a_0 je tzv. poloměr svazku (radiální vzdálenost od osy svazku, v níž poklesne intenzita pole na hodnotu $E_{\max}/e$; $e = 2.718...$

Gaussův vlnový svazek je jednoznačně popsán následujícími parametry:

- intenzitou záření
- výkonem svazku
- poloměrem svazku

Intenzita záření je funkcí axiální vzdálenosti z a radiální vzdálenosti $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$,

$$I(\rho, z) = I_0 \left[\frac{W_0}{W(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (3)$$

Na ose svazku ($\rho = 0$) má intenzita pro $z = 0$ svou maximální hodnotu I_0 a s rostoucím z spojitě klesá, přičemž pro $z \neq z_0$ dosahuje poloviny maximální hodnoty I_0 .

Celkový výkon přenášený svazkem je dán integrálem ze součinu intenzity svazku a plochy jeho příčného průřezu

$$P = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho \quad (4)$$

Na ose svazku tedy platí

$$P = \frac{1}{2} I(0, z) \pi [W(z)]^2 \quad (5)$$

Uvnitř kružnice o poloměru $\rho_0 = W(z)$ je přenášeno přibližně 86,5 % celkového výkonu. Kruhem o poloměru $1,5 W(z)$ se šíří asi 99 % výkonu.

Protože se gaussovské svazky často charakterizují přenášeným výkonem P je vhodné vyjádřit I jako funkci P .

$$I(\rho, z) = \frac{2P}{\pi W^2(z)} \exp \left[-\frac{2\rho^2}{W^2(z)} \right] \quad (6)$$

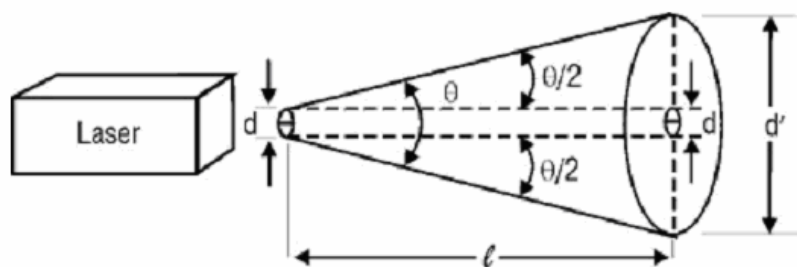
V každém příčném průřezu dosahuje intenzita největší hodnoty na optické ose (z). A protože se většina výkonu šíří v oblasti o poloměru $W(z)$, bereme $W(z)$ jako poloměr

svazku (také se setkáme s termíny pološířka nebo šířka svazku). Závislost poloměru svazku na podélné souřadnici z je dána vztahem

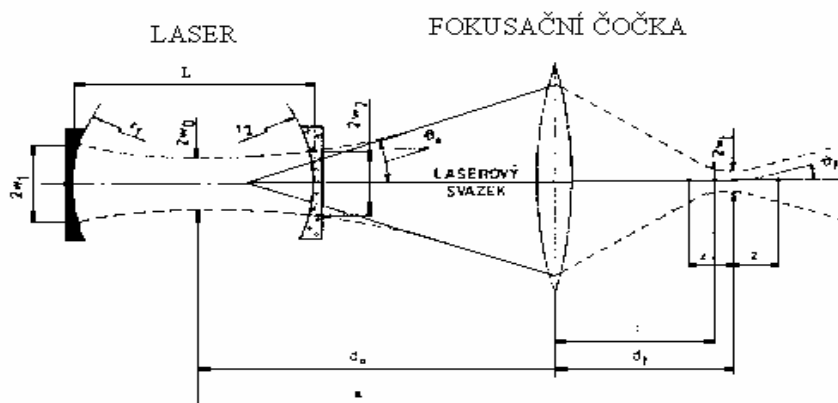
$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + (z/z_0)^2} \quad (7)$$

V rovině $z = 0$ nabývá minimální hodnoty W_0 . Toto místo se nazývá místem maximálního zúžení středem svazku. (19)

U laseru se stabilním rezonátorem, který pracuje v módu TEM_{00} , je obálka svazku charakterizována dvěma zúženími (poloměry W_0 , W_f) a divergencí θ (θ_0 , θ_f) - obr. 12. Čočka o ohniskové délce f transformuje rozložení energie v blízké zóně na rozložení energie ve vzdálené zóně (v zúžení dané průměrem svazku $2W_f$).



Obr. 10. Divergence laserového svazku (21)



Obr. 11. Divergence a fokusace laserového svazku v základním módu TEM_{00} (19)

Označíme-li intenzitu elektromagnetického pole E a hustotu výkonu laserového svazku q , lze závislost E a q na vzdálenosti x od zúžení $2W_0$ uvnitř rezonátoru vyjádřit vztahy:

$$E(r, x) = E_0 \exp(-r^2/W_x^2) \quad (8)$$

$$Q(r, x) = q_0 \exp(-2r^2/W_x^2), \quad (9)$$

kde E_0 je intenzita elektromagnetického pole ve středu svazku, q_0 je hustota výkonu ve středu svazku, W_x je poloměr svazku ve vzdálenosti x od zúžení ($2W_0$) v rezonátoru.

Dolní mezní hodnota divergence laserového svazku je určena difrakčním vztahem:

$$\theta_o = \frac{k \cdot \lambda}{d}, \quad (10)$$

kde k je součinitel, který v obecném případě je roven 1 a pro Gaussův svazek (TEM_{00}) je roven 1,22, λ je vlnová délka záření, d je poloměr výstupní clony (průměr svazku u fokusační čočky).

Ve vzdálené zóně je možné divergenci určit přesněji z výrazu

$$\theta_o = \frac{\lambda}{\pi \cdot W_o} \quad (11)$$

Hodnoty θ_o (mrad) pro nejčastěji se vyskytující typy laserů jsou: He-Ne: 0,2 - 1; Ar^+ : 0,5 - 1; CO_2 : 1 - 10; NdYAG: 2 - 20 a pro rubínový laser: 1 - 10.

Poloměr zúžení W_0 ve středu konfokálního rezonátoru, který je totožný s jeho geometrickým středem, je dán vztahem

$$\theta_o = \left(\frac{\lambda_v}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

zde

$$\lambda_v = \left[\frac{2}{r_1 + r_2 - 2L} \right] \cdot [L(r_2 - L) \cdot (r_1 - L) \cdot (r_1 + r_2 - L)]^{1/2}, \quad (13)$$

kde r_1 , r_2 jsou poloměry zakřivení zrcadel rezonátoru a L je jejich vzájemná vzdálenost. Hodnota $2W_0$ je obvykle téhož řádu jako průměr výstupní clony laseru.

Za průměr laserového svazku se obvykle považuje hodnota $2W$. Pro mód TEM_{00} je v ploše průřezu svazku s tímto průměrem soustředěno 86,5 % celkové hustoty výkonu svazku.

Na obr. 11 je $2W_0$ průměr zúžení svazku uvnitř rezonátoru laseru, $2W_1$ a $2W_2$ jsou průměry průřezů svazku na zrcadlech rezonátoru, r_1 a r_2 jsou poloměry zakřivení zrcadel, L je vzdálenost mezi zrcadly, θ_o je divergence svazku za výstupní clonou, θ_f je divergence svazku za ohniskem, do je vzdálenost mezi zúžením v rezonátoru a fokusující čočkou, f je

ohnisková délka čočky, d_f je vzdálenost mezi fokusující čočkou a zúžením, $2W_f$ je minimální průměr svazku pro fokusaci.

Pro poloměr zúžení W_o uvnitř rezonátoru platí vztah

$$W_o = \frac{W}{\left[1 + \left(\frac{\pi W^2}{\lambda \cdot r}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (14)$$

Při rovnosti poloměrů zakřivení zrcadel ($r_1 = r_2$) jsou poloměry stop laserového svazku na nich $W_1 = W_2 = W$.

S rostoucí vzdáleností x od zúžení uvnitř rezonátoru se svazek TEM_{00} rozšiřuje (divergence θ_o). Jeho poloměr ve vzdálenosti x je dán výrazem

$$W_x = W_o \left[1 + \left(\frac{\lambda \cdot x}{\pi \cdot W_o^2}\right)^2\right]^{1/2} \quad (15)$$

Tento vztah umožňuje rovněž definovat rozdíl mezi již dříve uvedenými pojmy blízká a vzdálená zóna. Blízká zóna je definovaná vztahem $x \ll \pi \cdot W_o^2 \cdot \lambda$, vzdálená zóna vztahem $x \gg \pi \cdot W_o^2 \cdot \lambda$. V blízké zóně průměr svazku o mnoho nepřevyšuje průměr v zúžení uvnitř rezonátoru ($W_x > W_o$), ve vzdálené zóně je již ovlivněn divergencí svazku (rovnice 10).

Laserový svazek v modu TEM_{00} je možné fokusovat tenkou čočkou, umístěnou ve vzdálenosti d_o od zúžení uvnitř rezonátoru (do $> f$) do minimálního průměru $2 W_f$ ve vzdálenosti d_f , přičemž poloměr W_f je dán vztahem:

$$W_f = \frac{W_o \cdot f}{\sqrt{(d_o - f)^2 + \left(\frac{\pi \cdot W_o^2}{\lambda}\right)^2}}, \quad (16)$$

kde f je ohnisková délka čočky a

$$x_R = \frac{\pi \cdot W_o^2}{\lambda} \quad (17)$$

je tzv. Rayleighova vzdálenost.

Zvětšením vzdálenosti d_o (zvětšení průměru svazku v čočce je omezeno velikostí příslušné clony) a zmenšením ohniskové délky f nebo divergence θ_o je možné zmenšit průměr svazku. Zmenšení f je omezeno minimální vzdáleností čočky a zpracovávaného dílu (obvykle je f rovné několik centimetrů).

Vzdálenost d_f mezi fokusující čočkou a zúžením $2W_f$ je daná vztahem

$$d_f = f + (d_o - f) \frac{f^2}{(d_o - f)^2 + \left(\frac{W_o}{\theta_o}\right)^2} \quad (18)$$

Při transformaci svazku v modu TEM_{00} čočkou mohou nastat tyto speciální případy:

a) Vzdálenost zúžení v rezonátoru od čočky a ohnisková dálka čočky jsou si rovny ($d_o = f$)

Protože pro malou divergenci θ_o je rozdíl mezi f a d_f nepatrný, je možné položit

$$W_f = f \cdot \theta_o \quad (19 a)$$

Vezmeme-li

$$\theta_o = \frac{\lambda}{\pi \cdot W_o} \quad 19 b)$$

Platí

$$2W_f = 2f\theta_o = \frac{2f \cdot \lambda}{\pi \cdot W_o} \quad (19 c)$$

b) Vzdálenost zúžení rezonátoru od čočky je mnohem větší než ohnisková dálka fokusující čočky ($d_o \gg f$).

V praktických technologických operacích, např. při řezání, svařování a povrchových úpravách bývá ohnisková dálka $f = 60 - 200$ mm, přičemž vzdálenost zúžení v rezonátoru od čočky d_o je ve srovnání s její ohniskovou délkou f mnohem větší. Rovnic 16 potom nabývá tvaru:

$$W_f = \frac{W_o \cdot f}{\sqrt{d_o^2 + \left(\frac{\pi \cdot W_o^2}{\lambda}\right)^2}} \quad (20)$$

a rovnice 18 nabývá tvaru:

$$\Delta = d_f - f = \frac{d_o \cdot f^2}{d_o^2 + \left(\frac{\pi \cdot W_o^2}{\lambda}\right)^2} \quad (21)$$

Poloha zúžení ($2W_f$) je na pravé straně čočky (obr. 12) posunuta směrem od čočky.

c) Vzdálenost zúžení v rezonátoru od čočky je menší než ohnisková dálka čočky ($d_o < f$).

Poloměr svazku W_f se počítá podle rovnice 16. Poloha zúžení $2W_f$ je po pravé straně čočky (obr. 12) posunuta směrem k čočce.

1.3 Typy laserů

Od spuštění prvního laseru uběhlo čtyřicet let. Během té doby, zejména v šedesátých letech, se začaly objevovat další typy laserů, lišící se aktivním prostředím, nebo konstrukčním uspořádáním. Vznikaly také lasery s dalšími vlnovými délkami v oblasti viditelného, infračerveného, ultrafialového a dokonce i rentgenového záření. Každý z těchto laserů našel uplatnění v jiné oblasti lidské činnosti. Při sváření a vrtání je určující charakteristikou výkon laseru, proto se zde uplatňují impulsní lasery. Zvyšování výkonu se ale nedělo zvyšováním energie vyzářené laserem. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám. Laserů je velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonaľovaly a vylepšovaly se jejich parametry. (6, 9)

Základní typy laserů

Lasery se mohou dělit podle skupenství aktivního prostředí na:

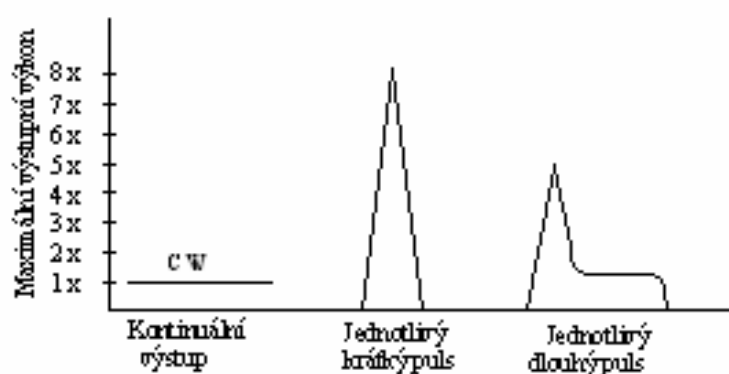
- pevnolátkové (rubín, yttrium aluminium granát, skla, keramika),
- kapalinové, plynové (atomární, molekulové, iontové),
- chemické,
- polovodičové (laserové diody).

Podle režimu generace na kontinuální (CW) a pulsní (Q - spínače). Pulsní provoz umožňuje:

- využití vysoké hustoty pulsu pro zvýšení absorpce záření v materiálu s vysokou odrazivostí,
- snížení objemového ohřevu materiálu při jeho zpracování laserem v důsledku krátké doby interakce laserového svazku s materiálem,

- provedení řady vysokorychlostních operací v důsledku schopnosti rychlého zažihání a zhasínání svazku.

Ve srovnání s kontinuálním režimem, kdy výstupní výkon je ekvivalentní celkovému jmenovitému výkonu daného typu laseru, při pulsním režimu je laser elektronicky modulován k emisi pulsu o výkonu několikanásobně vyšším než při kontinuálním režimu. Schematicky je toto srovnání patrné z obr. 12. (18)



Obr. 12. Kontinuální a pulsní režim provozu laseru (18)

Podle způsobu čerpání na: opticky čerpané, čerpané elektrickým výbojem, chemickou reakcí, elektronovým svazkem, radioaktivním zářením.

Podle vlnové délky generovaného laserového paprsku na: submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové, rentgenové. (3, 8, 18)

Tabulka I. Nejdůležitější používané typy laserů (základní údaje) (6)

laser (pracovní látka)	vlnová délka (v mikrometrech)	střední výkon	režim	poznámka
rubín	0,6943	1 W	impulsní	červený
neodymové sklo	1,058	1 W	impulsní	infračervený
YAG:Nd	1,064	150 W	spojitý	infračervený
arsenid galitý	0,840	0,01 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
AlGaAs	0,7-0,9	1 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
sulfid kadernatý	0,5-0,7		impulsní	EIL
KCl:Li	2,5-2,9		spojitý	brevná centra, přeladitelný
cheláty	0,22-0,86		impulsní	
organická barviva	0,55-0,67	100 W	spojitý	přeladitelné
rhodamin	0,590			
helium-neon	0,6328; 1,15; 3,39	0,05 W	spojitý	měřicí účely
helium-kadmium	0,325; 0,442	0,1 W	spojitý	“bílý”
argon	0,33; 0,48; 0,51	150 W	spojitý	modrozelený
krypton	0,46; 0,64		spojitý	
oxid uhličitý	10,6	100 W	spojitý	infračervený
“- s průtokem	10,6	10 kW	spojitý	
plynu				
“- elektroionizační	10,6	10 kW	spojitý	EIL
“- gazo dynamický	10,6	100 kW	spojitý	
“- s příčným	10,6		impulsní	TEA
buzením				
oxid uhelnatý	5,0-6,6		spojitý	vysoká účinnost
kyanovo dík	128,6; až 773	1 W	spojitý	submilimetrový
páry mědi	0,51; 0,58	40 W	impulsní	
dusík	0,337			ultrafialový
vodík	0,116; 0,160			ultrafialový
excimery		100 W		ultrafialové
XeF	0,350			
KrF	0,248			
ArF	0,193			
Ar ₂	0,126			
jód	1,315		impulsní	fotodisociační
fluorovo dík	2,6-3,5	10 kW	spojitý	chemický
fluoro deuterium	3,6-5,0	10 kW	spojitý	chemický

1.3.1 Pevnolátkové lasery

Lasery v pevné fázi pracují především v pulsním režimu. Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické, případně amorfnní látky, dopované příměsí vhodných iontů. Pevná fáze tvoří jen nosný skelet aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. U krystalických materiálů jsou aktivní ionty zabudovány v krystalové mřížce a mají stálou, orientovanou polohu v silovém poli mřížky. Jako příměsí krystalických aktivních prostředích se nejčastěji používá iontů ze skupiny prvků vzácných zemin (Nd^{3+} , Sm^{2+} , Pr^{3+} a jiné), či prvků z podskupiny 4A Mendělejevovy periodické soustavy (zvláště Cr^{3+} , U^{3+}). Ionty příměsí jsou v krystalu vystaveny působení poměrně velkých vazbových sil, které mohou ovlivnit energetické hladiny jejich valenčních elektronů. Důsledkem tohoto působení je

posun,

štěpení

a rozšiřování energetických hladin. (1, 3)

Jako nosného prostředí pro aktivní ionty se používá i amorfních materiálů - aktivní ionty (např. Nd^{3+} , Yb^{3+} , Gd^{3+}). Materiál nosného prostředí krystalické povahy tvoří často oxid hlinitý. (3)

U pevnolátkových laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje (obvykle výbojky) vyvolá změna v obsazení energetických hladin. Jako horní laserové hladiny se obvykle využívá metastabilní hladiny s dlouhou dobou života, a je naopak výhodné, když doba života spodní laserové hladiny je co nejkratší. (3)

1.3.1.1 Rubínový laser

Rubínový laser je základním reprezentantem pevnolátkových laserů. Byl realizován T. H. Maimanem v roce 1960. K jeho stavbě přispěla značná zkušenost s optickými vlastnostmi materiálu nosného prostředí korundu (oxidu hlinitého). Tento LASER využívá za aktivní prostředí rubín v němž jsou rovnoměrně rozptýleny trojmocné ionty chrómu Cr^{3+} v koncentraci asi 0,05%. Monokrystaly rubínu se získávají z taveniny Al_2O_3 s příměsí sloučenin trojmocného chrómu pozvolným ochlazováním. K optickému zesilování v rubínu dochází mezi energetickými hladinami trojmocného chrómu v Al_2O_3 . Je to laser tříhladinový pracující v pulsním režimu. Pulsní režim je nutný, protože se krystal při čerpání energie silně zahřívá. (3, 6)

1.3.1.2 Nd:YAG laser

Tento typ je především zástupcem čtyřhladinových laserů (tedy čerpání, rychlá emise fotonu, hlavní laserová emise fotonu a opět rychlá emise fotonu na základní hladinu).

Tento typ má jednu velikou výhodu, a to že se může vyrábět v prakticky neomezených rozměrech a dosahovat tak velikých laserových energií. Laser vyzařuje infračervený paprsek o velké energii.

Yttrito-hlinitý granát tvoří nosné prostředí pro neodymové ionty Nd^{3+} . (3)

1.3.1.3 Nd:sklo laser

Aktivní prostředí v tomto laseru tvoří amorfni materiál - sklo, v němž jsou rozptýleny ionty Nd^{3+} . Při výrobě se neodým do skla vpravuje v podobě oxidu Nd_2O_3 a to v koncentraci zhruba 2%.

Nevýhodou skla je jeho tepelná vodivost, substrát se zahřívá a tak není možno efektivně dosáhnout kontinuálního provozu laseru. Na druhé straně se sklo vyrábí mnohem jednodušeji než-li krystaly YAG, je tak možno dosahovat až 10 krát větších rozměrů - délky 1 m, průměr 50 mm. (3)

1.3.2 Plynové lasery

Hlavní rozdíl mezi plynovým a krystalovým laserem je ve způsobu buzení a v prostředí, ve kterém zesílení vzniká. Pracovním prostředím plynného laseru je směs atomů různých plynů. Nejčastěji se užívá směsi hélia a neónu, ve které se vytvoří vysokofrekvenční elektrický výboj, čímž se z elektricky neutrálního prostředí stane prostředí ionizované. Směs plynu je uzavřena ve skleněné trubce, na jejích obou koncích jsou planoparalelní zrcadla.

Plynný stav je možno charakterizovat jako soubor částic s kvantovanými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí. Částice jsou v neustálém (translačním) pohybu a to se projevuje na povaze emisních a absorpčních čar.

Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí a je možno je čerpat nejrůznějšími mechanismy, elektricky, chemicky apod. Plynové lasery mají vyšší účinnost, protože přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Proto tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu, ale jejich trvalý výkon není moc velký. (3, 5, 6)

1.3.2.1 CO_2 laser

CO_2 laser se skládá z křemenné trubice, naplněné vhodným plynem nebo směsí plynů, o velmi nízkém tlaku, aby mohl snáze nastat výboj. Prostor této trubice, která je

zakončená zrcadly, tvoří rezonanční dutinu. V takto vzniklém rezonátoru jsou světelné vlny (stimulovaná emise) reflektovány tak dlouho, až se vytvoří kontinuální světelná vlna, která poloproustným zrcadlem rezonátor opouští. Buzení se provádí vysokofrekvenčním výbojem. (1)

Předností těchto laserů je možnost získání vysoce monochromatického světla. CO₂ lasery zastávají pření místo v oblasti technologických aplikací. A to zejména díky svým vysokým výstupním výkonům a u laserů nejvyšší účinností převodu elektrické energie na energii světelnou (10 - 15 %). (1)

CO₂ laser patří do skupiny tzv. molekulárních laserů. Tyto lasery jsou charakteristické těmito parametry:

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

V současnosti je technicky možné uskutečnit u CO₂ laserů tyto metody buzení:

- a) doutnavý výboj - je nejčastější a dochází při něm k dobrému rozložení hustoty náboje
- b) proudem elektronů - dosahuje se intenzivní inverzní populace
- c) adiabatickou expanzí - prudké ochlazení horkého plynu vede k dosažení inverzní populace
- d) optické buzení - principiálně je možné buzení světlem, ale je málo účinné. Používá se ale buzení CO₂ laserů např. pomocí výkonných infračervených laserů.

U CO₂ laseru se k zesilování využívá přechodu mezi vibračními hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra.

Používají se čtyři hlavní uspořádání CO₂ laserů, které se liší zejména možnostmi dosahovaných výkonů:

- a) lasery s výbojkou - mají malé rozměry, výkon je asi do 100 W, výbojka má průměr asi 20 mm a délku do 200 mm, většinou mají vodní chlazení, vlivem rozpadu CO₂ na CO mají malou životnost (asi 10000 h),

- b) lasery s pomalým průtokem plynu - průtok aktivního plynu znamená na jedné straně více odvádět teplo a dosahovat vyšších výkonů, ale na druhé straně znamená složitější konstrukci. Rychlost plynu je kolem 1 m.s^{-1} , výkon je asi 50-70 W/m (na délku laseru),
- c) lasery s rychlým průtokem plynu - dovolují ještě intenzivnější odvod tepla a dosahují tak 3 - 4 krát vyššího výkonu než-li lasery s pomalým průtokem plynu, neobejdou se již bez výměníku tepla, místo vývěvy se používá kompresor,
- d) TEA CO₂ laser (z anglického názvu „Transversal Excitation at Atmospheric Pressure“, což znamená: příčná excitace při atmosférickém tlaku) - výhodou je, že nevyžadují náročnou evakuační techniku, doutnavý výboj je možné uskutečnit pouze při nižších tlacích.

Typické parametry současných CO₂ laserů: vlnová délky: 10,6 μm nebo 9,6 μm , opakovací frekvence: 0,1 až 50 Hz, délka pulsu: 100 ps až 1 ms, energie impulsu: 10^{-7} J až 250 kJ, účinnost: 20 - 40 %, střední výkon: 10^{-4} - 10^5 W.

Pro obrábění plastů jsou pak optimální CO₂ lasery s kontinuálním provozem s výkonem do 2,5 kW. (13)

1.3.2.2 Dusíkový laser

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

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

Molekula N₂ může být využita ke generaci záření na několika přechodech. Doba života horní hladina je však velmi krátká (kolem 50 ns), zatímco dolní asi 500 krát větší. V důsledku toho nelze použít pomalu se tvořícího doutnavého výboje k dosažení inverzní populace mezi hladinami. Zesílení v dusíkovém laseru je veliké, 60 dB/m, což znamená, že záření je na dráze 1 m zesíleno více než 100 000 krát. Při tak velikém zesílení může laser

pracovat superradiačně, tzn., že jediný průchod aktivním prostředím postačí k tomu, aby stimulovaná emise mnohonásobně převýšila spontánní emisi. (3, 13)

1.3.3 Kapalinový laser

Kapalinové lasery pracující s cheláty různých prvků vzácných zemin se objevily již v roce 1963. Výhodou je, že můžou zabírat neomezeně velký objem a jsou dokonale homogenní. Velkou nevýhodou těchto laserů je toxicita (chemicky se rozkládají) a krátká životnost aktivního prostředí. (3)

Jako aktivní prostředí kapalinových laserů se obvykle používají opticky buzené roztoky organických barviv. Jejich široké fluorescenční spektrum umožňuje spojitě měnit vlnovou délku záření (300 - 1 500 nm) generovaného těmito lasery. Důležitou skupinou jsou však zejména barvivové lasery, které využívají roztoků různých organických látek, například rhodaminu. Rhodamonový laser generuje pulsní záření od zelené až po červenou oblast spektra. K těmto kapalinovým laserům patří i lasery na barevných centrech, krystalech s různými defekty vyvolávající absorpci na různobarevných spektrálních čárách (krystal KCl s příměsí lithia). Barvivové lasery a lasery na barevných centrech mají společnou vlastnost, která je předurčuje k použití ve spektroskopii a v informační technice. (3, 13)

1.3.4 Chemický laser

Tento druh laseru využívá k čerpání energie do aktivního prostředí energie exotermických řetězových chemických reakcí. První takový laser s použitím reakce mezi vodíkem a chlorem byl zkonstruován v roce 1965 a první výkonné lasery tohoto druhu založené na reakci vodíku a fluoru vznikly v roce 1969. Zvláštním druhem chemického laseru založeného na disociaci molekul ultrafialovým zářením (takzvaný fotodisociační laser) je laser jódový. (3)

1.3.5 Polovodičový laser

Polovodičové lasery jsou poměrně rozšířeným typem laserů. Používá se pro ně označení laserová dioda. Mají velmi malé rozměry, což má za následek větší divergenci

výstupního svazku než je tomu u jiných typů laserů. Jsou velmi citlivé na změnu teploty. Laserový paprsek lze snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu. Vyznačují se vysokou účinností (běžně až 50 %), pracují jak v kontinuálním, tak pulsním režimu a mohou dosahovat relativně vysokých výstupních výkonů při velmi kompaktním uspořádání. Své uplatnění našly především v oblasti telekomunikací a výpočetní techniky. Dnes se jich také stále častěji používá pro čerpání pevnolátkových laserů a tak vznikají vysoce výkonné, miniaturní a flexibilní laserové generátory. (13)

1.3.6 Excimerový laser

Tato skupina laserů využívá jako aktivního prostředí zvláštního druhu molekul, excimerů, vytvářených za účasti atomů vzácných plynů. Tyto molekuly, jinak nestabilní, mohou existovat jen za zvláštních podmínek, například v plynovém výboji, s atomy ve vysoce vybuzených, excitovaných stavech. Při rozpadu těchto exotických molekul vzniká ultrafialové záření. První excimerový laser byl realizován v roce 1970. Šlo o laser s kapalným xenonem buzený elektronovým svazkem. V roce 1976 se pak objevily plynové excimerové lasery s excimery XeF, KrF, ArF, tedy molekulami tvořenými atomy vzácných plynů a fluoru. (3)

Aktivní prostředí je buzeno elektrickým výbojem. Hlavním důvodem použití těchto laserů je velmi krátká vlnová délka (157 nm, 193 nm, 248 nm) umožňující vysoce přesné obrábění. Energie pulsu těchto laserů dosahuje desetin až desítek joulů, výkon bývá maximálně stovky wattů, rozmezí pulsu 10-40 ns. Účinnost těchto laserových systémů se pohybuje kolem 10 %. Náklady na milion pulsů jsou asi 25 euro a elektrody je nutné měnit po několika stovkách pracovních hodin. (3)

Pro svou krátkou vlnovou délku v ultrafialové části spektra v rozmezí od 193 do 351 nm umožňují opracování s ostrými okraji a tepelně minimálně ovlivňují okolí dopadu paprsku nebo řezu. To všechno je v průmyslu předurčuje především pro mikroobrábění a mikrolitografické postupy v elektronice, kde jen pomocí těchto laserů je možné bez narušení okolí dosáhnout tak úzké stopy. (22)

Hlavní nevýhodou je složitá údržba, velmi nákladný provoz a rovněž značně vysoká pořizovací cena. (13)

1.3.7 Lasery pracující v pulsním provozu

V pulsním provozu pracují nejčastěji pevnolátkové lasery s kontinuálním čerpáním. Průběh, velikost a tvar pulsu je řízen světelným modulátorem (akustootický, elektrootický). Obvykle se frekvence pulsů pohybují od desítek do stovek kHz. Světelný modulátor je umístěn v dutině rezonátoru v dráze stimulovaného laserového svazku a tento laserový svazek pulsně přerušuje. Přerušení může trvat stomilióntinu sekundy. Výsledkem je okamžitý výstupní výkon o vysoké hustotě energie. (13)

1.3.8 Lasery pracující v kontinuálním provozu

V tomto provozu pracují převážně plynové lasery. V plynu je kontinuální záření vyvoláno pomocí srážek s elektrony. Tento způsob buzení je nejsnáze realizovatelný elektrickým výbojem v plynu, při kterém vznikají ionty a volné elektrony. Volné elektrony přebírají energii ze zdroje a předávají ji atomům při srážkách. Získání kontinuálního provozu v pevnolátkových laserech je obtížné, je nutné použít dostatečně silný zdroj energie a dovádět velké množství vzniklého tepla.(13)

1.4 Mikroobrábění plastů

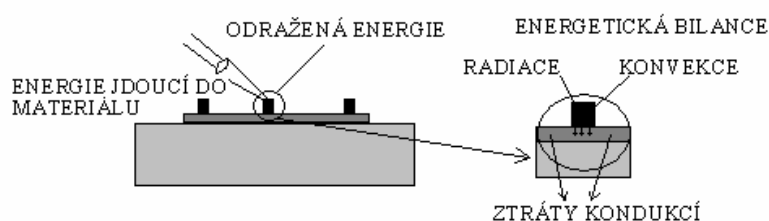
Stále rostoucím požadavkem na miniaturizaci rozměrů dílů a na jejich vysokou přesnost vychází vstříc i laserové obrábění. (2)

1.4.1 Fotonové obrábění plastů

Při dopadnutí svazku elektromagnetického záření na materiál a následné absorpci dochází k lokálnímu ohřátí malého objemu materiálu na tavicí, vypařovací nebo sublimační teplotu. Elektromagnetické záření dopadající na materiál se z části odrazí, z části se absorbuje a zbylé záření materiálem projde (viz obr. 13). Hloubku proniknutí materiálu (R) popisuje rovnice (1).

$$R = 2900 \sqrt{\frac{\lambda}{\mu_r \gamma}}, \quad (22)$$

kde R je hloubka proniknutí záření [μm], λ je vlnová délka záření laseru [μm], μ_r je relativní permeabilita materiálu [-] a γ je elektrická konduktivita materiálu [Sm^{-1}]. (13)



Obr. 13. Interakce laserového paprsku s materiálem (13)

Polymery obsahují dlouhé řetězce s opakujícími se skupinami, které jsou spojené vazbami. Polymerní řetězce se skládají nejčastěji z C, O, H, N, Si. Každá vazba je schopna pohltit jiné množství energie. O absorpci rozhoduje spektrální složení působícího záření a složení polymeru - typ chemických skupin vázaných v polymeru. Energii jednoho fotonu, který je ve svazku elektromagnetického záření popisuje rovnice (2).

$$E_p = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (23)$$

kde E_p je energie jednoho fotonu [J], $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [Js] je Planckova konstanta, $c = 299\,792\,458$ [ms^{-1}] je rychlost světla ve vakuu a λ je vlnová délka laseru [m]. (13)

V molekulách se kromě pohybu elektronů odehrává i vibrační pohyb atomů kolem jejich rovnovážných poloh a molekula také vykonává rotační pohyb kolem svého těžiště. Převod elektronového systému do vyššího kvantového stavu spotřebuje největší část absorbované světelné energie. Absorbuje-li molekula větší množství vibrační energie, než odpovídá její energetické potřebě k dislokaci, rozpadá se na atomy a volné radikály. (13)

Záření o vysoké energii vyvolává strukturní změny plastů. Může dojít k vytvoření příčných chemických vazeb v polymeru nebo ke štěpení základních řetězců a tvorbě monomeru. U materiálů s menší absorpcí proniká záření méně do materiálu a následně se tak ohřívají vrstvy materiálu pod povrchem. Následek tohoto podpovrchového přehřátí může být vytržení velkého objemu materiálu, což je nežádoucím efektem. (13)

Proces vypařování nejvíce ovlivňuje výstupní výkon laseru. Mezi důležité aspekty interakce materiálu s laserovým zářením patří další parametry laseru jako jsou frekvence pulsů, počet pulsů, šířka pulsu, počet opakování, úhel dopadu, posuv laserového svazku. Intenzitu a typy účinků laserového světla na polymerní materiál velmi ovlivňují jeho vlastnosti: čistota materiálu, použité přísady (stabilizátory, pigmenty, antioxydanty, antiozonanty, retardéry hoření), bod tání materiálu, chemické složení, povrchová reflexe, objemová absorpce, objemový rozptyl, tloušťka materiálu, fyzikální vlastnosti materiálu, hustota absorbované energie v závislosti na čase, teplotně-mechanické změny v materiálu (tavení, silicifikace, štěpení částic, rozptyl, vypařování). V tab. II. Jsou uvedeny základní vlastnosti polymerních materiálů. (13)

Tabulka II. Přehled některých vlastností polymerních materiálů (13)

Druh polymeru	Zpracovatelská – tavící teplota [°C]	Hustota [kgm ⁻³]	Tepelná vodivost [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Tepelná kapacita
---------------	---	------------------------------	---	------------------

				[kJkg ⁻¹ K ⁻¹]
PMMA	177-299 (z)	1050-1220	0,19-0,22	1,47
PTFE	327-377 (t)	1800-2410	0,10-0,26	1
PC	260-302 (z)	1130-1290	0,19-0,23	1,17
LDPE	80-110 (t)	914-928	0,32-0,40	2,1-2,5
HDPE	99-204 (t)	940-960	0,38-0,54	2,1-2,7
PP	160-182 (t)	900-910	0,12-0,23	2
PS	100-241 (t)	1020-1060	0,20-0,43	1,3
PUR	196-232 (z)	1120-1240	0,25-0,33	0,4
PI	117-241 (z)	320-1710	0,22-0,63	-
PA	218-285 (z)	1100-1170	0,17-0,30	1,7
POM	110-140 (z)	1030-1060	0,25-0,30	1,46
ABS	80-100 (z)	1410-1420	0,16-0,19	1,3
epoxidy	125-250 (z)	700-2230	0,01-0,66	-

1.4.2 Proces laserového mikroobrábění polymerních materiálů

Mikroobrábění patří do skupiny procesů výroby součástí malých rozměrů. Výrobní požadavky směřují k neustálé minimalizaci rozměrů výrobků. V tomto směru je laser díky svým vlastnostem optimální nástroj.

Na mikroobrábění se používají excimerové a Nd-YAG lasery s pulzním režimem paprsku s ultrakrátkým trváním impulsů. Obvykle se mikroobrábění používá na opracování elektronických součástek, na označování dílů výrobními čísly, kdy je označování laserem vhodným nástroj v systému kontroly kvality např. v automobilovém průmyslu, na automatické čtení výrobních značek, na opravu a renovaci zbytkových defektů na masce pro integrované obvody přímým ozářením a následným odstraněním defektu pomocí pulsního laseru, který je fokusovaný do kolmého tvaru.

1.4.3 Možnosti mikroobrábění laserem

Pro mikroobrábění laserem mohou být použity téměř všechny materiály, rozměry součástí se pohybují od několika μm do stovek μm . Procesy MEMS (MicroElectroMechanical Systém) slouží pro výrobu různých senzorů a ovladačů. Rozměry těchto součástí se pohybují od 10 μm do několika mm. Nanotechnologie pak pracují v submikronových rozměrech. (13)

1.4.3.1 Ablace materiálu pomocí laserové maskovací techniky

Nejjednodušší pro statické odstranění materiálu (ablaci) je použití maskovací metody. V masce je vyřezán požadovaný symbol a ten se pak přenáší na materiál. Tato metoda je vhodná v případech, kdy je tvar masky menší než průměr laserového paprsku, což lze zajistit vhodným výběrem masky a fokusačního objektivu laserového systému. (13)

1.4.3.2 Laserové popisování a gravírování

Laserové značení se používá ke značení finálních výrobků nebo dílů. Popisovacím prostředkem je světelný paprsek, popis probíhá bez přímého kontaktu s materiálem, nedochází k mechanické deformaci ani k znečištění povrchu popisovaného materiálu. Vynikající grafická kvalita vyplývá z mimořádně přesného a jemného zpracování písmen, znaků a grafických předloh. Popisovat se dají plochy rovinné i válcové, po kružnici či jinak zakřivené, popisovat se dá i na nepřístupných místech. Laserové značení má velkou trvanlivost a je nesmazatelné. Výhodou je rychlost, vysoká produktivita a nízká cena popisu. (11)

Vhodným typem laseru (Nd:YAG nebo CO_2) lze označit prakticky jakýkoliv materiál: oceli, nerezové oceli, hliník, eloxovaný hliník, slinuté karbidy, plasty, kůži atd. (11)

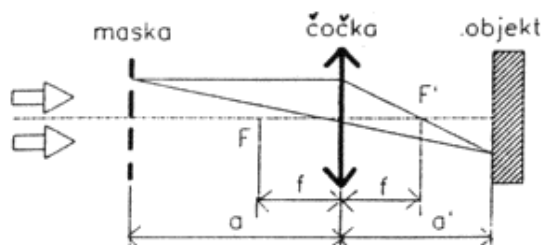
V průmyslové výrobě se používá dvou metod laserového popisu - maskovací metody. Metody vychylování svazku. Značkové výrobky jsou buď v klidu, nebo se pohybují. (13)

Maskovací metoda

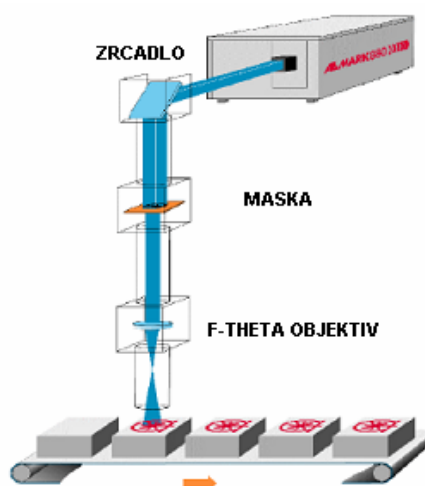
U této metody se používá masky (obsahující kopii popisu, který má být proveden). Hlavní částí značkovacího optického ramene je maska a zobrazovací element (čočka, objektiv, zrcadlo) - viz obr. 14. Masku tvoří zpravidla plech, ve kterém je proražen, vyříznut nebo pro gravírován potřebný znak nebo kód. Velikost motivu musí být taková, aby se vešla do homogenní části svazku CO_2 laseru. Maska se osvětlí svazkem CO_2 laseru a její zmenšený obraz se zobrazovacím prvkem (čočkou) přenese na objekt (výrobek, obal). Nutnost zmenšení (1,5 až 6 krát) vyplývá z nutnosti zvýšit hustotu energie záření na objektu tak, aby došlo k odstranění povrchu materiálu.

Hustota energie dopadající na povrch značkováného materiálu je základním parametrem určujícím kvalitu značkování.

Výhodou této techniky je velká rychlost popisu a vysoká produkce (od 25 kusů popsaných výrobků za sekundu). Obvykle jsou maximální rozměry popisované plochy $10 \times 20 \text{ mm}^2$. Nevýhodou je, že se změnou symbolu je nutné vyrobit novou masku. (13, 14)



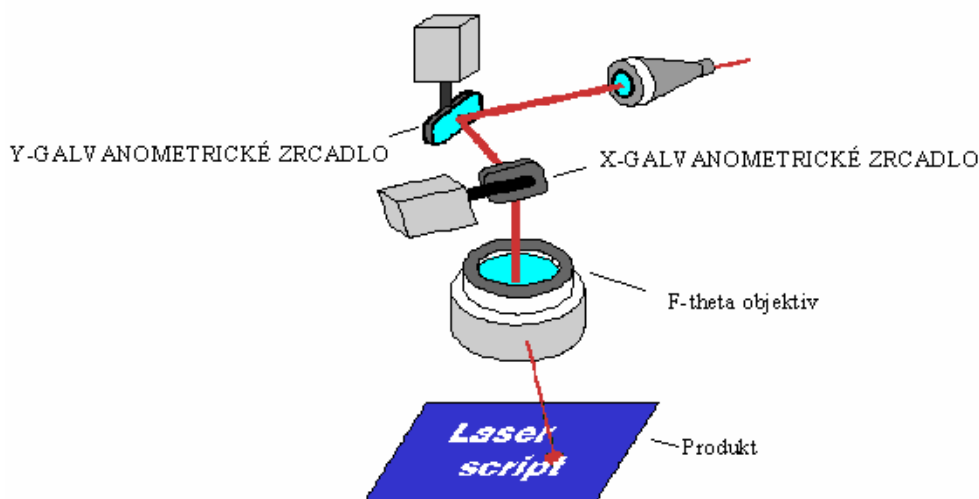
Obr. 14. Hlavní části značkovacího optického ramene (14)



Obr. 15. Schéma laserové optiky u maskovací metody (13)

Metoda popisu vychylováním svazku

Laserový svazek veden pomocí dvou galvanometrických zrcadel a přenáší se optickou soustavou na popisovaný výrobek. Zrcadla se pohybují v osách x a y, čímž mění tvar popisu (můžeme si představit vedení laserového svazku jako „psaní perem“). V kontrolním softwaru se vytvoří požadovaný symbol popisu, obvykle se navrhne v programech Corel Draw, CAD/CAM, které nabízí široké možnosti pro tvorbu grafiky, textu, log, čísel a podobně. Následně se nastaví vhodné procesní parametry obrábění. Výhodou systému je jeho flexibilita a mnohem větší popisovací plocha. Rychlost popisu polymerních materiálů se pohybuje v rozmezí $300 - 1\,000 \text{ mm s}^{-1}$. (13)



Obr. 16. Schéma laserové optiky u popisovací metody vychylováním svazku (20)

Pro popis jemných tenkých čar je nutné použít speciální plochou fokusační čočku (f-theta objektiv) s malou ohniskovou vzdáleností. V tab. III. jsou uvedeny různé typy fokusačních čoček a jejich vliv na velikost popisovací plochy (2).

Tabulka III. Vliv ohniska fokusační čočky na výstupní parametry u Nd:YAG laserů (2)

Průměr fokusační čočky [mm]	55	100	160	250	410
Pracovní vzdálenost [mm]	65	110	205	330	490
Velikost popisovacího pole [mm x mm]	40 x 40	70 x 70	115 x 115	175 x 175	245 x 245
Hloubka ohniska [mm]	0,3	0,7	1,3	5	15

1.4.3.2.1 Výhody a nevýhody laserového popisování

Tato technologie se vyznačuje vlastnostmi, jež ji kvalitativně odlišují od dosud používaných postupů (sítotisk, tampónový tisk, mechanické rytí a ražení), a která řeší nevýhody těchto konvenčních technologií. (16)

Výhody laserového popisu:

1. Vysoká kvalita popisu a extrémní reprodukovatelnost, variabilita popisu (záležitost software).
 2. Trvanlivost vůči působení tepla, chemikálií, působení UV záření.
 3. Bezkontaktní značení (žádné znečištění výrobku, nebezpečná deformace, opotřebení nástrojů).
 4. Bez použití barev, rozpouštědel (ekologické hledisko).
 5. Lze popisovat širokou škálu materiálů (veškeré kovy včetně kovů s povrchovou úpravou, plasty, kompozitní materiály, vícevrstvé materiály) i materiály s vysokou tvrdostí (diamant, speciální oceli).
 6. Výrobky mohou být značeny bez předchozí povrchové úpravy.
 7. Vysoké rozlišení značících symbolů, rychlost a přesnost značení.
 8. Možnost popisu nerovného povrchu a rotačních součástí po celém jejich obvodu.
 9. Jednoduché začlenění do výrobního procesu (buď jako samostatné pracoviště, nebo součást výrobní linky).
 10. Ekonomičnost.
 11. Minimální údržba zařízení.
 12. Vhodné pro výrobu štočků pro tampónový tisk a pro kombinaci s tampónovým tiskem.
- (16)

Laserový popis má i své nevýhody: ne všechny materiály mohou být značeny ve stejné kvalitě (CO₂ laserem nelze značit kovy bez povrchové vrstvy, Nd:YAG laserem nelze značit sklo a transparentní materiály), omezená barevnost popisu (pouze odstíny černé a bílé), vysoké pořizovací náklady laserového zařízení. (1)

1.4.3.2.2 Laserový popis polymerních materiálů

Výsledek laserového popisu u polymerních materiálů nezáleží jen na polymerní matrici, ale i na přísadách, které se obvykle přidávají při výrobě polymerního materiálu a významně tak ovlivňují jeho vlastnost. Patří mezi ně retardéry hoření, plniva, pigmenty, stabilizátory, změkčovadla i speciální přísady pro laserový popis (laserové pigmenty). Ne všechny druhy polymerů lze popisovat se stejnou výslednou kvalitou. Jakost popisu polymeru v přirozeném stavu je často nedostatečná, proto se polymery vybarvují na světlé či tmavé odstíny. Laserové přísady nejen zvyšují kontrast značení, ale pozitivně ovlivňují i kvalitu popsané plochy a zvyšují rychlost značení. (3)

Tabulka IV. Obecná popisovatelnost plastů

Výborná	Dobrá	Špatná
ABS	ABS+ASA	PTFE
PC	ASA	Pryže
PVA	SAN	Pryskyřice
PS,PSE	PP	
PC+ABS	PA	
PES	POM	
PSU	S/B	
	PE/PP	

Popisovací efekty na polymerní materiály lze rozdělit na popis rytím, odstranění vrstvy materiálu, změna barvy karbonizací a bělením, změna barvy sublimací. (13)

Sublimace

Bílé znaky na černém podkladu jsou způsobeny sublimací materiálu. Je dosažen vysoký kontrast popisu. Jakmile se materiál zahřeje laserovým zářením, uvolní se z něho plyny, které vytvoří na povrchu materiálu světlou pěnu. Pěna vystoupí na povrch v tloušťce přibližně 40 μm . Tento typ popisu může být méně odolný vůči mechanickému opotřebení. (13)



Obr. 17. Laserový popis sublimací (13)

Karbonizace

Energie laseru se mění na tepelnou a ta způsobí lokální zahřátí materiálu a následnou karbonizaci, vznikají tak tmavé nebo černé značky na světlém podkladu. U tohoto efektu je dosaženo největšího kontrastu na barevných materiálech. (13)



Obr. 18. Laserový popis karbonizací (13)

Bělení

Tento efekt laserového záření vytváří bílou značku na černém povrchu. S laserovým zářením reaguje pigment, ne samotný polymer. Výrazný efekt a kontrast popisu je dosažen přidavkem speciálních laserových pigmentů. Obecně je ale kontrast nižší než při aplikaci jiných technik. (13)

Odstranění vrstvy materiálu

Značka se vytváří v důsledku odstranění povrchové vrstvy materiálu působením výkonové špičky laserového impulsu fokusovaného infračerveného záření. Nejčastěji dochází k odstranění tenké vrstvy barvy z povrchu papíru, kovu nebo plastu, čímž se odhalí kontrastující základní povrch. Základní parametry určující možnost a kvalitu značkování CO₂ laserem jsou: ze strany laseru - hustota vyzařované energie a ze strany materiálu - míra absorpce záření na povrchu. Je žádoucí, aby kontrast mezi povrchem a spodní vrstvou byl co největší. (14)

Vhodným příkladem je tzv. „day and night design“. Laserem se odpaří vrstva tmavého laku na transparentním polymeru. Výrobek (např. ovládací tlačítko v automobilu) je možné podsvítit diodou. Vzniká tak značení viditelné nejen za denního světla. (13)



Obr. 19. Příklad popisu odstraněním vrstvy materiálu (15)

1.5 Materiály

1.5.1 Polyamid 6 (PA6)

Vzniká většinou stupňovinou polymerací 6 - kaprolaktamu. V prvním stupni probíhá tzv. otevření laktamu vodou a vznik kyseliny kapronové, ve druhém stupni vlastní polykondenzace kyseliny kapronové.

Výroba:

Kaprolaktam se roztaví a rozpustí v 5 - 10 % vody, přidá se stabilizátor polymeračního stupně. Roztok se zfiltruje a v autoklávu v inertní atmosféře zahřeje na 250 - 260 °C při tlaku 1,5 Mpa po dobu 1 - 2 hodiny. Pak se během 3 hodin odpouští vodní pára a dopolymerovává se za podtlaku ještě další 3 hodiny. Tavenina se inertním plynem vytlačuje z kotle ve formě pásku a granuluje se.

Vlastnosti PA6: tvrdý, světle žlutý polymer, použitelný od -30 do +100 °C. Je houževnatý, odolný vůči oděru, rozpustný ve fenolech, k. mravenčí a bezvodé kyseliny octové, neodolává anorganickým kyselinám a oxidačním činidlům, je navlhavý, jeho využití je zejména v textilním průmyslu na výrobu vláken, dále se používá jako konstrukční materiál na ložiska, ozubená kola a ovládací elementy, zejména při 30 %-ním plnění skelným vláknem.

1.5.2 Polymetylmetakrylát (PMMA)

Vyrábí se již od roku 1927. Monomerem je metylester kyseliny metakrylové, jedná se o čirou kapalinu. PMMA se vyrábí radikálovou (blokovou, suspenzní nebo emulzní) polymerací.

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

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 - horší kvalita povrchu.

- Suspenzní polymerace: Umožňuje zpracování vytlačováním a vstřikováním.

- Emulzní polymerace: Produkty slouží jako nátěrové hmoty.

Vlastnosti PMMA: sklovitě čirý polymer, 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, používá se trvale

do 80 °C, dobře se mechanicky obrábí, je rozpustný v aromatických uhlovodících, esterech, ketonech a éterech, zpracovává se vstřikováním při 170 - 220 °C, vytlačováním, tvarováním, mechanickým opracováním.

Využívá se k výrobě desek, trubek, tyčí, profilů, částí svítidel, vstřikovaných výrobků domácí spotřeby (transparentní), krytů kabin letadel, v zubní technice - protetika. Lze jej lepit vlastním roztokem.

1.5.3 Polypropylen (PP)

Monomer propylen se musí očistit od vodíku, etanu, ethylenu a propanu destilací na koloně. Dále se propíráním s nátronovým vápnem odstraní CO a CO₂, voda se pak odstraní na molekulárních sítích. Polymerace je stereospecifická - srážecí v roztoku hexanu. Vzniká směs převážně izotaktického, ale i stereoblokového a ataktického PP ve formě suspenze, která se v dalším stupni rozdělí na plynnou část monomeru a tekutou suspenzi převážně izotaktického polymeru znečištěného asi 10 % ataktickým podílem. Ten se

po odfiltrování polymeru dále vypírá hexanem. Ve vypraném polymeru se deaktivují zbytky katalyzátoru metanolem, dále chlorovodíkem a vše se nakonec neutralizuje hydroxidem sodným. Potom se polymer suší ve fluidní sušárně. Prášek se smíchá s přísadami (zejména s antioxidačními stabilizátory) a granuluje se na extruderech.

Vlastnosti PP: Lze jej používat krátkodobě až do +135 °C, má vyšší pevnost a tvrdost, včetně odolnosti vůči trhlínám, ale má vyšší křehkost pod 0 °C. Jeho vlastnosti kolísají s krystalinitou, závislou na způsobu zpracování, je dloužitelný, proto může sloužit i na výrobu vláken, zpracovává se technologií vstřikování, vytlačování a lisování při

teplotách do 280 °C. Je svařitelný, lepení je možné jen po speciální úpravě. Využívá se k výrobě trubek, folii, desek, předmětů domácí spotřeby s vyšší tuhostí a tepelnou odolností, orientovaných pásek, vláken.

1.5.4 Polystyren (PS)

Polymerace (suspenní) probíhá v míchané násadě. Její složení je monomer styren, demineralizovaná voda a plastifikátory. Přidá se stabilizátor suspenze, modřidlo a směs iniciátorů při teplotě 90 °C po dobu 6 - 7 hodin nebo 125 °C po dobu 2 hodiny. Po ochlazení na 60 °C se reakční směs přetlačí přes koš do neutralizátoru, odstředí se a po promývání vodou se polymer suší.

Emulzní polymerace se používá jen pro výrobu latexů sloužících k výrobě nátěrových hmot.

Vlastnosti PS: je použitelný do +75°C, stárne fotooxitačně (žloutne), rozpustný v aromatických uhlovodících, vyšších ketonech, tetrahydrofuranu, odolává vodě, alkoholům, olejům, zředěným anorganickým kyselinám, má sklon ke vzniku trhlin koroze za napětí - nevhodný pro mechanicky namáhané výrobky, zvláště ve styku s tenzidy a rozpouštědly, je tvrdý a značně křehký. Zpracovává se převážně vstřikováním při 180 - 240 °C.

Využívá se pro výrobu spotřebních předmětů, obalů, hraček, potravinových misek, různých kelímků, podnosů, dále jako součásti osvětlovacích těles.

1.5.5 Polymery ABS

Představují kombinaci monomerů akrylonitrilu (AN), butadienu (B) a styrenu (S), přičemž složka B se připravuje polymerací vždy zvlášť.

Složení: 45 - 70 % S, 10 - 30 % AN, 15 - 50 % B.

Základem výroby terpolymerů s dobrými vlastnostmi je oddělená příprava elastomeru (PS, PBS) a jeho dokonalá dispergace v kopolymeru SAN. Podle způsobu dispergace pak rozlišujeme postupy:

1) mísením (dispergací) PBS kaučuku ze SAN - na strojích

2) roubováním S a AN na kaučuk a smícháním produktu se SAN - vzniká nejkvalitnější produkt.

Vlastnosti ABS: má heterogenní strukturu, odolný vůči chemikáliím, je tvrdý a lesklý, povrch je možné pokovovat, zpracovává se vstřikováním, válcováním, vytlačováním, vyfukováním a tvarováním, lze jej lepit svařovat, povrchově upravit - levný konstrukční plast.

1.5.6 Polyoxometylen (POM)

Je lineární, vysoce krystalický.

Vyrábí se:

1) z formaldehydu (CH_2O), který se vede přes vymrazovač, kde při $-15\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k částečné polymeraci, a tím i ke stržení nečistot. Zbytek se vede do vysušeného heptanu v reaktoru, kde je ještě rozpuštěn aniontový katalyzátor. Polymeruje se v inertní atmosféře při $20 - 60\text{ }^\circ\text{C}$. Polymer vypadává z reakce ve formě bílého prášku. Polymeruje se do obsahu $10 - 20\%$ polymeru v suspenzi. Pak se polymer oddělí odstředěním a po promývání heptanem a acetonem se suší ve vakuu při $80\text{ }^\circ\text{C}$. Stabilizuje se esterifikací acetanhydridem v reaktoru v prostředí lakového benzinu.

2) z trioxanu (stále více nabývá na významu)

- bloková polymerace: kationtový katalyzátor ve speciálních hnětačích při $70 - 90\text{ }^\circ\text{C}$.

- roztoková polymerace v cyklohexanu při $30\text{ }^\circ\text{C}$. Stabilizace se zajišťuje kopolymerací s $2 - 4\%$ etylenoxidu.

Polymer je více nepravidelný, méně krystalický a s nižšími mechanickými vlastnostmi.

Vlastnosti POM: je lineární, vysoce krystalický, má nejvyšší odolnost vůči oděru (vedle PA), do $70\text{ }^\circ\text{C}$ se nerozpouští v žádném rozpouštědle, nad $70\text{ }^\circ\text{C}$ se rozpouští v chlorfenolech, ketonech a halogenuhlovodících, trpí korozí za napětí v organických rozpouštědlech, při $9 < \text{pH} < 4$ je povrch hydrolyticky naleptáván, zpracovává se vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním při $200 - 210\text{ }^\circ\text{C}$, je svařitelný a pokovovatelný.

Používá se na technické dílce - ozubená kola, západky namáhané rázem, různá ložiska, tlakové nádoby, čerpadla.

1.6 Shrnutí poznatků z literatury a stanovení cílů diplomové práce

Problematika laserového mikroobrábění má velké uplatnění v řadě průmyslových aplikacích. Proto se ukázalo být zavádění těchto technologií v podnicích velmi atraktivní. Kvalita obrobeného povrchu výrobku a jeho využití v konkrétní aplikaci je závislá na parametrech laseru a na typu polymerního materiálu.

Pro mikroobrábění laserem se v případě polymerních materiálů používá zejména UV a excimerových laserů. Cílem této práce je výzkum využití méně finančně náročného CO₂ laseru. Byly zvoleny tyto cíle diplomové práce:

1. Sledovat působení laserového paprsku při obrábění různých polymerních materiálů. Zkoušky provést na laserovém technologickém pracovišti pro různé technologické parametry.
2. Optickým mikroskopem s digitální kamerou vyhodnotit tvary a rozměry obrobených mikrostruktur. Vypracovat grafické závislosti naměřených hodnot na nastavených technologických podmínkách.
3. Pomocí měření drsnosti digitálním měřicím přístrojem charakterizovat obrobené plochy. Vypracovat grafické závislosti naměřených hodnot na nastavených technologických podmínkách.
4. Vypracovat ekonomickou analýzu laserového procesu.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Materiály

Ze získaných teoretických poznatků plyne, že charakter laserem obrobené plochy je podstatně závislý na tepelné vodivosti polymeru. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto testovat více druhů polymerů - PMMA, PP, PA, ABS, PS, POM. Je nutné upozornit, že vlastnosti jednoho typu polymeru se mohou významně lišit podle konkrétních druhů vyrobených jednotlivými výrobci v rámci různých výrobních. Nejlépe je působení laserového paprsku prezentováno na zkušebních vzorcích z transparentního materiálu PMMA, proto bylo

u tohoto materiálu provedeno zkoušek více. Pro PMMA je také k dispozici nejvíce údajů z literatury o možnostech mikroobrábění nejen laserem.

Tabulka V. Polymerní materiály použité pro experimenty

Polymer	Bližší specifikace
PMMA	litá deska
PA 6	Silamid
ABS	k lisování - černé 32 920
POM	Delrin 100-NC-010
PS	Krasten 542
PP	Tatran, Mosten, 20% GF

2.2 Příprava vzorků

Zkušební vzorky z materiálů PA6, ABS, POM, PP, PS mají tvar zkušebních těles určených k tahové zkoušce, v rozměrech dle normy ČSN EN ISO 527-1 Plasty - stanovení tahových vlastností, tyčinka je střední velikosti. Vzorky z těchto materiálů byly vyrobeny vstřikováním dle normy ČSN EN ISO 294-1 Plasty - vstřikování zkušebních těles z termoplastů. Kondicionování bylo provedeno u materiálu PA6 (20 h, 90°C).

Tabulka VI. Technologické podmínky vstřikování zkušebních vzorků

Parametry	PP	PA6	POM	ABS	PS
Teplota taveniny T_m [°C]	231	252	240	225	230
Teplota formy T_c [°C]	25	40	60	50	40
Dotlak p_{dot} [MPa]	7,5	8	4	7	3
Čas dotlaku t_{dot} [s]	12	8	20	10	6
Teplota vst. pásma [°C]	180	200	185	185	185
Teplota přech. pásma [°C]	225	245	220	210	210
Čas chlazení t_{ch} [s]	30	30	40	50	40

PMMA deska byla vyrobena odléváním v podniku Považské chemické závody Žilina. Z ní pak byly připraveny dva kusy o rozměrech 160 x 38 mm a tloušťce 7 mm a 30 x 27 mm a tloušťce 7 mm. Hrany byly upraveny frézováním a broušením.

Vzorky budou označeny následovně:

Tabulka VII. Číselné označení jednotlivých vzorků

Materiál	Číselné označení vzorku
PP	1
PA 6	2
POM	3
ABS	4
PS	5
PMMA 160 x 38 mm	6
PMMA 130 x 61 mm	7

2.3 Použité experimentální zařízení

2.3.1 Vstřikovací stroj Demag ERGOtech 50-200 Systém NC 4

Pro výrobu zkušebních vzorků vstřikováním byl použit vstřikovací stroj Demag ERGOtech 50-200 Systém NC 4 (FT UTB Zlín).

Základní parametry vstřikovacího stroje:

- Uzavírací síla 500 kN
- Zdvihový objem 106 cm³
- Rozměr mezi vodícími sloupy 355 x 355 mm
- Rozměr upínacích desek 520 x 520 mm

2.3.2 CO₂ laser MERCURY L-30

Pro obrábění zkušebních vzorků byl použit komerční CO₂ laser Mercury L-30 firmy LaserPro, USA. Zkoušky byly provedeny ve firmě Mechanika Prostějov. Výkon a posuv laserového systému lze měnit. Paprsek laseru je možné fokusovat automaticky na průměr stopy $d = 185 \mu\text{m}$. Maximální hodnota hustoty energetického toku je $q = 1,1 \text{ GWm}^{-2}$. Laser pracuje pomocí softwaru Corel Draw. Laserem MERCURY L-30 lze popisovat, gravírovat a řezat širokou škálu materiálů, například plasty, pryž, kůži, sklo, povlakovaný kov, kámen, dřevo, keramiku. Tento typ laseru je určen především ke komerčnímu gravírování.



Obr. 20. . CO₂ laser MERCURY L-30

Tabulka VIII. Technické parametry CO₂ laseru, typ MERCURY L-30

Výkon laseru [W]	30
Typ laseru	CO ₂ laser
Max. pracovní plocha (š x h x d) přední a zadní dvířka zavřena [mm]	800 x 570 x 165
Velikost pracovního stolu [mm]	790 x 530
Vnější rozměry (š x h x d) [mm]	1125 x 720 x 1005
Pohon v osách x, y	DC servo
Řízení rychlosti [mms ⁻¹]	Nastavitelné od 1 do 1066
Řízení výkonu [W]	Nastavitelné od 1 do 30
Nastavení osy Z [mm]	Automatické, v rozmezí 250
Rozlišení (DPI)	1000, 600, 500, 300, 250, 200
Ovládací panel	Čtyřřádkový LCD display
Chlazení	Vzduchové - vodní
Dodavatel	Firma LaserPro, rok výroby 1998

Dále je CO₂ MERCURY laser vybaven popisovací hlavou, posuvy v osách x a y, bodovou červenou laserovou diodou (pro nastavení přesné pozice místa obrábění), LCD displejem k navolení času obrábění, přesné pozice, výstupního výkonu a dalších parametrů. Mezi volitelnými položkami je rotační přípravek, dvojité laserové hlavy, řezací podložka, vzduchový filtr, odsávání. Pracovní prostředí by mělo být čisté a bezprašné, teplota pracovní místnosti 15 - 20°C a s 30% - 40% vlhkostí (30).

2.3.3 Přístroj na měření drsnosti SJ-301

K měření drsnosti obrobené plochy byl použit přístroj SurfTest SJ-301 od firmy Mitutoyo, který je určen pro použití v dílenském provozu. Přístrojem SJ-301 lze charakterizovat obrobenou plochu řadou parametrů podle různých národních a mezinárodních norem (JIS, DIN, ISO, ANSI). Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na obrazovce přístroje. Drsnost povrchu se počítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu (35).

Tabulka IX. Technické parametry přístroje J-301

Měřicí rozsah [μm]	300
Parametry	$R_a, R_t, R_p, R_q, R_v, R_{pc}, R_{mr}, R_s, R_{sm}$
Filtr	2RC, PC75, GAUSS
Délka pojezdu hrotu [mm]	0,25; 0,8; 2,5; 8
Rozlišení [μm]	0,01
Poloměr snímacího hrotu [μm]	5
Měřicí síla [mN]	4
Rychlost posuvu [mm s^{-1}]	0,25; 0,5

2.3.4 Optické mikroskopy

Kvalita a charakter obrobené plochy byly zkoumány na optickém mikroskopu MU, ZEISS (FT, UTB Zlín) se zvětšením 40 x a 250 x. Na mikroskop byla instalována digitální kamera.

Rozměry obrobených drážek byly měřeny na optickém mikroskopu ZEISS 2772 se zvětšením 117 x. Mikroskop byl vybaven mikrometrickými šrouby povolujícími posuv v osách x a y s rozlišením 10 μm (odhadem na 1 μm).

2.3.5 Číselníkový úchylkoměr

Z důvodu zachování celistvosti vzorku č. 7 byla hloubka drážky měřena pomocí číselníkového úchylkoměru měřícího s přesností 0,001 mm. Zjišťuje se ním odchylka od stanoveného jmenovitého rozměru. Hlavní stupnice je dělena tak, že jeden dílek odpovídá změně polohy dotyku o 0,001 mm. Pro různá měření se používá snadno vyměnitelných dotyků, kuželových, kulových, jehlových apod. Při měření se nemá pracovat s příliš velkým zdvihem dotyku, protože přesnost úchylkoměru klesá se zvětšujícím se zdvihem. Musí se dbát také na to, aby měřicí dotyk směřoval vždy kolmo na směr měření.

2.4 Provedení zkoušek

2.4.1 Obrábění zkušebních vzorků na CO₂ laseru MERCURY L-30

Zkušební vzorky byly umístěny přesně v ose posuvu laserové popisovací hlavy - hlava konala posuv v ose x a vzorky byly umístěny podélně za sebou do osy y. V programu Corel Draw byl nakreslen požadovaný symbol, což byla v tomto případě drážka a čtverec. Byly nastaveny parametry obrábění - velikost výstupního výkonu a posuv. Tyto parametry se postupně měnily. U vzorků č. 1, 2, 3, 4, 5, 6 byla obrobena drážka široká 2 mm, u vzorku č. 7 byly obrobena čtverečky o rozměrech 10 x 10 mm. Paprsek laseru přejel každou dráhu dvakrát.

V tabulkách kombinací parametrů jsou uvedeny hodnoty výkonu (P) a posuvu (f) jako procenta z maximálního výkonu ($P_{\max} = 30\text{W}$) a maximálního posuvu ($f_{\max} = 1066\text{ mm s}^{-1}$). Hodnoty jsou uváděny v procentech z důvodu toho, že při práci s laserem je to obvyklá praxe, ovládací software laseru pracuje v procentech. V neposlední řadě práce zabývající se podobným tématem také užívají často procenta maximálních hodnot posuvu a výkonu použitých komerčních laserů (viz.15).

Tabulka X. Nastavené parametry obrábění pro vzorky č. 1, 2, 3, 4, 5, 6

Posuv f [%]	50	70	100					
Výkon laseru P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80

Tabulka XI. Nastavené parametry obrábění pro vzorek č. 7

Posuv f [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Výkon laseru P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

2.4.2 Měření rozměrů a tvarů obrobených drážek

Byla měřena závislost hloubky drážky na parametrech laserového systému - výstupním výkonu a posuvu.

U vzorků č. 1, 2, 3, 4, 5, 6 bylo měření provedeno na optickém mikroskopu ZEISS 2772 se zvětšením 117 x. Okraje zkušebních vzorků bylo nutné začistit broušením. Vzorek se upevnil pomocí přípravků tak, aby byl ve vodorovné poloze. Poté se optika mikroskopu zaostřila na hranu zkušebního tělesa. Rozměry byly odečteny pomocí mikrometrického posuvu stolu mikroskopu.

U vzorku č. 7 bylo měření provedeno na číselníkovém úchylkoměru. Deska byla ustavena do vodorovné polohy, tak aby měřící dotyk směřoval kolmo na měřenou plochu v drážce.

Z důvodů statistického vyhodnocení výsledků bylo měření hloubky v každé drážce provedeno 5 x. Z těchto měření byl vypočítán aritmetický průměr.

2.4.3 Zkoumání kvality obrobené plochy

Zkoumání kvality povrchu obrobené plochy bylo provedeno na optickém mikroskopu NU ZEISS. Nejprve se nastavila vhodná optika mikroskopu, která zajistila zvětšení 40 a 250 x. Poté se na mikroskop nainstalovala digitální kamera, se kterou se snímaly fotografie zkušebních vzorků. Byly zhotoveny fotografie povrchu obrobených vzorků, drážek a natavených okrajů.

2.4.4 Měření drsnosti obrobené plochy

Drsnost povrchu je popsána mnoha parametry, blíže uvedenými v normě ČSN EN ISO 4287, například P-parametr vypočítaný ze základního profilu, R-parametr vypočítaný z profilu drsnosti, W-parametr vypočítaný z profilu vlnitosti a profil je definován jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. Vyhodnocení parametrů bylo provedeno dle normy JIS. Vlastní měření je zahájeno kalibrací pomocí přiloženého etalonu. Dále se nastaví měřící dráha (dráha pojezdu měřícího hrotu), v tomto případě byla hodnota nastavení

0,8 x 3. Při vlastním měření je nutné zajistit, aby zkušební vzorek a měřicí hrot byly umístěny rovnoběžně. Po projetí měřicí dráhy hrotem přístroje jsou zvolené parametry zaznamenány na displeji. Při měření drsnosti povrchu vzorků jsem vyhodnocovala tyto parametry:

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

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx, \quad (24)$$

b) střední kvadratická úchylka R_q - kvadratický průměr odchylky profilu uvnitř vztažné dráhy.

$$R_q = \frac{1}{l} \sqrt{\int_0^l Y^2(x) dx}, \quad (25)$$

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

$$R_z(JIS) = Y_p + Y_v, \quad (26)$$

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

2.5 Naměřené hodnoty a závislosti

2.5.1 Rozměry obrobených drážek

V tabulkách výsledků je uváděna hloubka drážky (d) v $[\mu\text{m}]$ v závislosti na kombinaci parametrů laseru - výstupního výkonu (P) a posuvu (f). Hodnoty parametrů jsou uvedeny jako procenta z maximálního výkonu ($P_{\text{max}} = 30\text{W}$) a maximálního posuvu ($f_{\text{max}} = 1066 \text{ mm s}^{-1}$).

Tabulka XII. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 2

$f [\%] / P [\%]$	10	20	30	40	50	60	70	80
50	10	18	31,2	53,3	86	112	129	145
70	-	-	-	12	27	40	80	93
100	-	-	-	-	8	15	25	34

Tabulka XIII. . Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 3

$f [\%] / P [\%]$	10	20	30	40	50	60	70	80
50	25	67	84	127	150	187	193	207
70	17	23	53	76	94	106	146	137
100	10	18	30	41	58	71	83	94

Tabulka XIV. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 4

$f [\%] / P [\%]$	10	20	30	40	50	60	70	80
50	-	10	75	90	105	118	162	206
70	-	-	10	54	68	75	102	127
100	-	-	-	20	31	65	75	101

Tabulka XV. . Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 5

f [%]/P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80
50	8	15	42	70	105	142	210	238
70	-	10	13	31	55	98	138	197
100	-	-	18	32	51	63	66	76

Tabulka XVI. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 6

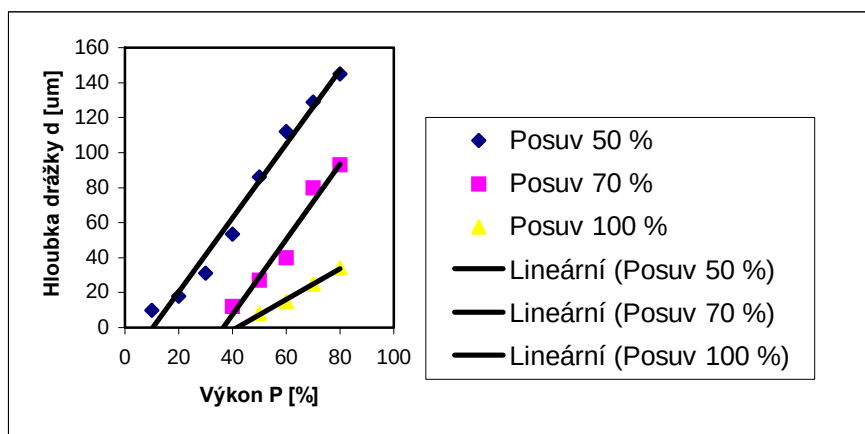
f [%]/P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80
50	24	38	102	126	178	200	246	248
70	-	3	15	39	51	116	146	160
100	-	-	8	25	31	37	47	63

Zejména u nízkých výkonů byly hodnoty hloubky drážky velmi malé a nebylo možné je přesně odečíst na mikrometrickém stole mikroskopu (-). U materiálu PP nebylo měření hloubky drážky provedeno právě z tohoto důvodu. Hodnoty uvedené v tabulkách jsou dále zpracovány do grafů. Pro tyto graficky znázorněné závislosti byly zaznamenány směrnice přímk a jejich koeficienty korelace.

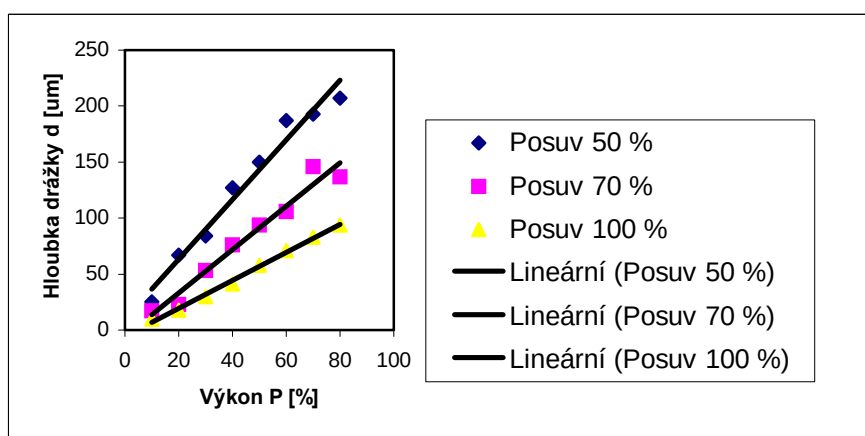
Tabulka XVII. Regresní rovnice závislostí hloubky obrobené drážky na parametrech laserového systému (f, P), odečteno z graficky vyjádřených závislostí v programu EXCEL

Posuv f [%]	Rovnice	Koeficient korelace R^2
Vzorek č. 2		
50	$y = 2,1132x$	0,9800
70	$y = 2,1500x$	0,9588
100	$y = 0,8800x$	0,9954
Vzorek č. 3		
50	$y = 2,6619x$	0,9705
70	$y = 1,9429x$	0,9654
100	$y = 1,2536x$	0,9952
Vzorek č. 4		
50	$y = 2,8214x$	0,9432
70	$y = 2,1029x$	0,9536
100	$y = 2,0600x$	0,9735
Vzorek č. 5		
50	$y = 3,4762x$	0,9617
70	$y = 3,1429x$	0,9257
100	$y = 1,1543x$	0,9540
Vzorek č. 6		
50	$y = 3,5167x$	0,9759
70	$y = 2,8929x$	0,9525
100	$y = 0,9914x$	0,9681

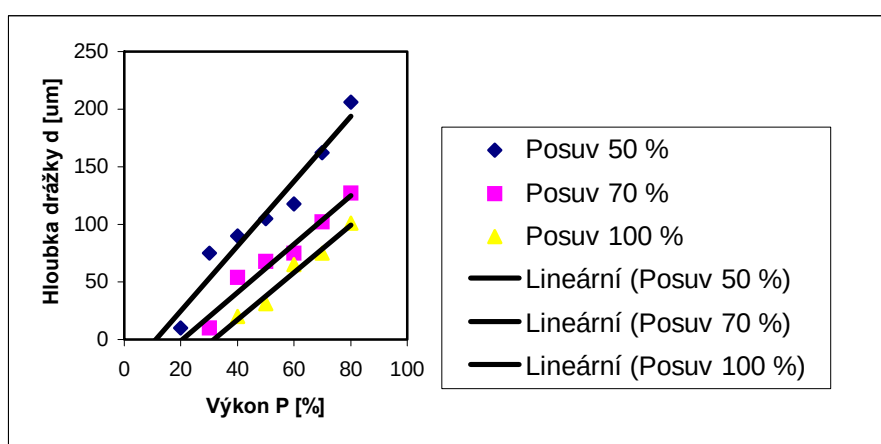
Rozměry obrobených drážek v závislosti na parametrech laseru vyjádřeny graficky



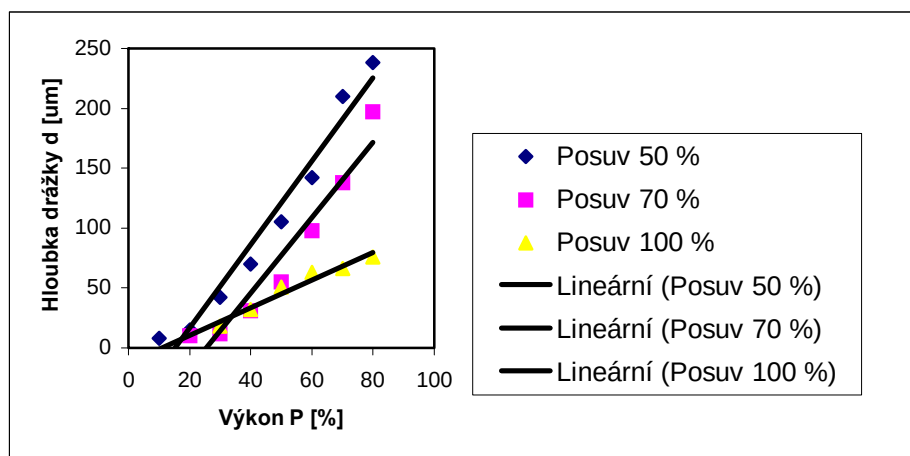
Obr. 21. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f), Vzorek č. 2



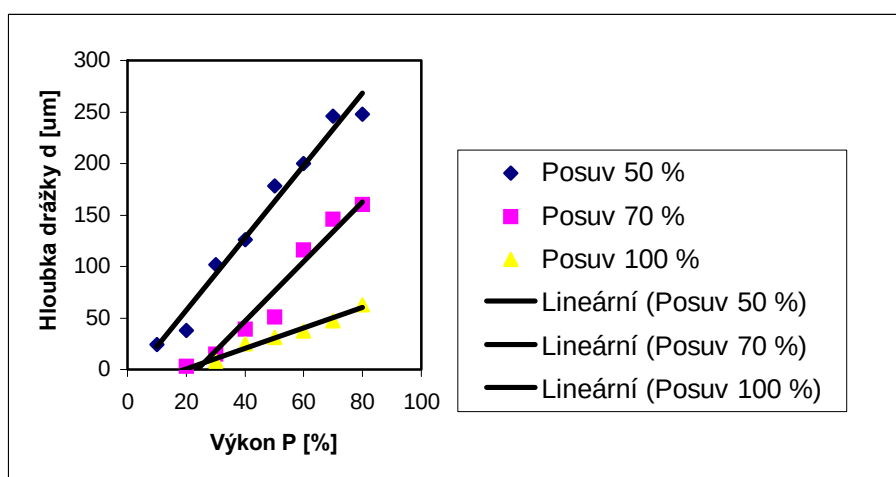
Obr. 22. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f), Vzorek č. 3



Obr. 23. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f), Vzorek č. 4



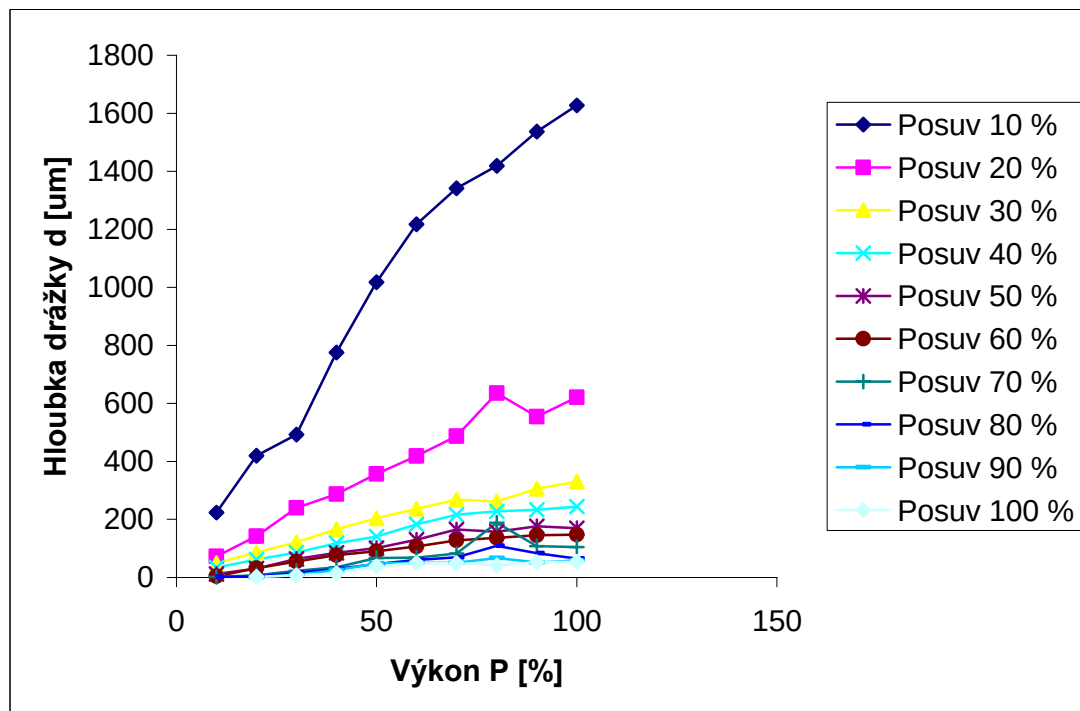
Obr. 24. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f), Vzorek č. 5



Obr. 25. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f), Vzorek č. 6

Tabulka XVIII. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru pro vzorek č. 7

Výkon P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Posuv f 10%	223,4	419,2	492,8	775,2	1018	1217,8	1341,6	1419,4	1537	1627,6
Posuv f 20%	72,8	141,8	239,8	288	357,4	418,8	487	535,2	554,6	620,8
Posuv f 30%	50	85,8	121,4	166,8	203,4	237,2	268,6	262,6	306	330,2
Posuv f 40%	34,2	61,6	85,6	117,8	141,4	182,4	215,6	227,8	233,8	244,6
Posuv f 50%	11,6	31	63,6	85,2	101,6	129,8	164,8	157,2	176,2	169,4
Posuv f 60%	4	31,8	54,8	76,6	90,6	106,4	127,8	137	145,2	147,2
Posuv f 70%	2,2	7,6	22,6	34,8	66,8	68,2	82,6	108,4	107,8	104,4
Posuv f 80%	2,6	3,8	16,8	30,2	46,8	60,8	69,4	109,4	83,4	65,4
Posuv f 90%	-	1,2	8,6	25,2	48,6	50,4	51,2	67,2	51,6	58,8
Posuv f 100%	-	2,6	7,4	14,8	39	50	49,6	41,6	53,2	53,8



Obr. 26. Závislost hloubky drážek d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA)

Tabulka XIX. Regresní rovnice závislostí hloubky obrobene drážky na parametrech laserového systému (f , P), odečteno z graficky vyjádřených závislostí v programu EXCEL pro vzorek č. 7

Posuv [%]	f	Rovnice	Koeficient R^2	korelace
10		$y = 16,3600 x$	0,9726	
20		$y = 6,3376 x$	0,9570	
30		$y = 3,0960 x$	0,9771	
40		$y = 2,5118 x$	0,9700	
50		$y = 1,9222 x$	0,9441	
60		$y = 1,6139 x$	0,9601	
70		$y = 1,5727 x$	0,7096	
80		$y = 1,0406 x$	0,7943	
90		$y = 0,7433 x$	0,7810	
100		$y = 0,6773 x$	0,8094	

2.5.2 Naměřené hodnoty drsnosti obrobené plochy

Dráha pojezdu měřicího hrotu přístroje SJ-301 byla 2,4 mm. Obrobené drážky u materiálů PP (vzorek č. 1), PA6 (vzorek č. 2), POM (vzorek č. 3), měly šířku 2 mm, nebylo tudíž možné u těchto materiálů provést měření drsnosti ve směru kolmém na směr obrábění, pouze ve směru obrábění. U PMMA (vzorek č. 7) byla šířka obrobené drážky 10 x 10 mm dostatečná a měření mohlo být provedeno ve směru kolmém na směr obrábění. U materiálů PS (vzorek č. 5), ABS (vzorek č. 4) nebylo provedeno měření drsnosti obrobené plochy z důvodů velkého množství resolidifikovaného materiálu v obrobených drážkách. Hodnoty parametrů drsnosti obrobené plochy R_a a R_z jsou uvedeny v tabulkách.

Z důvodů statistického vyhodnocení výsledků bylo měření drsnosti v každé drážce provedeno 8 x. Z těchto měření byl vypočítán aritmetický průměr.

Tabulka XX. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 1

Posuv f 50%	Výkon P [%] PP Tatra							
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,5	0,8	1,6	1	1,4	2,6	1,9	1,5
R_z [μm]	3,7	4,5	8,1	6,6	9,7	13,1	12,3	11,1
Posuv f 70%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,7	1	0,5	1,8	2,7	2	2,5	1,8
R_z [μm]	4,6	5,5	3,6	10,3	16,1	10,4	14,8	11
Posuv f 100%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,5	0,5	1,1	0,8	0,9	2	2,7	2,1
R_z [μm]	2,5	2,6	5,2	4,8	5,4	11,8	15,7	11,4

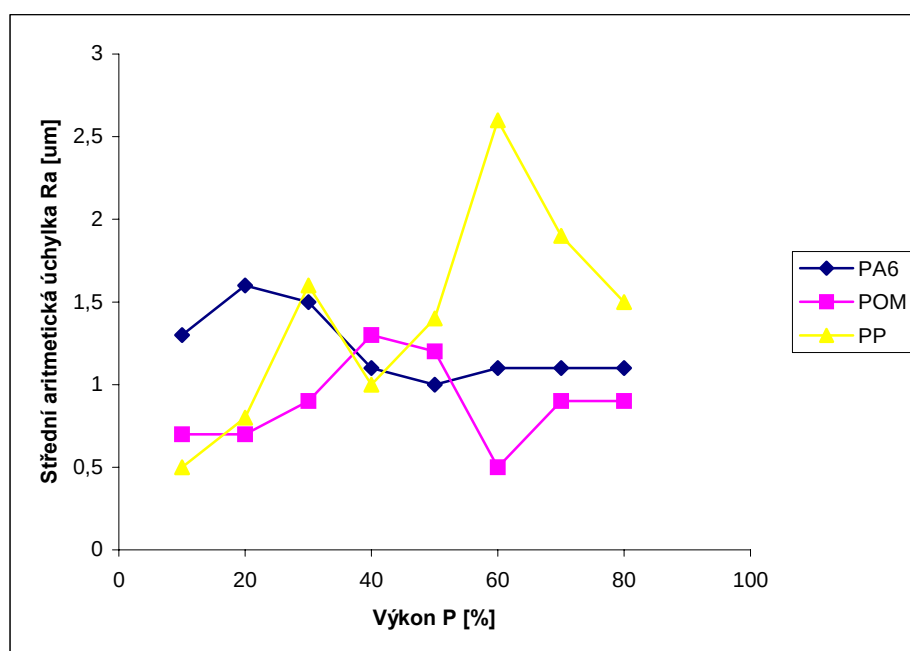
Tabulka XXI. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 2

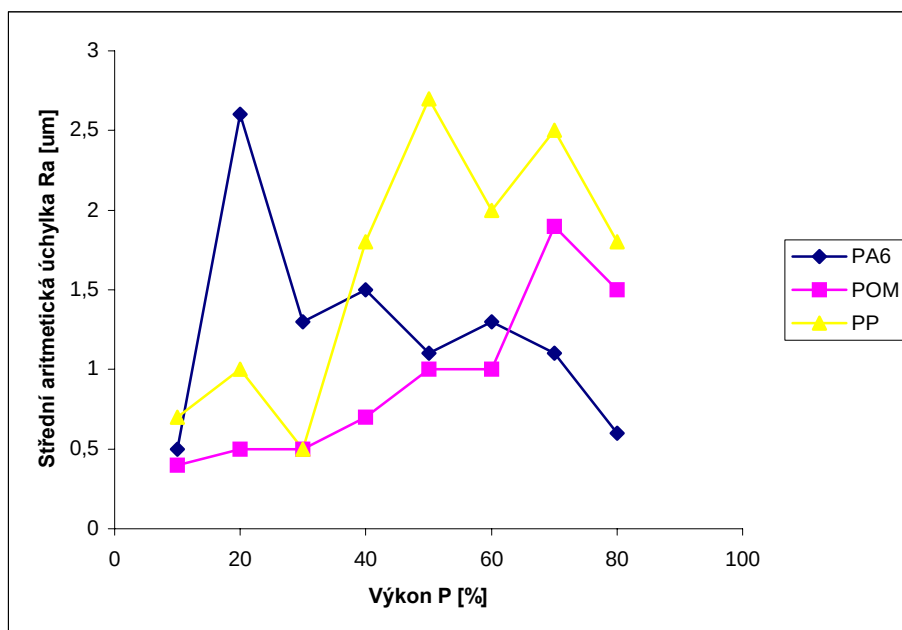
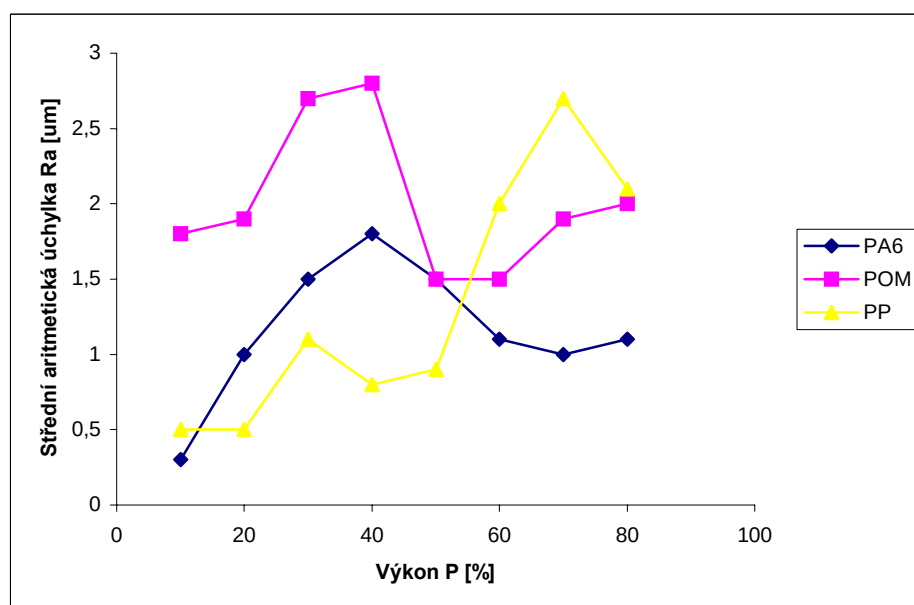
Posuv f 50 %	Výkon P [%] PA 6							
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	1,3	1,6	1,5	1,1	1	1,1	1,1	1,1
R_z [μm]	9,2	10,3	7,3	5,3	5,8	7,7	6,2	5,6
Posuv f 70%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,5	2,6	1,3	1,5	1,1	1,3	1,1	0,6
R_z [μm]	2,8	15,4	8,5	11,9	6,6	7,4	5,3	3,5
Posuv f 100%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,3	1	1,5	1,8	1,5	1,1	1	1,1
R_z [μm]	1,9	6,7	6,8	16,8	8,2	6	6,1	5,8

Tabulka XXII. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 3

Posuv f 50%	Výkon P [%] POM							
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,7	0,7	0,9	1,3	1,2	0,5	0,9	0,9
R_z [μm]	4,4	3,8	4,4	6,8	5,4	2,6	3,7	3,6
Posuv f 70%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	0,4	0,5	0,5	0,7	1	1	1,9	1,5
R_z [μm]	2,3	2,8	2,6	3,4	4,2	8,6	12	8,2
Posuv f 100%								
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a [μm]	1,8	1,9	2,7	2,8	1,5	1,5	1,9	2
R_z [μm]	9,7	11,6	14	13	8	11,2	9,6	9,3

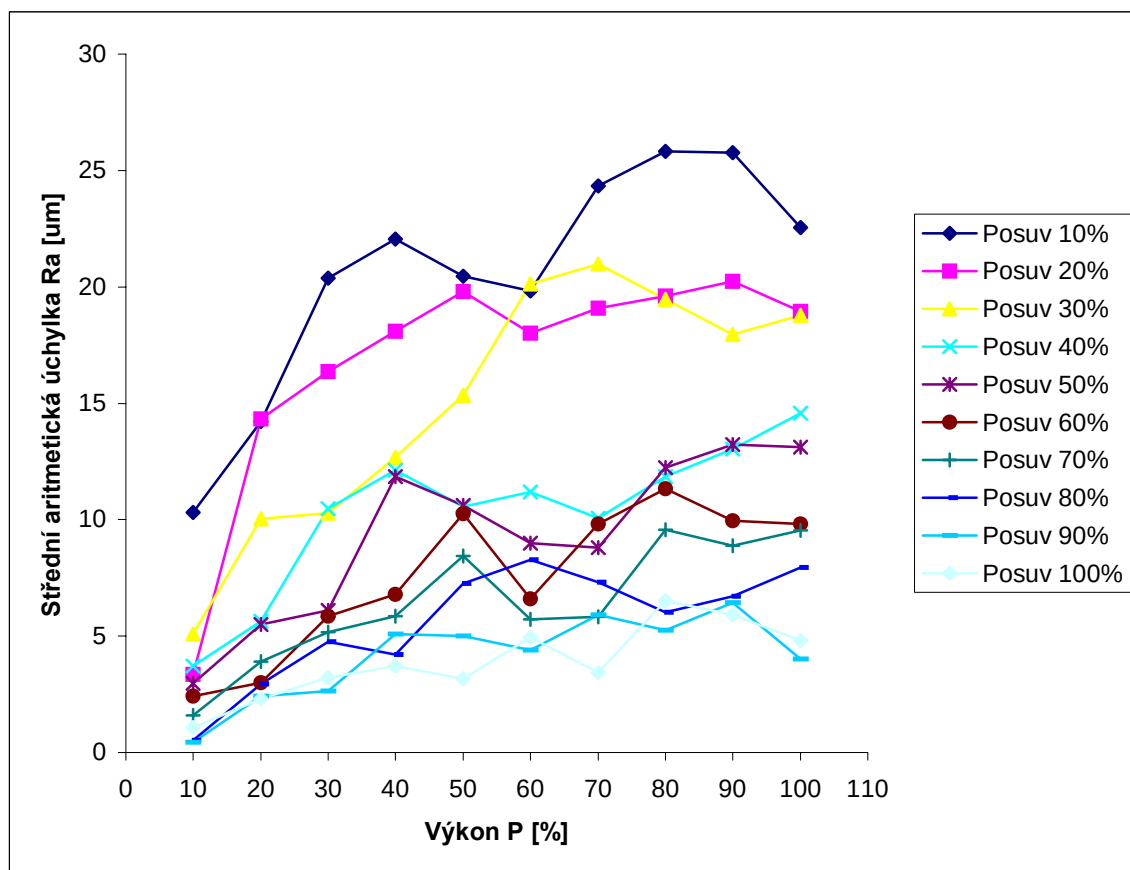
Naměřené hodnoty drsnosti obrobené plochy přístrojem SJ-301 vyjádřené graficky

Obr. 27. Závislost střední aritmetické úchytky R_a na výkonu P pro posuv 50 %

Obr. 28. Závislost střední aritmetické úchylny R_a na výkonu P pro posuv 70 %Obr. 29. Závislost střední aritmetické úchylny R_a na výkonu P pro posuv 100 %

Tabulka XXIII. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 7 - ve směru rovnoběžném se směrem obrábění

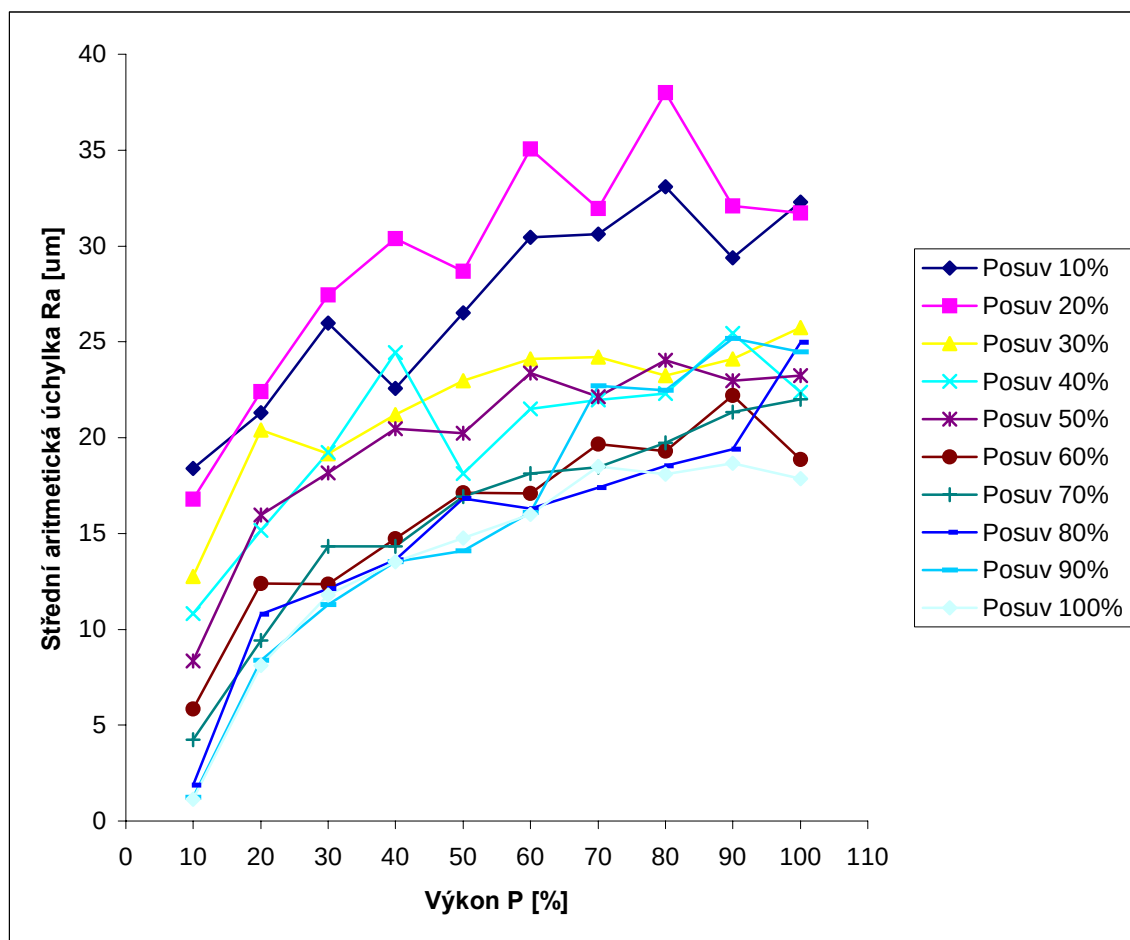
Výkon P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Posuv f 10%										
R _a [μm]	10,31	14,23	20,37	22,04	20,47	19,83	24,32	25,82	25,75	22,56
R _z [μm]	44,08	68,10	117,78	126,63	116,36	120,98	135,45	152,61	130,15	119,37
Posuv f 20%										
R _a [μm]	3,35	14,33	16,35	18,10	19,81	18,00	19,10	19,61	20,23	18,93
R _z [μm]	20,17	64,78	90,06	102,27	119,79	109,64	117,46	110,92	121,71	108,57
Posuv f 30%										
R _a [μm]	5,09	10,05	10,29	12,69	15,35	20,14	20,99	19,46	17,96	18,78
R _z [μm]	25,97	54,05	64,58	65,58	88,60	106,11	112,34	106,26	100,27	113,59
Posuv f 40%										
R _a [μm]	3,72	5,62	10,47	12,12	10,57	11,18	10,06	11,85	13,04	14,57
R _z [μm]	21,23	27,62	57,77	64,33	55,07	56,44	54,44	59,40	66,24	71,37
Posuv f 50%										
R _a [μm]	2,97	5,51	6,12	11,87	10,61	8,98	8,80	12,25	13,27	13,12
R _z [μm]	18,02	27,98	31,91	52,80	47,90	45,89	43,35	58,53	62,78	63,78
Posuv f 60%										
R _a [μm]	2,41	3,01	5,85	6,80	10,24	6,60	9,83	11,32	9,96	9,82
R _z [μm]	14,15	19,23	28,86	34,94	48,18	36,57	50,07	56,59	50,04	51,04
Posuv f 70%										
R _a [μm]	1,58	3,91	5,16	5,86	8,43	5,71	5,83	9,56	8,88	9,55
R _z [μm]	10,74	21,07	27,99	31,89	41,36	33,79	31,68	46,69	46,99	49,35
Posuv f 80%										
R _a [μm]	0,53	2,95	4,76	4,22	7,26	8,27	7,33	6,03	6,70	7,94
R _z [μm]	3,51	17,04	24,86	23,64	35,98	44,59	38,67	35,58	36,24	42,41
Posuv f 90%										
R _a [μm]	0,44	2,41	2,63	5,08	5,02	4,40	5,91	5,26	6,44	4,02
R _z [μm]	3,49	14,95	16,44	29,10	29,07	26,27	31,25	38,50	38,27	21,47
Posuv f 100%										
R _a [μm]	1,08	2,32	3,22	3,71	3,15	4,96	3,45	6,52	5,91	4,81
R _z [μm]	8,23	15,34	19,23	22,39	18,84	28,48	20,20	33,53	32,74	27,70



Obr. 30. . Závislost Střední aritmetické úchylky R_a na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA), směr pojezdu hrotu rovnoběžný se směrem obrábění

Tabulka XXIV. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 7 - ve směru kolmém na směr obrábění

Výkon P [%]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Posuv f 10%										
R _a [μm]	18,38	21,30	25,96	22,57	26,52	30,45	30,63	33,08	29,39	32,28
R _z [μm]	101,57	118,23	144,68	125,11	158,13	175,41	167,9	182,38	156,58	181,86
Posuv f 20%										
R _a [μm]	16,79	22,39	27,44	30,40	28,68	35,07	31,97	38,00	32,09	31,71
R _z [μm]	80,84	121,86	152,03	168,71	157,34	198,56	183,79	196,15	165,59	167,36
Posuv f 30%										
R _a [μm]	12,74	20,39	19,18	21,21	22,97	24,11	24,21	23,23	24,11	25,74
R _z [μm]	69,48	93,73	102,13	116,08	124,31	130,25	124,71	135,50	149,10	145,72
Posuv f 40%										
R _a [μm]	10,82	15,16	19,22	24,43	18,15	21,49	21,98	22,32	25,44	22,36
R _z [μm]	50,12	78,38	101,96	113,90	106,21	118,79	120,55	123,89	149,01	127,93
Posuv f 50%										
R _a [μm]	8,33	15,95	18,15	20,46	20,23	23,39	22,15	24,03	22,97	23,22
R _z [μm]	38,97	73,06	89,30	106,65	108,35	125,61	126,80	126,60	132,61	126,45
Posuv f 60%										
R _a [μm]	5,85	12,39	12,37	14,72	17,13	17,11	19,68	19,30	22,20	18,85
R _z [μm]	30,02	65,34	72,90	79,91	94,78	98,13	95,34	100,51	131,14	106,34
Posuv f 70%										
R _a [μm]	4,25	9,41	14,33	14,34	16,94	18,13	18,47	19,74	21,32	21,99
R _z [μm]	23,36	51,13	78,20	89,29	96,88	98,35	113,44	108,36	112,91	124,49
Posuv f 80%										
R _a [μm]	1,89	10,79	12,12	13,63	16,82	16,28	17,38	18,53	19,41	24,98
R _z [μm]	15,36	44,17	68,86	77,75	94,10	94,26	110,30	104,47	101,35	133,31
Posuv f 90%										
R _a [μm]	1,25	8,39	11,27	13,52	14,10	16,08	22,70	22,47	25,18	24,47
R _z [μm]	12,29	39,85	62,32	77,36	81,60	97,08	140,29	126,24	133,39	131,40
Posuv f 100%										
R _a [μm]	1,14	8,10	11,79	13,52	14,76	15,99	18,51	18,10	18,68	17,86
R _z [μm]	12,02	38,32	54,44	74,11	88,12	93,47	107,60	105,81	102,63	102,87



Obr. 31. Závislost Střední aritmetické úchytky R_a na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA), směr pojezdu hrotu příčný

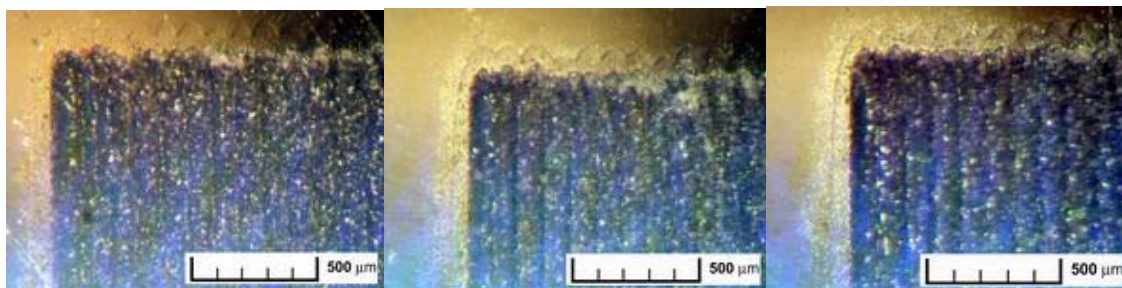
2.5.3 Vizuální porovnání působení laserového paprsku na povrch polymerních materiálů

Vedle sebe jsou seřazeny fotografie povrchu polymerů při rozdílných podmínkách obrábění. Na uvedených fotografiích je materiál PMMA (vzorek č. 7) při těchto parametrech obrábění - rychlost posuvu 70% a 100% a výkon u každé z těchto rychlostí od 10% do 100% (obr.33 - 52). Dále jsou zde snímky okrajů drážek u materiálů PP (vzorek č. 1), PA 6 (vzorek č. 2), POM (vzorek č. 3), ABS (vzorek č. 4), PS (vzorek č. 5), PMMA (vzorek č. 6) (obr.53 - 57) a detailu drážky u materiálů ABS (vzorek č. 4), PMMA (vzorek č. 6) (obr.58, 59). Další fotografie znázorňují interakci materiálů PS, PP a POM s laserovým svazkem (obr. 60 - 82).

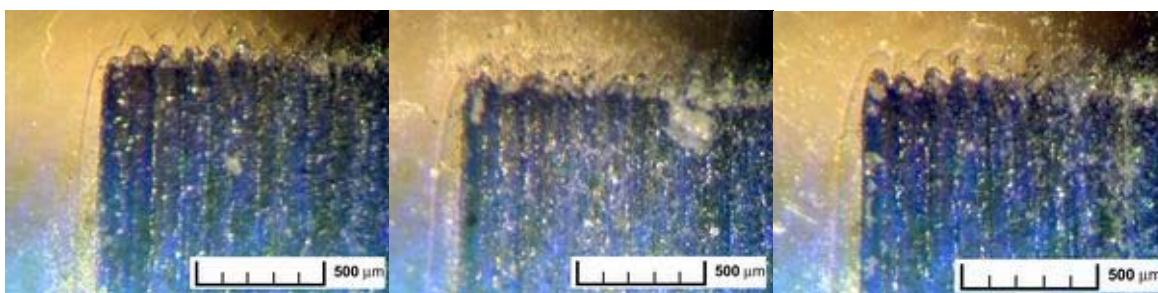
Fotografie materiálu PMMA (vzorek č. 6), parametry obrábění: výkon 10 - 100%, posuv 70% a 100%.



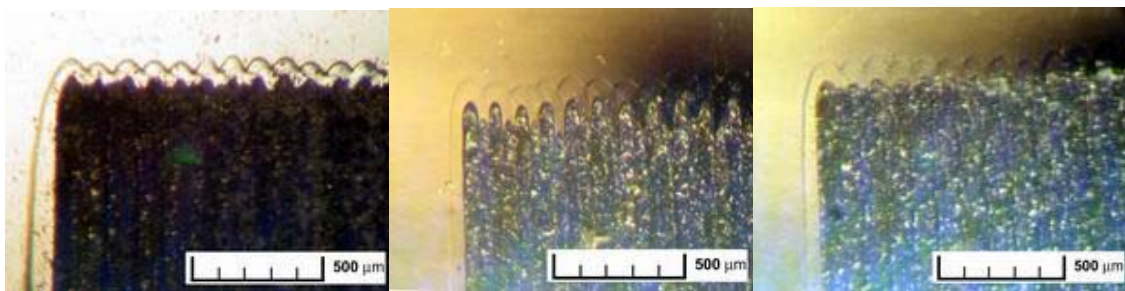
Obr. 33, 34, 35. Parametry obrábění: výkon 10 %, 20 %, 30 %, posuv 100 %, vzorek č. 6



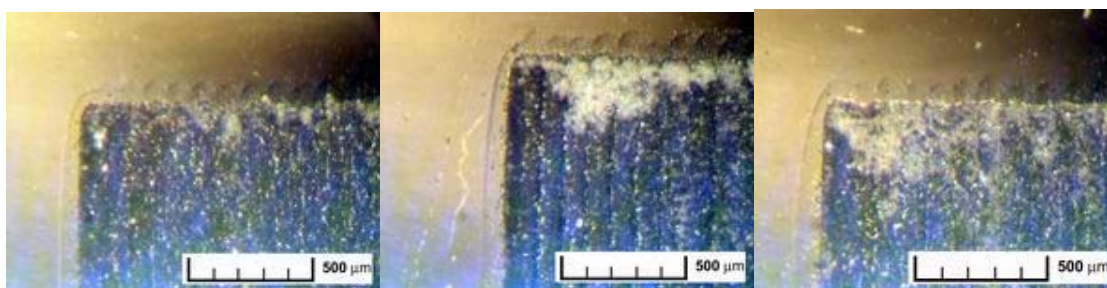
Obr. 36, 37, 38. Parametry obrábění: výkon 40 %, 50 %, 60 %, posuv 100 %, vzorek č. 6



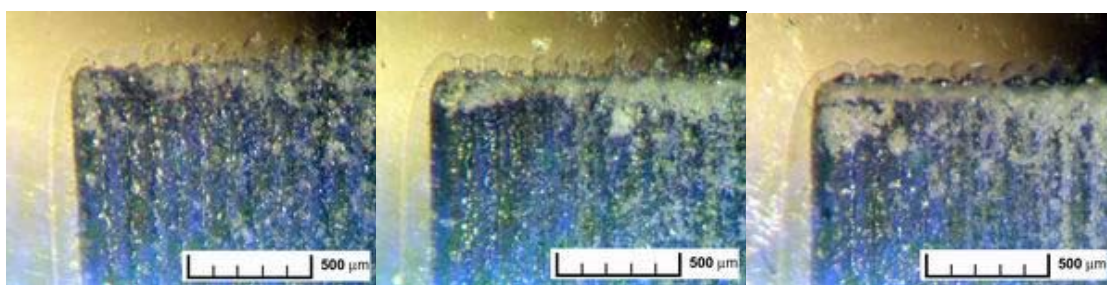
Obr. 39, 40, 41. Parametry obrábění: výkon 70 %, 80 %, 90 %, posuv 100 %, vzorek č. 6



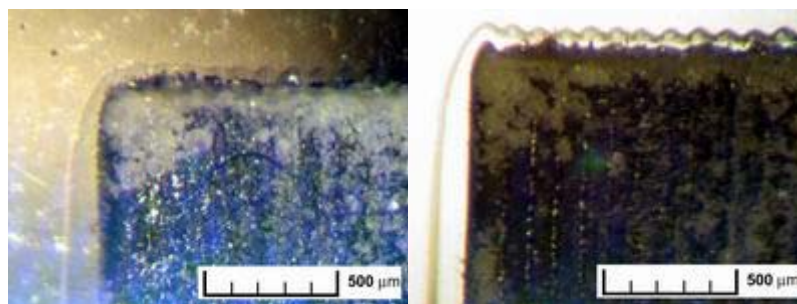
Obr. 42, 43, 44. Parametry obrábění: výkon 100 %, posuv 100 %; výkon 10 %, 20 %, posuv 71 % vzorek č. 6



Obr. 45, 46, 47. Parametry obrábění: výkon 30 %, 40 %, 50 %, posuv 70 %, vzorek č. 6

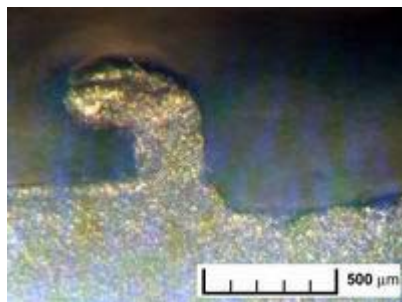


Obr. 48, 49, 50. Parametry obrábění: výkon 60 %, 70 %, 80 %, posuv 70 %, vzorek č. 6

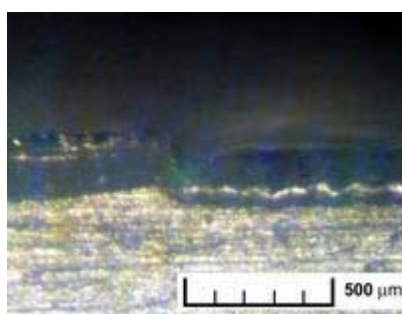


Obr. 51, 52. Parametry obrábění: výkon 90 %, 100 %, posuv 70 %, vzorek č. 6

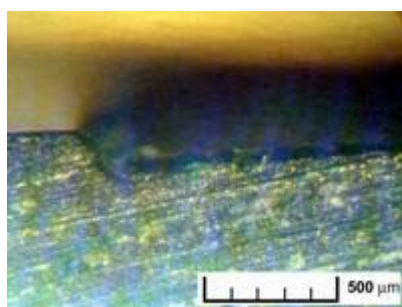
Fotografie okrajů drážek u vzorků č. 1 (PP), č. 2 (PA 6), č. 3 (POM), č. 4 (ABS), č. 5 (PS), 6 (PMMA)



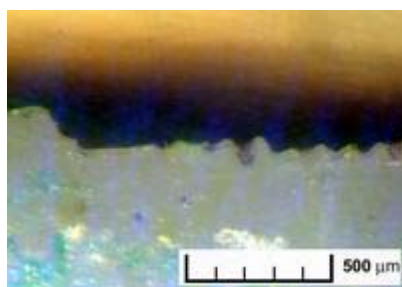
Obr. 53. Konec drážky u vzorku č. 4 při výkonu 70% a posuvu 80 %



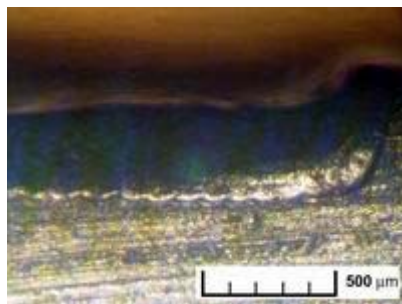
Obr. 54. Konec drážky u vzorku č. 2 při výkonu 50 % a posuvu 10 %



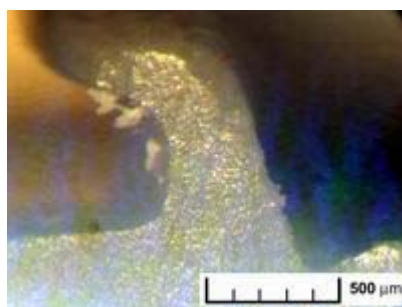
Obr. 55. Konec drážky u vzorku č. 6 při výkonu 70 % a posuvu 80 %



Obr. 56. Konec drážky u vzorku č. 3 při výkonu 70 % a posuvu 80 %

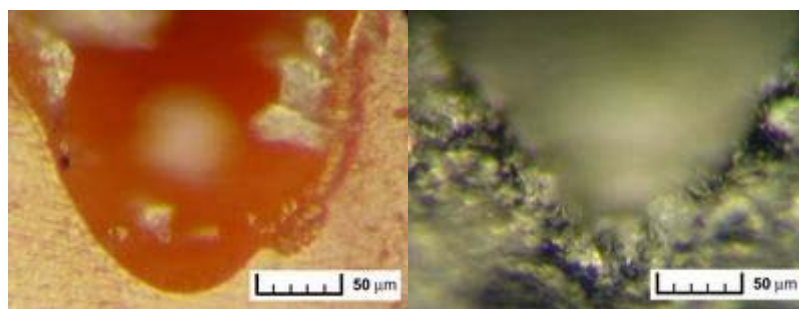


Obr. 57. Konec drážky u vzorku č. 1 při výkonu 70 % a posuvu 80 %



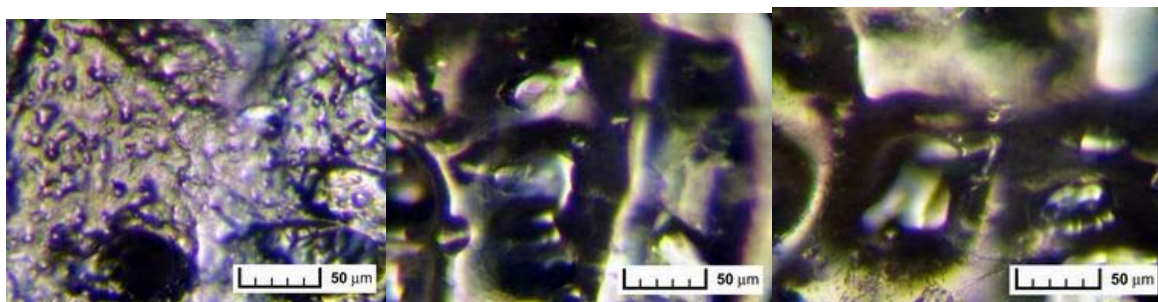
Obr. 58. Konec drážky u vzorku č. 5 při výkonu 70 % a posuvu 80 %

Fotografie detailu drážky, materiál ABS, PMMA.

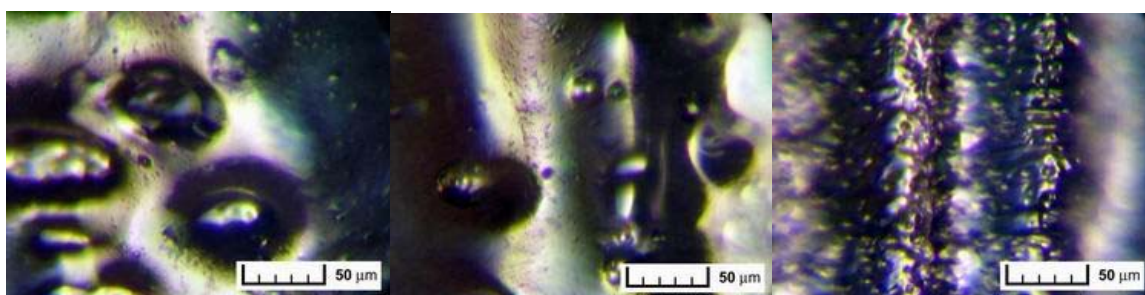


Obr. 59. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 10 %, vzorek č. 4 a 6

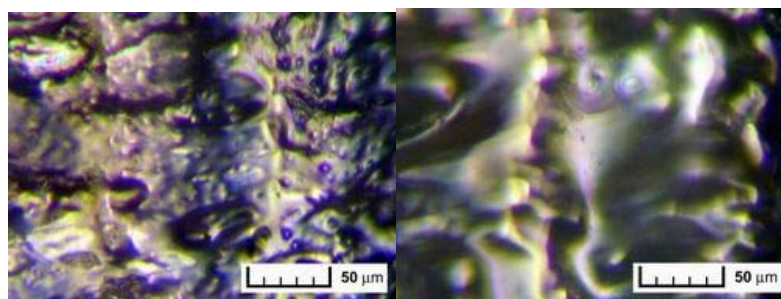
Fotografie vzorku č. 5 (PS), parametry obrábění: výkon 10 - 80%, posuv 50%



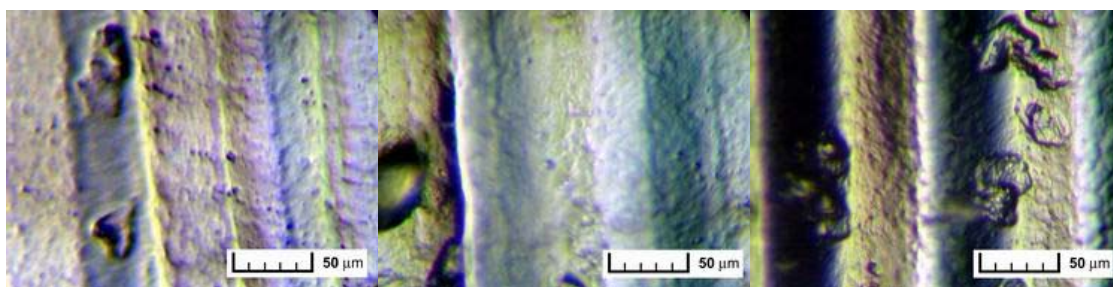
Obr. 60, 61, 62. Parametry obrábění: výkon 10 %, 20 %, 30 %, posuv 50 %, vzorek č. 5



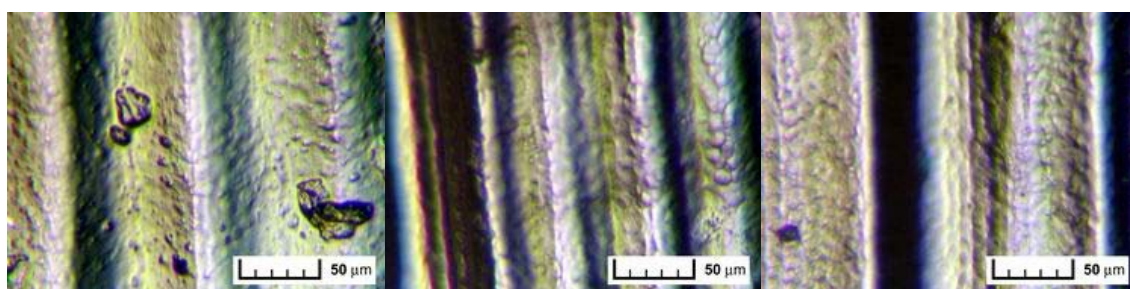
Obr. 63, 64, 65. Parametry obrábění: výkon 40 %, 50 %, 60 %, posuv 50 %, vzorek č. 5



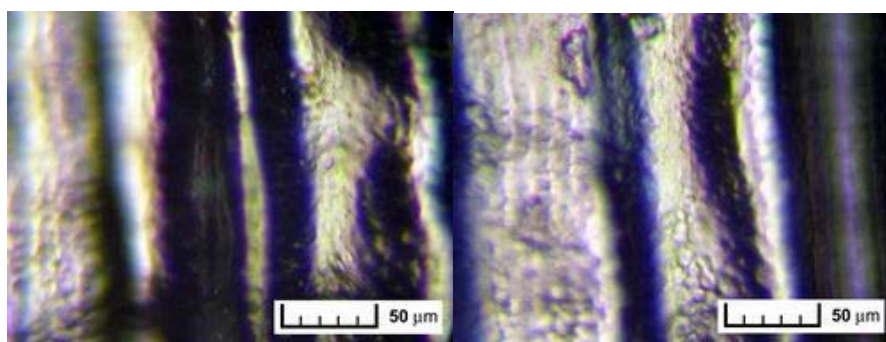
Obr. 66, 67. Parametry obrábění: výkon 70 %, 80 %, posuv 50 %, vzorek č. 5

Fotografie vzorku č. 3 (POM), parametry obrábění: výkon 10 - 80%, posuv 70%

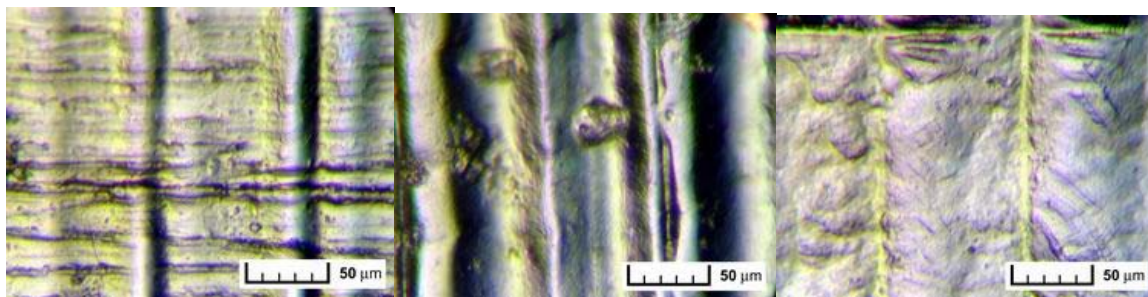
Obr. 68, 69, 70. Parametry obrábění: výkon 10 %, 20 %, 30 %, posuv 70 %, vzorek č. 3



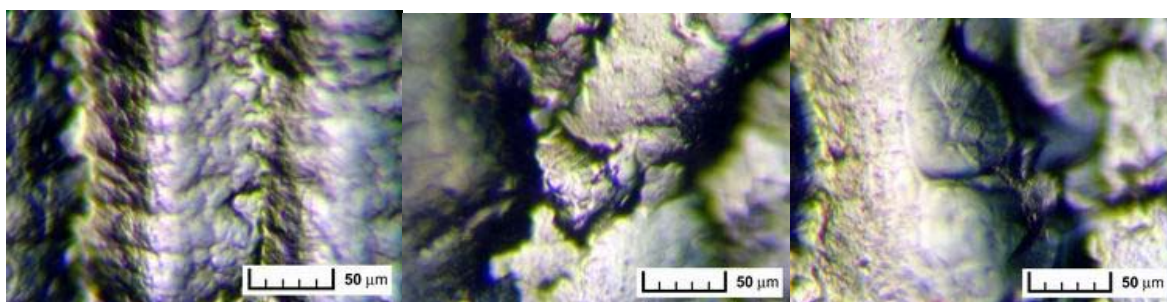
Obr. 71, 72, 73. Parametry obrábění: výkon 40 %, 50 %, 60 %, posuv 70 %, vzorek č. 3



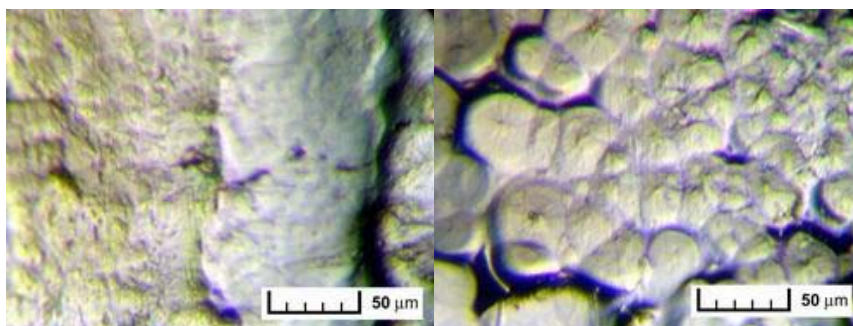
Obr. 74, 75. Parametry obrábění: výkon 70 %, 80 %, posuv 70 %, vzorek č. 3

Fotografie vzorku č. 1 (PP), parametry obrábění: výkon 10 - 80%, posuv 70%

Obr. 76, 77, 78. Parametry obrábění: výkon 10 %, 20 %, 30 %, posuv 70 %, vzorek č. 1



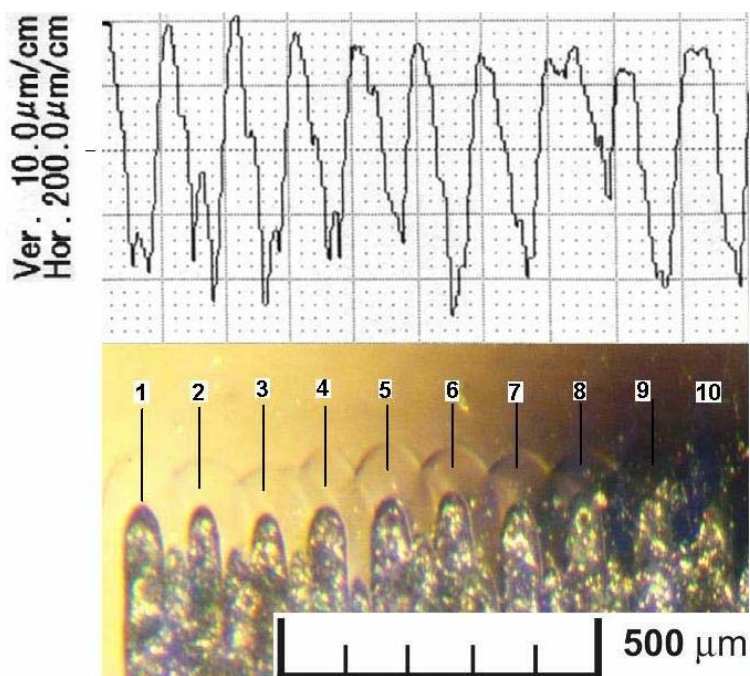
Obr. 79, 80, 81. Parametry obrábění: výkon 40 %, 50 %, 60 %, posuv 70 %, vzorek č. 1



Obr. 82, 83. Parametry obrábění: výkon 70 %, 80 %, posuv 70 %, vzorek č. 1

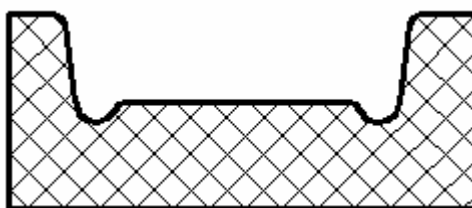
2.5.4 Vyhodnocení drsnosti obrobené plochy

Bylo již uvedeno (viz kap.2.5.2), že hodnota parametru drsnosti R_a stoupá s hodnotami výkonu u daného posuvu pouze u materiálu PMMA. Na obr. 84. je srovnána digitální fotografie PMMA při parametrech obrábění: výkon 20% a posuv 70 % s graficky znázorněnou hodnotou drsnosti (změřeno na měřícím přístroji SJ-301). Můžeme si všimnout na okrajích obrobené drážky v místě směru obrábění zřetelných stop po laserovém paprsku, širokých přibližně 50 μm . Tento okraj drážky je značně nestejný, k dosažení rovné hrany je zapotřebí „orámovat“ obrobenou drážku konturou.



Obr. 84. Materiál PMMA vzorek č. 6 (20/70) a příslušná hodnota drsnosti obrobené plochy

S použitím kontury v závěru obrábění vypadá obrobená drážka jako na obr. 84.



Obr. 85. Obrobená drážka s konturou

2.5.5 Optimální parametry CO₂ laseru MERCURY L-30 pro použité materiály

V tab. XXV jsou uvedeny parametry obrábění laserového systému, které byly vyhodnoceny jako nejvhodnější pro zvolené druhy materiálů. Hodnoty posuvu (max. 1066 mm^s⁻¹) a výkonu (max. 30W) jsou uvedeny v procentech.

Tabulka XXV. Optimální parametry laserového systému pro použité materiály

Materiál	Optimální výkon	Optimální posuv	Poznámka
PA 6	široké rozmezí	od 50%	Široké rozmezí výkonu a posuv je vhodný od 50% hodnot.
POM	široké rozmezí	široké rozmezí	Materiál dobře reaguje na všechny nastavené parametry.
PP	od 20%	od 70% do 100%	Také dobře reaguje na všechny nastavené parametry, vhodný je vyšší výkon.
PTFE	maximální	minimální	Je vhodné použít laserový systém s vyšším výstupním výkonem.
PMMA	široké rozmezí	vyšší hodnoty	Vhodné jsou jakékoliv parametry, pro kvalitu obr.plochy lepší nižší hodnoty posuvu.
ABS	do 15%	70 – 100%	Problémem je tuhnutí taveniny na okraji drážky.
PS	do 30%	100%	Problémem je tuhnutí taveniny na okraji drážky.

2.6 Ekonomické zhodnocení využití laseru při mikroobrábění

Ekonomickým cílem využití laserové techniky v průmyslu je především zvýšení produktivity práce a přesnosti obrábění.

Není však vhodné nahrazovat laserovou technikou všechna konvenční zařízení. Laser se uplatní tam, kde je jeho použití efektivnější ve srovnání s klasickými řeznými nástroji nebo kde tyto nástroje nelze vůbec použít.

Rychlá změna pracovní činnosti laserového zařízení je dána především rychlou změnou požadovaného symbolu v programu Corel Draw.

Tato technologie se vyznačuje vlastnostmi, jež ji kvalitativně odlišují od dosud používaných postupů (sítotisk, tampónový tisk, mechanické rytí a ražení), a která řeší nevýhody těchto konvenčních technologií. Jsou to zejména lepší pracovní podmínky pro obsluhu stroje (nehlučný provoz), zlepšení bezpečnosti práce, úspora pracovních sil a výrobních ploch. Nehrozí zde poranění pracovníka odletujícími třískami, protože se jedná o bezsilový způsob obrábění.

2.6.1 Náklady na jednu hodinu práce stroje s obsluhou

Vstupní parametry:

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

Tabulka XXVI. Sazby pro rovnoměrné odpisování (23)

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

Výpočet:

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

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

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

Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou v 1. roce:

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

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

Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou ve 2. roce:

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

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

Výpočet hodinové práce stroje s obsluhou ve 3. roce:

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

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

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

Celková hodinová práce (průměrná hodinová práce stroje, tj. stroj + obsluha, výrobní režie, zisk)

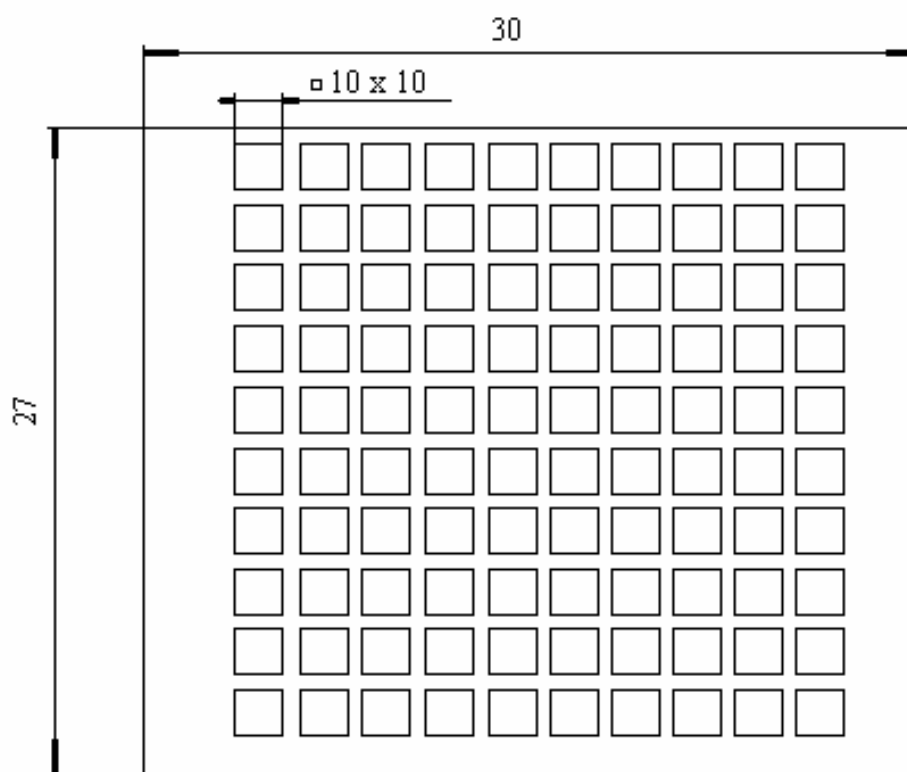
Průměrná hodinová práce stroje + výrobní režie = $162 + 40 = 202$ Kč/h

Zisk (5 %) z hodnoty 202 = 10 Kč

Celková hodinová práce (bez materiálu) = $202 + 10 = 212$ Kč

2.6.2 Výpočet ceny navržené mikrostruktury

K obrobení mikrostruktury (obr. 86) tvaru čtverce o rozměrech 10 x 10 mm vykoná paprsek dráhu 20 mm, a to 500 x po sobě.



Obr. 86. Návrh tvaru mikrostruktury, zleva doprava roste posuv z 10 % na 100 %

Vstupní parametry:

- Celková hodinová práce Kč 212,-
- Čas potřebný k vytvoření mikrostruktury 2747,5 s, tj. 0,76 h

Tabulka XXVII. Doba potřebná k vyrobení navržené mikrostruktury

Posuv [%]	Doba potřebná k výrobě mikrostruktury [s]
100	9,38
90	10,42
80	11,73
70	13,40
60	15,63
50	18,76
40	23,45
30	31,27
20	46,90
10	93,81
Celkem	274,75

Základní cena mikrostruktury:

Celková hodinová práce x čas potřebný k vytvoření mikrostruktury = $212 \times 0,76 = 162$ Kč

Cena navržené mikrostruktury (bez materiálu): paušální částka: Kč 500,- + základní cena: Kč 162,- = Kč 516,-

3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledné struktury obráběného polymeru a kvalita povrchu jsou závislé jak na parametrech laseru, tak i na druhu obráběného polymeru. Zhoršení přesnosti rozměrů a kvality povrchu způsobuje zejména přecházení neodtransportovaného materiálu znovu do pevné fáze. K tomuto jevu dochází většinou při nižších hodnotách posuvu. Můžeme si ale všimnout, že u materiálů ABS a PS dochází k tomuto nežádoucímu efektu i při vyšších hodnotách posuvu. Při pomalejším příjezdu laserového paprsku je tavenina vyvrhována plyny kolem drážky, namísto klidného přejití materiálu po přejezdu laserového paprsku do pevného skupenství.

3.1 Vizuální vyhodnocení působení laserového paprsku na povrch polymerních materiálů

Na obr. 53 - 57 jsou zobrazeny okraje drážek při stejných parametrech obrábění (výkon 70 % a posuv 80%). Můžeme si však všimnout velkých rozdílů mezi různými druhy polymerů. Z obr. 53 a 57 je zřejmé, že tavenina materiálu ABS a PS byla hrnuta vpřed ve směru obrábění laserovým paprskem. Na okraji obrobené drážky je velmi výrazný zbytek po nahrnutí taveniny a následném zatuhnutí. Tohoto jevu si můžeme všimnout také u materiálu PS. Naopak přechod do pevného skupenství bez známek nežádoucích efektů je pozorován u materiálů PMMA, POM a PP (obr. 55 - 57).

Obr. 60 - 67 zobrazuje fotografie povrchu obrobené plochy u materiálu PS při parametrech obrábění: výkon v rozmezí 10 - 80 % a posuv 50 %. Materiál nejlépe reagoval při výkonu 60 % a 70 % (obr. 65 a 66). Ale na okraji obrobené drážky si můžeme všimnout velkého zbytku resolidifikovaného materiálu. Také je zde viditelná dráha obrábění po přejezdu laserového paprsku. Při nižších i vyšších hodnotách nastavených parametrů je materiál resolidifikován bez zřetelných stop po posuvu laserového svazku. Toto je zřejmě zapříčiněno dlouhým časem působení laserové energie (nízký posuv) u nižších hodnot výkonu. Při vyšších hodnotách nastaveného výkonu je zřejmě energie laserového paprsku

příliš vysoká. Proto jsou optimální parametry obrábění pro tento materiál pro hodnoty výkonu do 30 % a co nejvyšší hodnoty posuvu (~ 100 %). Tím se zabrání nepřiměřeně velkému množství materiálu, který znovu přechází v pevnou fázi v obráběné drážce.

Fotografie uvedené na obr. 68 - 75 znázorňují materiál POM při parametrech obrábění: výkon v rozmezí 10 - 80 % a posuv 70 %. Zde můžeme jsou dobře viditelné stopy po přejezdu laserového paprsku. Tyto stopy se prohlubují s přibývajícím výkonem. Nežádoucí efekt zde nebyl pozorován ve větší míře.

Obr. 76 - 82 znázorňují fotografie obrobeného povrchu u materiálu PP při parametrech obrábění: výkon v rozmezí 10 - 80 % a posuv 70 %. Můžeme pozorovat, že materiál reaguje rozdílně na každou kombinaci parametrů. Asi do 40 % hodnoty výkonu lze pozorovat stopy po přejezdu laserového svazku. Od vyšších hodnot nastaveného výkonu už nejsou na povrchu materiálu tyto stopy viditelné nejsou. Povrch po ukončení obrábění vykazuje charakter resolidifikované taveniny. Větší výskyt nežádoucích efektů nebyl rovněž pozorován.

3.2 Závislost hloubky drážky a drsnosti obrobené plochy na parametrech obrábění laserového systému

Prakticky bylo zjištěno, že hloubka obrobené drážky se lineárně zvyšuje se stoupajícími hodnotami výkonu u každé konkrétně nastavené hodnoty posuvu. Největší hloubka je u nízkých hodnot posuvů. Tato skutečnost byla pozorována u všech materiálů. Největší hloubka drážky byla změřena u materiálů PS a PMMA. Směrnice přímek a koeficienty korelace u graficky prezentovaných výsledků poskytují informace o charakteru závislosti hloubky drážky na nastaveném výkonu za daného posuvu. Pro přesné řízení úběru materiálu (přesnou hloubku drážky) využíváme hodnoty směrnice (k). Ta nám udává informaci o hloubce drážky při zvýšení výkonu o určitý počet procent. Koeficient korelace udává přibližnou kvalitu lineární závislosti (srovnáváno s $R^2=1$). U materiálu PMMA klesá koeficient korelace se zvyšujícím se posuvem. U všech materiálů se blíží koeficient korelace jedné. Kvalitu závislosti však ovlivňuje mnoho dalších aspektů měření (počet měřených bodů, charakter dat a podobně).

U vzorků č. 1 (PP), č. 2 (PA 6) a č. 3 (POM) bylo možné měřit pouze drsnost podélnou (rovnoběžně se směrem obrábění). To způsobilo jisté nepřesnosti měření. Charakter drsnosti obrobené plochy je obvykle měřen ve směru příčném, tj. směru kolmém na směr obrábění. Důvodem byla šířka obrobené drážky, která byla pouze 2 mm. Pouze u vzorku č. 7 (PMMA) bylo měření provedeno i ve směru příčném, jelikož rozměry obrobených drážek byly 10 x 10 mm. U vzorku č. 4 (ABS) a č. 5 (PS) se nepodařilo změřit drsnost obrobené plochy z důvodu velké nerovnosti obrobené drážky (způsobené nerovnoměrnou resolidifikací taveniny v drážce). U vzorku č. 7. (PMMA) hodnoty parametrů drsnosti stoupají se zvyšujícími se hodnotami výkonu při daném posuvu, toto se však děje jen při měření drsnosti příčné. Při měření drsnosti podélné pozorujeme tento jev jen do hodnoty výkonu asi 80 %, potom hodnota parametrů drsnosti klesá. U ostatních materiálů hodnoty parametrů drsnosti velmi kolísají, pravděpodobně z důvodů nepřesného nastavení směru pojezdu hrotu měřicího přístroje.

Šířka obrobené drážky se téměř nemění u žádné kombinace parametrů.

3.2.1 ABS

Materiál ABS lépe reaguje na laserové záření za nastavení rychlejšího posuvu a velmi nízkých hodnot výkonu (max. do 15%). Dle vizuálního hodnocení byla nejvhodnější kombinace výstupních parametrů laserového systému: výkon 10% a posuv 50%. Při posuvu 70% a 100% je efektivní zvýšit výkon, ale maximálně do 15% hodnoty. Od vyšších hodnot výkonu je u tohoto materiálu možné pozorovat výrazný nežádoucí efekt - rychlé resolidifikace taveniny v obráběné drážce. Energie laserového svazku je příliš vysoká a materiál nemá dostatek času ji absorbovat.

Měření drsnosti obrobené plochy nebylo u tohoto materiálu možné provést z důvodu nestejnoměrného povrchu obrobené drážky.

Závislost hloubky drážky na nastavených parametrech (P, f) vykazuje lineární průběh. Největší hloubka drážky byla naměřena u nejnižšího posuvu (50%). U hodnoty posuvu 50% a výkonu 80% byla maximální hloubka drážky 206 μm , u 70% posuvu a výkonu 80% byla maximální hodnota hloubky drážky 127 μm a u 100% posuvu a výkonu 80% byla maximální hloubka drážky 101 μm .

Materiál ABS se dá obrábět za optimalizovaných parametrů, tj. za nízkého výkonu při vysokém posuvu. Styrenové polymery (v našem případě ABS a PS) mají nižší teplotní odolnost, hodnoty $c_p = 1,3 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda = 16 - 40 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Tyto vlastnosti se mohou podílet při přechodu taveniny v tuhou fázi.

3.2.2 PA 6

Jelikož u tohoto materiálu nedochází k žádným nežádoucím efektům, mohou se optimální parametry nastavení laserového systému pohybovat v širokém rozmezí hodnot posuvu a lze použít i vyšších výkonů při dosažení dobré kvality obrobené plochy. Tato nastavení výstupních parametrů laserového systému se mohou libovolně měnit podle požadovaných vlastností obrobené plochy, podle kvantitativních požadavků výroby a podobně.

Hodnoty parametru R_a při měření drsnosti obrobené plochy se zvyšovaly s rostoucím výkonem. Nejvyšší hodnota R_a byla u nejnižší hodnoty posuvu (50 %) a nejvyššího výkonu. Hodnoty parametrů v tabulkách kolísají z důvodů uvedených výše, ale v zásadě lze poznamenat, že se zvyšujícím se výkonem a snižujícím se posuvem rostou hodnoty parametrů charakterizující drsnost povrchu. Hodnoty R_a se u PA6 pohybovaly kolem $1,2 \mu\text{m}$.

Maximální hloubka drážky u kombinace parametrů: výkon 80 % a posuv 50 % byla naměřena $145 \mu\text{m}$, u výkonu 80 % a posuvu 70 % byla maximální hodnota hloubky drážky $93 \mu\text{m}$ a u výkonu 80 % a posuvu 100 % byla maximální hloubka drážky $34 \mu\text{m}$. PA je velmi vhodným materiálem pro laserové obrábění, což může být vysvětleno jeho vysokým stupněm krystalinity, H-můstky. Jeho hodnoty $c_p = 1,7 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda = 0,17 - 0,30 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ se příliš neliší od styrenových polymerů, ale reaguje na laserové záření lépe.

3.2.3 PS

Zejména při vyšších hodnotách výkonů dochází u PS k nepřiměřeně velkému přechodu materiálu v obráběné drážce znovu do pevné fáze. (nežádoucí efekt, viz kapitola 3. 1).

Závislost hloubky obrobené drážky na výkonu vykazuje lineární charakter, s rostoucím výkonem se hloubka drážek zvětšuje, největší hloubka drážky byla naměřena u nejnižšího posuvu. U hodnoty posuvu 50% a výkonu 80% byla maximální hloubka drážky 238 μm , u 70% posuvu a výkonu 80% byla maximální hodnota hloubky drážky 197 μm a u 100% posuvu a výkonu 80% byla maximální hloubka drážky 76 μm .

Drsnost povrchu obrobené plochy nebylo možné zkoumat z důvodu resolidifikace taveniny v obrobené drážce. PS je třeba obrábět za nízkých hodnot výkonu s maximálním posuvem.

3.2.4 PP

Hloubku drážky nebylo možné u PP změřit z důvodu malé rozlišovací schopnosti použitého optického mikroskopu. Můžeme však předpokládat, že se hloubka drážky bude zvyšovat se stoupajícími hodnotami výkonu při daném posuvu.

Od hodnot výkonu 50 % je možné pozorovat výskyt nežádoucích efektů, ovšem ne v takové míře jako u ABS a PS. Tomu jevu je možné předejít vhodnou volbou kombinace nižších výkonů a vyšších posuvů. Optimální je použít nastavení nejvyššího posuvu 100 % a výkonu 70 %. S touto kombinací parametrů materiál reaguje velmi dobře.

Také hodnoty parametru R_a u měření drsnosti obrobené plochy v zásadě lineárně rostou, pohybují se v průměru okolo 1,6 μm . Tento materiál je rovněž velmi vhodný materiál pro různé metody laserového obrábění, což může být částečně způsobeno hodnotami isotakticity, molekulové hmotnosti, stupni polydisperzity konkrétního typu polymeru ($c_p = 2 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda = 0,2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

3.2.5 POM

Tento materiál taktéž nevykazoval patrné nežádoucí efekty. Reaguje dobře na široké rozmezí rychlostí posuvu i výkonů, což je velká výhoda pro technologické aplikace.

Hloubka drážky opět stoupá se zvyšujícím se výkonem u daného posuvu. Při posuvu 50 % a výkonu 80 % byla maximální hloubka drážky 207 μm . Při 70 % posuvu a výkonu 80 % byla maximální hodnota hloubky drážky 137 μm a u 100 % posuvu a výkonu 80 % byla maximální hloubka drážky 94 μm .

U posuvu 50 % a 70 % se průměrné hodnoty parametru drsnosti R_a pohybovaly kolem 0,9 μm . U posuvu 100 % pak byla hodnota parametru R_a 2 μm , což je zřejmě způsobeno chybou měření v důsledku nerovnoměrného povrchu po zatuhnuté polymerní tavenině (hodnota R_a parametru by měla klesat se stoupajícím posuvem). POM je také velmi vhodným materiálem pro laserové obrábění, má vysoký stupeň krystalinity a hodnoty $c_p = 1,4 \text{ kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda = 0,25 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

3.2.6 PMMA

Díky své transparentnosti a vlastnostem je PMMA ideálním materiálem pro mikroobrábění laserem a samozřejmě pro další aplikace mikroobrábění. Z tohoto důvodu bylo u tohoto materiálu provedeno více experimentálních zkoušek na CO_2 laseru MERCURY L-30.

Fotografie obrobených drážek u vzorku č. 1 znázorňují všechny obrobené drážky (viz obr. 33 - 52) při použití 70% a 100% posuvu a rozmezí výkonu od 10 - 100%. U nastavených parametrů výkonu 10 % a posuvu 100 % je možné pozorovat, že nastavený výkon byl velmi nízký vzhledem k vysokému posuvu a drážka nebyla dostatečně obrobená (obr. 33). Při zvýšení výkonu na 20 % je viditelný rozdíl mezi oběma stupni (obr. 34). Z obr. 43 je vidět, že snížením hodnoty posuvu na 70 % je hodnota výkonu 10 % dostatečná pro obrobení drážky v požadované kvalitě. Rovněž se stoupajícími hodnotami výkonu zvyšuje hloubka obrobené drážky. Vhodným nastavením parametrů lze tudíž velmi dobře regulovat přesně definovanou hloubku drážky pro konkrétní aplikaci. U fotografií si dále můžeme všimnout, že okraje drážek jsou značně nestejněměrné. Toto je nejvýraznější u okraje ve směru obrábění drážky. Právě v tomto směru lze dobře pozorovat dráhu

paprsku a jeho zpětného pohybu. Použitým laserovým systémem tedy není možné vyrobit přesné zakončení okrajů obráběných drážek (či jiných tvarů). Přesného tvaru docílíme pouze použitím kontury (viz obr. 85)

Drsnost materiálu byla zkoumána měřicími zařízeními SJ-30. Drsnost byla měřena pouze u vzorku č. 7, jelikož zde mohla být změřena jak drsnost podélná, tak i rozhodující drsnost příčná. Hodnoty parametrů drsnosti stoupají se zvyšujícími se hodnotami výkonu při daném posuvu, toto se však děje jen při měření drsnosti příčné. Při měření drsnosti podélné pozorujeme tento jev jen do hodnoty výkonu asi 80 %, potom hodnota parametrů drsnosti klesá, pravděpodobně z důvodů nepřesného nastavení směru pojezdu hrotu měřicího přístroje. Můžeme si všimnout lineární závislosti parametru R_a na nastaveném výkonu při daném posuvu. Čím je posuv nižší, tím jsou hodnoty R_a vyšší. Při výkonu 10 % a posuvu

70 % až 100 % je povrch obrobené plochy méně členitý a nejsou zde velké rozdíly mezi prohlubněmi a vrcholy. Při stejném výkonu, avšak malých posuvech jsou již tyto rozdíly viditelné. Při výkonu 100 % je už zřejmý velký rozdíl ve výstupcích a prohlubních dané plochy (což charakterizuje právě parametr R_a), a to zejména při nízkých hodnotách posuvů. Šířka oblasti, ve které působila laserová energie je přibližně 50 μm (viz obr. 84) a při vyšším výkonu je hloubka po posuvu svazku větší. To je důvodem zvýšení hodnot parametru R_a .

U nastaveného výkonu 50 % a posuvu 100 % je už zřetelná dráha po posuvu laserového svazku, také si můžeme všimnout vlnitosti obrobeného povrchu.

Můžeme tedy konstatovat, že volbou vhodné kombinace parametrů lze dosáhnout takové kvality obrobené plochy, jaká je požadována pro konkrétní aplikaci výrobku.

3.3 Kvalita obrábění CO₂ laserem

V případě využívání CO₂ laseru při mikroobrábění se hledá optimum mezi výstupními parametry laserového systému, tj. výkonem a posuvem. Vhodnou volbou těchto parametrů lze dosáhnout takové kvality obrobené plochy, jakou konkrétní aplikace výrobku vyžaduje.

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsou zkoumány mikrostruktury v různých typech polymerních materiálů obrobené pomocí CO₂ laseru. Experimenty byly provedeny na typu CO₂ laseru, který je běžně využíván ke komerčnímu gravírování reklamních předmětů. Vhodnou kombinací nastavených výstupních parametrů (výkonu laserového paprsku a rychlosti posuvu) laserového systému je možné v polymeru vytvořit mikrostrukturu již během několika sekund. Byly navrženy optimální parametry laserového systému, které zaručují obrobění zkoumaných typů polymerů v požadované kvalitě (hloubka, drsnost). Princip je založen na nakreslení požadovaného tvaru mikrostruktury v programu Corel Draw v různých odstínech šedi (bílá až černá). V tomto případě byly obroběny drážky navržené pouze v barvě černé. Nastavení různých odstínů a obrábění 3D mikrostruktur může být návodem pro pokračování v této práci. Použití CO₂ laseru zaručuje nižší provozní náklady, avšak horší kvalitu kontur obrobených mikrostruktur. Pro tyto účely se běžně využívají UV a excimerové lasery.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

c	rychlost světla ve vakuu [ms^{-1}]
d	hloubka drážky [μm]
f	posuv udávaný v [%]
h	Planckova konstanta [Js]
p_{dot}	dotlak [MPa]
$p_{\text{vstř.}}$	Vstřikovací tlak [MPa]
t_{dot}	čas dotlaku [s]
t_{ch}	čas chlazení [s]
k	vlnové číslo
a_0	poloměr svazku
q	hustota výkonu laserového svazku
q_0	hustota výkonu ve středu svazku
r_1, r_2	poloměry zakřivení zrcadel rezonátoru
f	ohnisková dálka čočky
A	intenzita vlnění.
E	intenzitu elektromagnetického pole
E_0	intenzita elektromagnetického pole ve středu svazku
L	je jejich vzájemná vzdálenost
A	absorpce
Ar laser	argonový laser
$\text{C}=\text{H}$	nenasycena vazba uhlík – vodík
$\text{C}-\text{C}$	nasycena vazba uhlík – uhlík
$\text{C}-\text{H}$	nasycena vazba uhlík – vodík
E_A	energie absorbovaná materiálem [J]

E_c	tepelné ztráty kondukcí [J]
E_p	energie jednoho fotonu [J]
E_{rad}	tepelné ztráty radiací [J]
$E_{s \rightarrow m}$	energie pro zahřátí materiálu v pevném stavu na teplotu tání [J]
H_r	energie vzniklá chemickými reakcemi [J]
ΔH_v	energie potřebná pro vypaření veškeré taveniny [J]
Hs-Ne laser	helium neodymový laser
P	výkon udávaný v [%]
R	hloubka proniknutí záření [μm]
R_a	střední aritmetická úchylka [μm]
R_z	maximální výška profilu [μm]
T_c	teplota formy [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
λ	vlnová délka záření laseru [μm]
λ_s	filtr k potlačení vlnitosti
γ	elektrická konduktivita materiálu [Sm^{-1}]
μ_r	relativní permeabilita materiálu [-]
ABS	akrylobutadienstyren
ASA	akrylonitril styren akrylát
CD	compact disc player (kompaktní disk)
CVD	(chemical vapor deposition) nanášení chemikálií v tenkých vrstvách

CW	continual wavelength (kontinuální vlnové záření)
DVD	digital versatile disc (univerzální digitální disk)
HDPE	vysokohustotní polyetylen
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)
LIGA	(LI-X-ray lithography, G-for galvanic or electroplating, A-abformung) litografie, pokovování a tvarování
MEMS	(MicroElectroMechanical System) mikro-elektromechanické systémy
Micro EDM	(Micro Electro-Discharge Machining) miro-elektrovýbojové obrábění
Nd:YAG	neodymem (Nd^{+3}) dopovaný yttrito-hlinitým granátem
PA	polyamid
PC	polykarbonát
PMMA	polymethylmetakrylát
POM	polyoxometylen
PP	polypropylen
PS	polystyren
Q-switch	přepínač pulzů
TEA CO ₂ laser	Transversally Excited Atmospheric Pressure (příčně buzený laser za atmosférického tlaku)
TEM ₀₀	Transverse Electromagnetic Mode (laserový operační mód)
UV	ultrafialové záření

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1) Maňková, I: Progresivně technologie, Strojnická fakulta TU Košice - edice vědecké a odborné literatury, ISBN 80-7099-430-4, Viena, Košice 2000
- 2) www.pf.jcu.cz <<http://www.pf.jcu.cz>>
- 3) <<http://space.fjfi.cvut.cz>>
- 4) <<http://www.mendelova.cz>>
- 5) <<http://jenda1.mysteria.cz>>
- 6) <<http://slon.fsv.cvut.cz>>
- 7) <<http://www.kovotrade.cz>>
- 8) <<http://www.axes.cz>>
- 9) <<http://www.karnedtools.cz>>
- 10) <<http://www.laser-tech.cz>>
- 11) <<http://www.plslaser.cz>>
- 12) GÖRFÖLOVÁ, R: Porovnávání kvality laserového a laserového obrábění polymerů (Diplomová práce) FT UTB ve Zlíně, 2004
- 13) HENDRYCHOVÁ, B: Výzkum mikroobrábění polymerních materiálů laserem (Diplomová práce) FT UTB ve Zlíně, 2003
- 14) <<http://www.pascal.fjfi.cvut.cz>>
- 15) <<http://www.fremach.cz/technologie>>
- 16) <<http://www.laser-popis.cz/tech.thm>>
- 17) <<http://www.elektrorevue.cz/clanky>>
- 18) <<http://www.physicsdaily.com>>
- 19) <<http://wes.feec.vutbr.cz>>
- 20) www.altec.com <<http://www.altec.com>>
- 21) <<http://repairfag.ece.erexel.edu>>

22) ŠMÍD, Jiří. Laser a laserové technologie do roku 2000. Průmyslové spektrum. 1999, č. 11, s. 10 – 12

23) KOSINOVÁ, Radka. Účetnictví v praxi. 2005, č. 2, s. 9

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní rozdělení nekonvenčních metod obrábění (1)	8
Obr. 2. Vlnové délky různých typů laserů (2)	10
Obr. 3. Schéma laseru (4)	11
Obr. 4. Schéma rezonátoru (13).....	11
Obr. 5. Srovnání světla vyzařovaného laserem se světlem žárovky (10)	12
Obr. 6. Příčné struktury svazků zachycené CCD kamerou (4).....	12
Obr. 7. Vybrané módy TEM s a) osou, b) středovou symetrií (18).....	13
Obr. 8. Laserový mód TEM_{00} a TEM_{01} (21).....	13
Obr. 9. Profil fokusovaného laserového svazku v jeho ohnisku (17).....	14
Obr. 10. Divergence laserového svazku (21).....	16
Obr. 11. Divergence a fokusace laserového svazku v základním módu TEM_{00} (19).....	16
Obr. 12. Kontinuální a pulsní režim provozu laseru (18).....	21
Obr. 13. Interakce laserového paprsku s materiálem (13)	30
Obr. 14. Hlavní části značkovacího optického ramene (14).....	34
Obr. 15. Schéma laserové optiky u maskovací metody (13)	35
Obr. 16. Schéma laserové optiky u popisovací metody vychylováním svazku (20).....	35
Obr. 17. Laserový popis sublimací (13)	38
Obr. 18. Laserový popis karbonizací (13)	38
Obr. 19. Příklad popisu odstraněním vrstvy materiálu (15)	39
Obr. 20. . CO ₂ laser MERCURY L-30	47
Obr. 21. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f), Vzorek č. 2	56
Obr. 22. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f), Vzorek č. 3	56
Obr. 23. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f), Vzorek č. 4	56
Obr. 24. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f), Vzorek č. 5	57
Obr. 25. Lineární závislost hloubky drážky d na nastavených parametrech obrábění (výkon P, posuv f), Vzorek č. 6	57

Obr. 26. Závislost hloubky drážek d na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA).....	59
Obr. 27. Závislost střední aritmetické úchylky R_a na výkonu P pro posuv 50 %.....	61
Obr. 28. Závislost střední aritmetické úchylky R_a na výkonu P pro posuv 70 %.....	62
Obr. 29. Závislost střední aritmetické úchylky R_a na výkonu P pro posuv 100 %.....	62
Obr. 30. . Závislost Střední aritmetické úchylky R_a na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA), směr pojezdu hrotu rovnoběžný se směrem obrábění.....	64
Obr. 31. Závislost Střední aritmetické úchylky R_a na nastavených parametrech obrábění (výkon P , posuv f) pro vzorek č. 7 (PMMA), směr pojezdu hrotu příčný.....	66
Obr. 32. Parametry obrábění: výkon 10 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 33. Parametry obrábění: výkon 20 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 34. Parametry obrábění: výkon 30 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 35. Parametry obrábění: výkon 40 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 36. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 37. Parametry obrábění: výkon 60 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 38. Parametry obrábění: výkon 70 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 39. Parametry obrábění: výkon 80 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 40. Parametry obrábění: výkon 90 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 41. Parametry obrábění: výkon 100 %, posuv 100 % pro vzorek č. 6.....	67
Obr. 42. Parametry obrábění: výkon 10 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 43. Parametry obrábění: výkon 20 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 44. Parametry obrábění: výkon 30 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 45. Parametry obrábění: výkon 40 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 46. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 47. Parametry obrábění: výkon 60 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 48. Parametry obrábění: výkon 70 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 49. Parametry obrábění: výkon 80 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68

Obr. 50. Parametry obrábění: výkon 90 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 51. Parametry obrábění: výkon 100 %, posuv 70 % pro vzorek č. 6.....	68
Obr. 52. Konec drážky u vzorku č. 4 při výkonu 70% a posuvu 80 %.....	68
Obr. 53. Konec drážky u vzorku č. 2 při výkonu 50 % a posuvu 10 %	69
Obr. 54. Konec drážky u vzorku č. 6 při výkonu 70 % a posuvu 80 %	69
Obr. 55. Konec drážky u vzorku č. 3 při výkonu 70 % a posuvu 80 %	69
Obr. 56. Konec drážky u vzorku č. 1 při výkonu 70 % a posuvu 80 %	69
Obr. 57. Konec drážky u vzorku č. 5 při výkonu 70 % a posuvu 80 %	70
Obr. 58. Zobrazení drážky u vzorku č. 4 při výkonu 50% a posuvu 10 %	70
Obr. 59. Zobrazení drážky u vzorku č. 6 při výkonu 50% a posuvu 10 %	70
Obr. 60. Parametry obrábění: výkon 10 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 61. Parametry obrábění: výkon 20 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 62. Parametry obrábění: výkon 30 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 63. Parametry obrábění: výkon 40 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 64. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 65. Parametry obrábění: výkon 60 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 66. Parametry obrábění: výkon 70 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 67. Parametry obrábění: výkon 80 %, posuv 50 % pro vzorek č. 5	71
Obr. 68. Parametry obrábění: výkon 10 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 69. Parametry obrábění: výkon 20 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 70. Parametry obrábění: výkon 30 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 71. Parametry obrábění: výkon 40 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 72. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 73. Parametry obrábění: výkon 60 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 74. Parametry obrábění: výkon 70 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72
Obr. 75. Parametry obrábění: výkon 80 %, posuv 70 % pro vzorek č. 3	72

Obr. 76. Parametry obrábění: výkon 10 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 77. Parametry obrábění: výkon 20 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 78. Parametry obrábění: výkon 30 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 79. Parametry obrábění: výkon 40 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 80. Parametry obrábění: výkon 50 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 81. Parametry obrábění: výkon 60 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 82. Parametry obrábění: výkon 70 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 83. Parametry obrábění: výkon 80 %, posuv 70 % pro vzorek č. 1	73
Obr. 84. Materiál PMMA vzorek č. 6 (20/70) a příslušná hodnota drsnosti obrobené plochy.....	74
Obr. 85. Obrobená drážka s konturou	74
Obr. 86. Návrh tvaru mikrostruktury.....	78

SEZNAM TABULEK

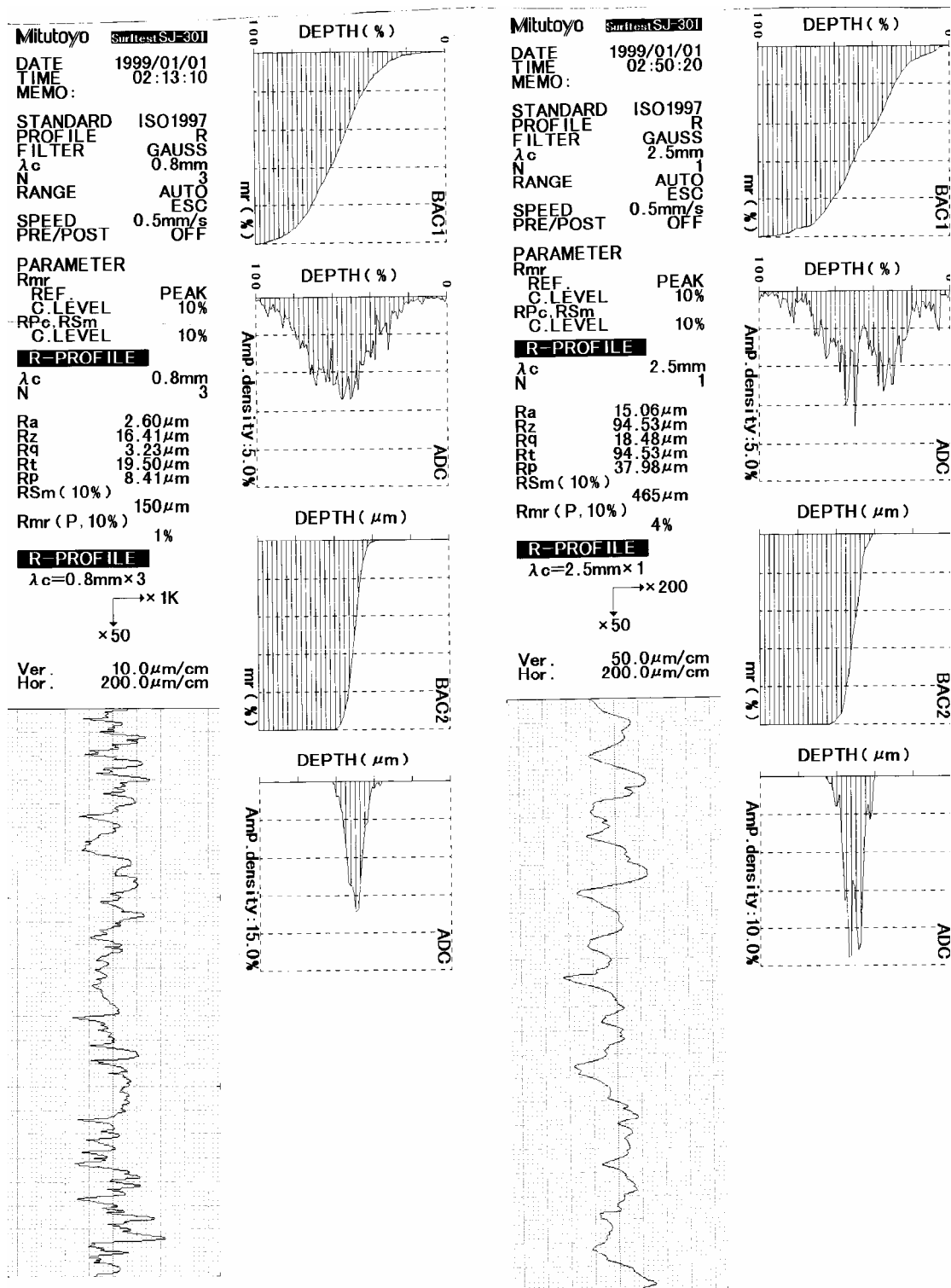
Tabulka I. Nejdůležitější používané typy laserů (základní údaje) (6).....	22
Tabulka II. Přehled některých vlastností polymerních materiálů (13)	31
Tabulka III. Vliv ohniska fokusační čočky na výstupní parametry u Nd:YAG laserů (2)..	35
Tabulka IV. Obecná popisovatelnost plastů	37
Tabulka V. Polymerní materiály použité pro experimenty.....	45
Tabulka VI. Technologické podmínky vstřikování zkušebních vzorků	46
Tabulka VII. Číselné označení jednotlivých vzorků	46
Tabulka VIII. Technické parametry CO ₂ laseru, typ MERCURY L-30	48
Tabulka IX. Technické parametry přístroje J-301	49
Tabulka X. Nastavené parametry obrábění pro vzorky č. 1, 2, 3, 4, 5, 6	50
Tabulka XI. Nastavené parametry obrábění pro vzorek č. 7	50
Tabulka XII. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 2	53
Tabulka XIII. . Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 3	53
Tabulka XIV. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 4	53
Tabulka XV. . Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 5	53
Tabulka XVI. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru, vzorek č. 6	54
Tabulka XVII. Regresní rovnice závislostí hloubky obrobené drážky na parametrech laserového systému (f, P), odečteno z graficky vyjádřených závislostí v programu EXCEL.....	54
Tabulka XVIII. Hloubka obrobené drážky (d) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru pro vzorek č. 7	58
Tabulka XIX. Regresní rovnice závislostí hloubky obrobené drážky na parametrech laserového systému (f, P), odečteno z graficky vyjádřených závislostí v programu EXCEL pro vzorek č. 7.....	59
Tabulka XX. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 1	60
Tabulka XXI. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 2.....	60
Tabulka XXII. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 3	61

Tabulka XXIII. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 7 - ve směru rovnoběžném se směrem obrábění	63
Tabulka XXIV. Parametry charakterizující drsnost obrobené plochy u vzorku č. 7 - ve směru kolmém na směr obrábění	65
Tabulka XXV. Optimální parametry laserového systému pro použité materiály.....	75
Tabulka XXVI. Sazby pro rovnoměrné odpisování	77
Tabulka XXVII. Doba potřebná k vyrobení navržené mikrostruktury.....	79

SEZNAM PŘÍLOH

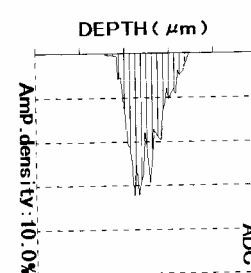
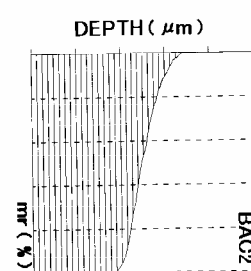
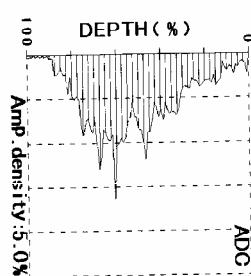
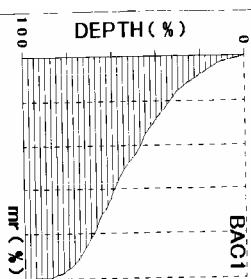
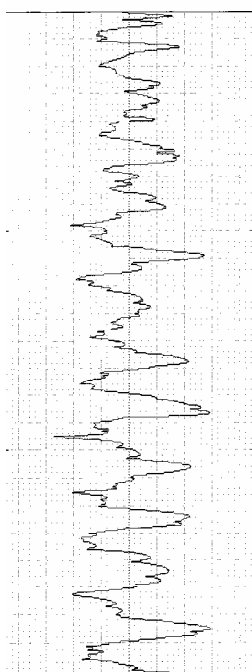
- P 1 : Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 20 %
- P 2 : Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 40 %
- P 3 : Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 60 %
- P 4 : Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 80 %
- P 5 : Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 100 %
- P 6 : Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 20 %
- P 7 : Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 40 %
- P 8 : Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 60 %
- P 9 : Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 80 %
- P 10 : Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 100 %
- P 11 : Vzorek č. 7, materiál PMMA

P 1: Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7
PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 20 %

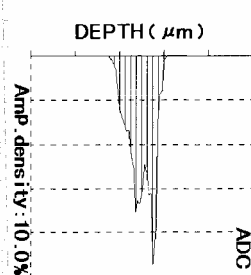
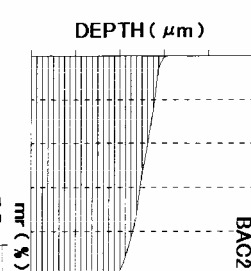
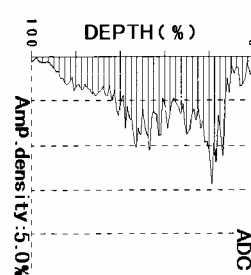
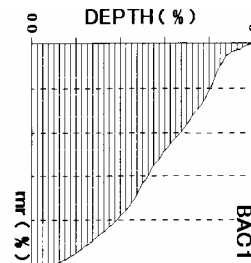
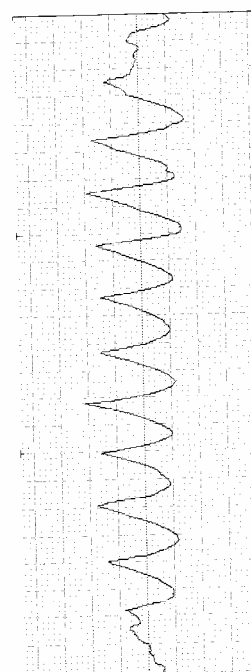


P 2: Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7
PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 40 %

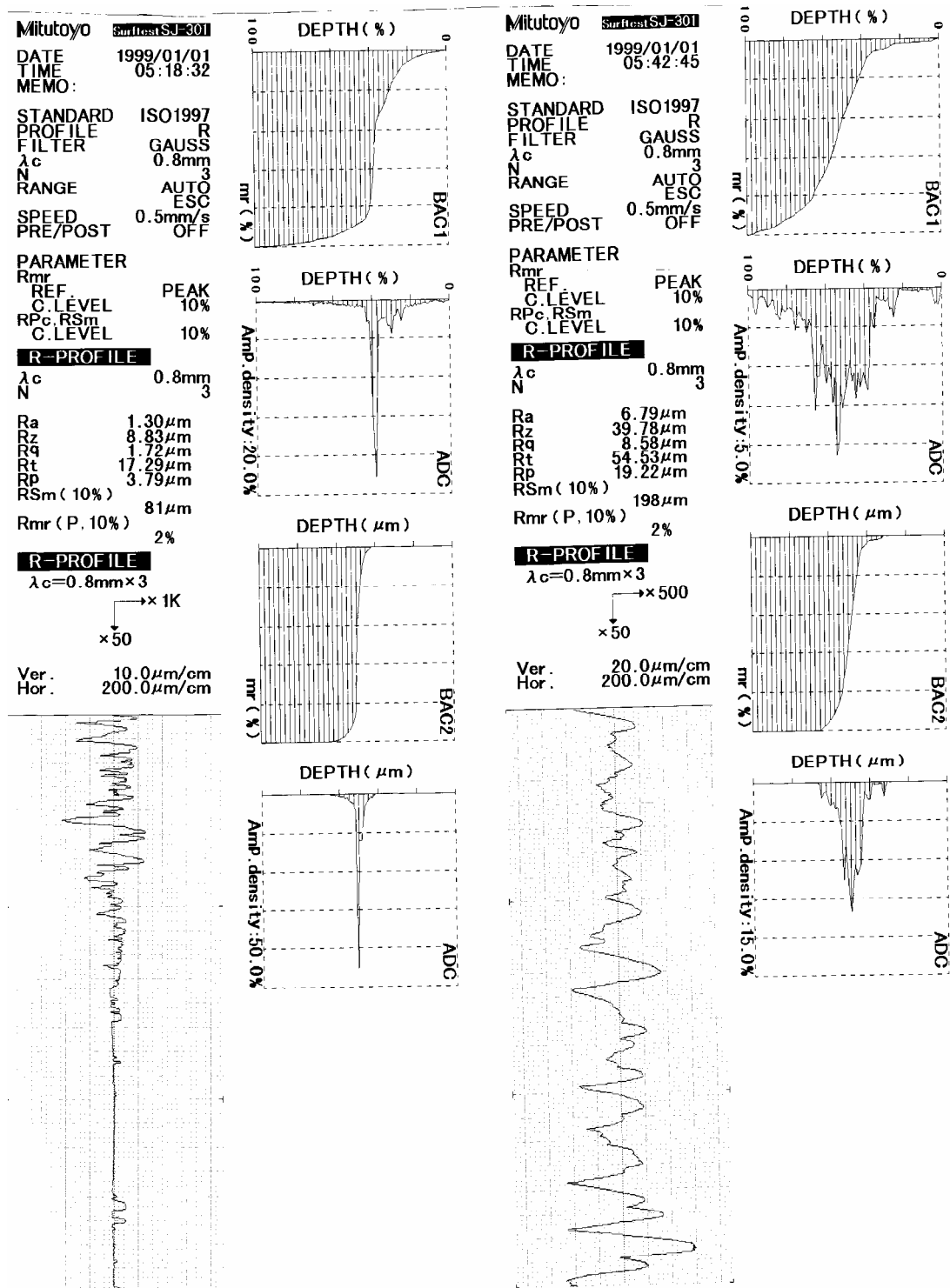
Mitutoyo Surftest SJ-301
DATE 1999/01/01
TIME 03:35:22
MEMO: $\frac{\pi}{4}$
STANDARD ISO1997
PROFILE R
FILTER GAUSS
 λ_c 0.8mm
N 3
RANGE AUTO
SPEED ESC
PRE/POST OFF
PARAMETER
Rmr REF PEAK
C.LEVEL 10%
R_{Pc}, R_{Sm} C.LEVEL 10%
R-PROFILE
 λ_c 0.8mm
N 3
Ra 4.60 μ m
Rz 24.29 μ m
Rq 5.50 μ m
Rt 28.30 μ m
Rp 12.74 μ m
R_{Sm} (10%) 180 μ m
Rmr (P, 10%) 3%
R-PROFILE
 $\lambda_c=0.8\text{mm} \times 3$
 $\times 1K$
 $\times 50$
Ver. 10.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



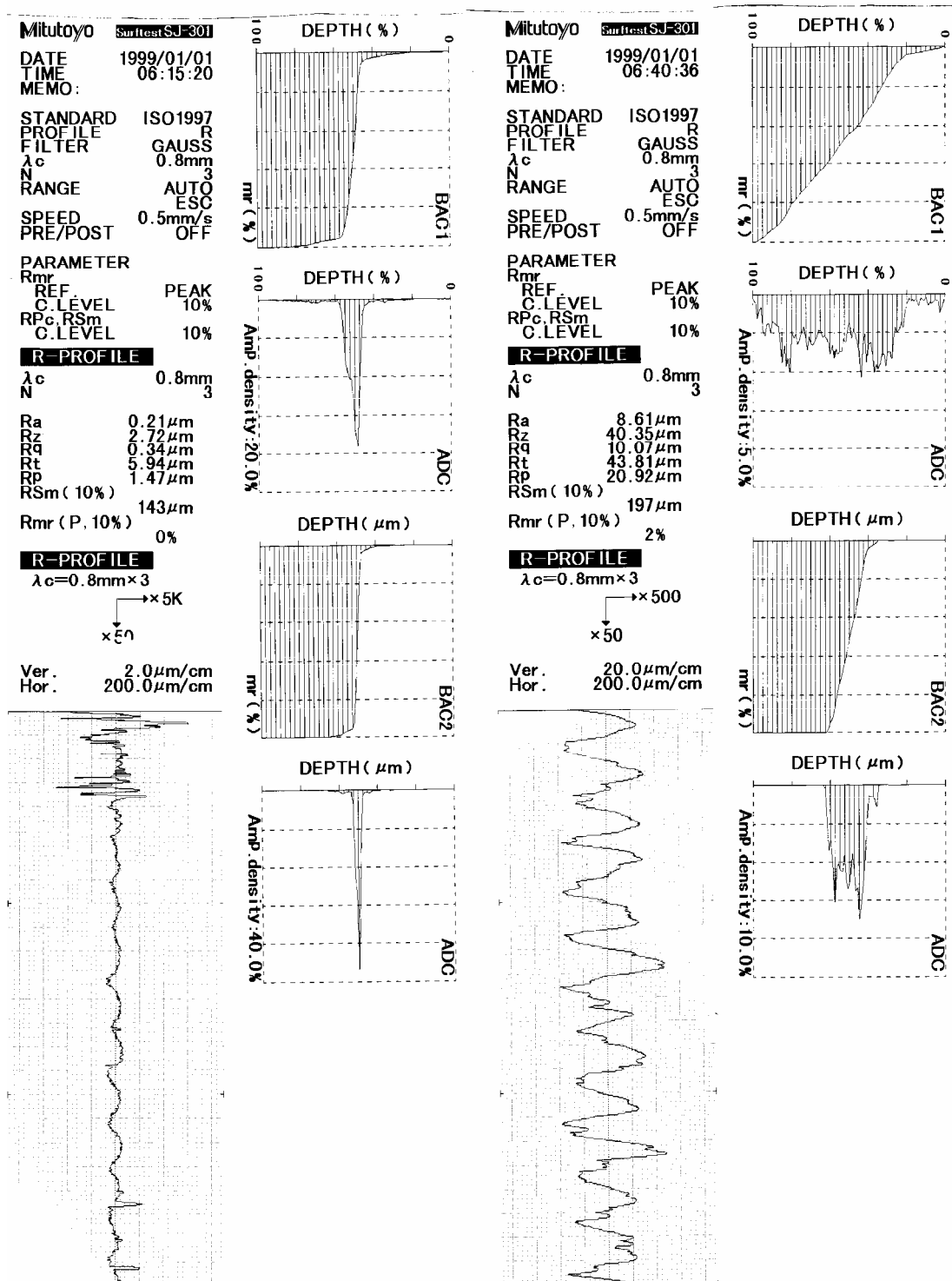
Mitutoyo Surftest SJ-301
DATE 1999/01/01
TIME 04:38:32
MEMO:
STANDARD ISO1997
PROFILE R
FILTER GAUSS
 λ_c 0.8mm
N 3
RANGE AUTO
SPEED ESC
PRE/POST OFF
PARAMETER
Rmr REF PEAK
C.LEVEL 10%
R_{Pc}, R_{Sm} C.LEVEL 10%
R-PROFILE
 λ_c 0.8mm
N 3
Ra 17.49 μ m
Rz 82.96 μ m
Rq 20.67 μ m
Rt 93.97 μ m
Rp 33.69 μ m
R_{Sm} (10%) 232 μ m
Rmr (P, 10%) 4%
R-PROFILE
 $\lambda_c=0.8\text{mm} \times 3$
 $\times 200$
 $\times 50$
Ver. 50.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



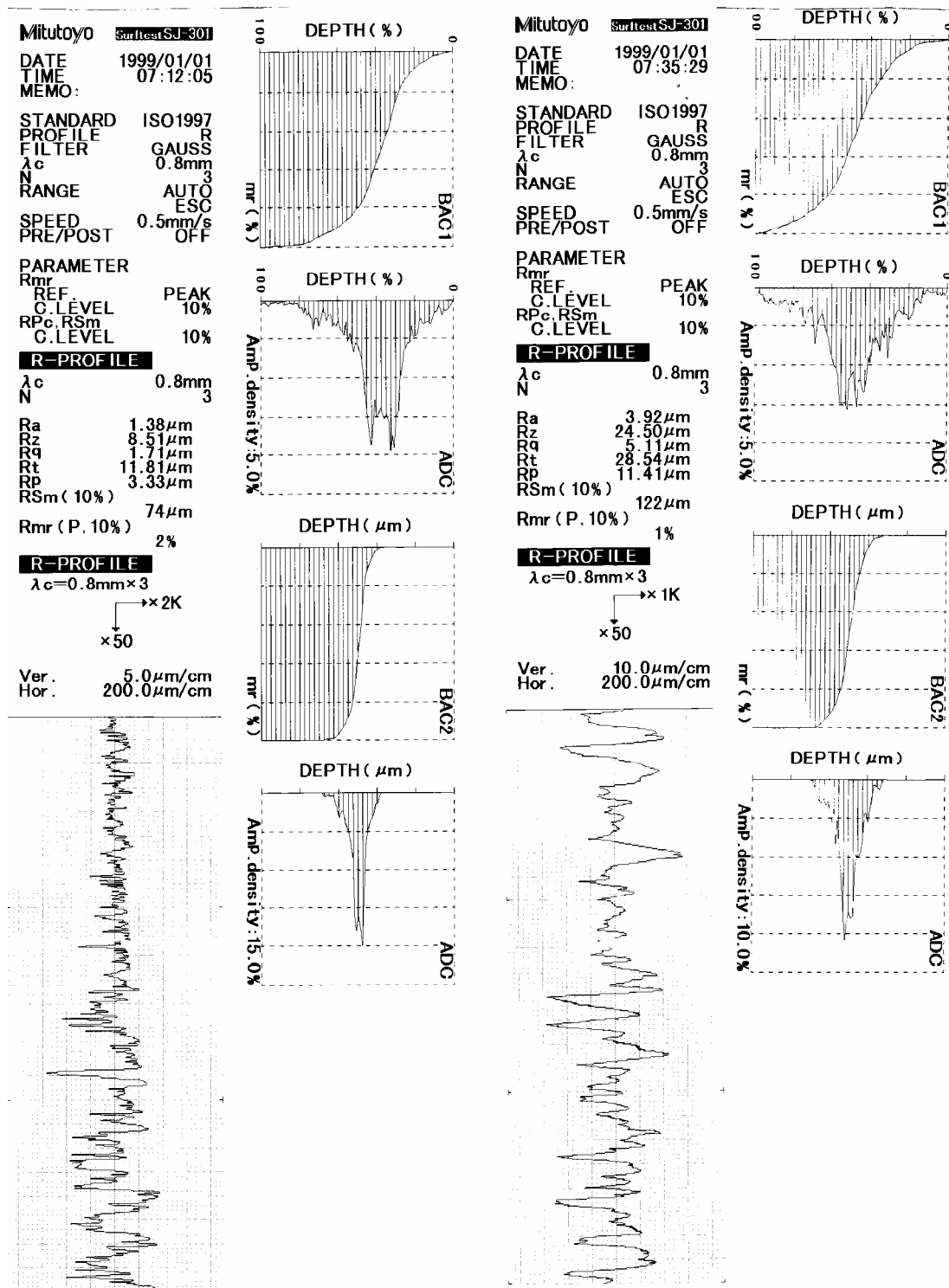
P 3: Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7
PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 60 %



P 4: Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7
PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 80 %

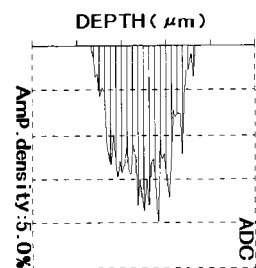
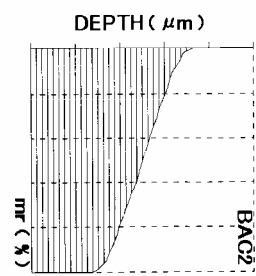
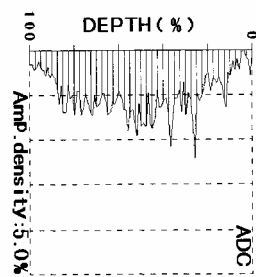
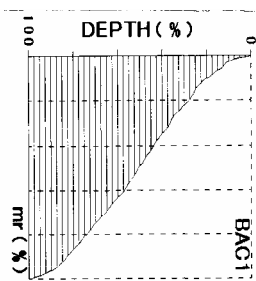
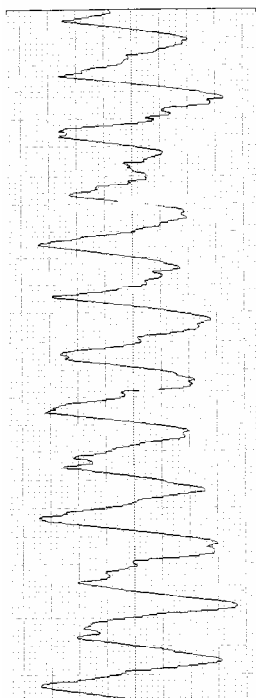


P 5: Ukázka grafického znázornění podélné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7
PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 100 %

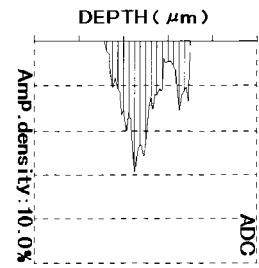
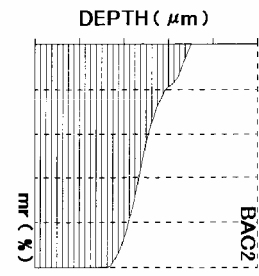
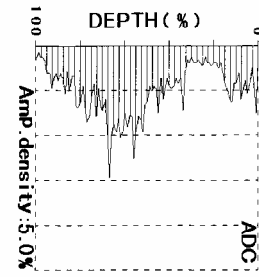
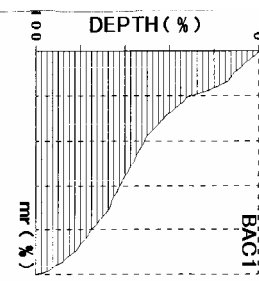
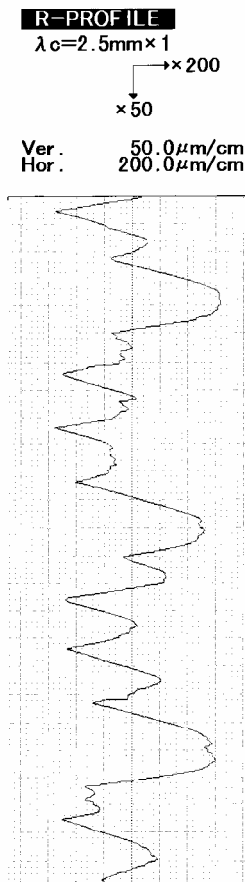


P 6: Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 20 %

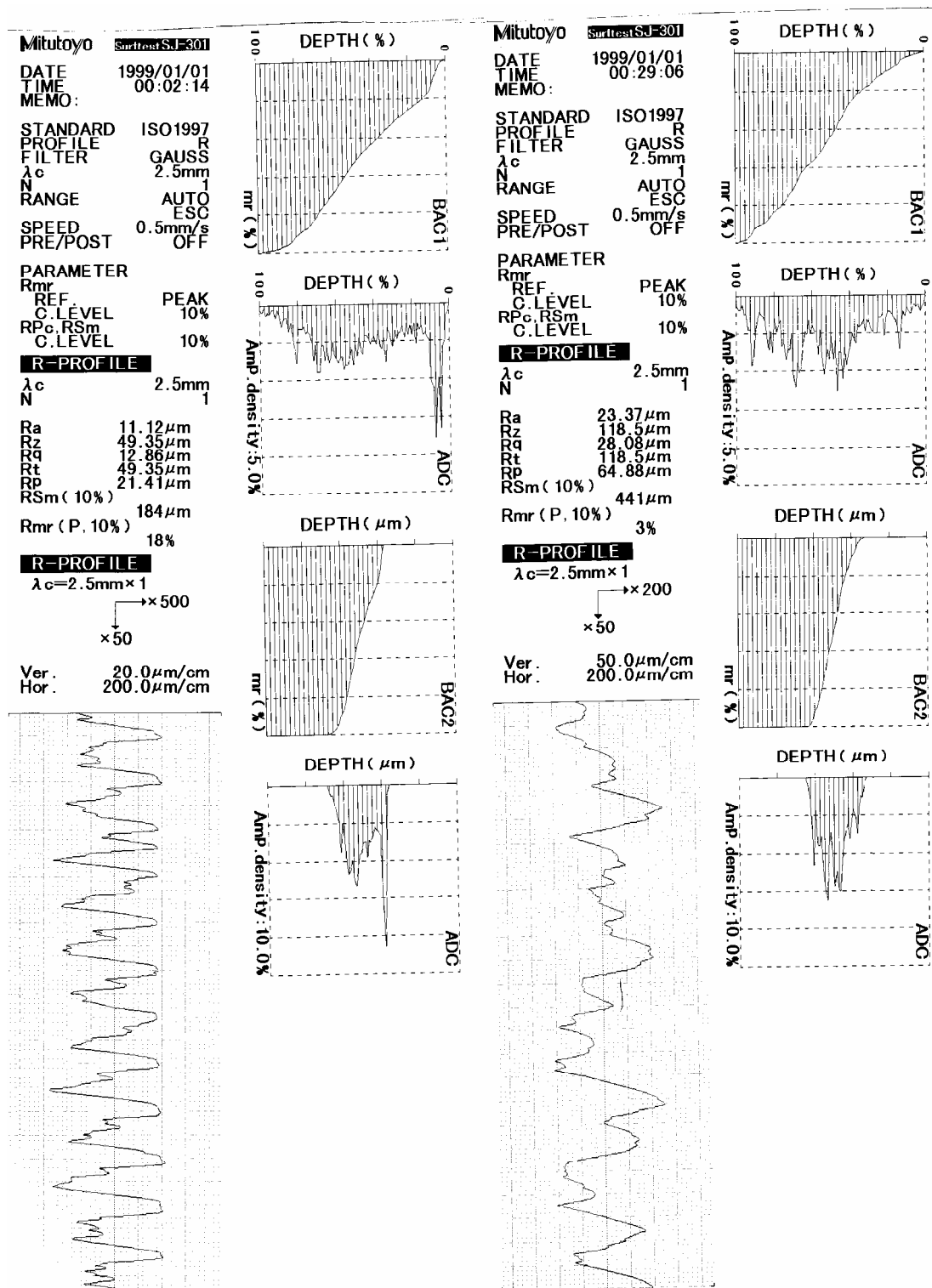
Mitutoyo Surftest SJ-301
 DATE 1999/01/01
 TIME 08:00:11
 MEMO:
 STANDARD ISO1997
 PROFILE R
 FILTER GAUSS
 λ_c 2.5mm
 N
 RANGE AUTO
 SPEED ESC
 PRE/POST OFF
 PARAMETER
 Rmr REF PEAK
 C.LEVEL 10%
 R_{Pc}, R_{Sm}
 C.LEVEL 10%
R-PROFILE
 λ_c 2.5mm
 N
 Ra 14.26 μ m
 Rz 72.33 μ m
 Rq 16.97 μ m
 Rt 72.33 μ m
 Rp 36.64 μ m
 R_{Sm} (10%) 203 μ m
 Rmr (P, 10%) 3%
R-PROFILE
 $\lambda_c=2.5\text{mm} \times 1$
 $\times 500$
 $\times 50$
 Ver. 20.0 μ m/cm
 Hor. 200.0 μ m/cm



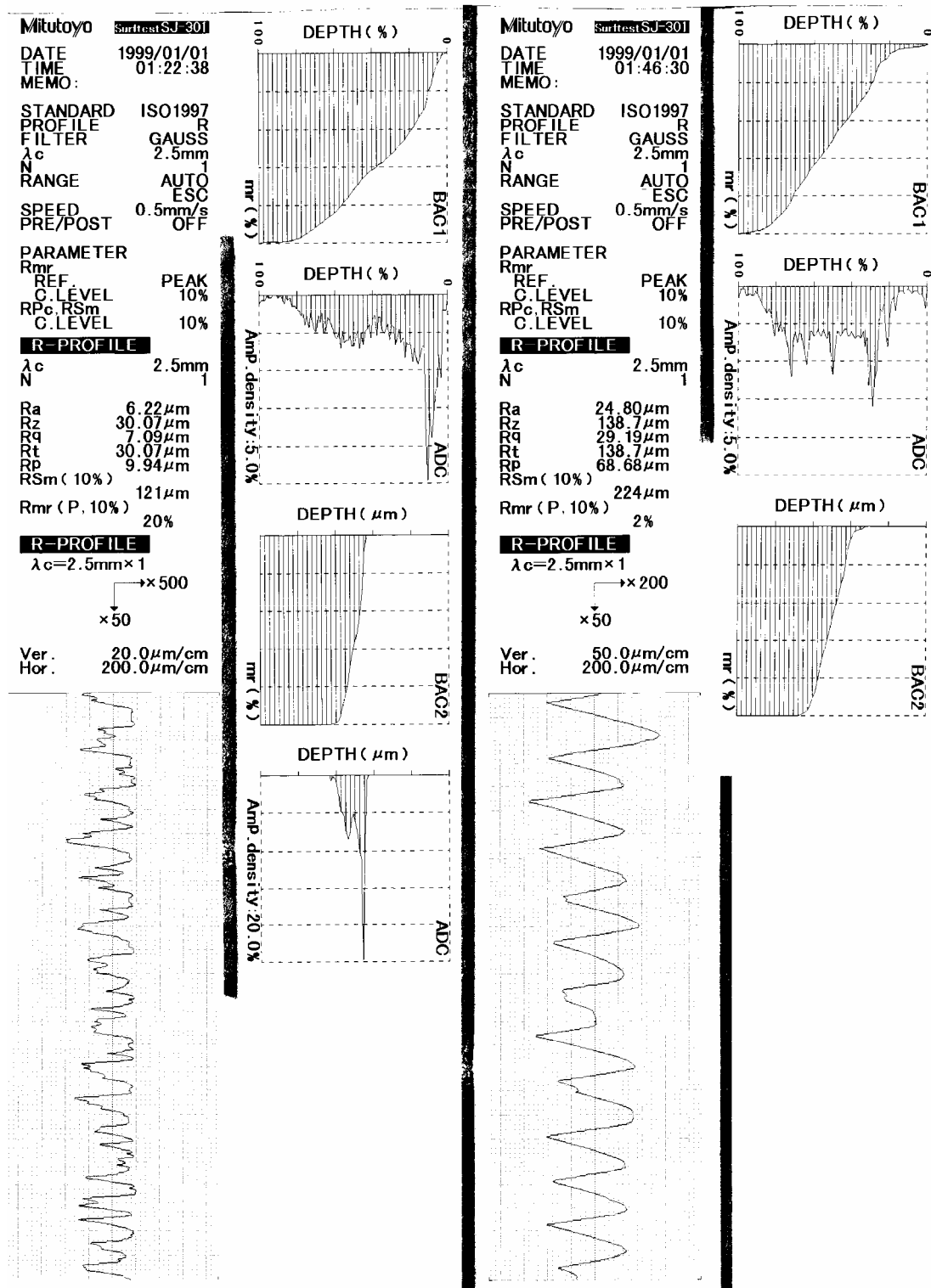
Mitutoyo Surftest SJ-301
 DATE 1999/01/01
 TIME 08:27:07
 MEMO:
 STANDARD ISO1997
 PROFILE R
 FILTER GAUSS
 λ_c 2.5mm
 N
 RANGE AUTO
 SPEED ESC
 PRE/POST OFF
 PARAMETER
 Rmr REF PEAK
 C.LEVEL 10%
 R_{Pc}, R_{Sm}
 C.LEVEL 10%
R-PROFILE
 λ_c 2.5mm
 N
 Ra 30.84 μ m
 Rz 149.6 μ m
 Rq 38.01 μ m
 Rt 149.6 μ m
 Rp 79.29 μ m
 R_{Sm} (10%) 520 μ m
 Rmr (P, 10%) 9%
R-PROFILE
 $\lambda_c=2.5\text{mm} \times 1$
 $\times 200$
 $\times 50$
 Ver. 50.0 μ m/cm
 Hor. 200.0 μ m/cm



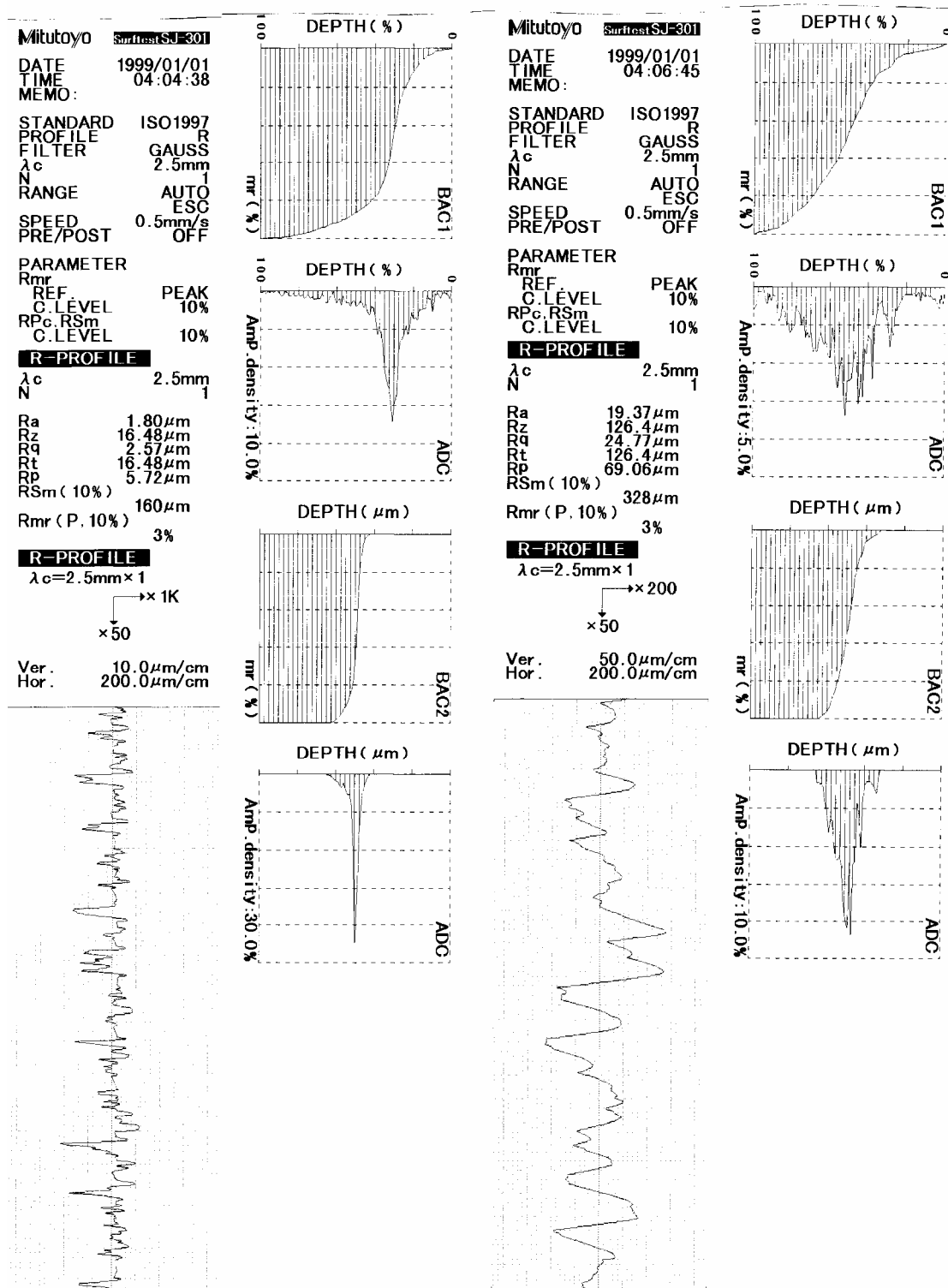
P 7: Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 40 %



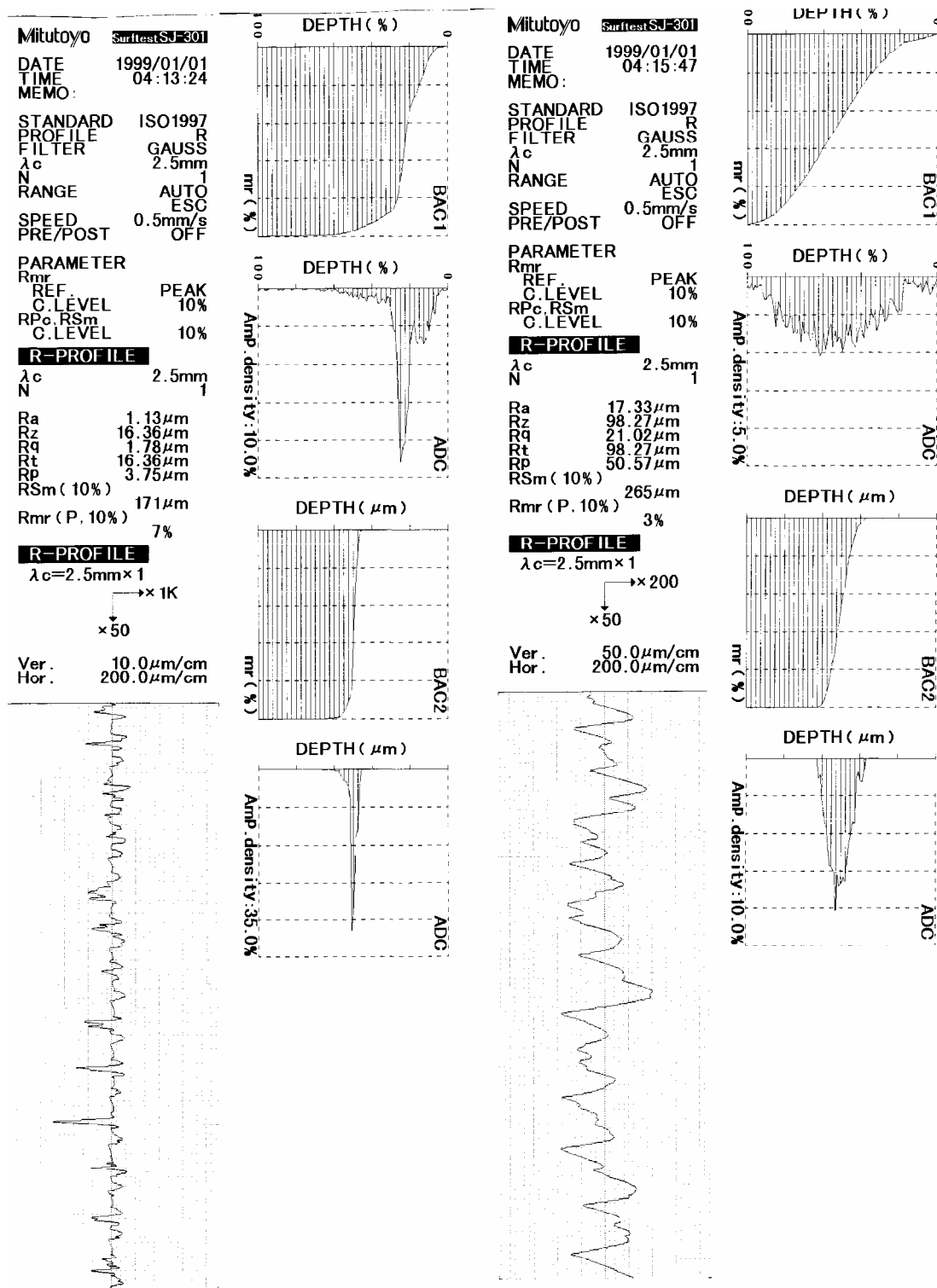
P 8: Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 60 %



P 9: Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 80 %



P 10: Ukázka grafického znázornění příčné drsnosti, přístroj SJ-301, vzorek č. 7 PMMA, výkon 10 %, 100 % a posuv 100 %



P 11: Vzorek č. 7, materiál PMMA

