

Vliv ohniskové vzdálenosti na šířku řezu při laserovém obrábění polymerních materiálů

Bc. Peter Beňačka

Diplomová práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Peter Beňačka**

Osobní číslo: **T13607**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv ohniskové vzdálenosti na šířku řezu při laserovém obrábění polymerních materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii na dané téma
2. Provedte výrobu zkušebních vzorků z různých materiálů
3. Provedte porovnání a vyhodnocení pracovních podmínek



Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Knedlová**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské/diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně 13.5.2016

.....
Jméno, příjmení, podpis

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce je preukázať, ako sa mení šírka rezu polymérnych materiálov v závislosti od ohniskovej vzdialenosti lasera.

V praktickej časti je popísané vyhodnotenie šírky rezu a kvality výsledného obrobeného povrchu materiálu PMMA pri opracovaní (rezaní) laserom ILS 3NM.

Kľúčové slová: CO₂ laser, ohnisková vzdialenosť, polymér, PMMA, kvalita rezu, šírka rezu.

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to show the changes of the cut width of polymeric materials, depending on the focal length of the laser.

The practical part describes the evaluation of the cut width and the quality of the final surface of polymer material PMMA machined (cutted) by laser ILS 3NM.

Keywords: CO₂ laser, focal length, polymer, PMMA, cut quality, cut width,.

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som rád pod'akoval pani Ing. Jane Knedlovej za ochotu, odborné vedenie, trpezlivosť pri konzultáciách, za pripomienky a cenné rady, ktorými prispela k vypracovaniu tejto diplomovej práce.

Ďalej by som sa rád pod'akoval pánovi doc. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi za pomoc, odborné vedenie, poskytnutie meracích prístrojov a za pripomienky a rady, ktorými prispel k vypracovaniu tejto diplomovej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a elektronická verzia nahraná do IS/STAG sú totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČASŤ.....	10
1 LASER.....	11
1.1 PRINCÍP LASERA	14
1.2 PRINCÍP PRÁCE LASERA	20
1.3 OHNISKOVÁ VZDIALENOSŤ.....	22
1.4 ROZDELENIE LASEROV	26
1.5 CO ₂ LASER	28
1.6 OBRÁBANIE LASEROM.....	31
2 POLYMÉRNE MATERIÁLY	37
2.1 FYZIKÁLNE VLASTNOSTI	40
2.2 VÝBER MATERIÁLOV VHODNÝCH PRE LASEROVÉ OBRÁBANIE.....	44
II PRAKTICKÁ ČASŤ	50
3 CIELE PRÁCE.....	51
3.1 POPIS POUŽITÝCH ZARIADENÍ	51
3.2 PRINCÍP MERANIA.....	55
4 VYHODNOTENIE.....	62
ZÁVER	78
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	79
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	81
ZOZNAM OBRÁZKOV	82
ZOZNAM TABULIEK	84
ZOZNAM PRÍLOH.....	85

ÚVOD

Laser je zariadenie, ktoré produkuje tenký lúč svetla. Za takmer 40 rokov od svojho objavenia sa uplatnil v mnohých oblastiach nášho života. Od ošetrenia zraku, cez kozmetické zákroky, prenos dát, až po najpresnejšie rezanie rôznych technických materiálov, patrí dnes medzi kľúčové technológie. Mnohé výhody laserového obrábania materiálov, ako sú presnosť, rýchlosť, kvalita obrobenej povrchu a pod., spôsobujú masové rozširovanie laserového obrábania vo všetkých oblastiach priemyselnej výroby. Delenie pomocou laserového lúča sa v priemyselnej praxi v širokej miere využíva na veľmi presné a kvalitné rezanie kovových aj nekovových materiálov, čiže všade tam, kde sú vysoké požiadavky na dodržanie prísnych rozmerových tolerancií a kvality rezných hrán vyrezávaných súčiastok.

Postupným vývojom polymérnych materiálov dochádza k čoraz častejším prípadom nahrádzania prírodných materiálov polymérnymi materiálmi, najmä pre ich nízku hmotnosť a ľahkú možnosť opracovania. Polyméry dnes patria medzi najpoužívanejšie materiály vo všetkých odvetviach priemyslu a spotrebného tovaru.

Pri opracovaní polymérov laserom je potrebné poznať špecifické vlastnosti jednotlivých polymérnych materiálov, nie všetky typy polymérov je možné obrábať laserom, pri niektorých typoch nie je laserové obrábanie vhodné a efektívne.

Jedným z kľúčových parametrov laserového obrábania je ohnisková vzdialenosť. Správne nastavenie ohniskovej vzdialenosti umožňuje čistejší rez a efektívne využitie lasera. Táto diplomová práca sa zaoberá vplyvom ohniskovej vzdialenosti na šírku rezu a je rozdelená na štyri časti. V prvej časti sa pojednáva o laseri, jeho princípe, rozdelení laserov. Charakterizuje CO₂ laser, ohniskovú vzdialenosť a obrábanie laserom, popisuje vybrané technológie obrábania laserom. Druhá časť práce popisuje polymérne materiály a ich fyzikálno-chemické vlastnosti. Tretia časť práce obsahuje merania šírky rezu polyméru PMMA po obrábaní laserom pri rôznych rýchlostiach, výkone a ohniskovej vzdialenosti. Výsledky jednotlivých meraní sú zhrnuté v štvrtej časti práce.

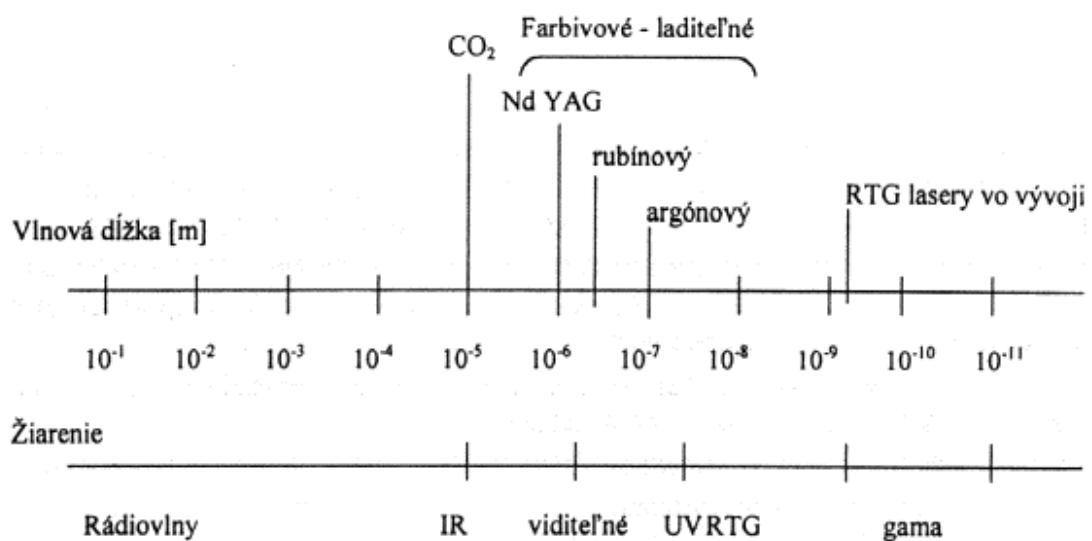
I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 LASER

Slovo laser pochádza z počiatočných písmen anglického pomenovania "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" - zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia. Je to zdroj monochromatického koherentného svetla, ktorý vznikne umiestnením zosilňovača svetla do optického rezonátora naladeného na príslušnú vlnovú dĺžku. Zo známych technických princípov a zariadení zo začiatku 21. storočia je laser energetický zdroj s najväčšou hustotou energie:

- elektrónový lúč $106-108 \text{ J cm}^{-2}$
- jadrový výbuch 1010 J cm^{-2}
- laser 1012 J cm^{-2}

Spektrálny rozsah svetla a porovnanie vlnovej dĺžky jednotlivých druhov laserov znázorňuje obrázok č. 1.



Obr. 1 Spektrálny rozsah svetla a lasera [1]

Základom dnešného moderného laseru je teória publikovaná Albertom Einsteinom v roku 1917 v práci „Ku kvantovej mechanike žiarenia“, v ktorej hovoril o stimulovanej (vynútenej alebo indukovanej) emisii. Prvý skutočný laser, ktorý dokázal vytvoriť lúč koherentného svetla, sa podarilo zostrojiť až Theodorovi Mainmanovi v roku 1960. Použil na to syntetický rubín tvaru tehličky s postriebrenými oboma koncami. Tento jednoduchý koncept sa rokmi zdokonalil a

dnešné lasery sú už oveľa výkonnejšie a presnejšie. Stručný vývoj lasera je znázornený v tabuľke 1.

Tab. 1 Vývoj lasera

- 1900 – Max Plank chápe svetlo ako elektromagnetické žiarenie
- 1916 – A.Einstein predpovedal jav stimulovanej emisie
- 1928 – Rudolph W Landenburg potvrdil existenciu stimulovanej emisie
- 1947 – R C Rutherford demonštroval stimulovanú emisiu
- 1951 – C.H.Townes zostrojil prvý MASER
- 1960 – T. Maiman (USA) zostrojil rubínový laser
- 1962 – Fred J. McClung zostrojil prvý polovodičový laser
- 1964 – C.Kumar N.Patel – prvý plynový CO₂ laser
- 1965 – George Pimentel, J V V Kasper - chemický laser (reakcia H + Cl)
- 1966 – James Hobart – prvý komerčný CO₂ laser
- 1969 – Keeve M. Siegel – inštalácia lasera v automobilovom priemysle

Z fyzikálneho hľadiska je laser kvantovo - elektronický zosilňovač elektromagnetického žiarenia. Laser je zdrojom intenzívneho monochromatického a časovo a priestorovo koherentného žiarenia. Princíp je založený na stimulovanej emisii fotónov v aktívnom prostredí lasera (obr.2). Pri normálnych podmienkach sa väčšina atómov, iónov alebo molekúl (častíc) nachádza v najnižšom energetickom stave. Ak sú tieto častice excitované do vyšších energetických stavov pôsobením vonkajších zdrojov energie, napr. intenzívnymi svetelnými zábleskami, výbojom, vnorením do magnetického poľa a pod., budú po čas preskoku do pôvodného alebo nižšieho energetického stavu vyžarovať nekoherentné svetelné žiarenie. Pôsobeniu vonkajších energetických zdrojov sa hovorí čerpanie lasera. U lasera sa tieto emitované fotóny pohybujú v tzv. rezonátore (optickom), ktorého technickým vyhotovením je uzavretá trubica (dutina), ktorá má na koncoch navzájom rovnobežné kovové zrkadlá, z ktorých jedno je vysoko-reflexné a druhé polopriepustné, umožňujúce výstup lúča. Prúd takto získaných fotónov má identickú vlnovú dĺžku, smer a fázu. Fotóny, ktoré nie sú usporiadané rezonátorom nie sú riadené zrkadlami. Na

vybudzovanie väčšej emisie bude dutina zosilňovať iba tie fotóny, ktoré sú správne orientované. Matematicky sa to dá napísať nasledovne:

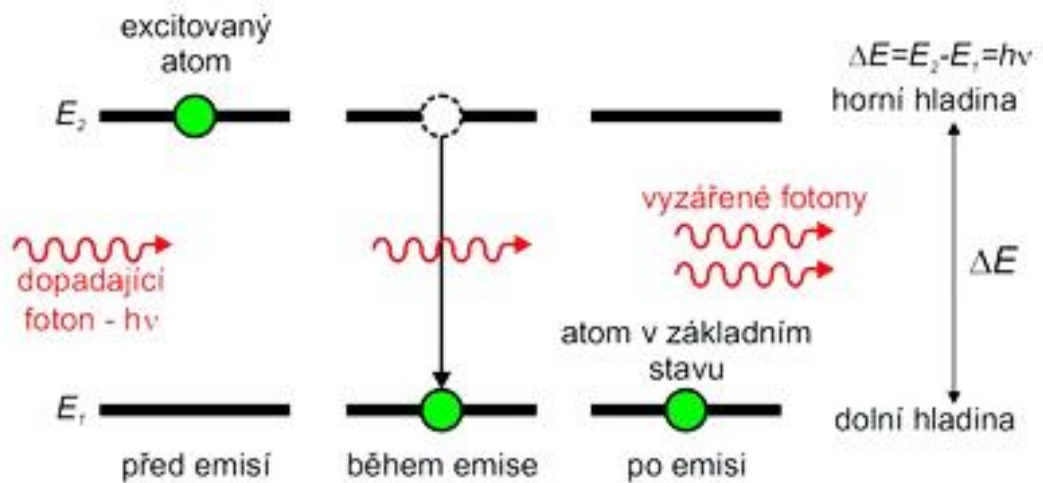
$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu$$

E_2 – kvantová energia odpovedajúca vyššej energetickej hladine [J]

E_1 – kvantová energia odpovedajúca nižšej energetickej hladine [J]

h – Planckova konštanta ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s)

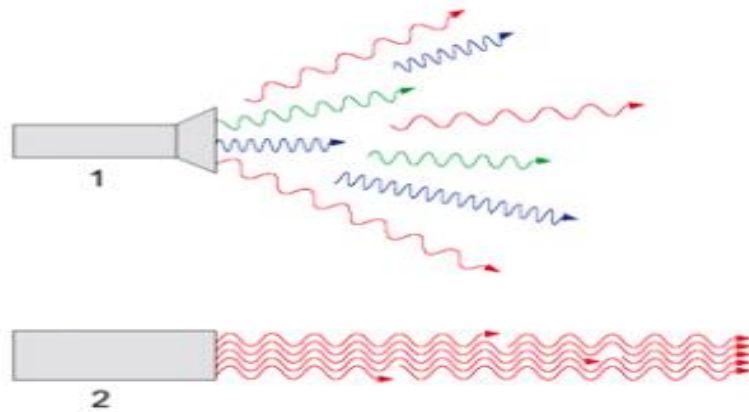
ν – rezonančná frekvencia žiarenia [Hz]



Obr. 2 Stimulovaná emisia fotónov [2]

Dôležité je, že pri procese stimulovanej emisie, má dopadajúci a emitovaný fotón rovnakú energiu (frekvenciu), rovnaký smer, polarizáciu a fázu. Z tohto vyplývajú tri základné vlastnosti lasera (zväzku laserových lúčov) (obr.3):

- je kolimovaný,
- je monochromatický,
- je koherentný.



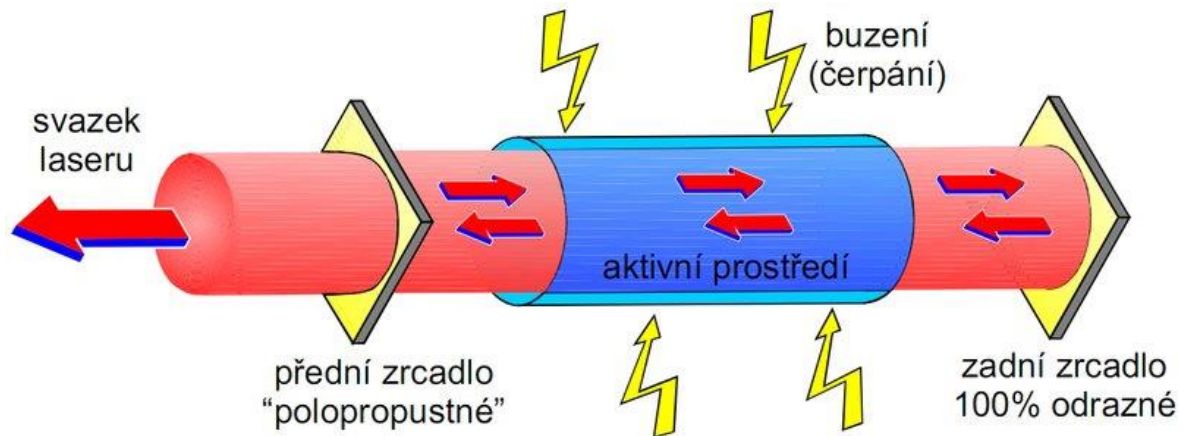
Obr. 3 Porovnanie svetelného lúča a laserového lúča [3]

Nefokusovaný lúč má priemer rádovo v mm. Vďaka koherentnosti lúča možno pomocou optického systému sústrediť žiarenie do veľmi malého bodu – teoreticky rádovo veľkosti vlnovej dĺžky žiarenia, prakticky 0,1 až 0,001 mm, čím sa dajú získať hustoty energetického toku väčšie ako 10^8 Wcm^{-2} . To sú hodnoty tisícnásobne vyššie ako teploty dosahované fokusáciou slnečného svetla. Z toho dôvodu sa v praxi pre prácu s laserom vyžaduje fokusovaný lúč, ktorého priemer sa udáva v μm . Rozloženie energie vo vystupujúcom zväzku a jeho rozbiehavosť sú dané usporiadaním zrkadiel rezonátora, vlnovými vlastnosťami svetla, vlastnosťami aktívneho prostredia, priebehom zosilnenia aktívneho prostredia v priečnom smere alebo nehomogenitou aktívneho prostredia. Zmenšovanie zväzku lúčov sa robí voľbou vhodnej optiky.

1.1 Princíp lasera

Každý laser sa skladá z troch základných častí (obr.4):

1. Aktívne zosilňovacie prostredie, ktoré obsahuje atómy, ióny alebo molekuly schopné excitácie na emisné energetické hladiny a ktoré je schopné zaistiť inverznú populáciu.
2. Zdroj energie, ktorý túto excitáciu vyvolá.
3. Optický rezonátor, ktorý zabezpečí mnohonásobný odraz fotónov od planoparalelných zrkadiel dutiny.



Obr. 4 Části lasera [2]

Zdroj energie, teda zdroj žiarenia je potrebný pre vytvorenie stimulovanej emisie. Aktívne zosilňovacie prostredie je vybudené zdrojom žiarenia, čím sa zvyšuje počet atómov na vyššej energetickej hladine – tvorí sa laserový lúč. Ako zdroj žiarenia slúži elektrický výboj, výbojka, teplo, atď. Veľmi dôležitý je optický rezonátor. Po dodaní žiarenia aktívnemu prostrediu, emituje toto prostredie fotóny. Emitované fotóny môžu mať odlišnú frekvenciu, fázu a polarizáciu. Optický rezonátor využije iba tie fotóny, ktoré majú rovnakú frekvenciu ako je jeho rezonančná frekvencia. Súčasťou optického rezonátora je polopriepustné a nepriepustné zrkadlo. Fotóny pohybujúce sa medzi týmito zrkadlami opúšťajú laser ako výstupný laserový zväzok cez polopriepustné zrkadlo.

Aktívne médium

Aktívne médium predstavuje zmes atómov alebo molekúl, ktoré je možné vybudit' do excitovaného stavu a vytvorit' tak inverznú populáciu, čo vlastne znamená, že väčšie množstvo častíc je v excitovanom stave ako v základnom energetickom stave. Musia byť splnené dve podmienky, aby došlo k vytvoreniu tohto stavu. Prvou podmienkou je, že atómy musia zotrvať na vyššej energetickej hladine relatívne dlhý čas, kvôli zabezpečeniu väčšieho množstva emitovaných fotónov stimulovanou emisiou ako spontánnym vyžiaraním. Druhou podmienkou je existencia efektívnej metódy pumpovania atómov na vyššiu energetickú hladinu a tým zabezpečenie početnejšej obsadenosti vyšších energetických hladín. Zvýšenie počtu na nižších hladinách má za následok znemožnenie zosilnenia emitovaného svetla pomocou stimulovanej emisie. Inými slovami, keď atómy prechádzajú z vyšších energetických hladín na nižšie, väčšie

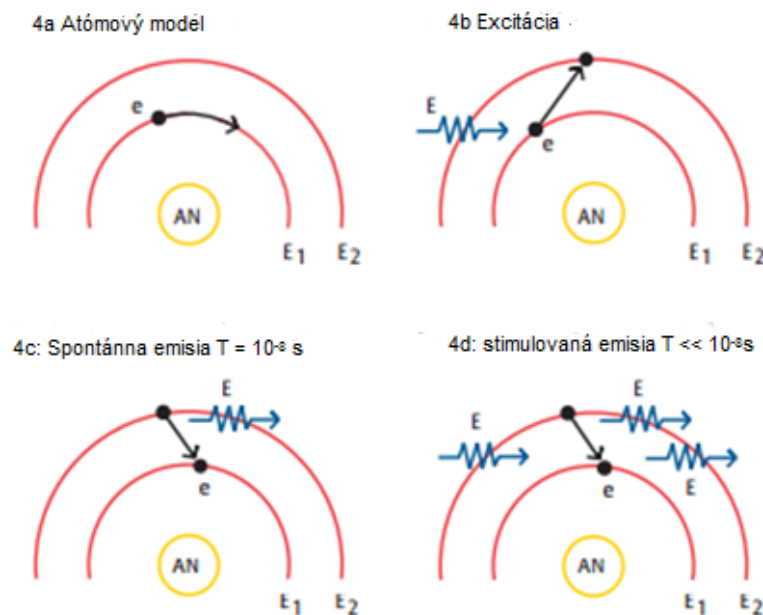
množstvo fotónov sa vyžiari spontánnou emisiou ako emisiou stimulovanou. A tieto fotóny sú vyžiarené v rozličných smeroch a s rôznou fázou.

Aktívne médium si môžeme predstaviť ako optický zosilňovač. Lúč koherentného svetla vchádza na jednej strane do aktívneho média, kde je zosilnený stimulovanou emisiou a na opačnej strane aktívneho média vychádza lúč zvýšenej intenzity. Aktívne médium takto zvyšuje výkon lasera.

Aktívne médium môže byť:

- plyn,
- kvapalina,
- pevný materiál,
- spojenie dvoch polovodičových materiálov.

Aktívne médium sa skladá z atómov s jadrom a okolitých elektrónov (obr.4a). V prípade, že médiu je dodávaná energia (E), a jeho atómy alebo molekuly sú v stave prijať vyššiu energiu, sú "excitované"; tieto elektróny absorbujú vyššiu energiu ($E_1 \rightarrow E_2$), (obr. 4b). Molekuly začnú kmitať v dôsledku vstupnej energie. Avšak, tento takzvaný excitovaný stav, nie je stabilný, a excitované častice sa vždy chcú vrátiť do svojej pôvodnej polohy (najnižšia úroveň energie). Deje sa tak po charakteristickej dobe od 10^{-7} - 10^{-8} s a atómy emitujú uchovanú energiu v podobe tepla alebo impulzov alebo opäť vo forme svetla ($E_2 \rightarrow E_1$), (obr. 4c). Tento proces sa nazýva spontánna emisia.



AN: Atómové jadro, E: elektrón, E: energia, E_1 a E_2 : Energetické hladiny

Obr. 5 Spontánna a stimulovaná emisia [4]

Ako prvé aktívne médium u funkčného lasera bol použitý rubínový kryštál. Kvapalné aktívne médium v laditeľných farbivových laseroch vznikne rozpustením niektorých farbív v etylalkohole alebo metylalkohole.

Iné aktívne médiá obsahujú rôzne typy plynov alebo ich zmesi. Lasery, ktoré obsahujú zmes hélia a neónu alebo oxid uhličitý, sú príkladom typického plynného aktívneho média. Ďalším príkladom aktívneho média sú P-N polovodičové prechody obsahujúce napr. gálium arzenid alebo gálium fosforid.

Budiaci mechanizmus

Budiaci mechanizmus je v podstate zdroj energie, ktorý budí (excituje alebo pumpuje) atómy aktívneho média z nižších hladín na vyššie, a tým vytvára populačnú inverziu. V plynných a polovodičových laseroch je tento budiaci mechanizmus obvyčajne vytvorený elektrickým prúdom, ktorý prúdi cez aktívne médium. Pevno-látkové a kvapalinové lasery bývajú najčastejšie budené opticky (napríklad rubínový laser). Atómy chrómu, ktoré sú obsiahnuté v rubínovom kryštáli je možné budiť pomocou svetla výkonnej xenónovej výbojky.

Optický rezonátor

Rezonátor je zariadenie, ktoré umožňuje sformovať a zosilniť žiarenie, čo v podstate znamená zosilniť elektromagnetickú vlnu, ktorá z neho vychádza. Konštrukčné usporiadanie rezonátora určuje jeho vlastnosti ako sú napr. koherencia, intenzita žiarenia, jeho pravidelnosť, spektrálne a priestorové charakteristiky. Optický rezonátor je tvorený najmenej dvomi zrkadlami. Najčastejšie používané zrkadlá sú sférické zrkadlá s konfokálnym stabilným alebo konfokálnym nestabilným usporiadaním. Priemer a zakrivenie zrkadiel určuje rozdelenie intenzity žiarenia a energetickú rozbiehavosť laserového žiarenia, čiže divergenciu lúča, ktorá je daná rovinným alebo priestorovým uhlom, v ktorom sa šíri. Intenzitu žiarenia v priereze výstupného lúča lasera vyjadruje tzv. mód. Mód je označenie pre vlastné kmity elektromagnetického poľa rezonátora, ktoré je charakterizované danou frekvenciou a zvláštnosťami rozloženia poľa v rezonátore. Základný mód pre väčšinu technologických operácií je označovaný ako TEM₀₀, v tomto móde je intenzita žiarenia rozdelená podľa Gaussovej krivky. Mód TEM₁₀ sa využíva na príklad pre tepelné spracovanie alebo povlakovanie. Príklad použitia jednotlivých módov pri obrábaní je znázornený na obr. 6.

prierez A v rovine kolmej na smer lúča	prierez B kolmý na A	pôdorys	označenie TEM (použitie)
			TEM ₀₀ Gauss (rezanie)
			TEM ₀₁ (zváranie, kalenie)
			TEM ₂₁
			TEM ₃₂ (málo používané)
			multimód (rezanie)
			multimód (nevhodné pre rezanie)

Obr. 6 Prehľad použitia jednotlivých módov TEM pri obrábaní [5]

Niektoré druhy laserov dokážu vyvinúť dostatočne veľkú energiu pri prechode aktívnym prostredím aj napriek tomu, aby potrebovali rezonátora pracujú superadične, čo znamená, že tieto lasery dokážu získať dostatočnú energiu jedným priechodom rezonátorom. Medzi takto pracujúce lasery patrí medený laser alebo dusíkový laser. Rezonátor sa takisto nepoužíva pri laserových zosilňovačoch. Laserový zosilňovač je tvorený aktívnym prostredím, ktorým prechádza iba laserový lúč z dôvodu jeho zosilnenia a pokračuje ďalej bez akéhokoľvek odrazu. Zrkadlá rezonátora sú väčšinou rovinné, ale môžu byť aj zakrivené. Podľa druhu použitia možno použiť zrkadlo konkávne, konkávne zrkadlo alebo vyduté, má smer dovnútra. Alebo môžeme použiť zrkadlo konvexné, konvexné zrkadlo alebo vypuklé má smer von. Stabilita žiarenia v rezonátore závisí predovšetkým na polomere zakrivenia zrkadla, ďalej závisí stabilita žiarenia tiež na dĺžke rezonátora.

Mechanizmus spätnej väzby

Mechanizmus spätnej väzby vracia časť koherentného svetla pôvodne vyprodukovaného v aktívnom médiu späť do aktívneho prostredia pre ďalšie zosilnenie v stimulovanej emisii. Množstvo koherentného svetla vyprodukované stimulovanou emisiou závisí od stavu populačnej inverzie a od intenzity stimulujúceho signálu. Tento mechanizmus sa obyčajne skladá z dvoch

zrkadiel umiestnených na oboch koncoch aktívneho média. Tieto zrkadlá zabezpečujú neustále odrazy koherentného svetla cez aktívne médium.

Výstupné zrkadlo

Výstupné zrkadlo dovoľuje časti laserového svetla odrážajúceho sa medzi dvoma zrkadlami opustiť laser vo forme lúča. Jedno zo zrkadiel mechanizmu spätnej väzby býva čiastočne priepustné a dovoľuje časti svetla vyžiariť von. Množstvo svetla, ktoré môže prejsť výstupným zrkadlom je veľmi variabilné a závisí od typu lasera. Pohybuje sa od 1 % pri HeNe laseroch až po 80 % pri pevno-látkových laseroch.

Proces generovania

Prvým krokom je spustenie budiaceho mechanizmu lasera energia, ktorý prúdi do aktívneho média a je príčinou toho, že atómy prechádzajú zo základných stavov do stavov excitovaných. Práve v tomto momente sa začína vytvárať populačná inverzia. Niektoré excitované atómy prechádzajú spontánne naspäť na základnú energetickú hladinu a vyžiaria pritom nekoherentné fotóny s vlnovou dĺžkou laserového svetla. Tieto fotóny sú však vyžiarené v rôznych smeroch. Mnohé z týchto fotónov teda uniknú z aktívneho média, ale tie, ktoré sú vyžiarené v smere osi aktívneho média vytvoria tak stimulovanú emisiu. Vyprodukovaný lúč po odraze od zrkadiel znovu prechádza do aktívneho prostredia. Časť tohto žiarenia po prechode cez čiastočne priepustné zrkadlo opúšťa aktívne prostredie a vychádza v podobe laserového lúča.

Ak počet fotónov, ktoré sa odrážajú medzi zrkadlami, je v čase približne stály, aj výkon lasera sa v čase nemení, je konštantný. Ak sa toto množstvo znižuje, znižuje sa aj výkon na výstupe lasera, prípadne sa generovanie zastaví. Približná hranica, na ktorej laser začína produkovať lúč, závisí od miery populačnej inverzie v aktívnom prostredí a od spustenia stimulovanej emisie. Straty výkonu v laseri vznikajú nedokonalou odrazivosťou zrkadiel, rozptylom a difrakciami pri prechode lúča aktívnym prostredím, nesprávnym nastavením zrkadiel a plánovanými stratami cez výstupné zrkadlo. Ak je množstvo vyprodukovaných fotónov väčšie ako množstvo ktoré sa „stratí“, tak výkon lasera rastie. V stave, keď je produkcia fotónov v rovnováhe so stratami, pracuje laser v ustálenom stave s konštantným výstupným výkonom lúča. V impulzných laseroch dodáva budiaci mechanizmus energiu v krátkych impulzoch. Dobíjanie aj

vybíjanie energie prebieha veľmi rýchlo. Energia rýchlo dosiahne vysokú hladinu a potom dôjde k rýchlemu vybitiu, ktoré vyprodukuje laserový impulz. V laseroch pracujúcich kontinuálne dodáva budiaci mechanizmus konštantné množstvo energie do aktívneho prostredia. Systém pracuje v ustálenom stave, keď sú dodávaná a vyprodukovaná energia v rovnováhe. Výsledkom týchto pomerov je konštantný lúč na výstupe lasera.

Stimulovaná emisia znamená takú produkciu excitovaných stavov atómov alebo molekúl, pri ktorej vznikajú fotóny žiarenia s rovnakou frekvenciou, viac sa populujú excitované stavy a v laseri pôsobí pozitívna spätná väzba (čím viac fotónov s danou frekvenciou sa vyžiari, tým viac sa ich bude podnecovať).

1.2 Princíp práce lasera

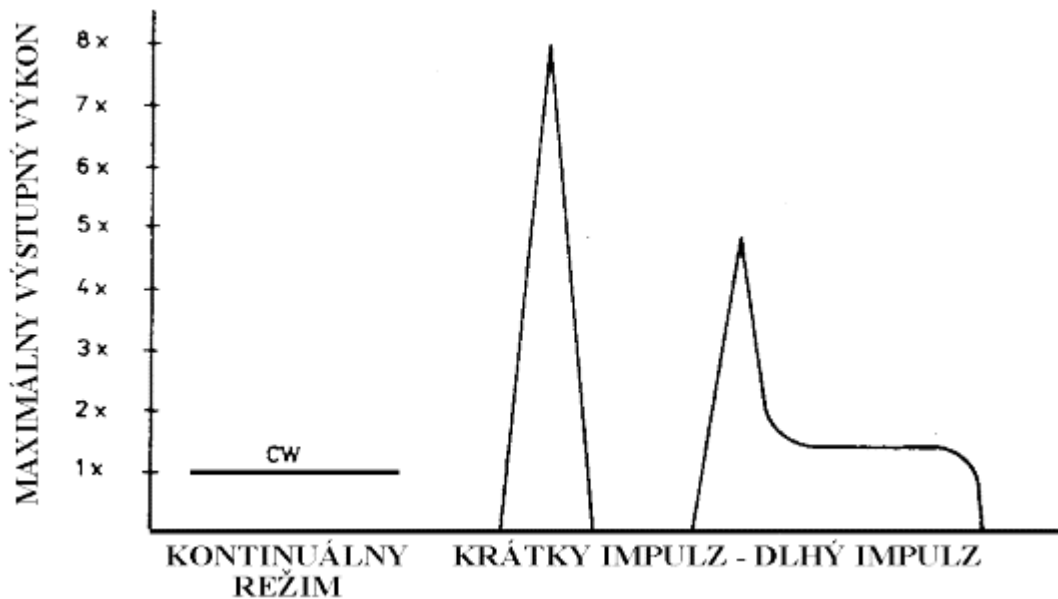
Lasery môžu všeobecne pracovať v troch režimoch :

- v pulznom (μs - ms),
- kontinuálnom (s),
- v režime s moduláciou kvality (ns).

Každý z týchto režimov sa vyznačuje svojimi špecifickými vlastnosťami a taktiež každá laserová technológia vyžaduje presné nastavenie prevádzkových parametrov tak, aby sa daná technológia stala efektívnou. Porovnanie pulzného a kontinuálneho režimu je znázornené na obr.7.

V porovnaní s kontinuálnym režimom lasera, kedy výstupný výkon je ekvivalentný celkovému menovitému výkonu daného typu lasera, je v pulznom režime laser elektronický modulovaný k emisii impulzu o výkone niekoľkonásobne vyššom než pri kontinuálnom režime.

Maximálny výstupný výkon v impulze je závislý na opakovacej frekvencii impulzov. Čím vyššia je opakovacia frekvencia, tým nižší je výstupný výkon. To je výhodné pri rezaní tenkých listov papiera, plastu, alebo taktiež pri popisovaní, kde sa vyžaduje vysoká vzájomná rýchlosť pohybu materiálu a laserového zväzku. Naopak pri nižšej opakovacej frekvencii sa dosahujú vysoké výkony impulzov, čo je vhodné pre impulzné vrtanie. Jeho výhodou je minimálny objemový ohrev materiálu. Pri vysokých opakovacích frekvenciách musíme zabezpečiť, aby sa jednotlivé impulzy vzájomne neprekrývali, to znamená, aby sme čo najviac skrátili čas dobehu impulzu, ktorý sa môže pohybovať až v jednotkách milisekúnd, čo výrazne ovplyvní maximum opakovacej frekvencie.



Obr. 7 Porovnanie pulzného a kontinuálneho režimu práce lasera [6]

Tvar prierezu zväzku žiarenia, vystupujúceho z optického rezonátora, nie je závislý iba na vlnovej dĺžke, ale taktiež na súosovosti, vzdialenosti, zakrivenosti zrkadiel a na priemere laserovej trubice. Tvar prierezu zväzku, inak „mód“, sa v technickej literatúre označuje skratkou TEM, čo znamená „transverse electromagnetic“. Znázornenie jednotlivých módov je na obrázku 8. Teoreticky je možné v laserovej technike vytvoriť nekonečné množstvo módov, ale iba niektoré typy majú pre priemysel praktické uplatnenie.

Označovanie jednotlivých módov: **TEM_{m,n}**

m je počet miním intenzity v smere polomeru pričného rezu zväzku

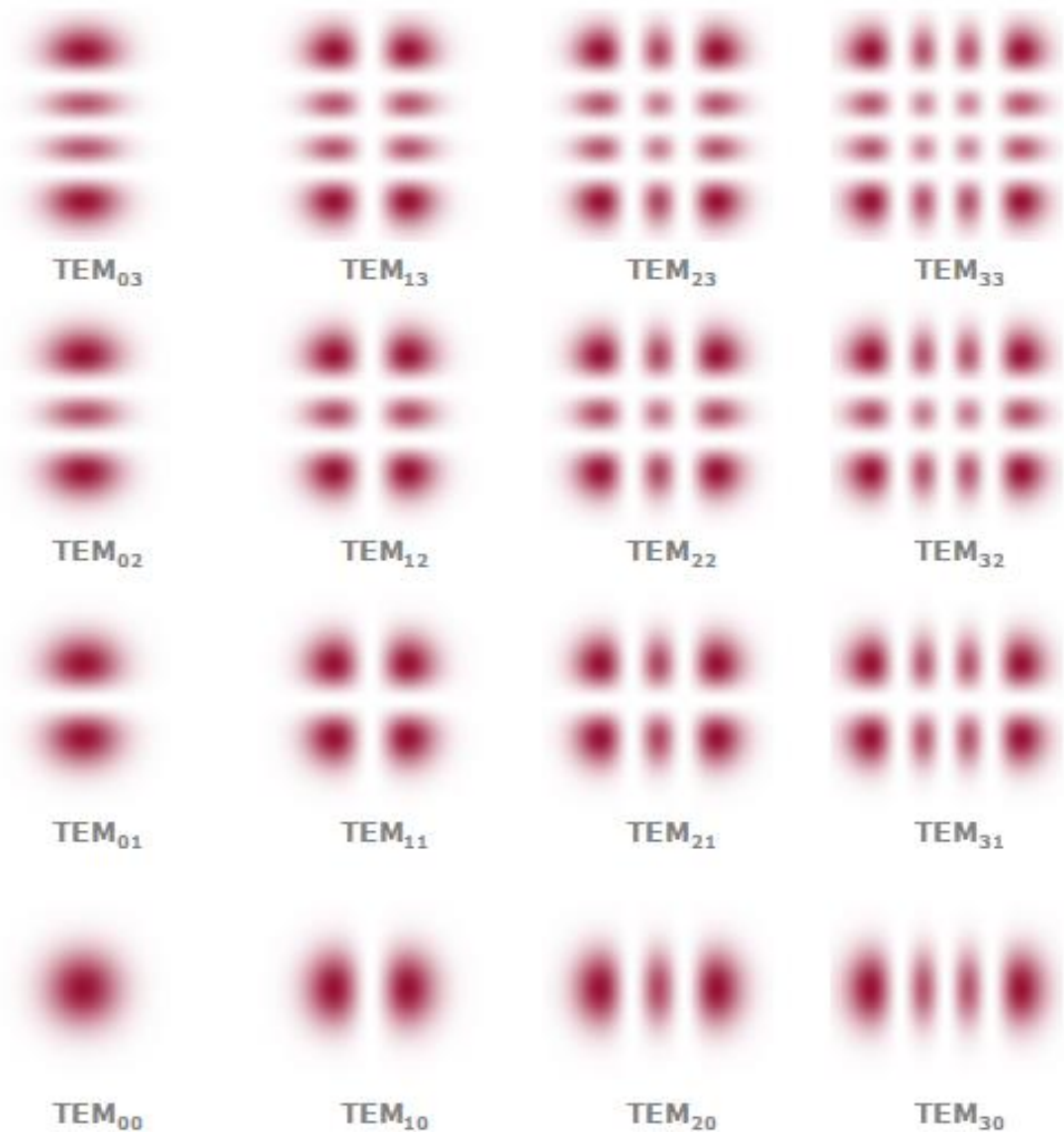
n je jedna polovica počtu miním intenzity po obvode pričného rezu zväzku

Základný mód TEM₀₀

Jeho rozloženie energie v zväzku má Gaussovský profil s jedným maximom uprostred zväzku, ktorý je dokonale súosí, má najmenšiu divergenciu a vytvára stopu veľmi malého priemeru a vysokej hustoty výkonu. Je vhodný pre vŕtanie a rezanie laserovým zväzkom.

Mód TEM_{0,1}

Má prierez v tvare medzikružia s energiou sústredenou po obvode fokusovaného zväzku. Je vhodný pre technológie povrchových úprav a pre niektoré aplikácie laserového vŕtania.

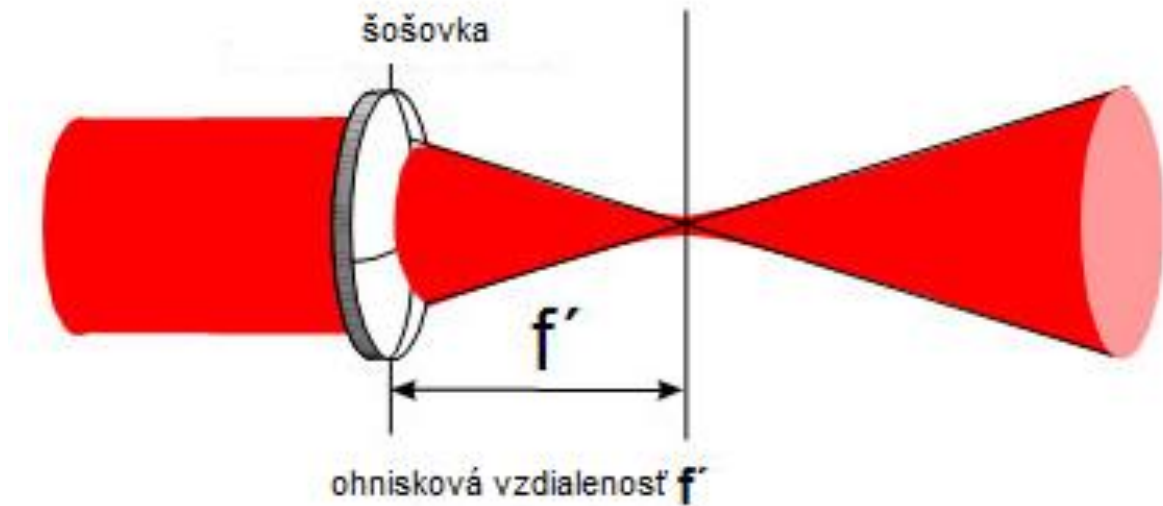


Obr. 8 Porovnanie vybraných módov [7]

1.3 Ohnisková vzdialenosť

Ohnisková vzdialenosť $-f$, znázornená na obr. 9 udáva vzdialenosť medzi ohniskom a ostriacou optikou. Kontaktné miesto je umiestnené nad, pod alebo na povrchu materiálu v súlade s požiadavkami na materiál.

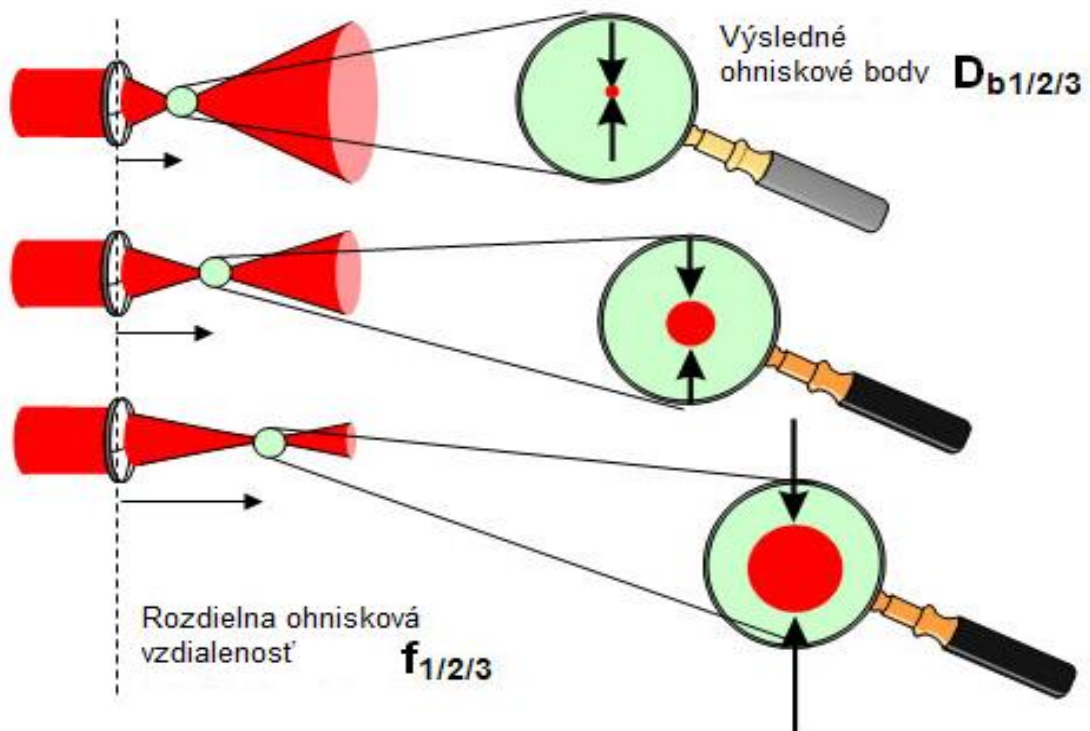
Presná optická šošovka sa používa na zoskupenie skoro paralelných a neviditeľných laserových lúčov. Kombináciou dvoch okrúhlych povrchov (concave a convex) je výsledná šošovka nazývaná meniskus.



Obr. 9 Ohnisková vzdialenosť [8]

Laserový lúč, ktorý bol práve rozšírený pomocou teleskopu, prechádza priamo cez šošovku (podobná ako parabolický reflektor), ktorá sa používa na zaostrenie. Rozšírenie lúča slúži na jednej strane na vyrovnanie rozdielov, na druhej strane na lepšie zaostrovanie. Väčší priemer laserového lúča umožňuje oveľa presnejšie zobrazovanie lúča do jedného bodu – teda do ohniska.

Malý, čistý a vysoko energetický ohniskový bod umožňuje čistý rez. V závislosti na extrémne malej zóne tepelného vplyvu zostávajú hrany materiálu pri rezaní prakticky nedotknuté. Hustota energie sa v ohniskovom bode laserového lúča zvyšuje milión krát. Priemer ohniskového bodu (sfokusovaného lúča) je potom v čiastkovom rozsahu 100 μ m. Avšak, maximálna hustota energie predstavuje iba zlomok z tohto priemeru a smerom k okrajovej oblasti výrazne klesá. Čím užší je rezaný kanál, tým vyššia je maximálna pracovná rýchlosť. Taktiež sa odparuje menej materiálu pri rovnakom prísune energie. Navyše: čím kratšia je ohnisková vzdialenosť, tým ostrejší je ohniskový bod. To je tiež znázornené na obr.10. [8]



Obr. 10 Závislosť ohniskovej vzdialenosti a ostrosti ohniskového bodu [8]

Priemer sfokusovaného lúča sa meria a vypočítava v mieste, kde intenzita žiarenia je $(1/e^2)$ násobkom jeho osovej intenzity za predpokladu, že lúč má Gaussovo rozloženie v základnom móde, obr.8 (TEM₀₀). Polomer r_t lúča v ohnisku (najužšom bode nazývanom ako „beam waist“ – zúžená časť lúča) a vzdialenosť d_t tohoto bodu od šošovky sú dané:

$$d_m = f + \frac{(d_1 - f)^2}{\sqrt{(d_1 - f)^2 + f_H^2}}$$

$$r_t = \frac{d \cdot r_0}{\sqrt{(d_1 - f)^2 + f_H^2}}$$

kde $f_H = n \cdot f \cdot \lambda_w / r_0$

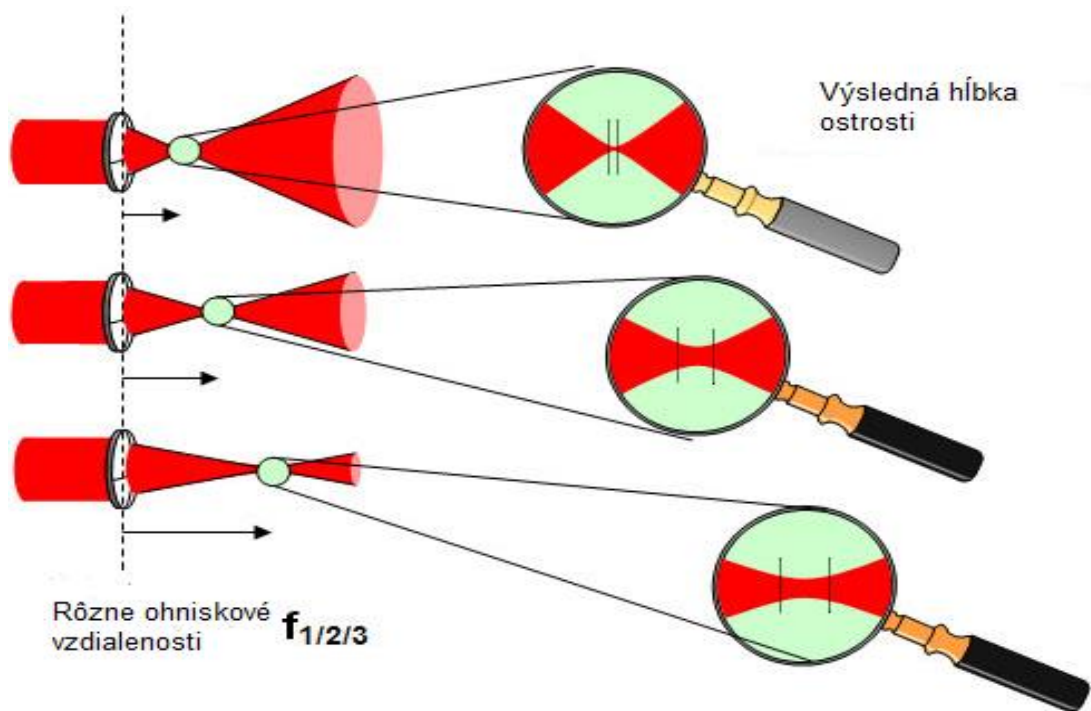
n je index lomu svetla

λ_w je vlnová dĺžka laserového svetla

Potom polomer sfokusovaného lúča je: $r_f = \frac{f \lambda_w}{\pi r_0}$

Veľkosť stopy lúča je priamoúmerná ohniskovej vzdialenosti šošovky f , vlnovej dĺžke lasera λ_w a nepriamoúmerná polomeru lúča r_0

Ďalšia optická hodnota je hĺbka ostrosti. Hĺbka ostrosti sa zvyšuje s väčšou ohniskovou vzdialenosťou a klesá s kratšou ohniskovou vzdialenosťou (obr.11). V laserovej aplikácii je to ekvivalent dĺžky lúča ku pásu. To je dôvod prečo sú šošovky s kratšou ohniskovou vzdialenosťou, napr. $f' = 1.5$ až 2.5 palcov, preferované pri spracovávaní tenkých a plochých materiálov. Funkcie tohto čistého rezu sú úzke rezacie kanále a veľmi malá zóna tepelného vplyvu. Šošovky s dlhšou ohniskovou vzdialenosťou, napr. $f' = 5$ až 7.5 palcov sú lepšie na spracovávanie hrubých a nerovnomerných materiálov.



Obr. 11 Závislosť ohniskovej vzdialenosti a hĺbky ostrosti [8]

Hĺbka ostrosti je definovaná ako vzdialenosť medzi dvoma priečnymi rovinami pred a za ohniskovou vzdialenosťou, na ktorej je efektívny polomer stopy lúča o 5% väčší ako v ohniskovej rovine. Vypočíta sa podľa vzťahu:

$$Z_f = 0,64 \cdot \frac{\lambda_w}{\pi} \cdot \frac{f^2}{r_0^2} \text{ alebo } Z_f = 0,64 \cdot \frac{\pi}{\lambda_w} \cdot r_f^2$$

Odkiaľ vyplýva, že hĺbka ostrosti rastie so štvorcem polomeru jeho stopy v ohnisku.

Kvalita optických šošoviek je tiež veľmi dôležitá pre úspešnú aplikáciu. Tieto polovodičové kryštály sú obzvlášť transparentné pre CO₂ laserový lúč s vlnovou dĺžkou okolo 10,600 nm.

Percento absorpcie a odrazu svetla od šošovky je veľmi nízke. Vysoko kvalitné šošovky sú vybavené špeciálnou antireflexnou vrstvou ktorá znižuje odrazivosť svetla pri vchádzaní a vychádzaní z kryštálu. Takže v podstate žiadna energia "sa nezachytí" v telese šošovky, objektív je bez tepelného zaťaženia takže má dlhú životnosť. Jediná vec, ktorá môže mať negatívny vplyv na životnosť vysoko kvalitných optických šošoviek je miera potenciálneho znečistenia. Vizuálna kontrola šošoviek a prípadné rutinné čistenie môžu pomôcť aby sa zabránilo predčasnému opotrebeniu.

1.4 Rozdelenie laserov

Lasery možno deliť podľa viacerých kritérií.

Podľa povahy aktívneho prostredia rozlišujeme lasery:

- **Pevného skupenstva** – tu patrí aj rubínový laser, sú z laserov najsilnejšie, môžu byť vo všetkých farbách. Do tejto skupiny patria lasery využívajúce rozptýlené ióny v kryštalických alebo amorfných látkach.
- **Plynové** – sem patrí napríklad argónový, ktorý má zelené a modré farby. Využíva sa na zábavných show, diskotékach ale aj v liečení očných chorôb a zatvrdzovaní zubných plomb. Pomocou týchto laserov sa dajú vytvárať aj holografické obrazy.
- **Polovodičové** – tieto lasery sú najkompaktnejšie. Hlavnou ich výhodou je to že vyžarujú krátkovlnné svetlo a preto dovoľujú zapísať viac informácií na CD a vďaka nemu tlačia aj laserové tlačiarne presnejšie. V polovodičoch s tzv. priamym zakázaným pásom (napríklad GaAS, InP) leží v pásovom diagramu minimum energie vodivostného pásu nad maximom energie valenčného pásu. Elektrón vybudený do vodivostného pásu tak môže spadnúť do voľného miesta vo valenčnom pásu a vyžiariť pritom fotón. Tieto materiály sú účinnými zdroji svetla a vyrábajú sa z nich luminiscenčné diódy (slúžia ako najrôznejšie kontrolky) alebo laserové diódy (nájdeme ich v CD prehrávači alebo v laserovom ukazováku).
- **Kvapalinové** – sa objavili už v roku 1963. Ich výhodou je že môžu zaberáť neobmedzene veľký objem a sú dokonale homogénne. Nevýhodou ale je, že sa chemicky rozkladajú.



Obr. 12 Rozdelenie laserov podľa povahy aktívneho prostredia [9]

Podľa spôsobu čerpania energie:

- Optický (výbojkou, iným laserom, slnečným svetlom a rádioaktívnym žiarením)
- Elektrický (zrážkami v elektrickom výboji, zväzkom nabitých častíc)
- Chemický (fotochemickou disociáciou)
- Termodynamický (zahrievaním a ochladzovaním vzduchu)
- Jadrovou energiou (reaktorom, jadrovým výbuchom)

Na základe vyžarovanej vlnovej dĺžky

- Infračervené
- Lasery v oblasti viditeľného svetla
- Ultrafialové
- Röntgenové

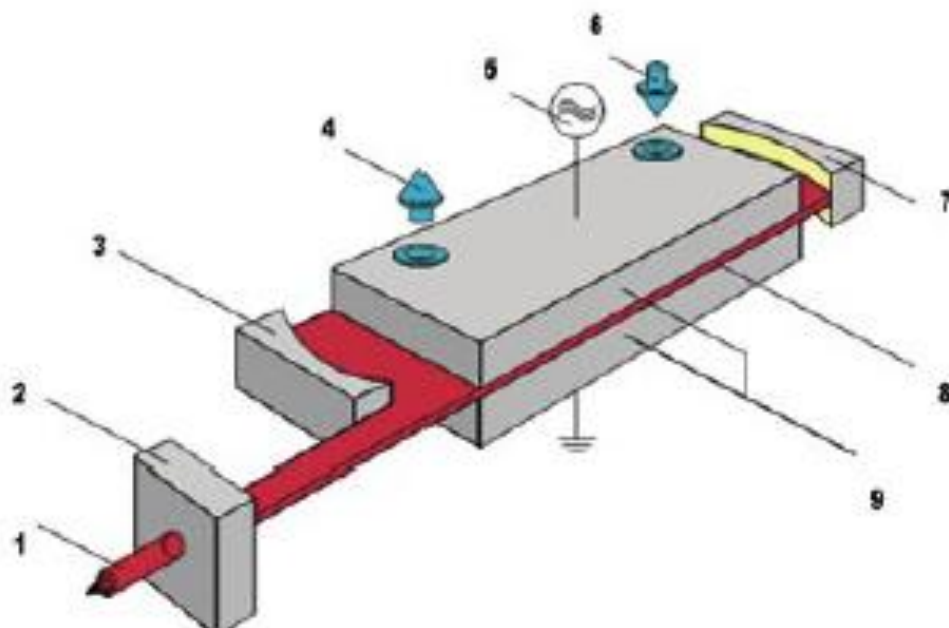
Podľa využitia v jednotlivých odvetviach hovoríme o laseroch:

- Výskumné
- Meracie
- Lekárske
- Technologické
- Energetické
- Vojenské

1.5 CO₂ laser

CO₂ laser je označenie pre plynový laser, kde laserovým prostredím je zmes plynov:

- Oxid uhličitý (CO₂) – obsah plynu v zmesi v rozmedzí 10–20 %
- Dusík (N₂) – obsah v zmesi 10–20%
- Vodík (H₂) a/alebo Xenón (Xe) – pár percent; obvykle používaný len v zatavenej trubici.
- Hélium (He) - zbytok zmesi plynu



Obr. 13 Konštrukcia CO₂ lasera [10]

Konstrukčne CO₂ laser pozostáva s nasledovných častí (obr. 13):

1. Laserový lúč
2. Úprava laserového lúča
3. Zrkadlo
4. Chladiaca voda
5. Vysokofrekvenčný zdroj
6. Chladiaca voda
7. Spätné zrkadlo
8. Prívod plynu
9. Vysokofrekvenčné elektródy

Sklenená trubica je naplnená uvedenou zmesou plynov, kde horí tlejivý elektrický výboj. Elektróny vznikajúce vo výboji budia molekuly oxidu uhličitého na hornú laserovú hladinu. Molekuly dusíka sú budené tiež pri zrážkach s elektrónmi a svoju energiu tak pri nasledovných zrážkach prenesú na molekuly CO₂. Tým sa zvyšuje koncentrácia molekúl vybudených na hornú laserovú hladinu. Do zmesi sa pridáva kvôli chladeniu hélium. Ľahké atómy hélia prijímajú pri zrážkach kinetickú energiu neutrálnych častíc a odovzdávajú ju stenám výbojky, ktoré sú chladené pretekajúcou vodou. Nízka teplota zmesi je pre laserový efekt podstatná, pretože inverzné obsadenie laserových hladín je väčšie. Rozmery laserovej trubice pri nízko výkonnom systéme sú cca 1 m dĺžka a 5 až 10 mm priemer. V medicíne sa používajú CO₂ lasery s maximálnym výkonom do 100 W. Vlnová dĺžka žiarenia tohoto lasera je 10,6 mm (infračervené žiarenie).

CO₂ laser je vhodný na aplikácie obrábania. Vyžaruje svetlo s vlnovou dĺžkou 10,6 μm v ďaleko-infračervenej oblasti elektromagnetického spektra. Laserové médium je zmesou CO₂, N a He. Laserový mechanizmus sa tu odlišuje od predošlých typov. Molekuly CO₂ sa riadne vybudia až pri kolíziách s molekulami N, ktoré im pridajú energiu (vybudenie sa dosahuje zvýšením vibračnej energie). Pre CO₂ molekuly je strata svetelnej energie a tepla počas energetického transferu oveľa menšia než u iných laserov. Energetická účinnosť tohto druhu lasera je až 10 %. Konštruujú sa v závislosti od geometrického usporiadania výboja a toku plynu v trubici na výkon niekoľkých W až 15 kW. Aplikačná oblasť tohto typu lasera je obrábanie, zváranie, tepelné spracovanie a iné.

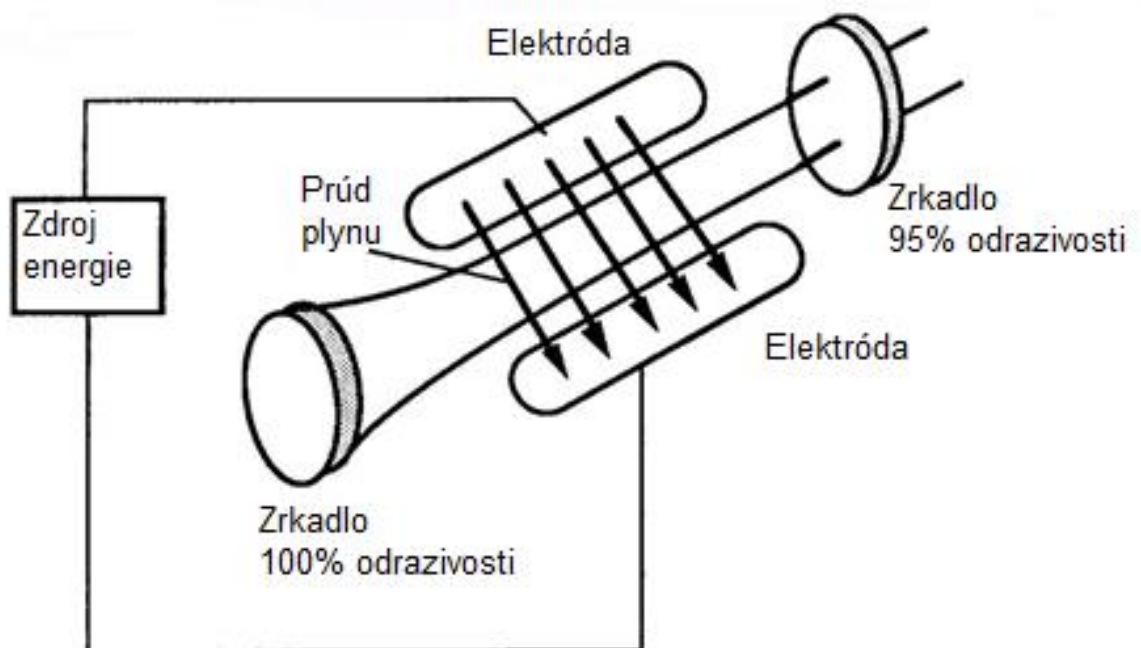
Druhy CO₂ laserov

1. typ s neriadeným tokom média.

Tento typ lasera má neriadený tok plynu, maximálny výkon je asi 50 W a životnosť lasera končí disociáciou CO₂ na CO + O.

2. typ s axiálnym tokom (obr. 14.).

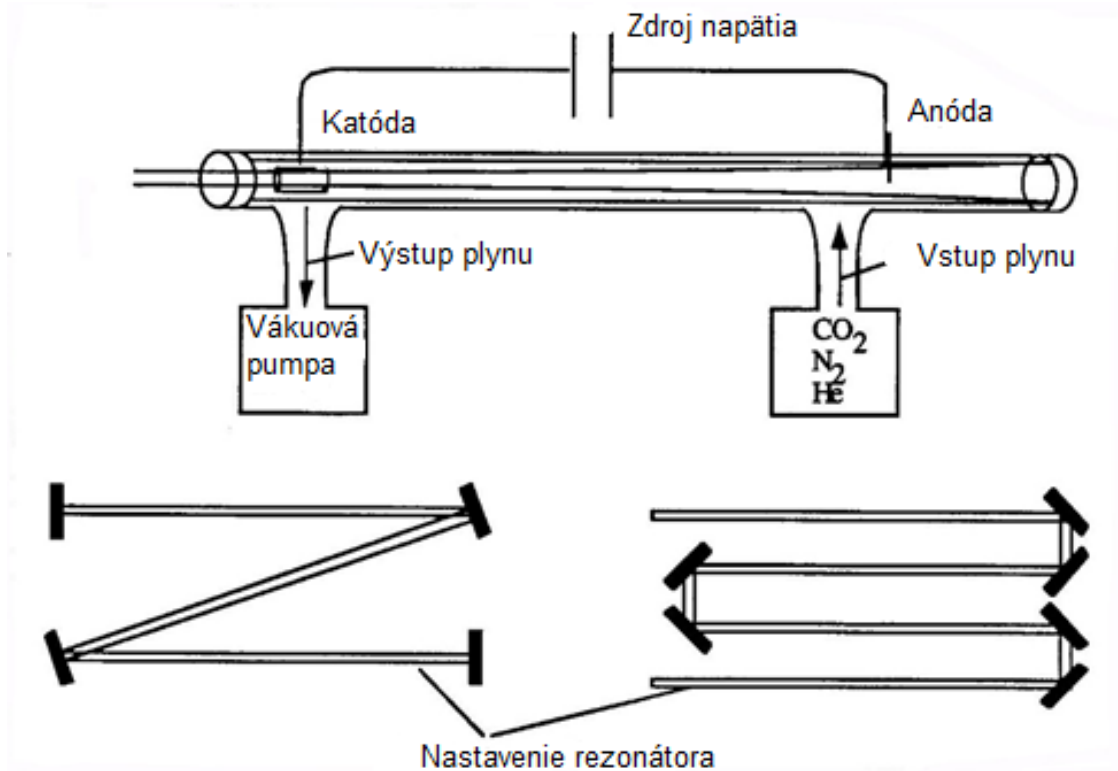
Axiálny tok umožňuje nahradzovať „vyčerpaný“ CO₂ novým. Typický výkon je do 4 kW pri kontinuálnom režime. Do výkonu 1 kW má intenzitný profil Gaussovo rozloženie. Tieto lasery s axiálnym tokom môžu byť ďalej rozlíšené ako nízkorýchlostné, kde výkon na bežný meter trubice je asi 60 W. Lasery s vysokorýchlostným tokom (60 m/s) majú typický výkon 600 W na meter trubice s totálnym výkonom do 6 kW. Tepelné ovplyvnenie rezonátora je vďaka rýchlemu prúdeniu média pomerne menšie ako u predošlého, ale chladit' treba aj v tomto prípade.



Obr. 14 CO₂ laser s transverzným tokom laserovacieho média [1]

3. typ je tranzverzný prietokový laser.

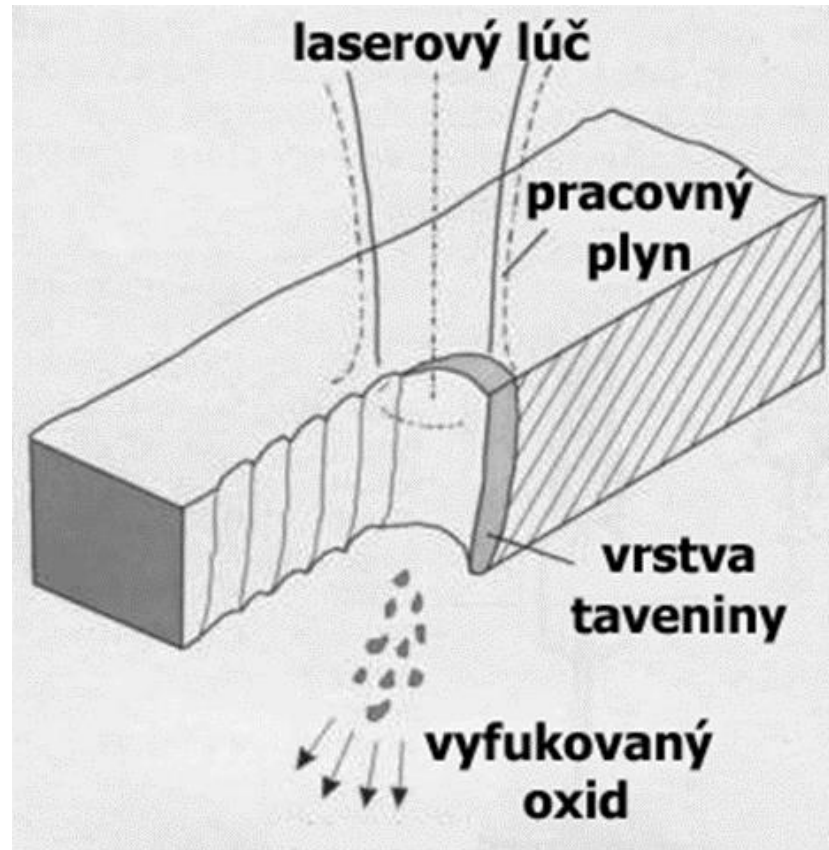
V tomto type plynová zmes He, N₂ a CO₂ prúdi kolmo na optickú dutinu. Typický výkon je 10 kW/m. Optika je vyrobená zo selenidu zinku alebo arzenitu gália (obr. 15).



Obr. 15 CO₂ laser s axiálnym tokom laserovacieho média [1]

1.6 Obrábanie laserom

Obrábanie laserom je taký druh obrábania materiálov, kedy sa k odberu materiálu využíva pôsobenie vysoko koncentrovaného zväzku fotónov vyžarovaného z hlavice lasera. Ide o obrábanie tepelnou energiou. Pri laseroch sa vysoko koncentrovaná svetelná energia, sústredená na malú plochu obrobku, mení na tepelnú. Jedným z typických špecifik obrábania prostredníctvom laserového lúča je odstraňovanie atómu za atómom, pričom energia laserového lúča spôsobuje zmenu tuhej fázy na tekutú a/alebo na plynnú. Schéma obrábania laserom je znázornená na obrázku č.16.



Obr. 16 Schéma obrábania laserom [11]

Obrábanie laserom možno rozdeliť na jedno, dvoj a trojrozmerné diferencovaním kinematiky erózie počas interakcie lúč/materiál.

Všetky laserové procesy majú spoločné charakteristiky:

- tvorba roztavenej vrstvy
- tvorba plazmy
- odraz lúča od čela erózie

Laserové obrábanie nahrádza mechanické odstraňovanie materiálov ako sú tvrdené kovy, keramika a kompozity. Efektivita laserového obrábania závisí oveľa viac na tepelných a optických ako na mechanických vlastnostiach obrábaného materiálu, napr. materiál s vysokou krehkosťou a tvrdosťou s nízkou tepelnou vodivosťou a rozptylom je pre laser prijateľný.

Nedochádza k mechanicky indikovanému odstraňovaniu, k opotrebeniu nástroja a kmitom stroja. Laserový lúč môže byť považovaný za smerový tepelný zdroj s hrúbkou tvoriacej priamky = priemer lúča.

Rezanie laserom

Najpoužívanejšie lasery v tomto odbore sú kontinuálne CO₂ lasery so stredným výkonom do 15 kW, ktorými je možné rezať konštrukčnej ocele do hrúbky až 20 mm, nehrdzavejúcej ocele do hrúbky 10 mm a zliatiny hliníka do hrúbky 5 mm. Pre presnejšie rezy s menšou šírkou reznej škáry sa používajú Nd:YAG lasery o výkone 100 až 1000 W, ktorými možno rezať konštrukčnej ocele do hrúbky 6 mm, nehrdzavejúcej ocele do hrúbky 3 mm a zliatiny hliníka do hrúbky 2 mm. Laserom možno rezať napr. titán, ocele s nízkym obsahom uhlíka a nehrdzavejúcej ocele.

Zváranie laserom

Zváranie laserom má rad výhod, ktoré nemožno dosiahnuť žiadnu inou technikou. Medzi výhody zváranie laserom patrí vysoká rýchlosť zvárania, malé tepelné ovplyvnenie miesta zvaru, možnosť prevedenia zvaru aj pri prístupe len z jednej strany, malé nároky na akostné povrch zváraných súčastí, vysoká pevnosť zvaru. Laserom je možné zvärať inými metódami ťažko zvärateľné materiály, ako titán a jeho zliatiny, hliníkové zliatiny (napr. Dnes v letectve a kozmonautike používanú zliatinu hliníka a lítia), sendvičových hliníkových konštrukcií, niób, zlato a pod. Ku zváranie sa používajú Nd:YAG a CO₂ lasery. Zváranie v porovnaní s ďalšími aplikáciami vyžaduje menšie intenzitu žiarenia optického zväzku a väčšiu dĺžku laserového pulzu.

Vrtanie laserom

Pre vrtanie laserom platí, že čím je diera dlhšia, tým viac sa odchyľuje tvar diery od geometrie, čo je spôsobené rozdelením energie lúča. Prednosťou laserového vrtania je vytváranie malých otvorov o priemere 10 μm až 100 μm v miestach, kde je to pomocou iných metód ťažké alebo nemožné. Diery môžu byť kruhové i tvarové. Dĺžka vrtanej diery môže byť až 50 mm. Vrtáť možno kovy, plasty, textilie, drevo, sklo, papier, keramiku a iné prírodné materiály. Táto technológia sa používa pre vrtanie kameňov do hodiniek, filtrov, vstrekovacích dýz, lopatiek prúdových motorov a pod. Na vrtanie sa používajú:

- CO₂ lasery - vyrezávanie (kruhových i tvarových) otvorov, najmenší priemer vyrezávaného otvoru je 5 mm, najmenší priemer vrtanej diery je 0,2 mm,
- Nd:YAG lasery - vrtanie dier s menším priemerom, najmenší priemer vrtanej diery je 0,025 mm,
- Excimerové lasery - vrtanie dier do keramiky.

V priemysle sa pre vrtanie dier používajú predovšetkým Nd:YAG lasery s výstupným výkonom 100 až 500 W.

Značenie, značkovanie a popis laserom

Laser na povrchu materiálu s vysokou presnosťou vytvára stály, mechanicky odolný a veľmi kontrastný popis. Laserom je možné označovať všetky materiály, ako kalenej aj nekalenej ocele a liatiny, titán, mosadz, bronz, hliník a jeho zliatiny, spekaný karbid, zlato, keramiku, drahé kamene, plasty, drevo, sklo, gumu, papier, kožu atď. Popisovaný povrch môže byť brúsený, pieskovaný, lakovaný, čiernený, smaltovaný, opatrený povlakom chrómu, zinku, titankarbidu, titannitridu, keramickým povlakom apod. Laserom možno popisovať rovinné, valcové aj inak zakrivené plochy, a to aj na málo prístupných miestach. Pre popisovanie sa používajú predovšetkým Nd:YAG lasery s výstupným výkonom 50 W, ďalej CO₂ lasery a excimerové lasery. Najnovšie sa pre popisovanie používajú lasery vláknové.

Tepelné spracovanie

Tepelné spracovanie materiálov laserom je charakterizované krátkou dobou ohrevu a malým objemom ohriateho materiálu. Metódy tepelného spracovania sú založené na:

- ohreve materiálu - žíhanie, kalenie a popúšťanie
- tavenie materiálu povrchu súčasti - tepelné spevnenie s natavením a amorfizácia povrchu
- odparovanie materiálu - nárazové spevnenie založené na mechanizme vyparovaní.

Spravidla sa používa kontinuálnych CO₂ laserov o výkone niekoľkých tisíc wattov. Veľmi výhodné je použitie vysoko výkonových diódových laserov, ktoré majú obdĺžnikovú stopu lúča na opracovávanom materiáli. Kalit' možno vonkajšie plochy, ale tiež napr. drážku v diere, vnútorné dosadacie plochy a pod.

Gravírovanie (mikrofrézovanie) laserom

Gravírovanie sa používa pre vytváranie jednoduchých i veľmi zložitých reliéfov, predovšetkým do kalených ocelí (napr. do foriem pre striekanie plastov a zápustiek), keramických materiálov,

dreva, gummy a pod. Podstatou metody je odparovanie materiálu v mieste, kde pôsobí lúč lasera. Gravírovanie môže byť v rovine, v niekoľkých rôznych hĺbkach alebo možno vytvárať priestorové reliéfy. Pre gravírovanie do kovových a keramických materiálov sa používajú predovšetkým Nd:YAG lasery, pre gravírovanie do dreva a gummy sú vhodné CO₂ lasery.

Textúrovanie povrchov

Do gravírovania je možné zahrnúť tiež vytváranie rôznych druhov textúr. Textúrovanie povrchov sa používa napríklad u tlačiarenských valcov, na dekoráciu predmetov alebo u ohybových nástrojoch s cieľom zvýšenia ich trvanlivosti.

Leštenie povrchov

Leštenie lúčom lasera má výrobcom foriem umožniť náhradu ručnej práce automaticky pracujúcim strojom. Najnižšie hodnoty drsnosti povrchu ($Ra_{pod} = 0,24 \mu\text{m}$, $Ry_{pod} = 1,67 \mu\text{m}$, $Ra_{pr} = 0,37 \mu\text{m}$, $Ry_{pr} = 2,9 \mu\text{m}$) boli dosiahnuté pri nástrojovej oceli 19 436. Lúčom lasera možno tiež spresňovať rozmery a tvar obrobku. Ide napríklad o vytváranie ostrých vnútorných rohov, ktoré nemožno vyrobiť frézovaním.

Využitie laserov v obrábacích strojoch

V oblasti aplikácie laserových technológií na obrábacích strojoch sú zrejmé tri prístupy:

- využitie existujúceho obrábacieho stroja a jeho doplnenie vhodným laserom - táto kombinácia umožňuje vykonávať operácie trieskového obrábania i laserové technológie na jednom stroji, teda na jedno upnutie obrobku;
- využitie podstatnej časti obrábacieho stroja (rámu a pracovných stolov, vrátane riadenia a pohonov) a doplnenie laserom - toto usporiadanie umožňuje vykonávanie iba laserových technológií;
- zaradenie lasera do výrobných liniek. Trendy v laserových strojoch a technológiách smerujú k získaniu možnosti vykonávať jedným laserom viac technológií, napr. mikrofrézovanie, leštenie, kalenie, vrtanie malých dier atď.

Kombinácia laser a obrábacie stroje

V súčasnej dobe je možné realizovať nasledujúce kombinácie:

sústruh - obrábanie s predohrevom (obrábanie keramiky a ostatných ťažkoobrobiteľných materiálov);

sústruh - kalenie, popisovanie, gravírovanie;

sústruh - výroba úzkych drážok, kalenie, opis, začisťovanie;

sústruh - nanášanie materiálu metódou Rapid Prototyping (napr. výroba osadeného puzdra z polotovaru v tvare rúrky);

frézka - kalenie, mikrofrézovanie, popisovanie;

frézka - mikrofrézovanie, odstraňovanie otrepov, leštenie, kalenie;

frézka - frézovanie úzkych drážok, vrtanie dier malého priemeru;

frézka - popisovanie.

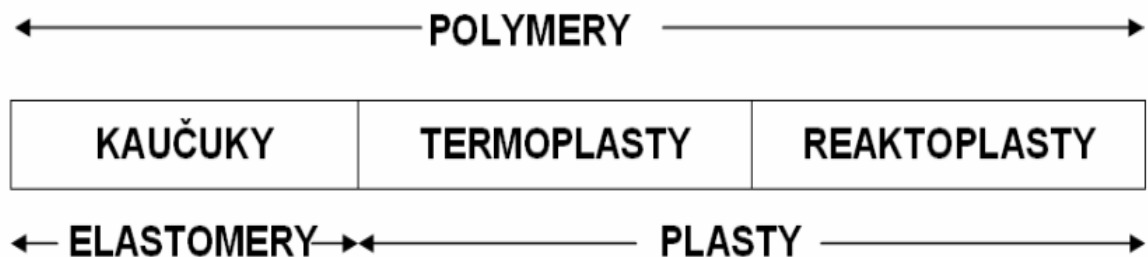
Kvalitu výsledného rezu ovplyvňuje niekoľko premenných, ktoré sú popísané v tabuľke 2.

Tab. 2 Premenné ovplyvňujúce kvalitu rezu

Generátor lúča	Distribúcia lúča	Rezací plyn	Charakteristika materiálu
výkon lasera	vzdialenosť medzi rezačou dýzou a obrobkom	typ a tlak plynu	typ materiálu
taktovacia frekvencia	ohnisková vzdialenosť optiky	priemer a typ trysky	povrch obrobku
	ohnisková pozícia		tvar obrobku
	rezná rýchlosť		hrúbka materiálu
	zrýchlenie		upnutie obrobku

2 POLYMÉRNE MATERIÁLY

Polymér je termín používaný na popis veľkých molekúl (makromolekúl) pozostávajúcich z veľkého počtu opakujúcich sa identických skupín atómov (štruktúrnych jednotiek) nazývaných monoméry. Monoméry sú obvykle malé molekuly s relatívne nízkou molekulovou hmotnosťou. V makromolekulách sú monoméry navzájom spojené kovalentnými chemickými väzbami do tzv. polymérneho reťazca. Chemickú reakciu tvorby makromolekúl z monomérov nazývame polymerizácia resp. polymerizačná reakcia. Pri polymerizácii môžeme získať makromolekuly s prevažne nerozvetvenými reťazcami - hovoríme o lineárnom polyméri alebo prevažne rozvetvenými reťazcami - vtedy získavame rozvetvený polymér [12]. V obrovských molekulách polymérov sa väčšinou nachádzajú atómy uhlíka, vodíka a kyslíka, dusíka, chlóru a iných prvkov. Polyméry, ktoré sú vo forme výrobkov sú prakticky v tuhom stave, ale v určitom štádiu spracovania sú v podstate v stave kvapalnom (väčšinou za zvýšenej teploty a tlaku), aby bolo možné udeliť budúcemu výrobku najrôznejšie tvary podľa predpokladaného použitia. Delíme ich na elastoméry a plasty, ako názorne ukazuje obrázok 17.



Obr. 17 Rozdelenie polymérov [13]

Vzhľadom na podmienky a spôsob ako polyméry vznikajú rozoznávame **polyméry prírodné** (bielkoviny, celulóza, škrob, chitín atď.) a **polyméry syntetické** (polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid, polystyrén, polyamid, polybutadién, polychloroprén atď.). Vhodným výberom základných monomérov pri polymerizácii syntetických polymérov a ich kombináciou môžeme získať širokú paletu polymérnych materiálov s rôznymi, častokrát diametrálne odlišnými vlastnosťami.

Podľa odozvy na mechanické namáhanie môžeme formálne rozdeliť polyméry na

- termoplasty
- termosety
- elastoméry

Termoplasty

Sú nezosietené polyméry. Patria k nim napr. polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid atď. Polymérne reťazce sú medzi sebou viazané len relatívne slabými (van der Waalsovými) silami, čo pri aplikovaní vonkajšieho deformačného napätia pri vhodnej teplote umožňuje premiestňovanie - kĺzanie reťazcov. Pri zaťažení dostatočne vysokým konštantným napätím termoplasty vykazujú nevratnú deformáciu, tzv. creep. Po dostatočne dlhom čase vzorka termoplastu podlieha deštrukcii. To, že reťazce môžu pri aplikovaní napätia po sebe kĺzať umožňuje pri vhodnom tepelnom režime formovanie -spracovanie a recykláciu termoplastov.

Termosety

Sú vysoko zosietené polyméry. K termosetom patria napr. vytvrdené epoxidy, polestery a pod. Polymérne reťazce v termosetoch sú buď priamo alebo cez skupiny atómov vzájomne spojené (zosietené) chemickými väzbami. Spojenie reťazcov navzájom chemickými väzbami neumožňuje kĺzanie reťazcov ani pri akomkoľvek zvyšovaní teploty. Pri zaťažení konštantným napätím termosety vykazujú malú vratnú deformáciu, minimálny creep a vzorka polyméru podlieha deštrukcii až po zvýšení zaťaženia nad medzu pevnosti.

Elastoméry

Sú polyméry, ktoré vykazujú teplotu skelenia pod bežnou resp. prevádzkovou teplotou. Patria k nim napr. kaučuky - prírodný, polyizoprénový, polybutadiénový a pod. Pri zaťažení elastoméry vykazujú relatívne rýchlu vratnú deformáciu. V prípade, že sú nezosietené vykazujú creep a po dostatočne dlhom čase vzorka elastoméru podlieha deštrukcii. V prípade zosietených (vulkanizovaných) elastomérov vzorka vykazuje rýchlu vratnú deformáciu, minimálny creep a podlieha deštrukcii až po zvýšení zaťaženia nad medzu pevnosti, pričom deformácia vzorky môže dosahovať aj niekoľko sto percent.

Pri tvorbe názvov polymérov sa používa predpona "poly", ku ktorej sa pripojí názov monoméru.

Napr.:	Predpona		Monomér		Polymér
	poly	+	etylén	=	polyetylén
	poly	+	styrén	=	polystyrén

Názov reaktoplast tvorí dvojica slov "živica" a názov monoméru, napr. polyesterová živica, epoxidová živica a pod. Ďalšou možnosťou sú pôvodné názvy v prírode sa vyskytujúcich polymérov, napr. kaučuk, celulóza, bielkoviny a pod.

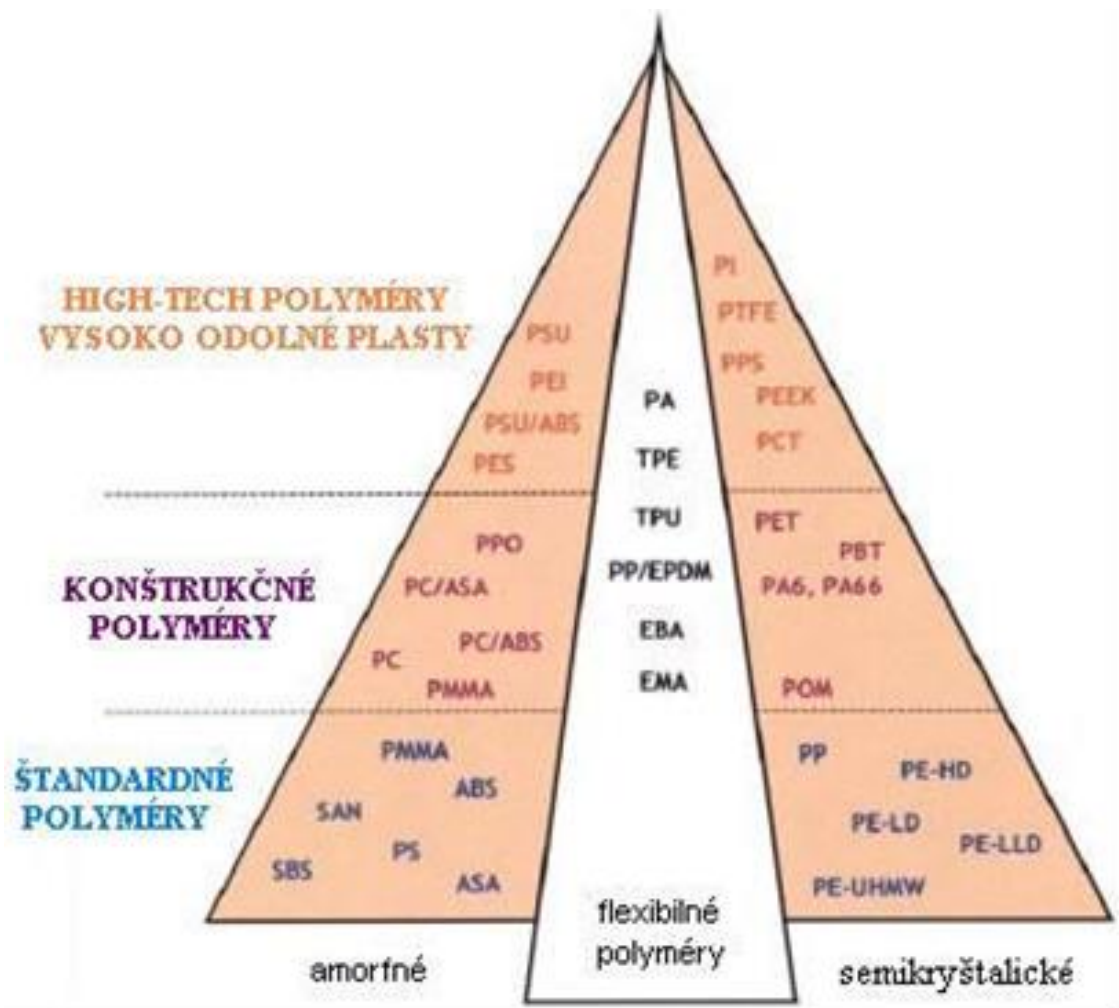
Mnohé názvy plastov, problémové pre svoje dlhé znenie, sa často nahrádzajú medzinárodne platnými skratkami (je ich asi 150), ktoré sú uvedené v norme STN EN ISO 1043-1.

Skratky niektorých u nás najčastejšie používaných druhov plastov sú uvedené v tab. 3.

Tab. 3 Skratky najčastejšie používaných plastov podľa STN EN ISO 1043-1 [14]

ABS	akronitrilbutadiénstyrén	PEI	polyéterimid
ASA	akronitrilstyrénakrylát	PE-LD	nizkohustotný polyetylén
BR	butadiénový kaučuk	PE-LLD	lineárny nizkohustotný polyetylén
CA	acetát celulózy	PEOX	polyetylénoxid
CAB	acetobutyrát celulózy	PET	polyetyléntereftalát
CPE	chlórovaný polyetylén	PF f	enolformaldehydová živica
CMC	karboxymetylcelulóza	PI	polyimid
CN	nitrát celulózy	PIB	polyizobutylén
CP	propionát celulózy	PMMA	polymetylmetakrylát
CSM	chlórsulfonovaný polyetylén	PMP	poly-4-metyl-1-pentén
EC	etylcelulóza	POM	poloxymetylén, polyformaldehyd
EP	epoxidová živica	PP	polypropylén139
E/P	kopolymér etylén/propylén	PPOX	polypropylénoxid
EPDM	etylén-propyléndiénový kaučuk	PPSU	polyfenylsulfón
EPM	etylén-propylénový kaučuk	PS	polystyrén
EVA	kopolymér etylén-vinylacetát	PTFE	polytetrafluóretylén
IIR	butyl kaučuk	PUR	polyuretán
IR	polyizoprén	PVAC	polyvinylacetát
MBS	kopolymér metylmetakrylát-butadiénstyrén	PVAL	polyvinylalkohol
MF	melamínoformaldehydová živica	PVB	polyvinylbutyral
NBR	butadién-akrylonitrilový kaučuk	PVC	polyvinylchlorid
PA	polyamid	PVDC	polyvinylidénchlorid
PAI	polyamidimid	PVF	polyvinylfluorid
PAN	polyakrylonitril	PVFM	polyvinylformal
PB	poly-1-butén	SAN	kopolymér styrénakrylonitril
PBI	polybenzimidazol	SI	silikón
PBT	polybutylétereftalát	UF	močovinoformaldehydová živica
PC	polykarbonát	UP	nenасыtená polyesterová živica
PCTFE	polychlórtrifluóretylén	VC/VAC	kopolymér vinylchlorid-vinylacetát
PEEK	polyéteréterketón	VC/E/VAC	terpolymér vinylchlorid-etylén-vinylacetát
PE-HD	polyetylén vysokej hustoty		

Prehľad polymérov z hľadiska ich využitia v praxi je znázornený na obr.18.



Obr. 18 Rozdelenie polymérov z hľadiska ich využitia [15]

2.1 Fyzikálne vlastnosti

K významným fyzikálnym vlastnostiam polymérov z hľadiska spracovateľských a aplikačných vlastností výrobkov patria:

- tepelné vlastnosti (tepelná kapacita, tepelná vodivosť a i.)
- elektrické vlastnosti (elektrická vodivosť a pevnosť, dielektrické vlastnosti a i.)
- optické vlastnosti
- magnetické vlastnosti

Tepelné vlastnosti plastov

Pre použitie plastov ako konštrukčného materiálu sú najvýznamnejšie nasledovné tepelné vlastnosti:

- tepelná rozťažnosť
- tepelná vodivosť
- horľavosť

Koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti plastov je väčší než u kovov (napr. polyetylén má až 18× väčší koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti ako oceľ obvyklých akostí), čo treba zohľadniť najmä pri zostavovaní rozvodových systémov chladených alebo ohriatych médií.

Termoplasty a reaktoplasty bez plnív majú porovnateľnú tepelnú vodivosť, tepelná vodivosť plastov je v porovnaní s kovmi približne o tri až štyri rády nižšia. Táto skutočnosť je na jednej strane veľkou prednosťou plastov - plasty (najmä ľahčený polystyrén, resp. polyuretán) sú výbornými tepelnými izolátormi napr. rozvodových systémov chladených alebo ohriatych médií, nesmie sa ale zanedbať v technológiách spracovania plastov - ohrev a ochladzovanie výrobkov z plastov.

Horľavosť plastov je podľa STN 64 0755 schopnosť plastov k zapáleniu pomocou plameňa a k ďalšiemu horeniu, pričom ale podľa STN 73 0760 nemožno ani jeden druh plastu považovať za nehorľavý.

Z hľadiska horľavosti rozlišujeme plasty:

- horľavé - trvalo horia nielen v plameni, ale aj po vybratí z neho
- samozhášavé - horia len v plameni, mimo neho po krátkom čase zhasínajú
- ťažkohorľavé - v plameni nehoria, ale uhoľnatejú alebo rozkladajú sa. Ich plynné splodiny sú tiež nehorľavé

Odolnosť proti horeniu je z dôvodu bezpečnosti vždy treba posúdiť, najmä v elektrotechnike, stavebníctve, pri prevádzke za vysokých teplôt (letecké a raketové motory) a pod. V konkrétnych prípadoch však sklon ku vznieteniu a spôsob horenia nezávisia iba od vlastností plastu, ale aj od tvaru výrobku, hrúbky jeho steny, prístupu vzduchu, odvodu tepla a pod.. Horľavosť sa dá znížiť prísadou retardéru horenia.

Elektrické vlastnosti plastov

Vedenie elektrického prúdu v elektricky vodivých materiáloch, predovšetkým kovoch je dané hlavne ich chemickou štruktúrou, a to prítomnosťou voľných elektrónov. Pretože polyméry majú prakticky všetky valenčné elektróny viazané v kovalentných väzbách, všeobecne možno povedať, že elektrický prúd nevedú, naopak, sú dobrými izolantmi. Pôsobením elektrického poľa z hľadiska štruktúrnych zmien polymérov môže dochádzať k obmedzenej orientácii dipólov v makromolekule. V prípade striedavého prúdu z dôvodov viskoelastických vlastností polymérnych materiálov dipóly nie sú schopné sledovať zmeny elektrického poľa okamžite, ale s určitým fázovým oneskorením, tzv. stratovým činiteľom, analogickým k stratovému uhlu pri dynamických mechanických skúškach pri cyklickom namáhaní.

Polymérne materiály sa teda z hľadiska elektrických charakteristík používajú predovšetkým ako elektroizolačné materiály, a to tak guma ako aj plasty (termoplasty i reaktoplasty). Okrem gumových izolátorov treba z plastov spomenúť v prvom rade PVC, ale aj PE, EVA kopolymér ako izolanty elektrických vodičov. Na výrobu izolátorov napäťových diaľkových rozvodov sa okrem keramických prvkov používajú izolátory z reaktoplastov a takisto v elektrotechnickom priemysle nie je možné predstaviť si výrobu plošných spojov bez sklolaminátových dosiek.

Vzhľadom na elektrické vlastnosti a z toho vyplývajúce použitie polymérov v aplikáciách, kde dochádzajú do kontaktu s elektrickým prúdom, resp. napätím, z elektrických vlastností sa testujú predovšetkým tie parametre, ktoré súvisia s ich izolačnými vlastnosťami a odolnosťou voči účinkom elektrického prúdu, resp. napätia v rôznych jeho formách podľa druhu aplikácie polymérneho výrobku. Plasty sú elektricky nevodivé materiály - izolanty. Ich izolačný odpor je priamo závislý na elektrostatickom náboji - čím je izolačný odpor väčší, tým ľahšie sa plasty nabíjajú.

Podľa schopnosti k polarizácii možno plasty rozdeliť do dvoch skupín:

- polárne (PA, PVC, PMMA a iné)
- nepolarizovateľné - nepolárne (PE, PP, PTFE, PS a iné)

Optické vlastnosti plastov

Väčšina plastov, pokiaľ neobsahuje rôzne prísady, dobre prepúšťa svetlo. Na priepustnosť svetla má vplyv hrúbka predmetov a vnútorná stavba plastov. Niektoré plasty pod napätím vykazujú dvojlom, čoho sa využíva vo fotoelasticimetrii. Znehodnotenie sa prejavuje zmenou farby, stratou lesku, vznikom trhliniek, zhoršením mechanických a elektrických vlastností a iné.

Magnetické vlastnosti plastov

Organické magnetiká (magnetopolyméry) sú materiály pozostávajúce z magnetického plnidla v polymérnej matrici, ktoré sa vyznačujú feromagnetickými vlastnosťami.

Delíme ich na:

- kompaktné organické magnetiká - organické polyméry, v ktorých pomocou vhodných prímiesí možno narušiť vykompenzovanie spinových magnetických momentov v molekulách polymérov a súčasne dosiahnuť magneticky usporiadaný stav. Označujeme ich ako prirodzené organické magnetiká. Sú v štádiu teoretického a experimentálneho skúmania
- kompozitné organické magnetiká - pozostávajú z dvoch základných zložiek; z magnetického prášku - plnidla (Alnico, SnCO₅, Sr ferit, Ba ferit) zapracovaného do nemagnetickej polymérnej matrice (polyvinylchlorid, kaučuk, polyamidy, polyetylén, polypropylén, polystyrén, fenolové a polyesterové živice). Označujeme ich ako nevlastné (nepravé) organické magnetiká

Mechanické vlastnosti plastov

Prehľad niektorých typov polymérov, z hľadiska ich vhodnosti pre obrábanie CO₂ laserom je uvedený v tabuľke 4. Tabuľka popisuje vhodnosť vybraných polymérov pre viaceré typy obrábania: rezanie laserom (delenie materiálu), popisovanie – značkovanie (vypálenie len do určitej hrúbky materiálu), popis výrobku čiarovým kódom (vypálenie tenkých čiar s malými rozstupmi).

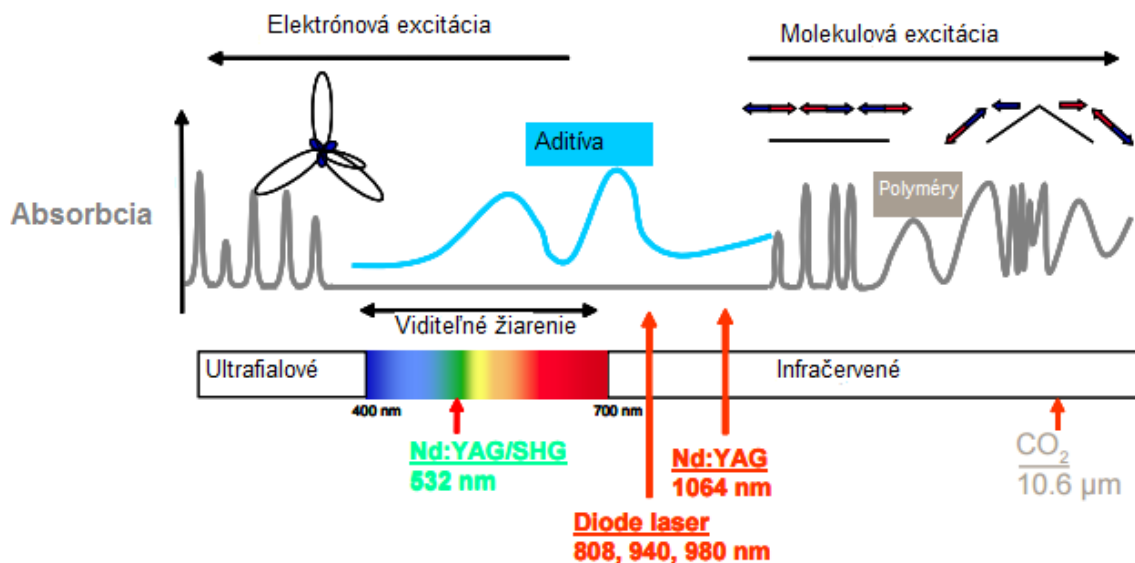
Tab. 4 Prehľad polymérov pre opracovanie CO₂ laserom [16]

Názov	Skratka	Typ	Rezanie	Popisovanie	Čiarový kód	Bezpečnosť
ABS		termoplast	Zlý vzhľad - mierne zafarbenie okrajov rezu	Zlý vzhľad - mierne ryhy	Nie	
Akryl	PMMA, Plexisklo	termoplast	Výborné - čisté odparenie s haldkým rohom	Dobré - matná biela značka	Niekedy (záleží na farbe pozadia)	
Bakelit		termoplast	Zlé - drobné zuhoľnatenie	Dobré- Nízky výkon:biele značky Vysoký výkon: obhorené ryhy	Niekedy (záleží na farbe pozadia)	
Fluórpolymer	PTFE, Teflon, EFTE	termoplast	Dobré - drobné taveniny	Priemerné - čisté ryhované značky	Nie	
FR4/FR2	PCB	termoplast	Slabé - hnedé zuhoľnatiny	Dobré - tmavé škrvny na nepovlakovanom povrchu	Áno	
Nylon		termoplast	Dobré - stredne veľká tavenina	Priemerné - Ryhy s drobnými ohorkami	Nie	
Nylon (sklenené vlákno)		termoplast	Priemerné - mierne zafarbenie okrajov rezu	Dobré - tmavé ryhy	Áno	
Polykarbonát	Lexan, Calibre, Makrolon	termoplast	Slabé - hnedé zuhoľnatiny	Dobré- Nízky výkon:biele/transparetné značky Vysoký výkon: hnedé/žlté ryhy	Áno	hustý dym pri rezaní
Polyester	Mylar, PET, PETE, PETG	termoplast	Dobré - drobné taveniny	Priemerné - Ryhy s drobnými ohorkami	Niekedy (záleží na farbe pozadia)	
Polyetylén	HPDE, MDPE, LDPE, UHMW	termoplast	Priemerné - stredne veľké až veľké taveniny	Priemerné - Ryhy s drobnými ohorkami	Nie	
Polyamid	Kapton	termoset	Slabé - hnedé/čierne zuhoľnatiny	Priemerné - tmavé ryhy so zvyškami sadzí	Áno	
Polyoxymetylén	POM, Delrin, Polyacetal	termoplast	Dobré - drobné taveniny	Priemerné - čisté ryhované značky	Nie	Formaldehydový plyn
Polypropylén		termoplast	Dobré - drobné taveniny	Priemerné - Hlboké ryhy a jemné zvyšky taveniny	Niekedy (2D kódy)	
Polystyrén		termoplast	Priemerné - stredne veľké taveniny a zvyšky	Priemerné - Hlboké ryhy a jemné zvyšky taveniny	Nie	
Polysulfán		termoplast	Priemerné - stredne veľké taveniny a zvyšky	Priemerné - Hlboké ryhy a jemné zvyšky taveniny	Nie	
Polyuretán			Priemerné - stredne veľké taveniny a zvyšky	Priemerné - mierne ryhy	Nie	HCN plyn
PVC	Vinyl	termoplast	Slabé - hnedé/žlté zuhoľnatiny	Dobré - Hnedé/žlté značky, drobná tavenina	Áno	HCL plyn - nerezať!
Guma		termoset	Dobré - vaporizuje s dorbou taveninou	Dobré - Hlbšie ryhy s dorbnou taveninou	Niekedy (2D kódy)	Hustý sadzový dym
ABS		termoplast	Priemerné - mierne zafarbenie okrajov rezu	Priemerné - mierne ryhy	Nie	

2.2 Výber materiálov vhodných pre laserové obrábanie

Prakticky každý plast môže byť opracovaný laserom, ale je potrebné vziať do úvahy špecifické materiálové a procesné obmedzenia. Plasty neabsorbujú laserové žiarenie v oblasti siahajúcej od blízkej ultrafialovej do blízkej infračervenej. Premena laserovej energie na teplo (fúzia), je teda možná iba v prípade, že polymér bol vhodne "laserovo spracovaný" pridaním aditíva. Bez laserových aditív polyméry môžu byť spracované len v hornom spektre UV žiarenia, napríklad

s excimerovými lasermi a v hornom spektre infračerveného svetla, napríklad s CO₂ lasermi (obr. 19).



Obr. 19 Absorpcia svetla plastov a vlnové dĺžky laserov [17]

V práci boli vykonané praktické meranie s vybranými druhmi polymérov, preto podrobnejšie charakterizujeme iba niektoré.

PMMA – polymetylmetakrylát

...[-CH₂C(CH₃)(COOCH₃)-]_n...

Lineárny amorfný termoplast, čiže organické sklo, sa vyrába pomerne zložitým spôsobom viacerými technológiami, napr. polymerizáciou blokovou (dosky, tyče), suspenznou (vstrekovacie granuláty, dvojzložkové zalievacie hmoty pre dentálnu techniku) a roztokovou (prášky), vytlačovaním a iné. Jeho relatívna molekulová hmotnosť je podľa technológie výroby 90 až 3000000.

Základnou zložkou pre výrobu PMMA je acetón z ktorého je syntetizovaný acetonkyanhydrin. Ten je pomocou kyseliny sírovej premenený na methakrylamid sulfát. Methakrylamid sulfát reaguje s metanolom za vzniku metylmetakrylátu čo je metyl ester kyseliny akrylovej a základný prvok PMMA ktorý sa ďalej vyrába polymerizáciou. Plexisklo vyvinula v roku 1928 a komerčne uviedla na trh v roku 1933 spoločnosť Rohm and Haas.

Ide o bezfarebný priehľadný materiál s výbornými optickými vlastnosťami, dobrou pevnosťou a húževnatosťou, vysokou nárazuvzdornosťou. Chemicky je odolnejší než polystyrény, zohľadňovať treba navlhavosť a jej vplyv na rozmery. Z PMMA sa vyrábajú chemické aparátúry, bezpečnostné sklá, kryty svietidiel, zalievacie a náterové hmoty, izolačné povlaky a iné.

PA – polyamidy

... [- NH (CH₂)₅ . CO . NH (CH₂)₅ . CO -]_n ...

Polyamidy sú lineárne polyméry charakterizované polymérnym reťazcom, v ktorom sa pravidelne striedajú skupiny -CO-NH- s väčším počtom skupín metylénových, teda -CH₂-.

Čísla za označením polyamid charakterizujú východiskové monoméry podľa počtu atómov uhlíka v ich molekulách. Tak napr. polymerizáciou kaprolaktámu, cyklickej zlúčeniny so šiestimi atómami uhlíka v molekule, získame polyamid 6 (PA 6) alebo polykondenzáciou lineárnych monomérov hexametylendiamínu so šiestimi a kyseliny adipovej tiež so šiestimi uhlíkovými atómami v molekule získame polyamid (PA 66). PA 6 a PA 66 sú celosvetovo najrozšírenejšie polyamidy.

Charakteristickými vlastnosťami PA 6 je vysoká hodnota polymerizačného stupňa (300 až 500), stupeň kryštalinity okolo 45 %, obsah nízkomolekulárnych látok extrahovateľných vodou pod 5 %, malá horľavosť, vysoká odolnosť voči oderu a značná húževnatosť. Z PA 66 sa vyrábajú predovšetkým súčasti strojov, prístrojov a zariadení, napr. puzdrá klzných ložísk, ozubené kolesá, remenice, transportné valce, nosné kladky, kalolisové dosky. Spracováva sa aj na textilné vlákna.

Polyamidy majú vynikajúce mechanické vlastnosti, sú pevné a tuhé, ich vlákna možno orientovať. Sú málo priesvitné, fyziologicky nezávadné a majú nízky súčiniteľ trenia. Elektroizolačné vlastnosti PA a pevnosť v ťahu veľmi ovplyvňuje jeho hygroskopickosť. Rozpustnosť je pomerne dobrá. Zrnitý polyamid možno ďalej spracovať vstrekom, vytlačaním, lisovaním a valcovaním na vlákna, bloky, fólie, pásy a iné pre textilný, elektrotechnický a strojársky priemysel. PA sa používa v medicíne na výrobu implantátov niektorých orgánov a kostí. Možno ho spájať lepením, vysokofrekvenčným zvarovaním, teplom i plameňom. Odpad z polyamidov možno veľmi úspešne recyklovať.

PE – polyetylén

... [- CH₂ - CH₂ -]_n ...

Je semikryštalická látka s podielom kryštalickej fázy v rozmedzí 50 až 85 %. Kryštalické fázy zabezpečujú vyššiu pevnosť. Jeho merná hmotnosť sa pohybuje od 0,85 do 0,90 g/cm³, polyetylén je teda ľahší ako voda. Je bez chuti a zápachu a fyziologicky neškodný.

Polyetylény sú typickými plastami, ktorých vlastnosti mimoriadne závisia od štruktúry. Štruktúrna závislosť vlastností je preto základným parametrom na rozlíšenie jednotlivých druhov polyetylénov a odvíjajú sa od nej aj ich názvy. Rozdelenie polyetylénov je v tabuľke 5.

Tab. 5 Rozdelenie polyetylénov

Skratka	Názov
PE-LD	nízkohustotný (rozvetvený, vysokotlakový)polyetylén
PE-HD	vysokohustotný (lineárny, nízkotlakový) polyetylén
PE-MD	strednohustotný polyetylén
PE-LLD	lineárny nízkohustotný polyetylén
PE-VLD	veľmi nízkohustotný polyetylén
MPE-LLD	metallocenový lineárny nízkohustotný polyetylén
PE-UHMW	ultravysokomolekulový polyetylén
PE-X	zosieťovaný polyetylén

Vlastnosti polyetylénu závisia od molekulovej hmotnosti, priestorového usporiadania mérov v reťazci makromolekuly a stupňa kryštalinity.

Polyetylén s nízkou hustotou PE-LD (z anglického low density) má hustotu v rozmedzí 0,85 – 0,93 gcm⁻³. Dôvodom nízkej hustoty je veľký počet dlhších bočných CH₃ skupín v reťazci. Vysoká rozvetvenosť bráni tesnému usporiadaniu makromolekúl, preto sa PE-LD vyznačuje nízkym obsahom kryštalitov, 40 – 50 %.

Polyetylén PE-HD (z anglického high density) má hustotu v rozmedzí 0,945 – 0,965 gcm⁻³. Dôvodom vysokej hustoty je nerozvetvený lineárny reťazec, ktorý umožňuje vznik väčšieho množstva kryštalitov, a to 60 – 80 %.

S použitím katalyzátorov kovov prechodného mocenstva (chróm, molybdén) sa vyrába vysokohustotný polyetylén PE-HD s hustotou v rozmedzí 0,95 – 0,97 gcm⁻³. Obsahuje vysoké množstvo kryštalitov až do 85 %.

S použitím rôznych katalyzátorov a iniciátorov sa vyrába lineárny polyetylén s nízkou hustotou, PE-LLD (z anglického linear low density). Je to kopolymér PE a vyššieho α -olefinu. Jeho hustota je porovnateľná s PE – LD.

Pomocou Zieglerovej metódy sa vyrába aj polyetylén s veľmi vysokou molekulovou hmotnosťou PE-UHMW.

Nizkotlakovou polymerizáciou s použitím nových katalyzátorov, metallocénov sa vyrábajú metallocénové polyetylény MPE-LLD. Od obvyklých PE-LLD sa líšia užšou distribučnou krivkou molekulových hmotností.

PE-VLD je polyetylén s veľmi nízkou hustotou, medzi 0,880 až 0,910 gcm^{-3} . Tieto ultraľahké typy sú kopolyméry alebo terpolyméry (polymerizácie sa zúčastňujú tri typy monomérov) etylénu až s 10 % vyšších α -olefinov, ako oktén, tetrametylpentén, spolu s propylénom.

Základné výhodné vlastnosti polyetylénu sú:

- nízka hustota v porovnaní s ostatnými plastmi
- vysoká rázová húževnatosť a vysoká ťažnosť
- veľmi dobré elektroizolačné a dielektrické vlastnosti, pre ktoré sa používa v káblovom priemysle
- veľmi malá nasiakavosť
- vysoká korózna odolnosť proti chemickým činidlám.

Chemická odolnosť polyetylénu je výborná, odoláva vode, roztokom solí, zásad a kyselín. Polyetylén má nízku priepustnosť pre vodnú paru, kyslík, oxid uhličitý a niektoré aromatické zlúčeniny.

PC – Polykarbonát

Patrí k najnovším typom termoplastov a svojimi mechanickými vlastnosťami sa približuje farebným kovom. Po vystužení, napr. sklenenými vláknami, polykarbonáty ich dokonca prevyšujú. Relatívna molekulová hmotnosť PC je 25000 až 200000, kryštalický podiel je relatívne malý.

PC majú vysokú odolnosť voči vyšším ale aj nízkym teplotám, sú vysoko transparentné, samozhášavé s teplotou vzplanutia vyše 500 °C, pri horení sú netoxické. Chemicky sú veľmi stále, málo navlhajú. Možno ich dobre spracovať vstrekománím, vytlačáním a vyfukovaním. Sú vhodné pre elektrotechniku (cievky, kondenzátory, špeciálne koncovky), strojárstvo (cievky

pre textilné stroje, autodiely), chemický priemysel (časti chemických aparatúr, špeciálne chemické nádoby), domáce potreby (telesá elektrospotrebičov, hračky, pravítka), obalovú techniku a iné. Pre svoju indiferentnosť k organizmom a schopnosti sterilizácie horúcou parou sú vhodné pre lekárske účely (časti prístrojov, injekčné striekačky, obaly sond).

Guma

Je vulkanizovaná kaučuková zmes. Vulkanizáciou rozumieme proces sietenia lineárneho polyméru (elastoméru), pri ktorom dochádza pôsobením vulkanizačného činidla (síry) alebo energie k štruktúrnym zmenám, ktoré menia kaučuk s prevažne plastickým charakterom na gumu s prevažne elastickým charakterom. Vulkanizáciou sa zvyšuje mechanická pevnosť kaučuku, odolnosť proti zmenám teploty, účinkom svetla a rôznych chemikálií. Podľa množstva síry, ktoré sa použije k vulkanizácii, dostaneme gumu mäkkú (obsah síry do 3 %) alebo gumu tvrdú (obsah síry až 3,6 %).

Mäkká guma sa vyznačuje nízkou tvrdosťou a vysokou elasticitou. Má veľmi rozsiahle použitie. Používa sa na výrobu pneumatík, ako tesnenie, izolácia elektrických zariadení, na obklady podláh, na výrobu dopravných pásov, v spotrebnom priemysle (hračky a pod.) a iné.

Tvrdá guma (ebonit) sa vyznačuje vyššou tvrdosťou, dobrými mechanickými a elektrickými vlastnosťami a výbornou chemickou odolnosťou. Používa sa na zhotovovanie armatúr, nádrží, chirurgických nástrojov a pod.

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

3 CIELE PRÁCE

Cieľom práce je vyhodnotenie vplyvu ohniskovej vzdialenosti na šírku rezu pri laserovom obrábaní. V praktickej časti práce bude vykonané rezanie rôznych polymérnych materiálov – PMMA, PC, PE, guma... viacerými rýchlosťami rezania. Možnosť rezania jednotlivých materiálov je detailnejšie popísaná v predchádzajúcej kapitole. Porovnaním jednotlivých vzoriek bude overené tvrdenie, či užší rezaný kanál, poskytuje vyššiu maximálnu pracovnú rýchlosť a či kratšia ohnisková vzdialenosť, zabezpečí ostrejší ohniskový bod – výsledný rez bude čistejší.

3.1 Popis použitých zariadení

Rezací laser ILS 3NM

Na rezanie materiálov bude použité laserové zariadenie ILS 3NM (obr.20). Laserový systém ILS 3 NM je zariadenie vhodné na gravírovanie a rezanie organických materiálov, napr. dreva, kovu, skla, polymérov. Laserové zariadenie má kompaktné rozmery a pripojenie k PC je jednoduché ako pripojenie laserovej tlačiarne (USB, LPT, sieť) a je plne kompatibilný so systémom Microsoft Windows.



Obr. 20 Laser ILS 3 NM [18]

Zdroj budenia zariadenia je plyn CO₂. Rozmer pracovnej plochy je 660 mm x 495 mm. Práca funguje ako tlač windows grafiky (obraz, logo, text) na uvedené materiály. Popis základných parametrov zariadenia uvádza tabuľka 6.

Tab. 6 Technické parametre lasera ILS 3NM

Laser ILS 3NM	
Výkon	100W
Aktívne prostredie	plyn - CO ₂
Vonkajšie rozmery	900(D) x 865(H) x 990(V)
Hmotnosť	230 kg
Pracovné pole	660(D) x 495(H) x 220(V) mm
Rozlíšenie	1000, 500, 333, 250, 200, 166 DPI
Vlnová dĺžka	10,6 μm
Riadenie rýchlosti posuvu	Nastaviteľné od 1 do 1524 mm/sec
Riadenie výkonu lasera	Nastaviteľné od 0 do 100% výkonu
Nastavenie ohniskovej vzdialenosti	Automatické, manuálne
Operačné módy	Rastrové gravírovanie , vektorové rezanie
Komunikačné rozhranie	USB, LPT1, LAN
Integrovaná pamäť	64 MB – max 99 súborov
Displej panel zobrazuje	zoznam vzorov, siloa lasera, gravírovacia rýchlosť, čas priebehu, načítané súboty, nastavenie a diagnostiku stroja
Napájanie	110/230 V AC, 20/10A, 50/60 Hz
Chladenie	Vzduchové

Dielenský mikroskop

Na pozorovanie výsledných rezov bude použitý dielenský mikroskop SPITZENHONEN MWD 150x50 mm s optikou CARLZEISS JENA s 30-násobným zväčšením. Zariadenie je vyobrazené na obr. 21.

Mikroskop je pripojený k PC prostredníctvom kábla a snímky z neho sú zachytávané prostredníctvom programu DinoCapture 2.0.



Obr. 21 Dielenský mikroskop

Namerané hodnoty budú zaznamenané v tabuľke a spracované v štatistickom programe MiniTab.

Materiál

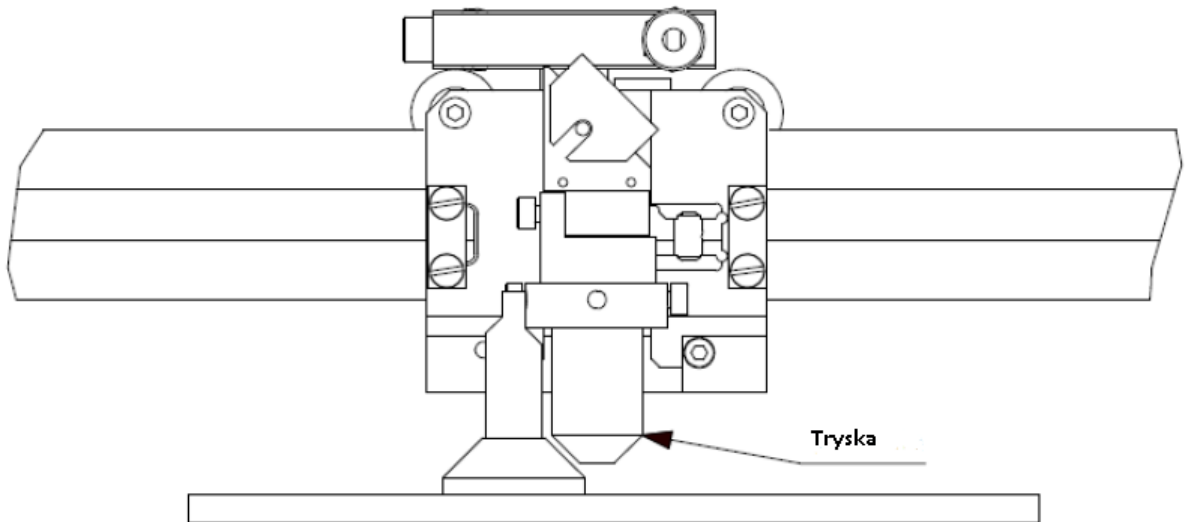
Ako základný materiál bude použitá platňa PMMA. Platňa bude mať rozmery 100 x 100 mm a hrúbku 3 mm. PMMA je vysoko transparentný termoplastický polymér, získavaný polymerizáciou monoméru metylmetakrylátu. Kvôli svojej transparentnosti, estetickým vlastnostiam a odolnosti voči poškrabaniu sa s PMMA môže uvažovať ako s ľahkou alternatívou skla. Niekedy sa nazýva plexisklo. Základné vlastnosti materiálu sú popísané v tabuľke č.7.

Tab. 7 Vlastnosti PMMA

VLASTNOSTI	Norma	Jednotka	Hodnota
Merná hmotnosť	ISO 1183	g.cm ³	1,19
OPTICKÉ	Norma	Jednotka	Hodnota
Priepustnosť svetla	ISO 13468 - 1 (hrúbka 3mm)	%	93
Index lomu	ISO 489		1.492
Zákal (Akrylon XT číry)	EN 2155 - 9	%	0,6
MECHANICKÉ	Norma	Jednotka	Hodnota
Medza pevnosti v ťahu pri pretrhnutí	ISO 527	MPa	70
Menovité pomerné predĺženie pri prestrihnutí	ISO 527	%	5.7
Modul pružnosti v ťahu	ISO 527	MPa	3200
Pevnosť v ohybe	ISO 178	MPa	120
TEPELNÉ	Norma	Jednotka	Hodnota
Teplota mäknutia podľa Vicata (B50)	ISO 306	°C	102
Teplota priehybu pri zaťažení (A - 1,8 MPa)	ISO 75	°C	92
Koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti	ASTM D676	K ⁻¹	70.10 ⁻⁶
Teplota degradácie		°C	> 280
Stupeň horľavosti	STN 730862		C 1
PEVNOSTNÉ	Norma	Jednotka	Hodnota
Tvrdosť vtláčaním guľôčky	ISO 2039 - 1	N.mm ²	130
Rázová húževnosť Charpy (telesá s vrubom)	ISO 179	kJ.m ²	1,3
Rázová húževnosť Charpy (telesá bez vrubu)	ISO 179	kJ.m ²	17
ELEKTRICKÉ	Norma	Jednotka	Hodnota
Relatívna permitivita (Dielektrická konšt.), 50 Hz	DIN 53 483		3,3
Elektrická pevnosť	DIN 53 481	kV.mm ⁻¹	15
Povrchová rezistivita (za sucha)	DIN 53 482	Ω	1015
Odolnosť voči plazivým prúdom	DIN 53 480		Vyhovuje pre napätie 600 V
Odolnosť voči jednosmernému prúdu	DIN 53 484	Stupeň	L 4
Odolnosť voči elektrickému oblúku (striedavý prúd)	ASTM 495 / 73	s	240

3.2 Princíp merania

Laser ILS 3NM disponuje poloautomatickým zaostrovaním. Nastavenie ohniskovej vzdialenosti sa vykonáva pomocou fokusačného telieska tak, že teliesko sa priloží na materiál a nižšia rýska telieska sa musí dotýkať s hranou hlavy lasera (obr.22).

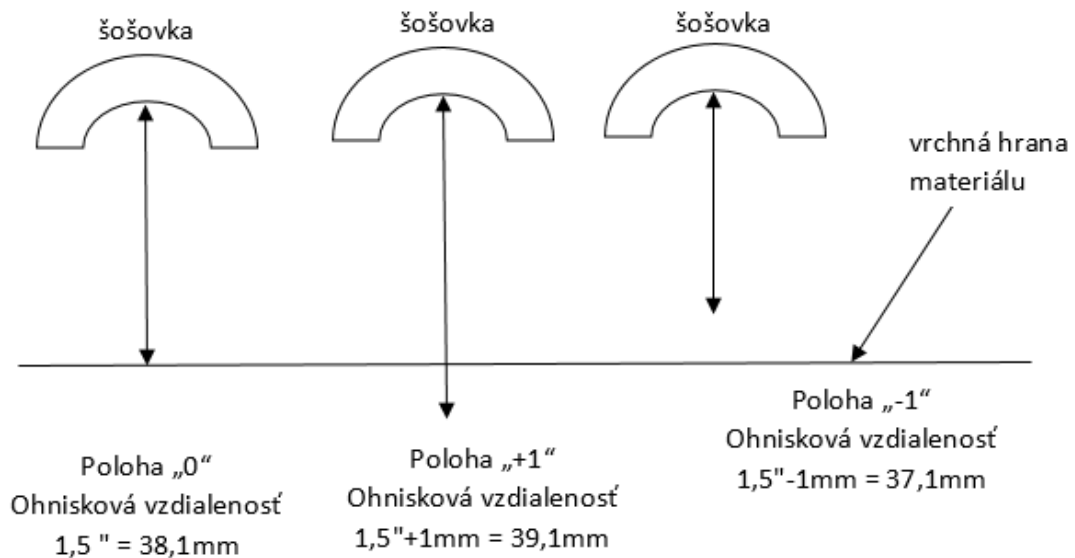


Obr. 22 Nastavenie ohniskovej vzdialenosti [19]

Takto nastavená hodnota ohniskovej vzdialenosti je určená výrobcom a jej hodnota je 1,5" = 38,1 mm. V práci bude táto hodnota označovaná ako **poloha „0“**.

Pre overenie vplyvu ohniskovej vzdialenosti na rezaný kanál, boli vykonané 3 typy merania. Prvé meranie bolo prevedené pri základnom nastavení ohniskovej vzdialenosti v polohe „0“ . Pre polohu „-1“ bola šošovka posunutá bližšie k rezanému materiálu o 1 mm, čím sa ohnisková vzdialenosť skrátila na hodnotu 37,1 mm, v práci označovaná ako **poloha „-1“**.

Pre ďalšiu hodnotu ohniskovej vzdialenosti, bola šošovka posunutá zo základnej polohy „0“ posunutá o 1 mm vyššie, čím sa ohnisková vzdialenosť zväčšila na hodnotu 39,1 mm, táto poloha je v práci značená ako **poloha „+1“**. Nastavenie ohniskovej vzdialenosti je vyobrazené na obrázku č.23.



Obr. 23 Nastavenie ohniskovej vzdialenosti

Pre každú úroveň šošovky boli vykonané merania s pozmenenými parametrami rezania. Princíp jednotlivých meraní znázorňuje tabuľka 8. V prázdnych bunkách bude po rezaní a následnom premeraní zaznamenaná hodnota šírky drážky v mm.

Plný výkon lasera je 100 W, pre účely práce boli vykonané merania pri 70% výkone lasera, to znamená pri výkone 70 W a pri 80% výkone, čo je 80 W.

Rýchlosť rezania lasera je 1524 mm/s, čo je 100% rýchlosti. Pri meraniach boli použité rýchlosti od 2% po 9%.

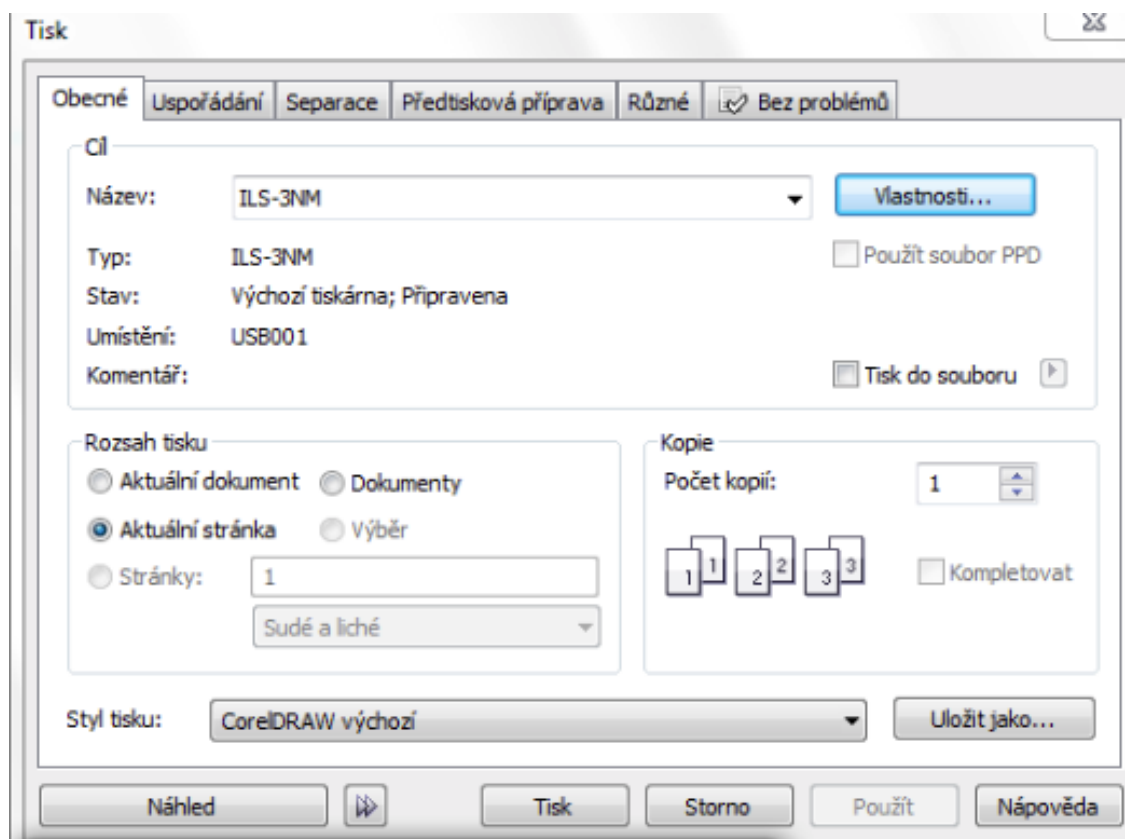
Tab. 8 Princíp merania

Výkon lasera 100% = 100 W	Smer rezania	Meraná časť drážky	Rýchlosť rezania							
			2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%
			30,48 mm/s	45,72 mm/s	60,96 mm/s	76,20 mm/s	91,44 mm/s	106,68 mm/s	121,92 mm/s	137,16 mm/s
70% 70 W	Z-V →	Vrchná								
		Spodná								
	S-J ↓	Vrchná								
		Spodná								
80% 80 W	Z-V →	Vrchná								
		Spodná								
	S-J ↓	Vrchná								
		Spodná								

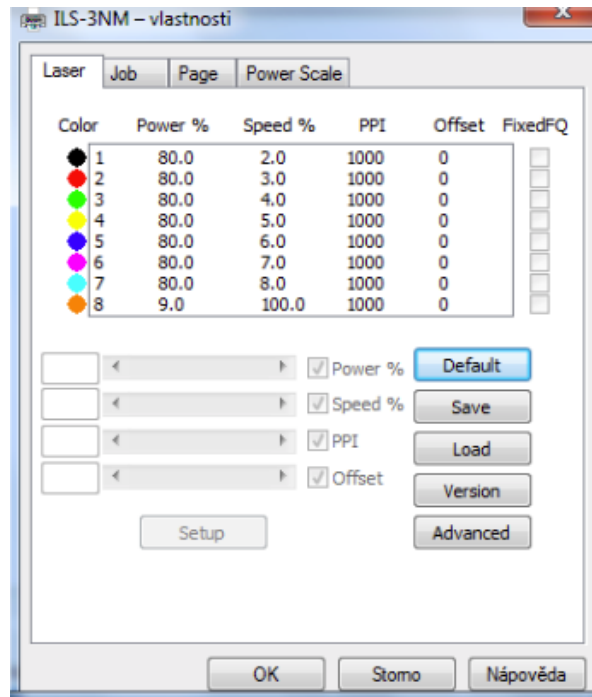
Merania boli prevedené pri dvoch úrovniach výkonu lasera 70% a 80%. Pri oboch výkonoch bola vypálená drážka do základného materiálu v dvoch smeroch: zľava doprava (západ-východ) a z hora dole (sever-juh). Každý rez bol vykonaný pri rôznych rýchlostiach rezania (2% - 9%).

Výkon lasera a jednotlivé rýchlosti rezania boli stanovené na základe viacerých pokusov a pre skúmanie šírky drážky sa ako najvhodnejšie ukázali hodnoty popísané v tabuľke 6.

Práca s laserom funguje ako tlač grafického súboru na tlačiarni (obr. 24). Jednotlivé rýchlosti nastavíme ako čiary rôznych farieb, ako je znázornené na obrázku 25. Každá farba predstavuje stanovenú rýchlosť rezania.

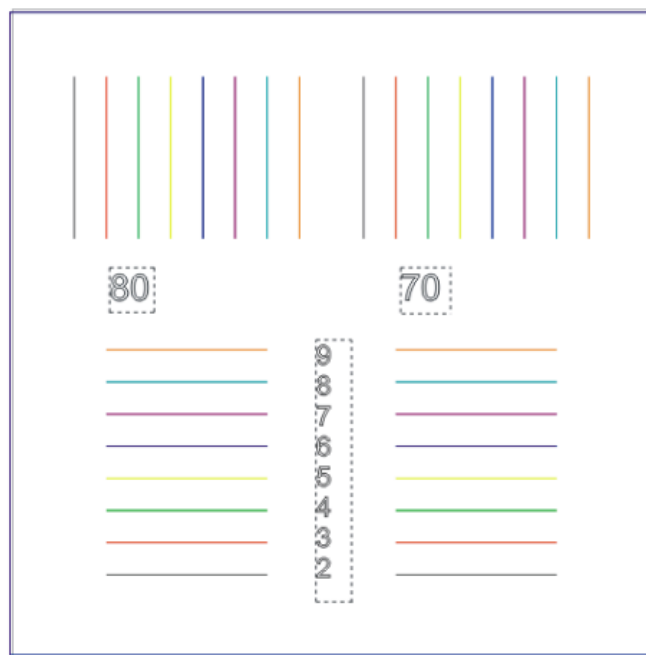


Obr. 24 Tlač grafického souboru na laseri



Obr. 25 Nastavenie výkonu lasera a rezacej rýchlosti

Výsledná mapa bude vyzerat' ako na obrázku č. 26. Jednotlivé farby reprezentujú stanovené rýchlosti. Každá farba je na vzorku vyrezaná dvakrát – pri výkone lasera 70% (70 W) a pri výkone 80% (80 W). Po odoslaní súboru z PC na laser, laser začne s rezaním jednotlivých čiar.



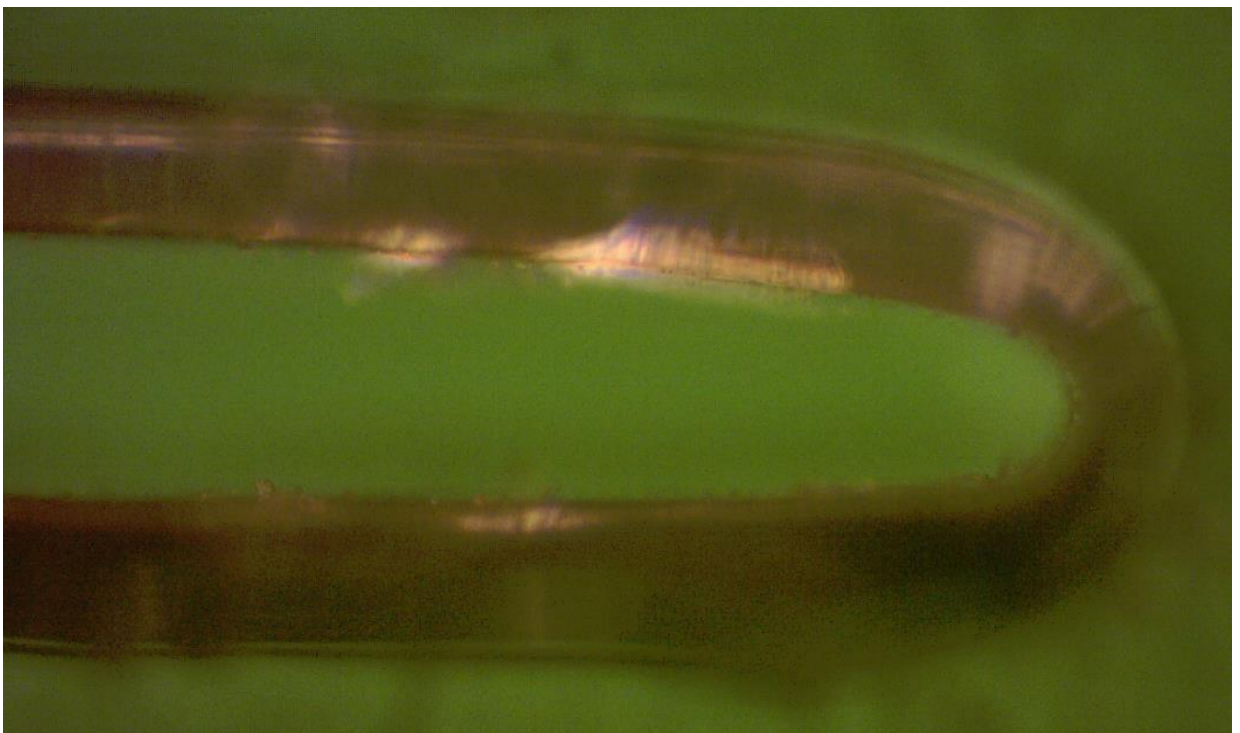
Obr. 26 Výsledná mapa rezov nastavená na laseri

Po dokončení rezania laserom vznikli jednotlivé vzorky. Na obrázku 27 je vidieť vzorku materiálu s výslednými rezi pre jednotlivé rýchlosti a výkon.



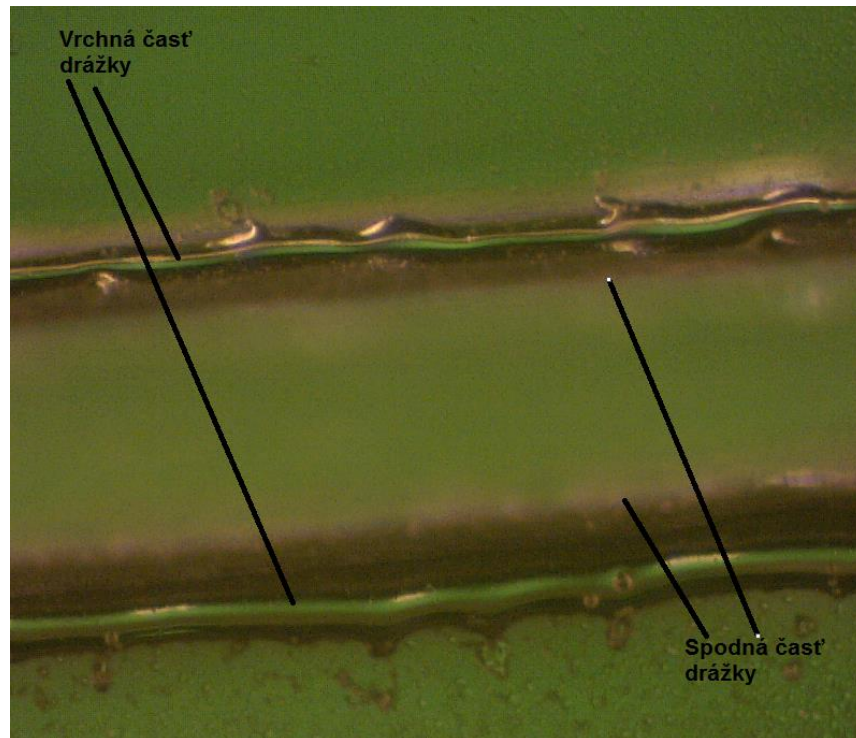
Obr. 27 Vzorky s vypálenými drážkami

Celkovo boli vypálené 3 vzorky pre každé nastavenie šošovky. Po vypálení jednotlivých vzoriek boli pod mikroskopom premerané jednotlivé rezy z vrchnej strany materiálu – zo strany dopadu laserového lúča a zo spodnej strany vzorky – zo strany výfuku laserového lúča. Obrázok drážky zväčšenej pod mikroskopom je vyobrazený na obr. 28.



Obr. 28 Drážka po rezaní zväčšená pod mikroskopom

Z obrázkov č. 29 a č. 30 je zřejmé, že pri rezaní je vrchná časť drážky širšia (v mieste vstupu laserového lúča do materiálu) ako spodná časť drážky (v mieste výstupu laserového lúča z materiálu). Pri obrázku č. 29 bol mikroskop zaostrený na vrchnú časť drážky pri obrázku č. 30 na spodnú časť drážky.

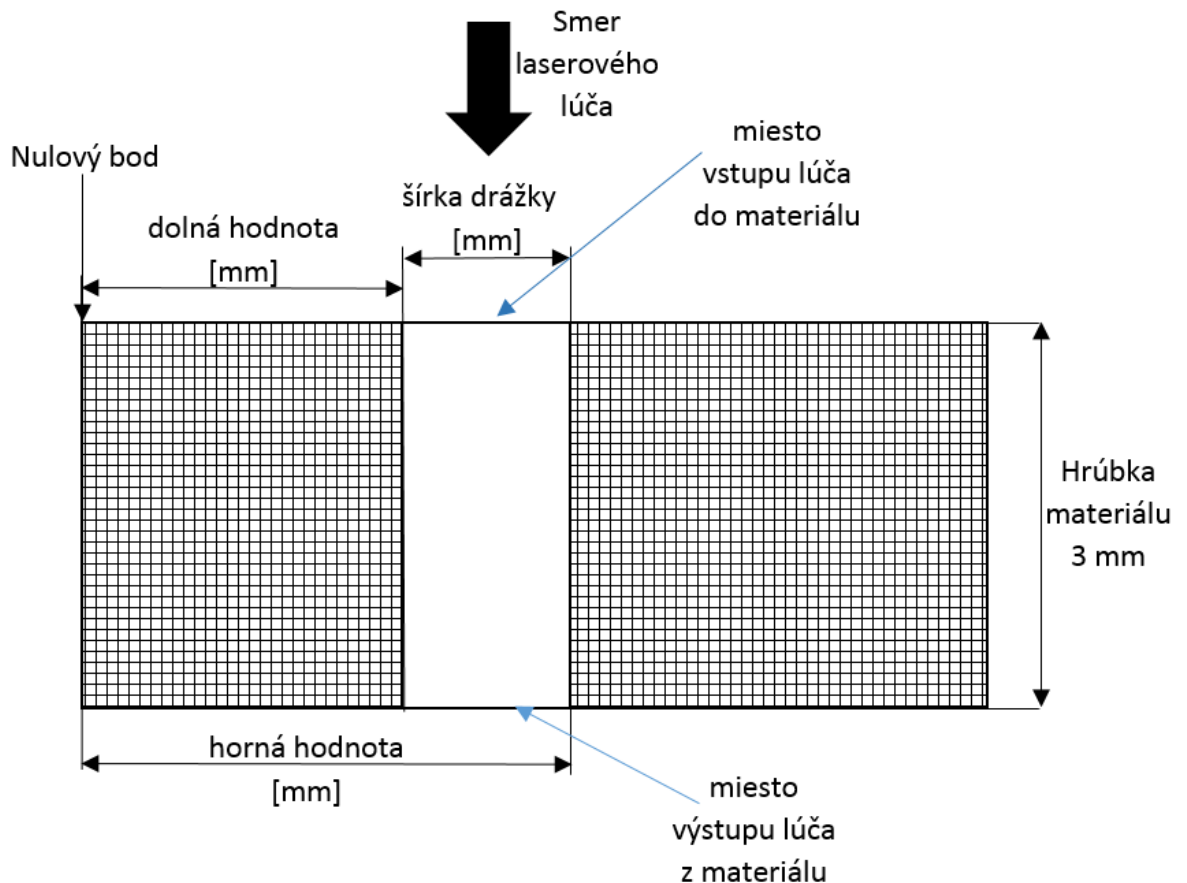


Obr. 29 Vrchná a spodná časť drážky (zaostrenie na vrchnú časť drážky)



Obr. 30 Vrchná a spodná časť drážky (zaostrenie na spodnú časť drážky)

Šírka drážky bola stanovená ako rozdiel hodnôt vzdialenosti začiatku drážky od nulového bodu a vzdialenosti konca drážky od rovnakého nulového bodu (obr.31), samostatne pre vrchnú časť drážky a samostatne pre spodnú časť drážky. Dolná a horná hodnota bola zistená posúvaním stolčeka mikroskopu, ktorý je vybavený stupnicou v pozdĺžnom aj priečnom smere. Otočením kolieska o 360° sa stolček posunul o 1 mm. Nónius je 100, posunutie o 1 dielik je teda 0,01 mm.



Obr. 31 Výpočet šírky rezu

Všetky namerané hodnoty boli zaznamenané do tabuliek (príloha č. I, II, III)

4 VYHODNOTENIE

Pre účely skúmania vplyvu ohniskovej vzdialenosti na rezaný kanál, sa ako najvhodnejší ukázal materiál PMMA. Výsledný rez bol skúmaný pod mikroskopom s digitálnym výstupom obrazu do PC. Pre 3 rozdielne vzdialenosti šošovky od vzorky materiálu bola vykonaná séria meraní.

Pre každú hodnotu ohniskovej vzdialenosti bola spracovaná štatistika nameraných hodnôt v programe Minitab. Výsledná tabuľka obsahuje štatistické ukazovatele:

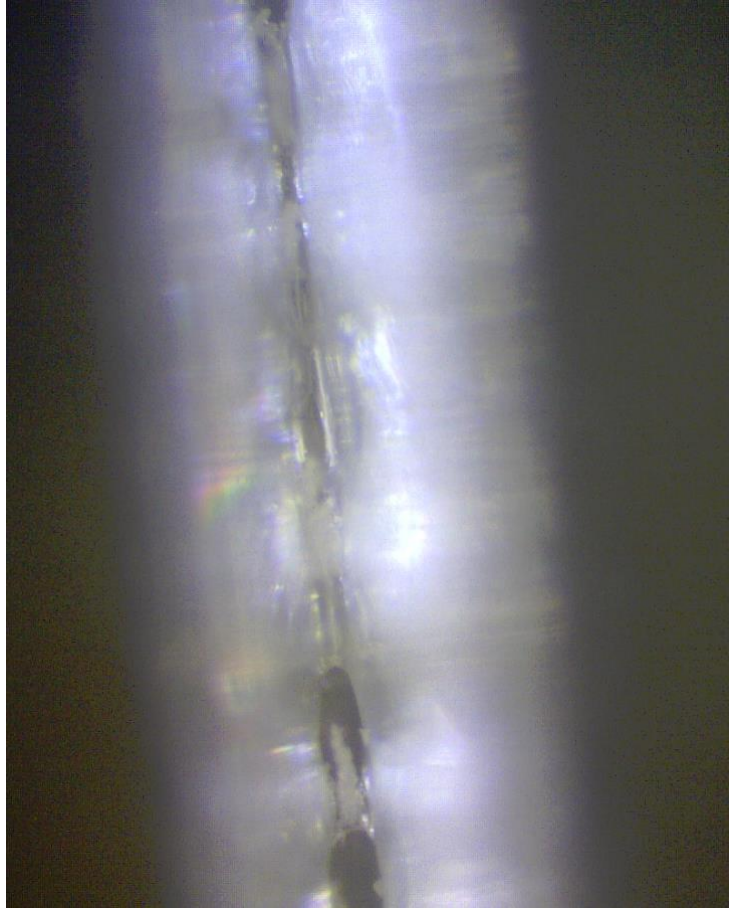
- Početnosť (N Total)
- Prvý kvartil (First Quartile)
- Medián (Median)
- Tretí kvartil (Third Quartile)
- Medzikvartilový rozsah (Inter Quartile Range)

Poloha šošovky “0“ – ohnisková vzdialenosť 1,5" (38,1 mm)

Pri tomto meraní bola šošovka nastavená podľa odporúčania výrobcu. Poloha šošovky by mala byť v optimálnej vzdialenosti a mali by byť dosiahnuté najlepšie výsledky kvality rezu a rýchlosti rezu.

Namerané hodnoty sú v prílohe P I.

Pri nastavení lasera na 70 % výkonu dochádza pri vyšších rýchlostiach k pretekaniu materiálu na spodnej strane rezanej drážky. Pretečenie (obr.32) sa zväčšuje úmerne s rýchlosťou rezania. K pretečeniu materiálu dochádza skôr pri zvislom rezaní (smer S-J). Po zvýšení výkonu lasera na 80% menovitej hodnoty sa pretečenie materiálu prejaví už pri nižších rýchlostiach rezania. Tak ako pri nastavení nižšieho výkonu, pretečenie sa objavuje skôr pri rezaní vo zvislom smere.



Obr. 32 Pretečenie materiálu pri rezaní

Poloha šošovky “-1“ – ohnisková vzdialenosť 37,1 mm

Šošovka bola posunutá o 1 mm nižšie oproti základnej polohe „0“, smerom bližšie k materiálu. Pri tomto rezaní je ohniskový bod väčší, čo spôsobuje, že výsledná drážka je širšia ako pri rezaní so šošovkou v bode „0“.

Namerané hodnoty sú v prílohe P II.

K pretečeniu spodnej strany drážky dochádza pri vyšších rýchlostiach v porovnaní so základným nastavením šošovky. Pretečenie materiálu je výraznejšie pri zvislom rezaní.

Poloha šošovky “+1“ – ohnisková vzdialenosť 39,1 mm

Poloha šošovky sa posunula o 1 mm vyššie oproti základnému nastaveniu, smerom ďalej od materiálu. Ohniskový bod je menší ako v predchádzajúcich prípadoch a výsledná drážka po

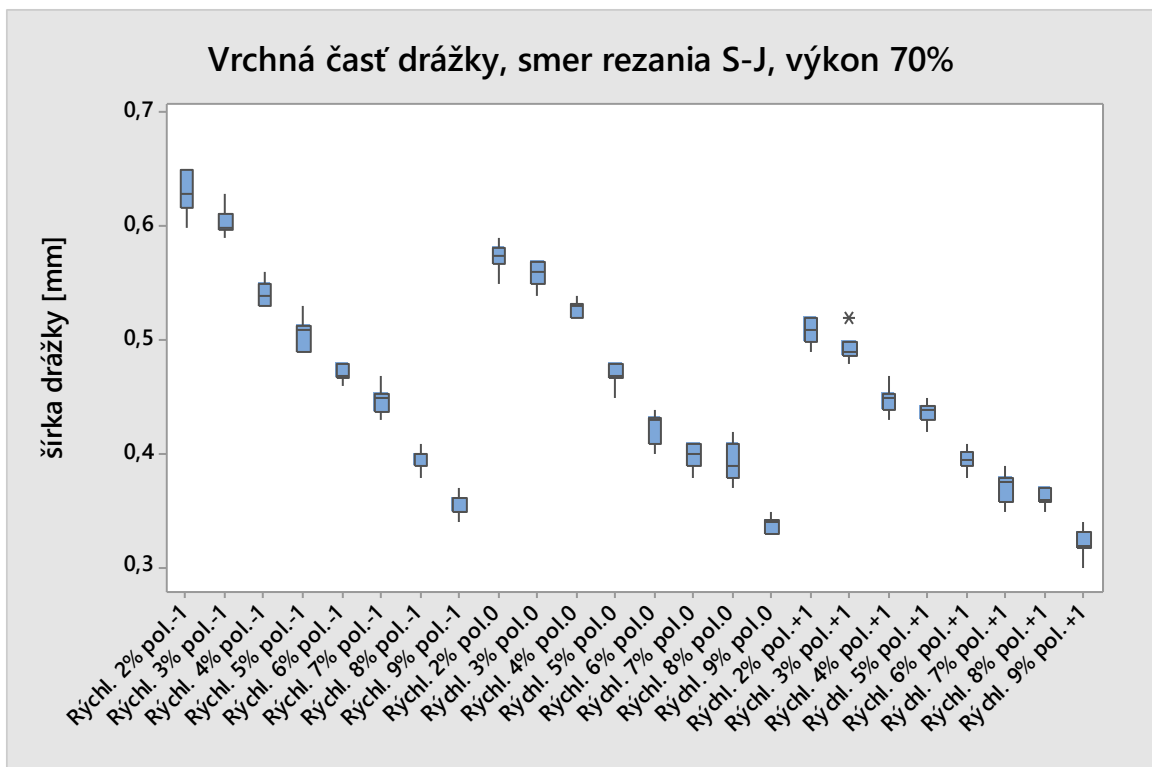
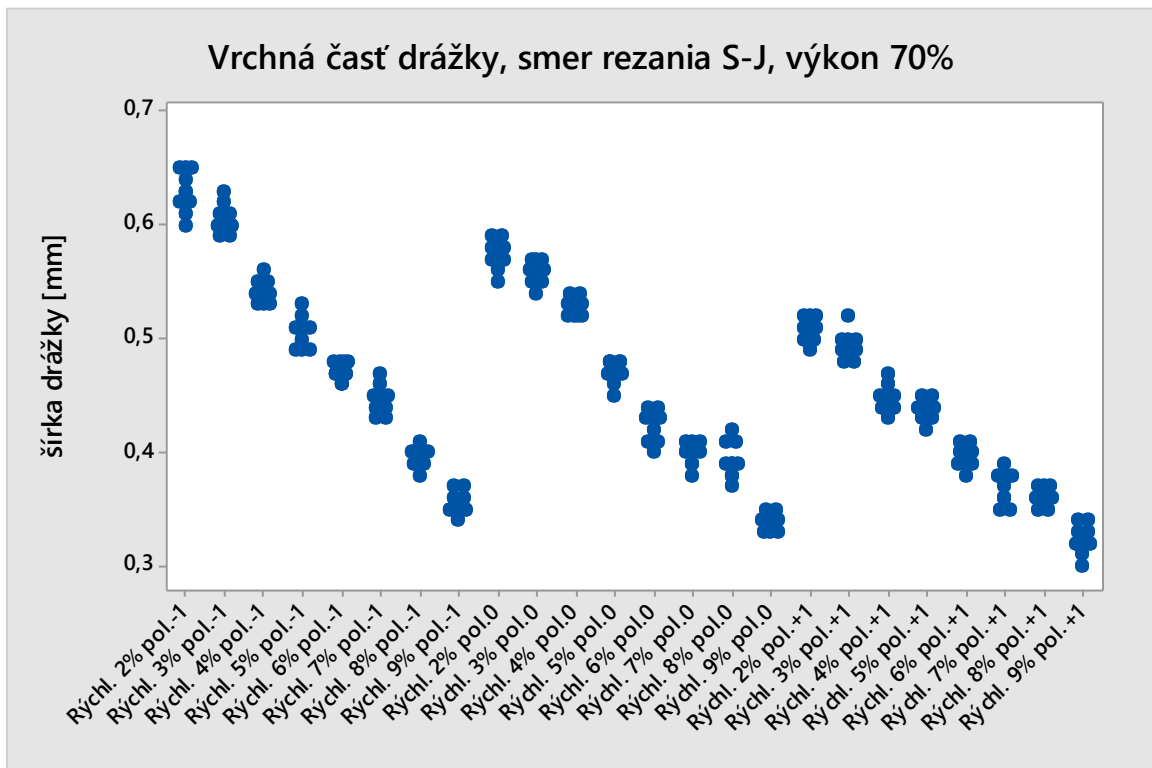
rezaní je najužšia. Výsledný rez je najčistejší (rozdiel v šírke drážky na vrchu a zospodu materiálu je najnižší).

Namerané hodnoty sú v prílohe P III.

K pretečeniu materiálu dochádza skôr ako u predchádzajúcich dvoch nastaveniach šošovky, pretečenie sa začne skôr prejavovať pri zvislom rezaní rovnako ako v oboch predchádzajúcich meraniach.

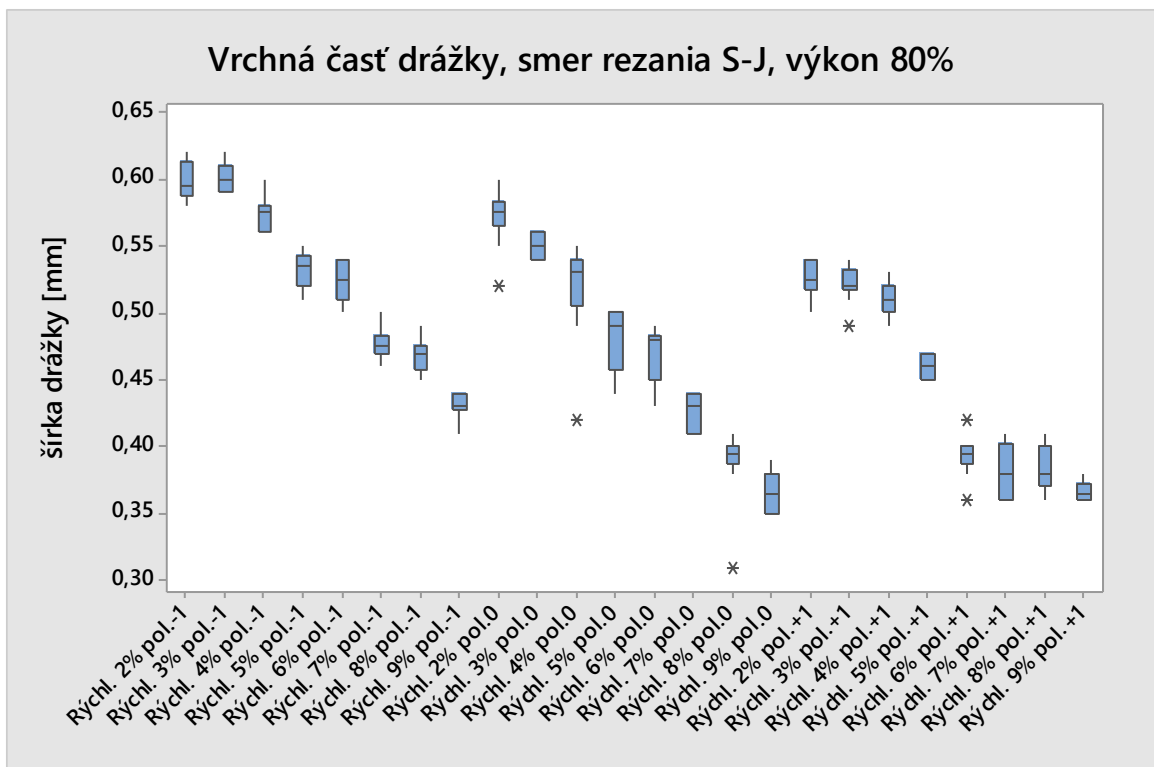
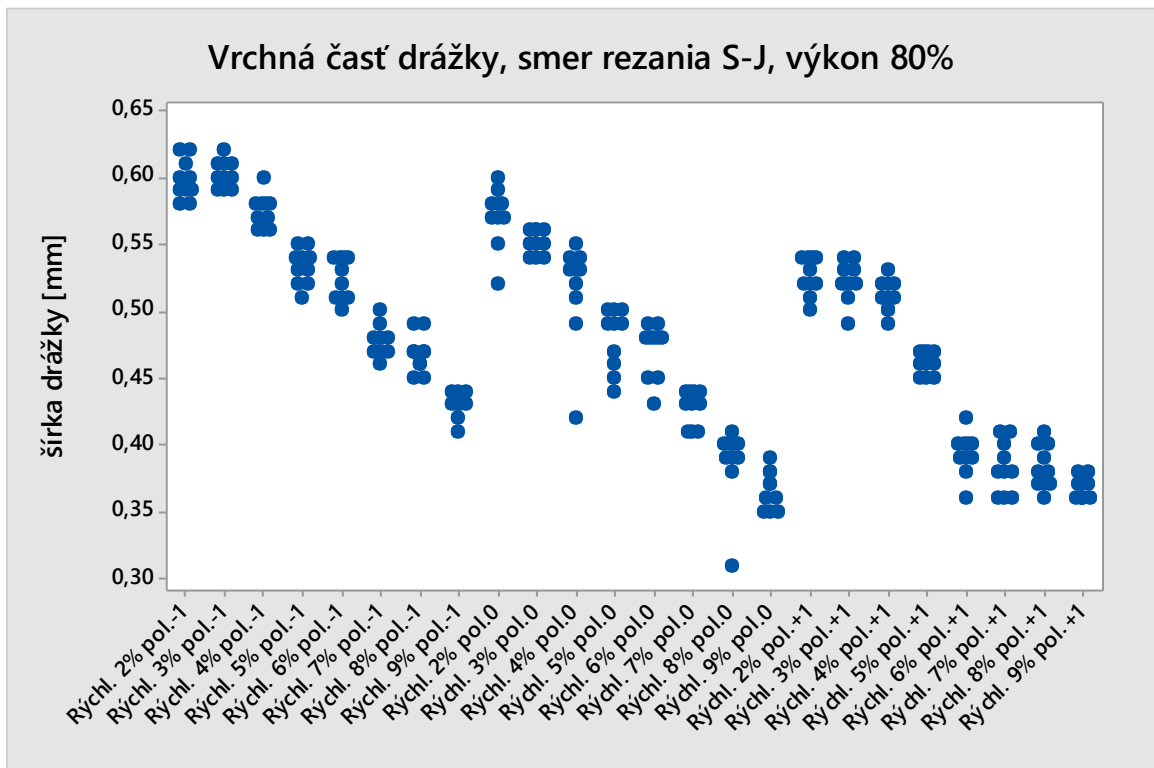
Pre jednotlivé merania bola spracovaná štatistika v programe Minitab. Štatistika pozostáva z dvoch grafov, prvý zobrazuje rozptyl nameraných hodnôt a druhý zobrazuje štatistické zobrazenie v grafe Boxplot. Horizontálna čiara predstavuje medián (50. percentil), horná hrana škatule 75. percentil a dolná hrana 25. percentil. Dĺžka obdĺžnika predstavuje medzikvartilové rozpätie (IQR), teda stredných 50 % hodnôt súboru. Horná čiarka predstavuje maximum a dolná čiarka minimum.

Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%



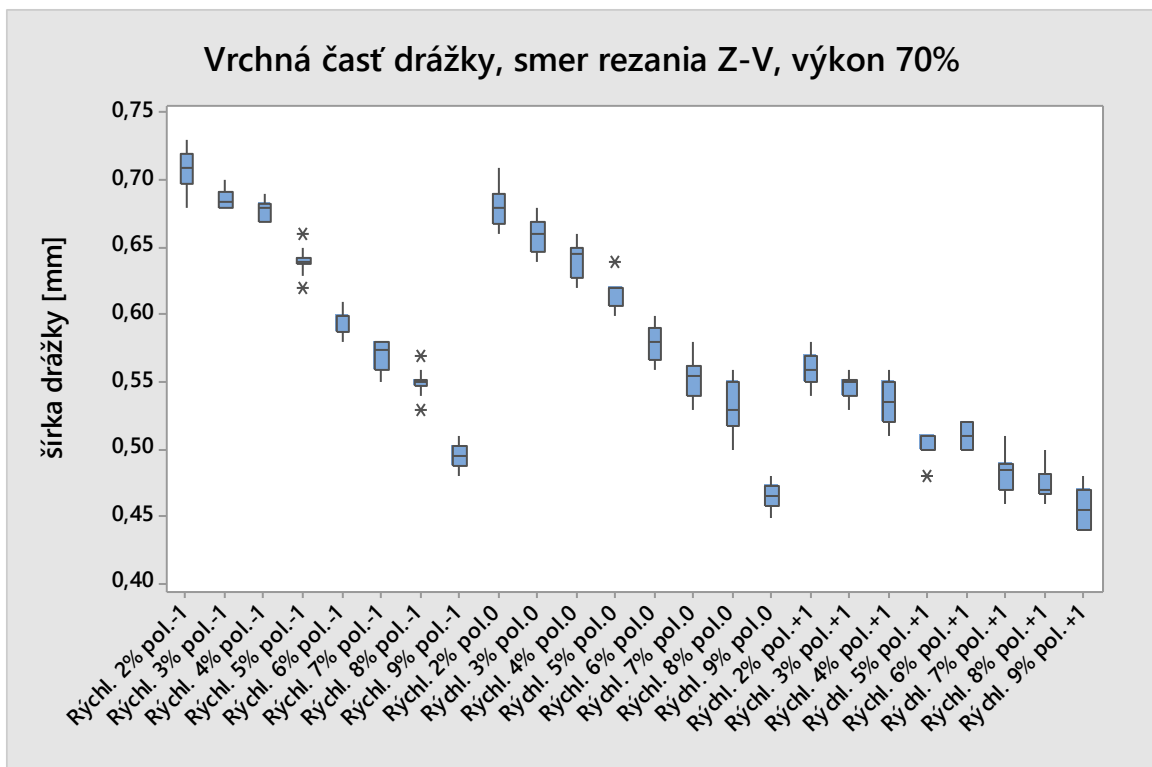
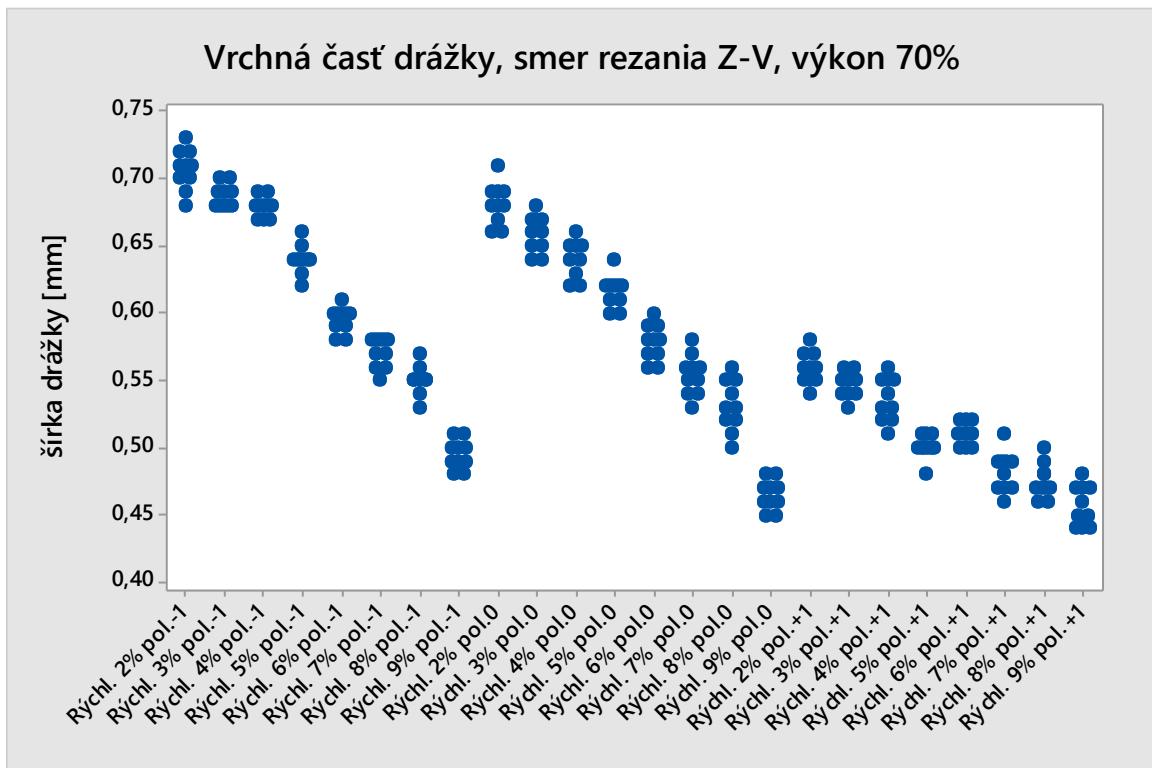
Obr. 33 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%

Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 80%



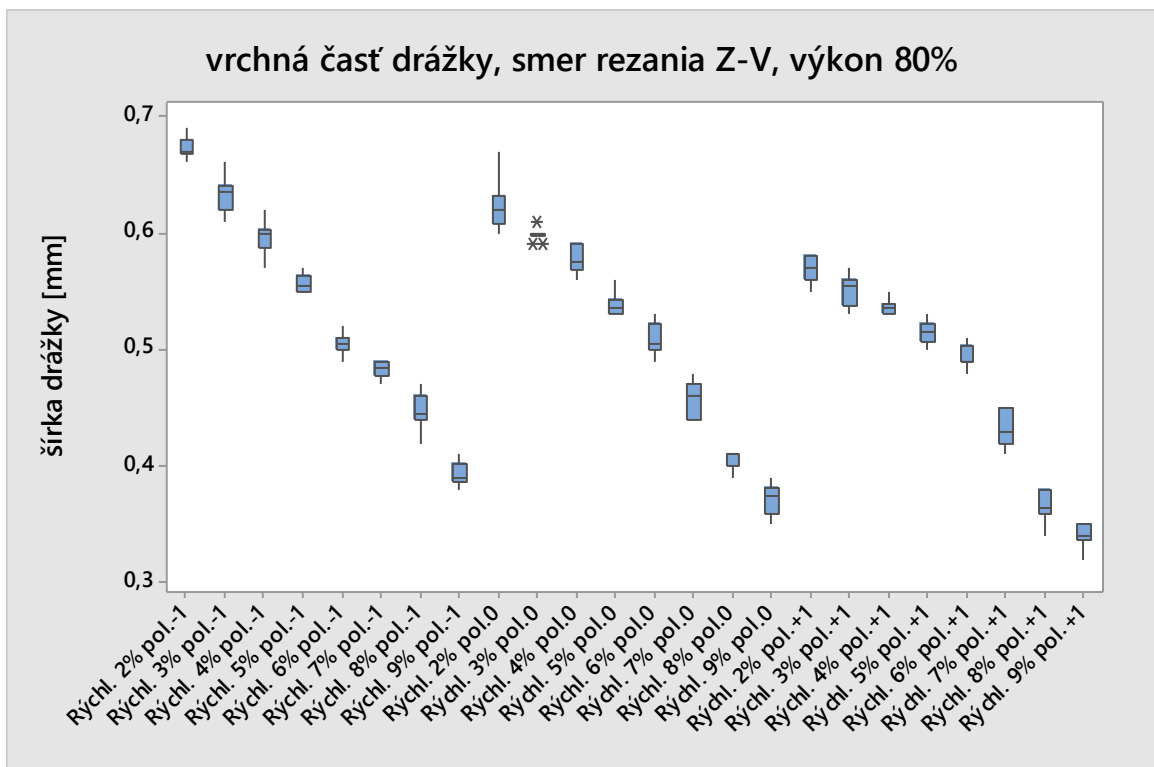
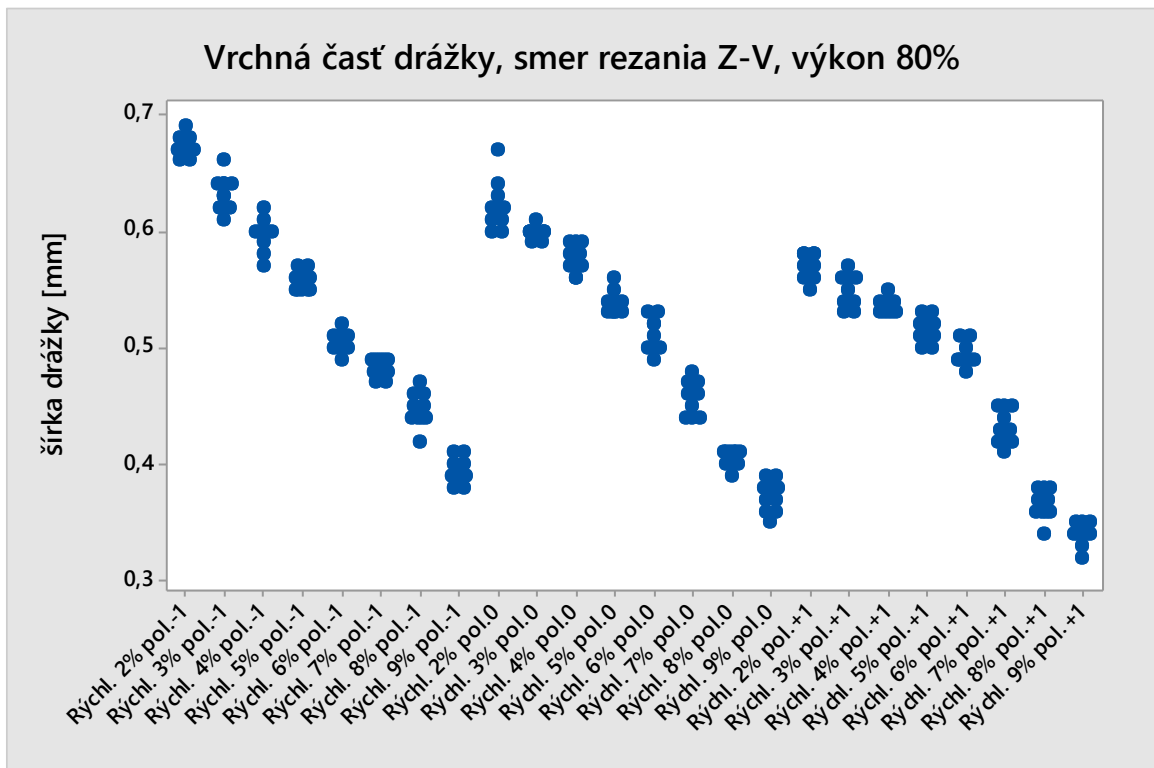
Obr. 34 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 80%

Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%



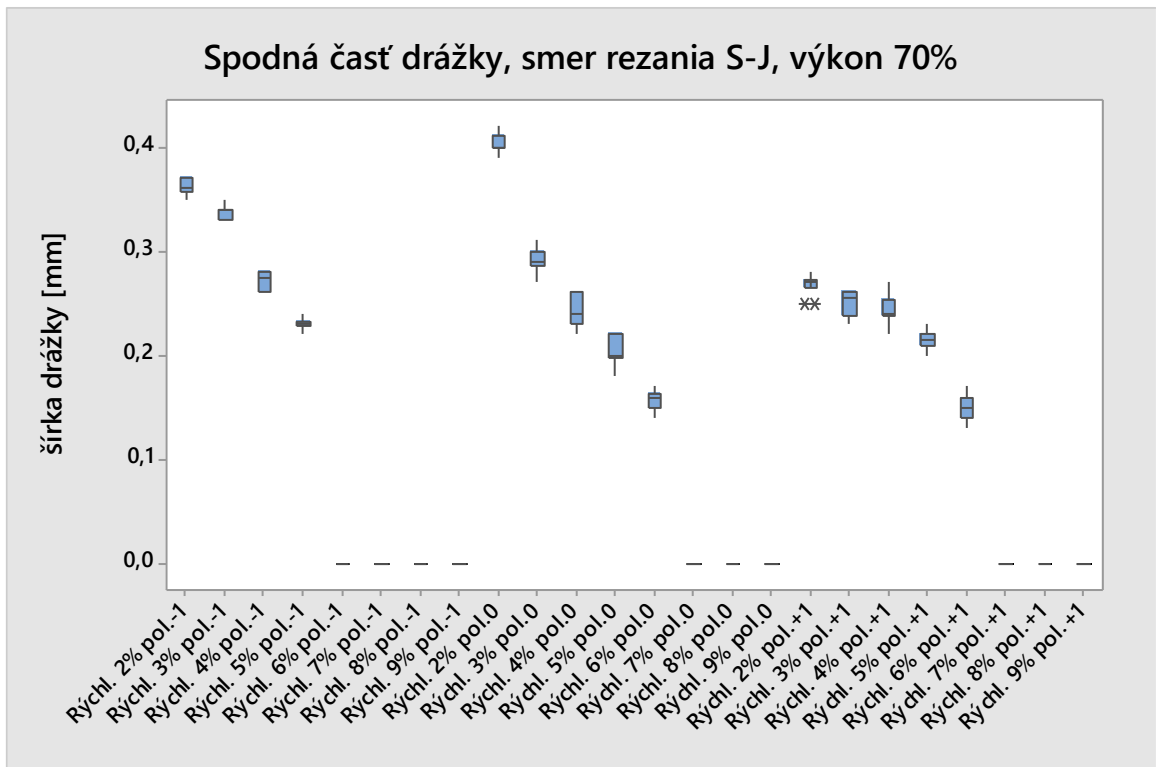
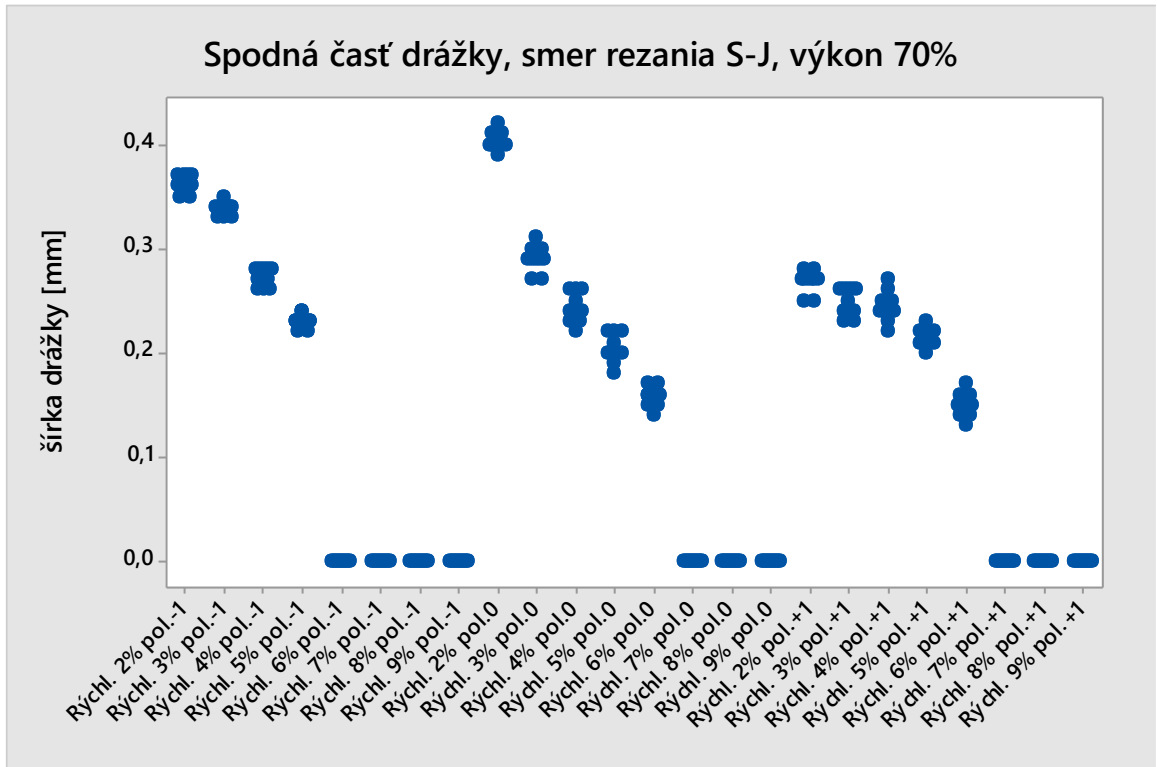
Obr. 35 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%

Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%



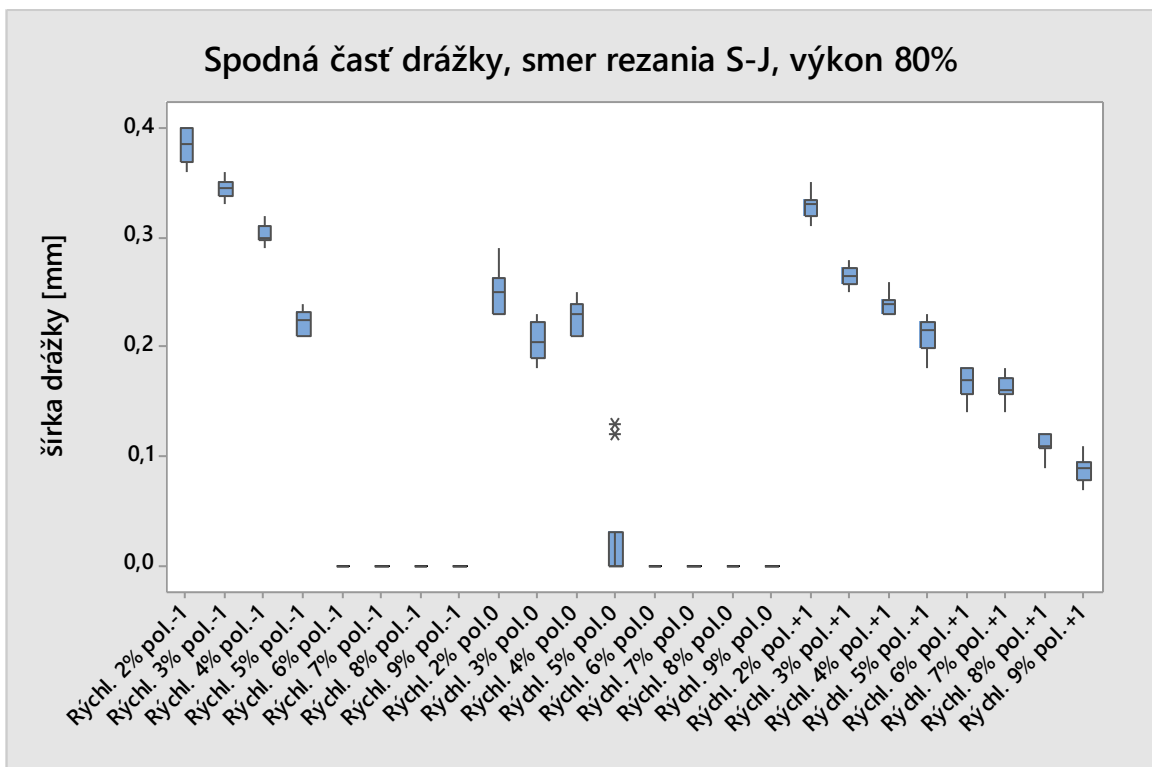
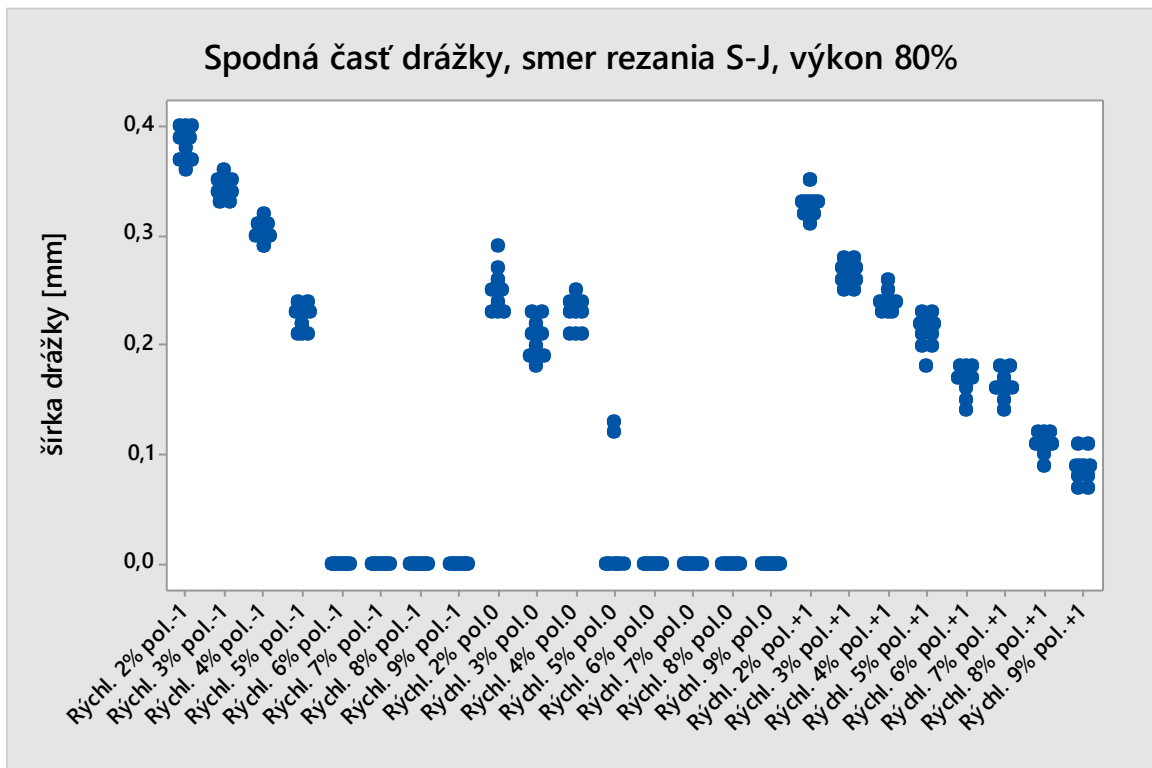
Obr. 36 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%

Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%



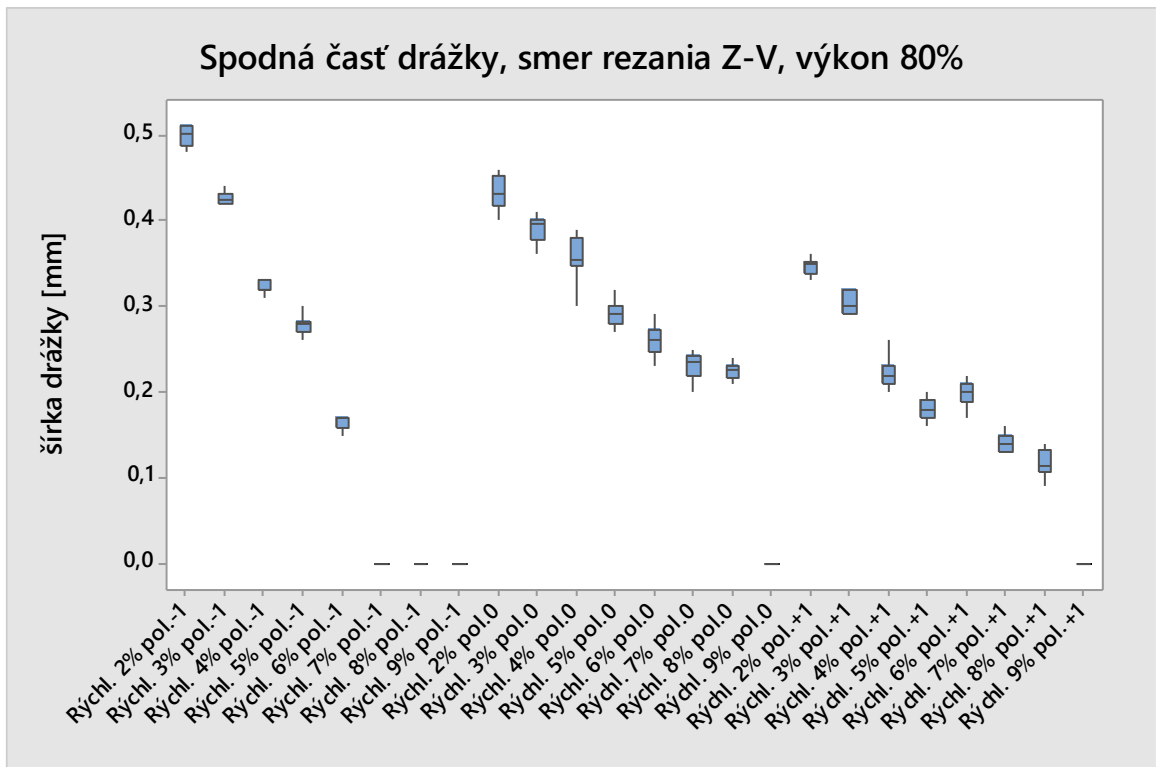
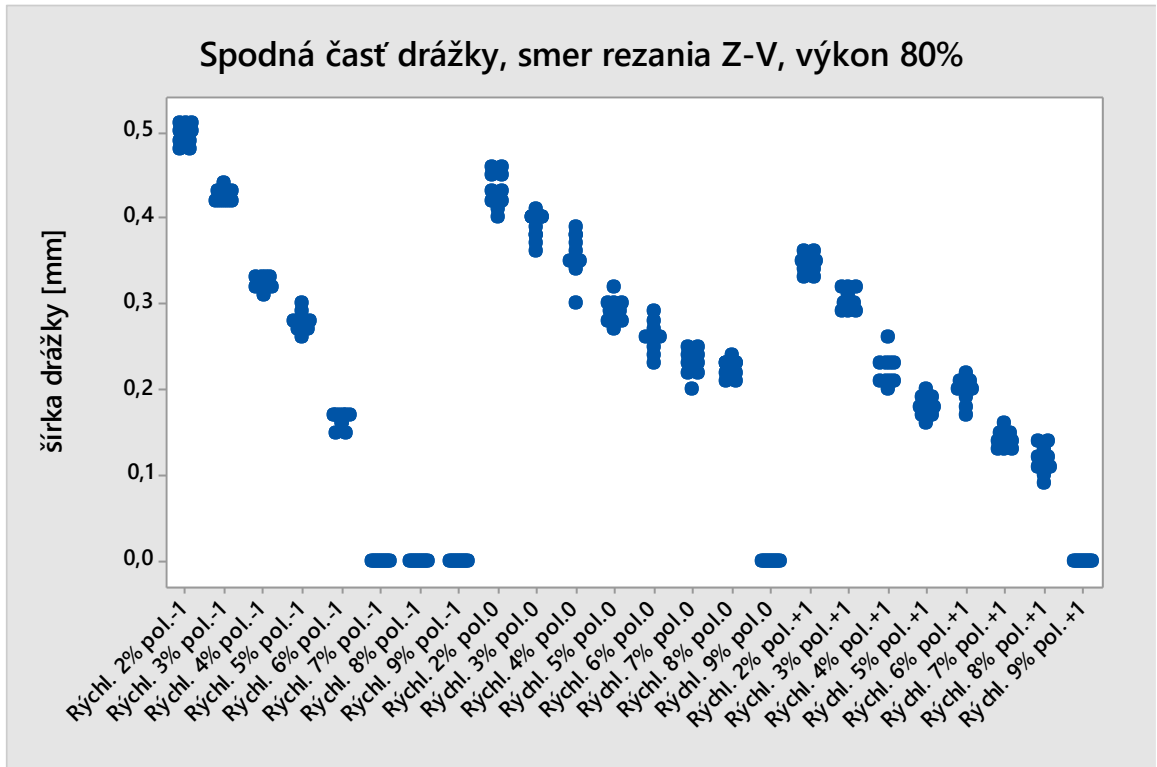
Obr. 37 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%

Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J výkon 80%



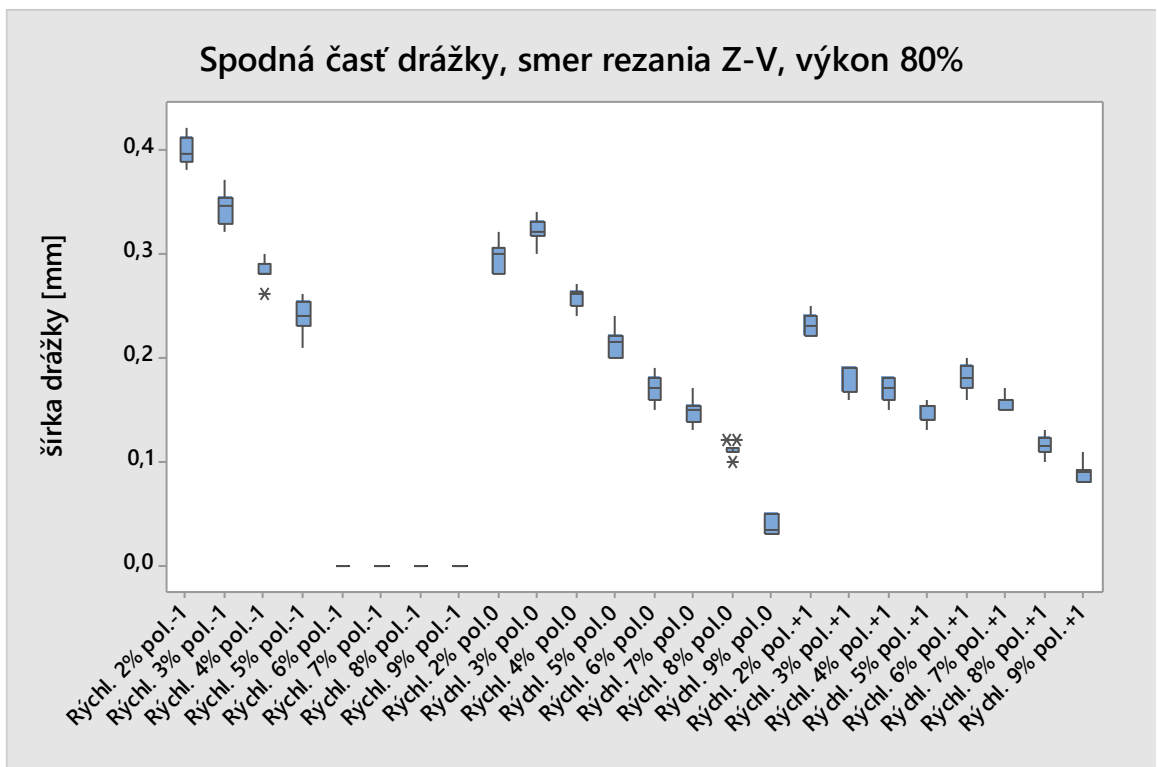
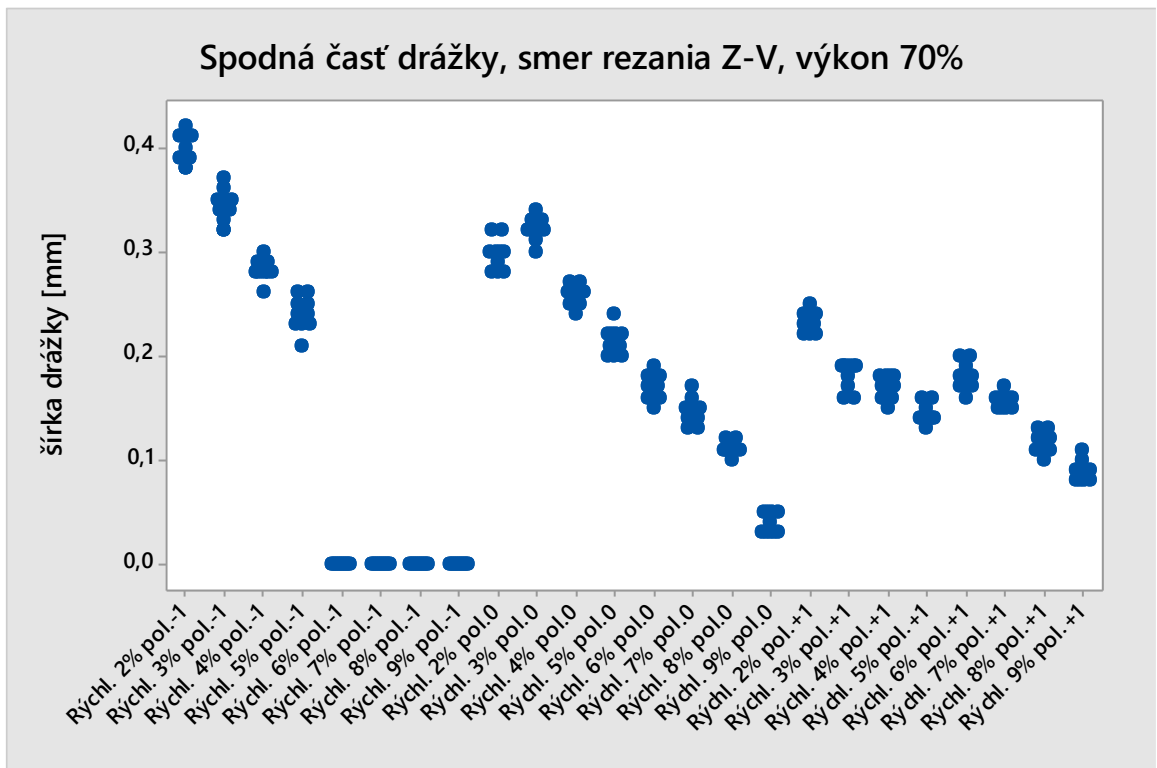
Obr. 38 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 80%

Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%



Obr. 39 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%

Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%



Obr. 40 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%

Z grafov je zřejmé, že spodná časť drážky je od vyšších rýchlostí značne deformovaná – zatečená. Pretože v spodnej časti rezanej drážky dochádza k pretečeniu materiálu, pre lepšiu ilustráciu, vyhodnotenie bolo prevedené na hornej časti drážky – miesto, kde laserový lúč vstupuje do materiálu. Rozdiel v šírke drážky v mieste dopadu lúča a výstupu lúča z materiálu je dobre zrejмый z tabuľky 9.

Z nameraných hodnôt je zřejmé, že pri zvýšení rýchlosti rezania dochádza k zúženiu rezanej drážky. Tiež je zřejmé, že pri skracovaní ohniskovej vzdialenosti je výsledná drážka širšia, naopak pri zväčšovaní ohniskovej vzdialenosti dochádza k zúženiu rezanej drážky.

V nasledujúcich tabuľkách (9, 10, 11) je zobrazené porovnanie štatistických hodnôt pre jednotlivé hodnoty nastavenia ohniskovej vzdialenosti.

Pri každej drážke bolo prevedených 10 meraní šírky drážky v náhodných miestach, preto celková početnosť je pri každom reze 10.

Tab. 9 Přehled prostředních hodnot (medián) šířky drážky

Rychlost		Šířka drážky (mm)																								
		2%		3%		4%		5%		6%		7%		8%		9%										
		0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1	-1							
Vrch drážky	S-J 70%	0,575	0,51	0,63	0,56	0,5	0,6	0,53	0,45	0,54	0,47	0,44	0,51	0,43	0,39	0,47	0,4	0,37	0,45	0,39	0,36	0,4	0,34	0,32	0,35	
Spodok drážky	S-J 70%	0,4	0,27	0,36	0,29	0,26	0,34	0,24	0,24	0,28	0,2	0,22	0,23	0,16	0,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vrch drážky	S-J 80%	0,575	0,54	0,6	0,55	0,52	0,6	0,53	0,52	0,58	0,49	0,46	0,54	0,48	0,4	0,53	0,43	0,38	0,48	0,4	0,38	0,47	0,37	0,36	0,43	
Spodok drážky	S-J 80%	0,25	0,33	0,39	0,21	0,27	0,35	0,23	0,24	0,3	0,13	0,22	0,23	0	0,17	0	0	0,16	0	0	0,11	0	0	0,09	0	
Vrch drážky	Z-V 70%	0,68	0,56	0,71	0,66	0,55	0,69	0,65	0,53	0,68	0,62	0,5	0,64	0,58	0,51	0,6	0,56	0,47	0,57	0,53	0,47	0,55	0,47	0,45	0,5	
Spodok drážky	Z-V 70%	0,3	0,23	0,4	0,32	0,19	0,35	0,26	0,17	0,28	0,22	0,14	0,24	0,17	0,18	0	0,15	0,16	0	0,11	0,12	0	0,04	0,09	0	
Vrch drážky	Z-V 80%	0,62	0,57	0,67	0,6	0,55	0,64	0,58	0,54	0,6	0,54	0,51	0,56	0,51	0,49	0,51	0,46	0,43	0,48	0,41	0,37	0,45	0,38	0,34	0,39	
Spodok drážky	Z-V 80%	0,43	0,35	0,5	0,4	0,3	0,43	0,36	0,22	0,32	0,29	0,18	0,28	0,26	0,2	0,17	0,23	0,14	0	0,23	0,12	0	0	0	0	

Tab. 10 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 37,1 mm „-1“

	Rýchlosť	Vrch drážky S-J 70%	Spodok drážky S-J 70%	Vrch drážky S-J 80%	Spodok drážky S-J 80%	Vrch drážky Z-V 70%	Spodok drážky Z-V 70%	Vrch drážky Z-V 80%	Spodok drážky Z-V 80%
Q1	2%	0,61750	0,35750	0,58750	0,37000	0,69750	0,38750	0,66750	0,48750
	3%	0,59750	0,33000	0,59000	0,33750	0,68000	0,32750	0,62000	0,42000
	4%	0,53000	0,26000	0,56000	0,29750	0,67000	0,28000	0,58750	0,32000
	5%	0,49000	0,22750	0,52000	0,21000	0,63750	0,23000	0,55000	0,27000
	6%	0,46750	0,00000	0,51000	0,00000	0,58750	0,00000	0,50000	0,15750
	7%	0,43750	0,00000	0,47000	0,00000	0,56000	0,00000	0,47750	0,00000
	8%	0,39000	0,00000	0,45750	0,00000	0,54750	0,00000	0,44000	0,00000
	9%	0,35000	0,00000	0,42750	0,00000	0,48750	0,00000	0,38750	0,00000
Median	2%	0,63000	0,36000	0,59500	0,38500	0,71000	0,39500	0,67000	0,50000
	3%	0,60000	0,34000	0,60000	0,34500	0,68500	0,34500	0,63500	0,42500
	4%	0,54000	0,27500	0,57500	0,30000	0,68000	0,28000	0,60000	0,32000
	5%	0,51000	0,23000	0,53500	0,22500	0,64000	0,24000	0,55500	0,28000
	6%	0,47000	0,00000	0,52500	0,00000	0,60000	0,00000	0,50500	0,17000
	7%	0,45000	0,00000	0,47500	0,00000	0,57500	0,00000	0,48500	0,00000
	8%	0,40000	0,00000	0,47000	0,00000	0,55000	0,00000	0,44500	0,00000
	9%	0,35000	0,00000	0,43000	0,00000	0,49500	0,00000	0,39000	0,00000
Q3	2%	0,65000	0,37000	0,61250	0,40000	0,72000	0,41000	0,68000	0,51000
	3%	0,61250	0,34000	0,61000	0,35000	0,69250	0,35250	0,64000	0,43000
	4%	0,55000	0,28000	0,58000	0,31000	0,68250	0,29000	0,60250	0,33000
	5%	0,51250	0,23250	0,54250	0,23250	0,64250	0,25250	0,56250	0,28250
	6%	0,48000	0,00000	0,54000	0,00000	0,60000	0,00000	0,51000	0,17000
	7%	0,45250	0,00000	0,48250	0,00000	0,58000	0,00000	0,49000	0,00000
	8%	0,40000	0,00000	0,47500	0,00000	0,55250	0,00000	0,46000	0,00000
	9%	0,36250	0,00000	0,44000	0,00000	0,50250	0,00000	0,40250	0,00000
Range	2%	0,05000	0,02000	0,04000	0,04000	0,05000	0,04000	0,03000	0,03000
	3%	0,04000	0,02000	0,03000	0,03000	0,02000	0,05000	0,05000	0,02000
	4%	0,03000	0,02000	0,04000	0,03000	0,02000	0,04000	0,05000	0,02000
	5%	0,04000	0,02000	0,04000	0,03000	0,04000	0,05000	0,02000	0,04000
	6%	0,02000	0,00000	0,04000	0,00000	0,03000	0,00000	0,03000	0,02000
	7%	0,04000	0,00000	0,04000	0,00000	0,03000	0,00000	0,02000	0,00000
	8%	0,03000	0,00000	0,04000	0,00000	0,04000	0,00000	0,05000	0,00000
	9%	0,03000	0,00000	0,03000	0,00000	0,03000	0,00000	0,03000	0,00000

Tab. 11 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 38,1 mm „0“

	Rýchlosť	Vrch drážky S-J 70%	Spodok drážky S-J 70%	Vrch drážky S-J 80%	Spodok drážky S-J 80%	Vrch drážky Z-V 70%	Spodok drážky Z-V 70%	Vrch drážky Z-V 80%	Spodok drážky Z-V 80%
Q1	2%	0,56750	0,40000	0,56500	0,23000	0,66750	0,28000	0,60750	0,41750
	3%	0,55000	0,28500	0,54000	0,19000	0,64750	0,31750	0,59750	0,37750
	4%	0,52000	0,23000	0,50500	0,21000	0,62750	0,25000	0,56750	0,34750
	5%	0,46750	0,19750	0,45750	0,00000	0,60750	0,20000	0,53000	0,28000
	6%	0,41000	0,15000	0,45000	0,00000	0,56750	0,16000	0,50000	0,24750
	7%	0,39000	0,00000	0,41000	0,00000	0,54000	0,13750	0,44000	0,22000
	8%	0,38000	0,00000	0,38750	0,00000	0,51750	0,11000	0,40000	0,21750
	9%	0,33000	0,00000	0,35000	0,00000	0,45750	0,03000	0,36000	0,00000
Median	2%	0,57500	0,40000	0,57500	0,25000	0,68000	0,30000	0,62000	0,43000
	3%	0,56000	0,29000	0,55000	0,20500	0,66000	0,32000	0,60000	0,39500
	4%	0,53000	0,24000	0,53000	0,23000	0,64500	0,26000	0,57500	0,35500
	5%	0,47000	0,20000	0,49000	0,00000	0,62000	0,21500	0,53500	0,29000
	6%	0,43000	0,16000	0,48000	0,00000	0,58000	0,17000	0,50500	0,26000
	7%	0,40000	0,00000	0,43000	0,00000	0,55500	0,15000	0,46000	0,23500
	8%	0,39000	0,00000	0,39500	0,00000	0,53000	0,11000	0,41000	0,22500
	9%	0,34000	0,00000	0,36500	0,00000	0,46500	0,03500	0,37500	0,00000
Q3	2%	0,58250	0,41000	0,58250	0,26250	0,69000	0,30500	0,63250	0,45250
	3%	0,57000	0,30000	0,56000	0,22250	0,67000	0,33000	0,60000	0,40000
	4%	0,53250	0,26000	0,54000	0,24000	0,65000	0,26250	0,59000	0,38000
	5%	0,48000	0,22000	0,50000	0,03000	0,62000	0,22000	0,54250	0,30000
	6%	0,43250	0,16250	0,48250	0,00000	0,59000	0,18000	0,52250	0,27250
	7%	0,41000	0,00000	0,44000	0,00000	0,56250	0,15250	0,47000	0,24250
	8%	0,41000	0,00000	0,40000	0,00000	0,55000	0,11250	0,41000	0,23000
	9%	0,34250	0,00000	0,38000	0,00000	0,47250	0,05000	0,38250	0,00000
Range	2%	0,04000	0,03000	0,08000	0,06000	0,05000	0,04000	0,07000	0,06000
	3%	0,03000	0,04000	0,02000	0,05000	0,04000	0,04000	0,02000	0,05000
	4%	0,02000	0,04000	0,13000	0,04000	0,04000	0,03000	0,03000	0,09000
	5%	0,03000	0,04000	0,06000	0,13000	0,04000	0,04000	0,03000	0,05000
	6%	0,04000	0,03000	0,06000	0,00000	0,04000	0,04000	0,04000	0,06000
	7%	0,03000	0,00000	0,03000	0,00000	0,05000	0,04000	0,04000	0,05000
	8%	0,05000	0,00000	0,10000	0,00000	0,06000	0,02000	0,02000	0,03000
	9%	0,02000	0,00000	0,04000	0,00000	0,03000	0,02000	0,04000	0,00000

Tab. 12 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 39,1 mm „+I“

	Rýchlosť	Vrch drážky S-J 70%	Spodok drážky S-J 70%	Vrch drážky S-J 80%	Spodok drážky S-J 80%	Vrch drážky Z-V 70%	Spodok drážky Z-V 70%	Vrch drážky Z-V 80%	Spodok drážky Z-V 80%
Q1	2%	0,50000	0,26500	0,51750	0,32000	0,55000	0,22000	0,56000	0,33750
	3%	0,48750	0,23750	0,51750	0,25750	0,54000	0,16750	0,53750	0,29000
	4%	0,44000	0,23750	0,50000	0,23000	0,52000	0,16000	0,53000	0,21000
	5%	0,43000	0,21000	0,45000	0,20000	0,50000	0,14000	0,50750	0,17000
	6%	0,39000	0,14000	0,38750	0,15750	0,50000	0,17000	0,49000	0,18750
	7%	0,35750	0,00000	0,36000	0,15750	0,47000	0,15000	0,42000	0,13000
	8%	0,35750	0,00000	0,37000	0,10750	0,46750	0,11000	0,36000	0,10750
	9%	0,31750	0,00000	0,36000	0,07750	0,44000	0,08000	0,33750	0,00000
Median	2%	0,51000	0,27000	0,52500	0,33000	0,56000	0,23000	0,57000	0,35000
	3%	0,49000	0,25500	0,52000	0,26500	0,55000	0,19000	0,55500	0,30000
	4%	0,45000	0,24000	0,51000	0,24000	0,53500	0,17000	0,53500	0,22000
	5%	0,44000	0,21500	0,46000	0,21500	0,50000	0,14000	0,51500	0,18000
	6%	0,39500	0,15000	0,39500	0,17000	0,51000	0,18000	0,49000	0,20000
	7%	0,37500	0,00000	0,38000	0,16000	0,48500	0,16000	0,43000	0,14000
	8%	0,36000	0,00000	0,38000	0,11000	0,47000	0,11500	0,36500	0,11500
	9%	0,32000	0,00000	0,36500	0,09000	0,45500	0,09000	0,34000	0,00000
Q3	2%	0,52000	0,27250	0,54000	0,33500	0,57000	0,24000	0,58000	0,35250
	3%	0,50000	0,26000	0,53250	0,27250	0,55250	0,19000	0,56000	0,32000
	4%	0,45250	0,25250	0,52000	0,24250	0,55000	0,18000	0,54000	0,23000
	5%	0,44250	0,22000	0,47000	0,22250	0,51000	0,15250	0,52250	0,19000
	6%	0,40250	0,16000	0,40000	0,18000	0,52000	0,19250	0,50250	0,21000
	7%	0,38000	0,00000	0,40250	0,17250	0,49000	0,16000	0,45000	0,15000
	8%	0,37000	0,00000	0,40000	0,12000	0,48250	0,12250	0,38000	0,13250
	9%	0,33250	0,00000	0,37250	0,09500	0,47000	0,09250	0,35000	0,00000
Range	2%	0,03000	0,03000	0,04000	0,04000	0,04000	0,03000	0,03000	0,03000
	3%	0,04000	0,03000	0,05000	0,03000	0,03000	0,03000	0,04000	0,03000
	4%	0,04000	0,05000	0,04000	0,03000	0,05000	0,03000	0,02000	0,06000
	5%	0,03000	0,03000	0,02000	0,05000	0,03000	0,03000	0,03000	0,04000
	6%	0,03000	0,04000	0,06000	0,04000	0,02000	0,04000	0,03000	0,05000
	7%	0,04000	0,00000	0,05000	0,04000	0,05000	0,02000	0,04000	0,03000
	8%	0,02000	0,00000	0,05000	0,03000	0,04000	0,03000	0,04000	0,05000
	9%	0,04000	0,00000	0,02000	0,04000	0,04000	0,03000	0,03000	0,00000

ZÁVER

Cieľom práce bolo určiť vplyv ohniskovej vzdialenosti CO₂ lasera na výslednú šírku rezu. Teoretická časť obsahuje základné teoretické poznatky z oblasti, popisuje prehľad laserov, zaoberá sa parametrami, ktoré majú vplyv na výslednú kvalitu a tým aj šírku rezu. Praktická časť práce popisuje priebeh meraní šírky rezu na vybranom polyméry –PMMA.

Výrobca stanovuje ideálnu polohu šošovky – optimálnu vzdialenosť ohniskového bodu pre široké spektrum materiálov (kov, plast, drevo, sklo a pod.) a pre rôzne typy opracovania materiálu (rezanie, gravírovanie, popisovanie). Z meraní vyplýva, že na výslednú kvalitu rezu vplyva viacero parametrov: rýchlosť rezania, výkon lasera a ohnisková vzdialenosť. Pre používateľa je nevyhnutné pred samotným procesom obrábania určiť, ktorý parameter je pre daný proces najvýhodnejší, či potrebuje rýchlo oddeliť materiál, požaduje čistý rez na oboch stranách materiálu alebo rovnomerný rez, prípadne vhodnú kombináciu všetkých.

Z charakteristiky polymérov vyplýva ich zložité opracovanie laserom. Nie všetky typy polymérov sa dajú efektívne obrábať, a aj pri polyméroch, ktoré sú na opracovanie laserom vhodné, je vhodné pred samotnou prácou vykonať sériu overovacích prác za účelom zistenia výslednej kvality povrchu opracovaného polyméru. Optimálne pracovné podmienky – rýchlosť rezania, výkon lasera, ohnisková vzdialenosť šošovky, je možné zistiť až po sérii vykonaných prác.

Z meraní je zrejmé, že na laseri je výhodnejšie rezať vo vodorovnom smere, takéto rezanie umožňuje použiť vyšší výkon rezania a vyššie rýchlosti rezania. Ďalším nevyhnutným poznatkom je fakt, že drážka po rezaní má z hornej strany (v mieste vstupu lúča do materiálu) presnejší tvar a menšiu drsnosť, nakoľko k pretečeniu (nedopáleniu) dochádza skôr v mieste výstupu laserového lúča z materiálu. Tento poznatok je dôležitý pre aplikácie, kedy potrebujeme docieľiť efektný vzhľad výsledného produktu, napr. pri rezaní reklamných nápisov a pod.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] V. GELETA a J. ZONGOR, „Prednáška z predmetu Nekonenčné technológie,“ STU Bratislava, [Online]. Dostupné z:
<http://www.kvs.sjf.stuba.sk/NT/LASER%20V%20OBR%C3%81BAN%C3%8D.pdf>.
[Cit. 10 02 2015].
- [2] „Seriál na tema lasery,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>. [Cit.17 01 2015].
- [3] „CO2 laser library,“ Trumpf machines, [Online]. Dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-and-laser-processing.html>.
[Cit. 20 1 2015].
- [4] „Laser basics,“ [Online]. Dostupné z:
https://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/laser-basics410_39552.pdf.
[Cit. 28 1 2015].
- [5] I. MAŇKOVÁ, Progresívne technológie, Košice: Vienaľa, 2000.
- [6] A. HUMÁR, Technologie obrábění - 3.část, Brno: VUT, 2005.
- [7] „Resonator Modes,“ [Online]. Dostupné z: http://www.rp-photonics.com/resonator_modes.html. [Cit. 12 02 2015].
- [8] „Optické komponenty,“ [Online]. Dostupné z:
<http://www.eurolaser.com/sk/products/system-components/optical-components/>. [Cit. 21 01 2015].
- [9] „Aspekty laseroveho pracoviska,“ industry-central.eu, [Online]. Dostupné z:
<http://www.industry-central.eu/sk/clanky/ekologia/95-bezpenostne-a-environmentalne-aspekty-laseroveho-pracoviska>. [Cit. 28 1 2015].
- [10] „Laser,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.bickelwolf.sk/s/21.html>. [Cit. 21 1 2015].
- [11] „Rezanie laserom,“ [Online]. Dostupné z:
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=372>. [Cit. 20 01 2015].

- [12] „Polyméry,“ [Online]. Dostupné z: www.matnet.sav.sk/data/files/688.doc. [Cit. 28 01 2015].
- [13] V. DUCHÁČEK, *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, Praha: VŠCHT, 1999.
- [14] *STN EN ISO 1043-1*, ISO, 2012.
- [15] TUKE, „příklad text.doc,“ [Online]. Dostupné z: <ftp://ftp.sjf.tuke.sk/Vyucba/Word/prikklad%20text.doc>. [Cit. 27 01 2015].
- [16] „Laser processing Guide Plastics,“ [Online]. Dostupné z: http://www.synrad.com/synradinside/pdfs/LaserProcessingGuide_Plastics.pdf. [Cit. 25 01 2015].
- [17] „Polymer and laser,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.vestamid.com/sites/dc/Downloadcenter/Evonik/Product/VESTAMID/en/brochures/Polymer%20and%20Laser.pdf>. [Cit. 26 01 2015].
- [18] „ILS III NM,“ [Online]. Dostupné z: http://littcorp.com/product_ILS.html. [Cit. 26 01 2015].
- [19] L. T. & T. Corp., *Operation manual*, 2007.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

CO ₂	Oxid uhličitý (zmes plynu)
He	Hélium
R _a	Drsnosť povrchu – priemerná aritmetická odchýlka profilu
R _y	Drsnosť povrchu – najväčšia výška profilu
PC	Osobný počítač
PMMA	polymetylakrylát
TEM	Tvar prierezu zväzku
f	Ohnisková vzdialenosť
D	Priemer
d	Polomer
USB	Univerzálna sériová zbernica
LPT	Parelný port
LAN	Lokálna počítačová sieť
DPI	Počet bodov na palec

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Spektrálny rozsah svetla a lasera [1]	11
Obr. 2 Stimulovaná emisia fotónov [2]	13
Obr. 3 Porovnanie svetelného lúča a laserového lúča [3]	14
Obr. 4 Časti lasera [2]	15
Obr. 5 Spontánna a stimulovaná emisia [4]	16
Obr. 6 Prehľad použitia jednotlivých módov TEM pri obrábaní [5]	18
Obr. 7 Porovnanie pulzného a kontinuálneho režimu práce lasera [6]	21
Obr. 8 Porovnanie vybraných módov [7]	22
Obr. 9 Ohnisková vzdialenosť [8]	23
Obr. 10 Závislosť ohniskovej vzdialenosti a ostrosti ohniskového bodu [8]	24
Obr. 11 Závislosť ohniskovej vzdialenosti a hĺbky ostrosti [8]	25
Obr. 12 Rozdelenie laserov podľa povahy aktívneho prostredia [9]	27
Obr. 13 Konštrukcia CO ₂ lasera [10]	28
Obr. 14 CO ₂ laser s transverzným tokom laserovacieho média [1]	30
Obr. 15 CO ₂ laser s axialným tokom laserovacieho média [1]	31
Obr. 16 Schéma obrábania laserom [11]	32
Obr. 17 Rozdelenie polymérov [13]	37
Obr. 18 Rozdelenie polymérov z hľadiska ich využitia [15]	40
Obr. 19 Absorpcia svetla plastov a vlnové dĺžky laserov [17]	45
Obr. 20 Laser ILS 3 NM [18]	51
Obr. 21 Dielenský mikroskop	53
Obr. 22 Nastavenie ohniskovej vzdialenosti [19]	55
Obr. 23 Nastavenie ohniskovej vzdialenosti	56
Obr. 24 Tlač grafického súboru na laseri	57
Obr. 25 Nastavenie výkonu lasera a rezacej rýchlosti	58
Obr. 26 Výsledná mapa rezov nastavená na laseri	58
Obr. 27 Vzorok s vypálenými drážkami	59
Obr. 28 Drážka po rezaní zväčšená pod mikroskopom	59
Obr. 29 Vrchná a spodná časť drážky (zaostrenie na vrchnú časť drážky)	60
Obr. 30 Vrchná a spodná časť drážky (zaostrenie na spodnú časť drážky)	60
Obr. 31 Výpočet šírky rezu	61
Obr. 32 Pretečenie materiálu pri rezaní	63

Obr. 33 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%	65
Obr. 34 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 80%	66
Obr. 35 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%	67
Obr. 36 Meranie vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%	68
Obr. 37 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 70%	69
Obr. 38 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon 80%	70
Obr. 39 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 80%	71
Obr. 40 Meranie spodnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon 70%	72

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Vývoj lasera	12
Tab. 2 Premenné ovplyvňujúce kvalitu rezu	36
Tab. 3 Skratky najčastejšie používaných plastov podľa STN EN ISO 1043-1 [14].....	39
Tab. 4 Prehľad polymérov pre opracovanie CO ₂ laserom [16]	44
Tab. 5 Rozdelenie polyetylénov	47
Tab. 6 Technické parametre lasera ILS 3NM.....	52
Tab. 7 Vlastnosti PMMA.....	54
Tab. 8 Princíp merania.....	56
Tab. 9 Prehľad prostredných hodnôt (medián) šírky drážky	74
Tab. 10 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 37,1 mm „-1“.....	75
Tab. 11 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 38,1 mm „0“	76
Tab. 12 Prehľad štatistických hodnôt pre ohniskovú vzdialenosť 39,1 mm „+1“.....	77

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha P I: Namerané hodnoty pre pozíciu šošovky “0“

Príloha P II: Namerané hodnoty pre pozíciu šošovky “-1“

Príloha P III: Namerané hodnoty pre pozíciu šošovky “+1“

Príloha P IV: Štatistické ukazovatele merania vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon
70%

Príloha P V: Štatistické ukazovatele merania vrchnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon
80%

Príloha P VI: Štatistické ukazovatele merania vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon
70%

Príloha P VII: Štatistické ukazovatele merania vrchnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon
80%

Príloha P VIII: Štatistické ukazovatele merania dolnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon
70%

Príloha P IX: Štatistické ukazovatele merania dolnej časti drážky, smer rezania S-J, výkon
80%

Príloha P X: Štatistické ukazovatele merania dolnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon
70%

Príloha P XI: Štatistické ukazovatele merania dolnej časti drážky, smer rezania Z-V, výkon
80%