

Mikroobrábění polymerních materiálů na CO2 laseru - Mechanika Prostějov

Bc. Marek Sukup

Diplomová práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2005/2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

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

Téma práce: **Mikroobrábění polymerních materiálů na CO2 laseru
– Mechanika Prostějov**

Zásady pro vypracování:

A) Vypracujte rešerši se zaměřením na tyto oblasti:

- 1. Význam a pojem technologie, rozdělení výrobních procesů, klasifikace pojmu obrábění**
- 2. Progresivní technologie, jejich klasifikace a základní charakteristiky, posouzení vhodnosti pro opracování konstrukčních materiálů**
- 3. Obrábění laserem, definice a základní vlastnosti laserového paprsku, druhy laseru a jejich dělení, účinek laserového paprsku na materiál a úběr materiálu, CO2 lasery, klasifikace procesu mikroobrábění**
- 4. Polymerní materiály, rozdělení, výroba, vlastnosti, vhodnost pro použití progresivních technologií**

B) Experimentální část:

- 1. Obrábění PMMA za různých technologických podmínek a změny DPI (1000)**
- 2. Provedte měření drsnosti povrchu a hloubky řezu**
- 3. Vyhodnoťte vliv změny DPI na jakost obráběných ploch**
- 4. Provedte rozbor strukturálních změn a vlivu koncentrované energie na PMMA – teplotní pole**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2006

Termín odevzdání diplomové práce:

31. května 2006

Ve Zlíně dne 11. ledna 2006



prof. Ing. Josef Šimoník, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje možnosti progresivních technologií, jejich použití při obrábění polymerních materiálů, především PMMA. Hlavním částí rešerše je popis jednotlivých druhů laserů a principů na kterých pracují. V praktická část je zaměřena na určení výsledku obrábění při různých technologických podmínkách a vlivu změny rozlišení z 500 na 1000DPI. Poslední část popisuje působení laserového paprsku na polymer.

Klíčová slova: progresivní technologie, laser, PMMA, DPI, teplotní pole

ABSTRACT

This diploma work describes possibilities of progressive technologies, their application for material shaping, especially PMMA.

The main part of background research consists of individual laser characteristics and their working principles.

The practical part intends on shaping results at different technological conditions and also enquires into influence of changing from 500 to 1000 DPI resolution.

The effects of laser ray application on polymer are contained in the last part of this work.

Keywords: advanced technology, laser, PMMA, DPI, field of temperature

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

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 VÝZNAM A POJEM TECHNOLOGIE	10
2 ROZDĚLENÍ VÝROBNÍCH PROCESŮ VE STROJÍRENSKÉ VÝROBĚ	11
2.1 KLASIFIKACE ZPŮSOBŮ OBRÁBĚNÍ	14
3 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ	16
3.1 KLASIFIKACE PROGRESIVNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	17
3.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění	17
3.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa.....	18
3.1.3 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu	18
3.2 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY PROGRESIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	18
3.2.1 Obrobitelnost materiálů.....	19
3.2.2 Tvarová komplexnost součástí	19
3.2.3 Automatizace výroby	19
3.2.4 Integrita povrchu a požadavek vysoké přesnosti	19
3.2.5 Miniaturizace dílců	20
4 VZNIK A PRINCIP LASERU	24
4.1 FYZIKÁLNÍ PRINCIP LASERU.....	28
4.2 HLAVNÍ TYPY LASERŮ	29
4.2.1 Pevnolátkové lasery	29
4.2.2 Kapalinové lasery	30
4.2.3 Polovodičové lasery	30
4.2.4 Plynové lasery	31
4.2.5 Lasery pracující v pulsním režimu.....	34
4.2.6 Lasery pracující v kontinuálním režimu	34
4.3 KRITERIA HODNOCENÍ POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM	34
4.4 ŘEZÁNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ	36
4.5 KLASIFIKACE PROCESU MIKROOBRÁBĚNÍ	37
4.6 MOŽNOSTI MIKROOBRÁBĚNÍ LASEREM.....	38
4.6.1 Laserové popisování a gravírování	39
5 PLASTY A JEJICH VLASTNOSTI	41
5.1 ZÁKLADNÍ POJMY A ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	41
5.2 VÝROBA A VLASTNOSTI REAKTOPLASTŮ	41
5.3 VÝROBA A VLASTNOSTI TERMOPLASTŮ - PMMA.....	43
6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE – SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	46
7 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL – PŘÍPRAVA VZORKU	47

8	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCI	49
8.1	LASER – MERCURY L30	49
8.2	DRSNOMĚR – SJ 301	50
8.3	LINEÁRNÍ VÝŠKOMĚR LH – 600 B	51
9	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU	52
10	ZHODNOCENÍ Vlivu Změny DPI NA JAKOST OBRÁBĚNÉ PLOCHY	57
11	ROZBOR PŮSOBENÍ KONCENTROVANÉ ENERGIE NA PMMA – TEPLOTNÍ POLE	64
11.1	ÚČINEK LASEROVÉHO PAPRSKU NA MATERIÁL	64
11.2	SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE	67
12	DISKUZE VÝSLEDKŮ	76
12.1	MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A HLOUBKY DRÁŽKY	76
12.2	VYHODNOCENÍ Vlivu Změny DPI NA JAKOST OBRÁBĚNÝCH PLOCH	77
12.3	ZHODNOCENÍ Vlivu KONCENTROVANÉ ENERGIE NA OBRÁBĚNÝ MATERIÁL	77
	ZÁVĚR	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	83
	SEZNAM TABULEK	85

ÚVOD

Současná úroveň výroby vyžaduje, aby aplikované materiály splňovaly ty nejnáročnější kritéria, ať už z hlediska dlouhé životnosti a opotřebení, tak i ekonomického. Vysoké požadavky na zpracování těchto materiálů jsme nuceni řešit aplikací nekonvenčních technologií, neboť klasické metody obrábění již často nesplňují požadavky kladené na rychlost a kvalitu zpracování. Proto se stále častěji setkáváme s metodami, které dovolují za kratší čas dosáhnout lepších výsledků. Mezi tyto technologie určitě patří také laser. Technologie laserového opracování materiálu umožňuje rychlé, ekonomické a ekologické zpracování v podstatě jakéhokoliv materiálu. Technologie laserového obrábění je používána také na mikroobrábění plastů. Do mikroobrábění patří např. popisování, vrtání mikroskopických otvorů, apod.. Tato diplomová práce se zabývá mikroobrábění PMMA a řeší zlepšení jakosti povrchu při změně technologických podmínek, především rozlišení. Společně se změnou rozlišení práce řeší vliv laserového paprsku při různých technologických podmínkách – posuvu a výkonu. Poslední částí práce je popis teplotního pole, které vzniká působením koncentrované energie na obráběný materiál.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝZNAM A POJEM TECHNOLOGIE

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

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

Samotný pojem technologie se v současnosti chápe a používá v širších souvislostech, než jak se tento pojem používal v dřívějších dobách. Ještě v nedávné minulosti se spojoval pouze se strojírenskou technologií a mnohokrát pouze s technologickým postupem, výrobou dílců, čím se technologie degradovala do polohy málo vědeckého a spíše empirického návodu na výrobu a ztrácela na významu. Vývoj v poslední době posunul pojem technologie, a tím i strojírenské technologie do jiné polohy, která rozlišuje dva přístupy jejího vnímání:

a) Technologie jakou součást rozvoje vědy a společnosti

Technologie související s rozvojem společnosti vycházejí ze všeobecně pojatého pojmu technologie jako soubor vědeckých poznatků a definují nové a nově koncipované vědní obory, jako jsou informační technologie, biotechnologie, technologický vývoj zemí třetího světa, nukleární technologie, lidský faktor a technologie, technologie životního prostředí, nauka o moři a mořská technologie, ale také průmyslové a materiálové technologie.

b) Technologie uplatňované přímo ve výrobě

Technologie uplatňované přímo v procesu výroby představují komplex věd, jejichž cílem je odkrývání a formulace zákonů a principů průmyslové výroby. Technologie tvoří a rozvíjí teoretickou základnu průmyslové a tedy i strojírenské výroby a její úlohou je přinášet pokrok v technologické a vědecké základně a rozvíjet principy výroby místo empirie a improvizace. [18]

2 ROZDĚLENÍ VÝROBNÍCH PROCESŮ VE STROJÍRENSKÉ VÝROBĚ

Vývoj silně ovlivňuje rozvoj průmyslové a tedy i strojírenské výroby. Z toho vyplívají i nové přístupy k technologii, konkrétně k technologii strojírenské výroby a její definici, klasifikaci a chápání. Pro lepší přehled jsou dále rozděleny základní pojmy ze strojírenské technologie.

Výroba

– je systém procesů, jejich výsledkem je produkt. Je to posloupnost činností, které vedou k tvorbě produktů zpracováním nebo spojením materiálů a jejich následující montáží do finálního výrobku.

Strojírenská výroba

– výběr výrobních prostředků a výrobních metod za účelem optimalizace použití výrobků podle technologických kritérií. Strojírenská výroba zahrnuje návrh a konstrukci výrobku, technologii výroby a výrobní proces, výrobu nástrojů a zařízení na jejich údržbu a informace potřebné na zabezpečení hospodárnosti a ekonomiky výroby. Technologie a strojírenská výroba jsou vzájemně spojené jako teorie a praxe.

Výrobní proces

– je soubor činností lidí, strojů a procesů, jejichž výsledkem je určitý druh výrobku. Zahrnuje hlavně výrobní procesy (výroba montážních celků, dílců a montáž), pomocné výrobní procesy (opravy, výroba nářadí, modelů, náhradních dílů) a vedlejší procesy (skladové hospodářství, doprava, energetické hospodářství, laboratoře, zkušebny ...)

Technologie strojírenské výroby

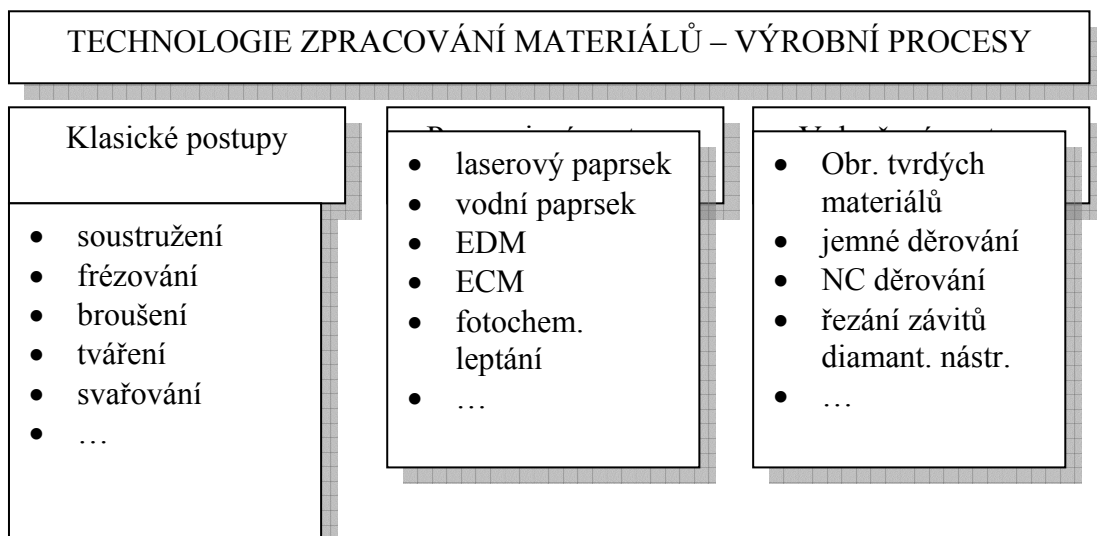
– je komplexně vědní oblast, jejímž předmětem zkoumání je podstata, vzájemné vztahy a zákonitosti procesu výroby dílců, zařízení a strojů. Posuzuje existující způsob výroby a hledá nové způsoby přeměny materiálu na polotovary, dílce a výrobky. Zabezpečuje požadovanou kvalitu předmětů na požadované ekonomické a ekologické úrovni.

Technologie zpracování materiálu se dělí na šest základních druhů, které se liší způsobem realizace ve výrobě, technologickými zvláštnostmi a výsledným efektem.

- A) Procesy dělení materiálů (stříhání, řezání ...)
- B) Procesy spojování materiálů (svařování, pájení, lepení, lisování ...)
- C) Procesy tvarování materiálů a polotovarů – dále se dělí na:
- 1) tvarování materiálu v tekutém stavu
 - 2) tvarování materiálů plastickou deformací
 - 3) tvarování práškovou metalurgií
 - 4) tvarování řezáním materiálu
 - 5) tvarování odstraňováním materiálu fyzikálně - chemickým úběrem
- D) Procesy změny fyzikálně mechanických vlastností materiálu (tepelné zpracování, galvanizace ...)
- E) Rozměrové zpracování dílců: odstraňují se nepřesnosti po předchozích operacích (lapování, mikrořezání, nanotechnologie ...)
- F) Procesy změny stavu povrchu: částečně se prolínají s rozměrovým opracováním dílců, využívají se procesy, které zlepšují a vylepšují kvalitu povrchu nebo i zlepšují rozměrovou přesnost (honování, superpřesné broušení ...)

Z výše uvedeného dělení vyplývá, že existuje široké spektrum technologických procesů a operací, které je možné dělit podle stupně jejich vývoje a průmyslového použití do třech kategorií na procesy označené jako:

- klasické resp. konvenční technologie založené na mechanické povaze zpracování materiálů.
- doplňkové progresivní založené na fyzikální a chemické povaze dějů při zpracování materiálů
- vylepšené, inovační metody zpracování materiálů



Obr. 1. Hlavní typy výrobních procesů [18]

Pozadí, průmyslové využití a směry dalšího vývoje progresivních a inovačních technologií zpracování materiálů je možné zjednodušeně charakterizovat následovně:

- a) Pozadí a trendy vývoje technologií zpracování materiálů vycházejí ze zvyšujících se požadavků na:
 - sortiment a složitost výrobků
 - zdokonalení konstrukce výrobků
 - přesnost, spolehlivost a životnost dílců a výrobků
- b) Nasazení a využívání progresivních a inovačních technologií v průmyslové výrobě sleduje rozvoj poznatků v oblastech:
 - zákonitosti procesů získávání a zpracování materiálů
 - zákonitosti funkcí strojů
 - zákonitosti toku informací a jejich zpracování
- c) Směry dalšího vývoje progresivních a inovačních výrobních technologií jsou úzce spojené s:
 - vývojem nových materiálů
 - vývojem nových metod výroby součástek
 - vývojem automatizovaných technologických procesů a technických prostředků na jejich realizaci

Ani klasické výrobní technologie nezaostávají za rozvojem poznatků, ale naopak využívají ho v plné míře. Důkazem může být využívání nových řezných materiálů. [18]

2.1 Klasifikace způsobů obrábění

Jedna z částí zpracovatelské technologie je obrábění, které se podílí na dělení materiálu, tvarování materiálů řezáním a fyzikálně chemickým působením, rozměrovým opracováním dílců a dokončením povrchů.

Obrábění je široký pojem, který zahrnuje všechny metody tvarování výrobku postupným odebráním určitého množství materiálu, který se nazývá přídavek. Obrábění je technologie, která zahrnuje několik vědních oborů a patří na první místo ve výrobních technologiích a to jednak podílem celkové pracnosti výroby dílců, která představuje okolo 25 – 30% a jednak svojí podstatou, která zabezpečuje kvalitativní stránku výrobků a v konečném důsledku jejich vyšší přidanou hodnotu.

Z hlediska klasifikace způsobu obrábění existuje více přístupů, které vycházejí z postupného vývoje metod obrábění. Zpočátku se dělily technologie na mechanické a chemické, s tím že obrábění spadalo do mechanické technologie. Později bylo rozdělení nahrazeno rozdělením podle principu úběru materiálu z výchozího polotovaru. Obrábění je charakterizováno jako technologický proces, při kterém požadovaný tvar a rozměr výrobku vzniká postupným odebráním částic materiálu mechanickými, elektrickými a chemickými postupy, případně jejich kombinací.

V poslední době hlavně anglosaské a německé zdroje dělí obrábění do tří skupin:

- Řezání, které zahrnuje obrábění nástroji s definovanou geometrií
- Abrasivní opracování – broušení, také definované jako opracování nástroji s nedefinovanou geometrií.
- Progresivní obrábění, které na úběr materiálu využívá fyzikální, elektrické, chemické a jiné zdroje energie

Aby mohlo dojít k obrábění řezáním nebo broušením, tedy k úběru třísky z materiálu musí být splněny některé požadavky:

1. Materiál rezného nástroje musí být tvrdší než materiál obrobku. Tato podmínka určuje tzv. obrobitelnost materiálu a na určitý čas limitovala využívání vysoce pevných konstrukčních materiálů.
2. Podstata mechanického obrábění je poznání, že při řezání musí být vynaložené určité množství mechanické energie na porušení molekulární struktury materiálu.

Tato podmínka omezuje použití řezání v oblastech, kde není možné na obrobek působit velkou silou – jako např. vrtání velmi malých otvorů do kalených ocelí, vrtání otvorů se zakřivenou dráhou spod.

3. Aby došlo k obrábění je nutné splnit podmínku, že všechny existující zdroje energie je potřeba proměnit na mechanickou energii, která je využita pro oddělení materiálu.

Progresivní technologie mají významné odlišnosti od procesu řezání a broušení:

1. V místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor a obrobek se nedoformuje mechanickým zatížením
2. Úběr materiálu nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu jako je tvrdost, pevnost, houževnatost a klasický pojem obrobitelnost ztrácí svůj význam
3. Úběr materiálu je po dobu jednoho cyklu a dochází k němu ve velkém počtu míst současně. [18]

3 PROGRESIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Název progresivní způsoby úběru materiálu se používá pro širokou škálu mechanických, elektrických, tepelných a chemických procesů při úběru materiálu.

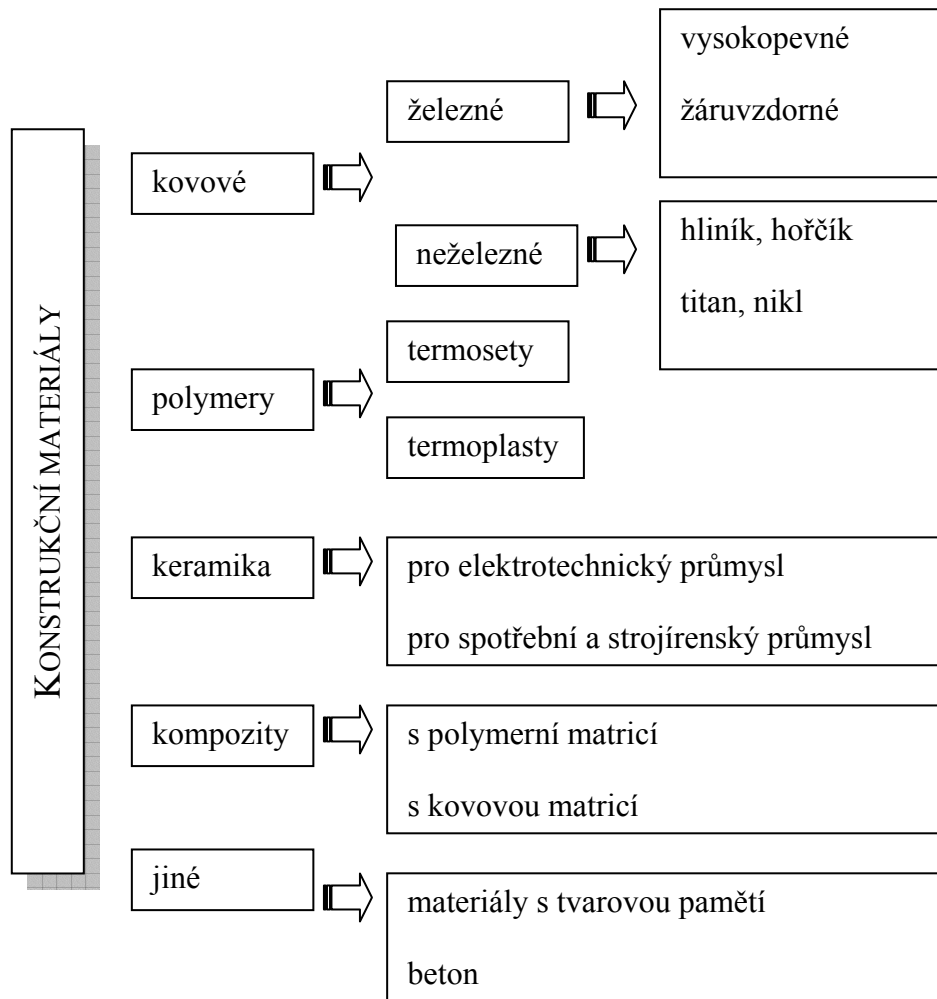
Kvůli širokému spektru procesů se těžko zavádí stručná definice progresivních metod obrábění. V literatuře ale panuje shoda v tom, že do této skupiny patří procesy, které používají běžné formy energie novým způsobem nebo používají energii, která nebyla nikdy před tím použita.

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

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

Z hlediska opotřebením nástrojů se vývoj progresivních metod ubírá dvěma směry:

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



Obr. 2. Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění [18]

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

3.1 Klasifikace progresivních metod obrábění

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

3.1.1 Podle hlavního energetického zdroje obrábění

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

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

3.1.2 Podle přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa

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

- Při vysvětlování teorie úběru materiálu se o nástroji mluví všeobecně jako o prostředku, který je příčinnou úběru materiálu např. laserový nástroj. V tomto případě ale nástrojem není tuhé geometrické těleso.
- Nástroj jako tuhé geometrické těleso, které na rozdíl od klasického řezání a broušení není v přímém kontaktu s obráběným materiálem, ale v procesu úběru materiálu podléhá opotřebení. V tomto případě slouží na zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečení optimálního průběhu procesu. Nástroje jako podpůrného geometrického tělesa se používá v těchto procesech:
 - ultrazvukové obrábění
 - elektrochemické obrábění
 - elektrojiskrové obrábění

3.1.3 Podle převládajícího mechanismu úběru materiálu

- procesy s brusným účinkem: ultrazvukové obrábění, obrábění proudem brusiva
- procesy s erozivním účinkem: obrábění vodním paprskem
- procesy chemického rozpouštění materiálu: fotochemické a elektrochem. obrábění
- procesy s tepelným účinkem na úběr materiálu: elektrojiskrové obrábění, laserové, plazmové a elektronové paprsky

3.2 Základní charakteristiky progresivních technologií

Původně byly progresivní metody obrábění vyvinuté jako alternativní způsoby. V současnosti představují v mnohých případech běžný způsob obrábění a v některých případech také jako jedinou možnost pro opracování daného materiálu.

Jejich používání je podpořeno výhodami, mezi které patří:

3.2.1 Obrobitelnost materiálů

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

3.2.2 Tvarová komplexnost součástek

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

3.2.3 Automatizace výroby

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

3.2.4 Integrita povrchu a požadavek vysoké přesnosti

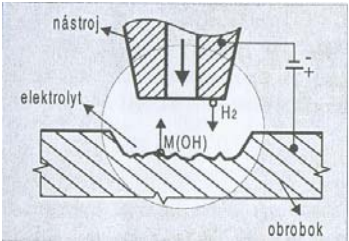
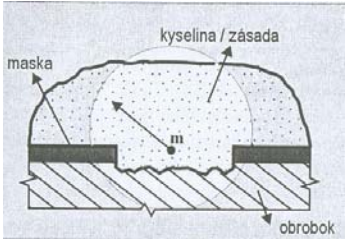
Povrchy opracované řezáním nebo broušením vykazují stopy silného mechanického působení (zpevnění, povrchové napětí, mikronerovnosti ...), které mohou mít nepříznivé účinky na užité vlastnosti obrobených povrchů. Také řezání a broušení materiálu jako je např. keramika nebo vláknové kompozity přináší řadu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

3.2.5 Miniaturizace dílců

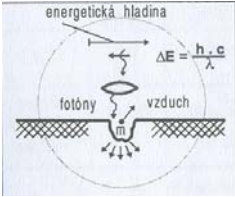
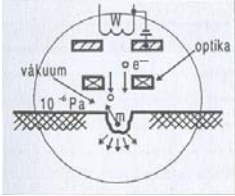
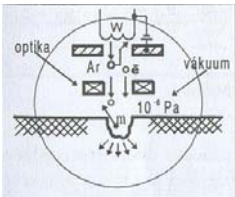
Trendy zmenšování rozměrů dílců zvyšují potřebu používání nových procesů, které umožňují úběr materiálů nejen v oblasti mikrorozměrů a dokonce úběr několika molekulárních a atomových vrstev. Ultra malé rozměry ($10 \div 100\mu\text{m}$) otvorů není možné vrtat běžnými technologiemi, ale technologie mikrochemického obrábění, obrábění svazkem elektronů a iontů řeší tyto problémy. [18]

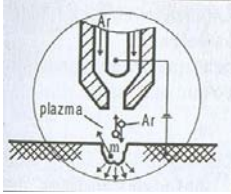
Pro lepší představu jsou níže uvedeny charakteristiky jednotlivých progresivních technologií.

Tab. 1. Znázornění principu technologie a stručná charakteristika [18]

	<p><u>Elektrochemické obrábění ECM</u></p> <p>Obrábění tvarů, složitých profilů a otvorů s větší intenzitou úběru.</p> <p>Použití pouze pro vodivé materiály</p> <p>Nevýhody: požadavek vstupních technologických zkoušek pro určení vhodných parametrů procesu, vysoké náklady na zařízení, vysoká energetická náročnost</p> <p>MRR: $2,5 \div 12 \text{ mm}^3/\text{min}$ v závislosti na hustotě proudu</p>
	<p><u>Chemické obrábění CM</u></p> <p>Chemické působení na úběr materiálu.</p> <p>Použití: pro skoro všechny kovy, tvrdé, křehké a nevodivé materiály</p> <p>Nevýhody: max. hloubka odleptání materiálu do 12 mm,</p> <p>Výhody: nízké náklady na zařízení</p> <p>MRR: $0,0025 \div 1 \text{ mm}^3/\text{min}$</p>

	<p><u>Ultrazvukové obrábění USM</u></p> <p>Úběr materiálu pomocí abrazivní suspenze která proudí v mezeře mezi kmitajícím nástrojem a obrobkem.</p> <p>Použití: tvorba plytkých nerovnoměrných profilů do tvrdých a křehkých materiálů.</p> <p>Nevýhody: vysoké náklady, malý úběr materiálu</p> <p>MRR: 0,4 ÷ 1,6 mm/min</p>
	<p><u>Vodní a vodní abrazivní paprsek WJM/AWJ</u></p> <p>Není limitované vlastnostmi materiálu, je doporučené zejména pro opracování těžkoobrobitelných mat. – keramika a kompozitní materiály do hloubky 25mm.</p> <p>Výhody: technologie šetří životní prostředí</p> <p>Nevýhody: vysoká hlučnost</p> <p>MRR: mění se podle druhu materiálu obrobku</p>
	<p><u>Technologie abrazivního paprsku AJM</u></p> <p>Používá stlačený plyn, obvykle vzduch na urychlení proudění pevného brusiva</p> <p>Použití: pro čištění povrchů a oddělování velmi malých dílců z křehkých materiálů</p> <p>Nevýhody: pomalý úběr materiálu, nízký výkon zařízení</p>
	<p><u>Elektroerozivní obrábění EDM</u></p> <p>Pro elektricky vodivé a tvrdé materiály, vysoké náklady a malá životnost nástroje elektrody, nutnost výroby vždy nové elektrody při změně profilu dílce</p> <p>EDM zvyšuje tvrdost vytvářené povrchové vrstvy</p>

	<p>a redukuje mez únavy</p> <p>MRR: okolo 0,15cm³/min</p>
	<p><u>Technologie laserového paprsku LBM</u></p> <p>Široce aplikovatelná technologie pro všechny druhy materiálů, nedoporučuje se pro velmi tenké dílce a pro velmi malé úběry.</p> <p>Nevýhodou je tepelně ovlivněná zóna, nerovnoměrnost řezu a vysoké nároky na přesnost nastavení ohniskové vzdálenosti paprsku od povrchu</p> <p>Nevýhody: drahé zařízení, energeticky náročné</p> <p>MRR: 0,006cm³/min</p>
	<p><u>Elektronový paprsek EBM</u></p> <p>Vyžaduje vakuové prostředí, vhodné pro vrtání otvorů a tvarování mikro rozměrů.</p> <p>Nevýhodou jsou vysoké náklady na zařízení, rozměry omezená použitelnost (vrtání do hloubky 6mm), nízká produktivita a tepelné ovlivnění vytvářeného povrchu</p> <p>MRR: 0,0008 ÷ 0,002cm³/min</p>
	<p><u>Technologie iontového paprsku IBM</u></p> <p>Vyžaduje se vakuové prostředí, vhodné pro tvarování mikro a nano rozměrů a velmi jemné opracování povrchů</p> <p>Nevýhody: vysoké náklady, omezená použitelnost dané rozměrem vakuové komory</p> <p>Povrchy nejsou ovlivněny teplem</p>

	<p style="text-align: center;"><u>Obrábění plazmovým paprskem PAM</u></p> <p>Vhodné pro opracování všech kovových materiálů vysokou rychlostí úběru</p> <p>Nevýhody: vysoké provozní náklady, náklady na zařízení a tepelné ovlivnění místa řezu</p>
---	--

Tab. 2. Posouzení vhodnosti progresivních technologií pro opracování vybraných druhů konstrukčních materiálů [18]

Materiál obrobku	USM	WJM	AJM	ECM	CHM	EDM	EBM	LBM	PAM
Kovové materiály									
Hliník	3	2	2	2	1	2	2	2	1
Hořčík	2	2	2	1	1	1	2	2	1
Vysokolegované oceli	3	1	1	1	2	1	2	2	1
Titan	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Žárupevné oceli	1	1	1	2	3	1	1	3	3
Nekovové materiály									
Keramika	1	1	1	4	3	4	1	1	4
Plasty	2	2	2	4	3	4	2	2	3
Kompozitní materiály	1	1	1	4	2	4	2	2	4

Hodnocení použití: 1 – optimální, 2 – vhodné, 3 – méně vhodné, 4 – nevhodné

Metody obrábění:

USM – obrábění ultrazvukem (Ultrasonic Machining)

WJM – obrábění vodním paprskem (Water Jet Machining)

AJM – obrábění proudem brusiva (Abrasive Jet Machining)

ECM – elektrochemické obrábění (Electrochemical Machining)

EDM – elektrojiskrové obrábění (Electrodischarge Machining)

EBM – obrábění elektronovým paprskem (Elektron Beam Machining)

LBM – laserové obrábění (Laser Beam Machining)

PAM – obrábění plazmovým paprskem (Plasma Arc Machining)

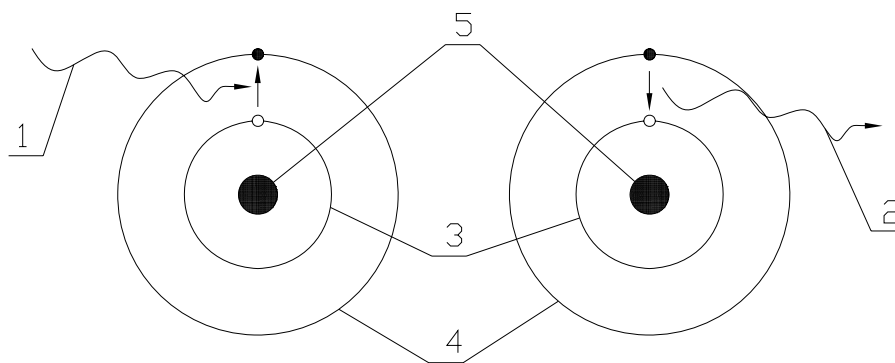
4 VZNIK A PRINCIP LASERU

Název laser je akronym tvořený počátečními písmeny anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“. Jako prvním se podařilo vytvořit tento stimulovaný tok světla pomocí rubínového laseru americkému fyzikovi T. H. Maimanovi 15. května 1960. [1]

Obor, který se zabývá výzkumem laserů spolu s aspekty jeho využití se nazývá kvantová elektronika. Při výkladu principu nelze vystačit s představou klasické fyziky, kdy systém může setrvávat ve stavu s libovolnou energií a energie může být předávána v jakémkoliv množství. Přejdeme-li do mikrosvětla atomů a molekul, zjišťujeme, že také systémy mohou zaujímat stavy jen s určitou energií. Energie přijímání nebo předávání ve formě energetických kvant, jejichž velikost je rovna rozdílu energie příslušných stavů. To platí např. pro elektrony v elektronovém obalu atomu a podobně jako kvantovaná energie v jádře atomů.

V případě laserů se setkáváme s energetickými přechody, které jsou doprovázeny pohlcením nebo vyzářením elektromagnetického záření.

Princip laseru je možné objasnit na základě pojmů kvantové fyziky. Vycházíme ze zjednodušeného planetárního modelu atomu. Kolem kladně nabitého jádra (protonu) krouží v uzavřených drahách elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Každé dráze přísluší přesně určené množství energie, zvané energetická hladina. Vzdálenější dráze elektronu přísluší větší množství energie, jelikož na překonání přitažlivé síly protonu je nutno vykonat větší práci. Čím je dráha elektronu bližší jádru tím je jeho energie menší. Za normálních podmínek se nachází atom v kvantovém stavu s nejmenší energií – tzv. základním stavu. Elektron se může nacházet pouze na vymezených energetických hladinách. To znamená, že změny energie elektronu nemohou probíhat plynule, ale jen po skocích odpovídajících drahám, na kterých se může elektron nacházet.

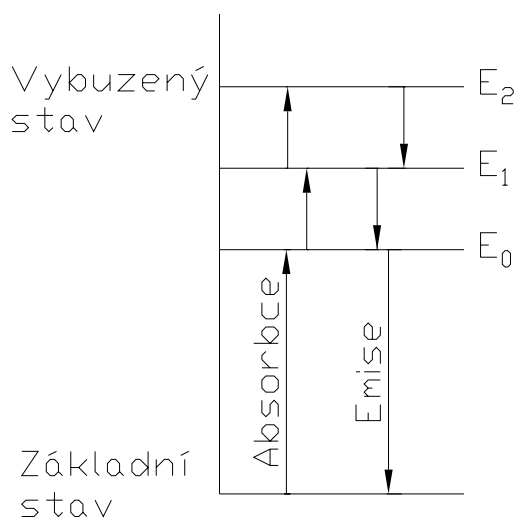


Obr. 3. Model atomu

- 1 – energie absorbovaná $E_1 - E_0$
- 2 – energie emitovaná $E_0 - E_1$
- 3 – dráha odpovídající základní energetické hladině E_0
- 4 – dráha odpovídající základní energetické hladině E_1
- 5 – jádro atomu

Přechod elektronu ze základní energetické hladiny E_0 na vyšší energetickou hladinu E_1 je doprovázen absorpcí a zpětný přechod z hladiny vyšší na nižší je doprovázen emisí přesně určené hodnoty energie. Tato hodnota energie, nazvaná kvantem, je rovna rozdílu mezi energiemi sousedních hladin:

$$E = E_1 - E_0 \quad (1)$$



Obr. 4. Skokové změny hodnot energie

Jednou z forem energie je elektromagnetické záření. Podle kvantové teorie světla je velikost kvanta energie E úměrná rezonanční frekvenci záření f .

$$E = h \cdot f = E_1 - E_0 \quad (2)$$

kde:

h – Planckova konstanta ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s)

$E_1 - E_0$ – rozdíl energií hladin, mezi kterými nastal přechod

Obor známých druhů elektromagnetického záření sahá od rádiových vln až po záření gama. V dlouhovlnné části spektra se setkáváme s typickými vlnovými vlastnostmi záření, se zvyšující se frekvencí (zkracující se vlnovou délkou) se u elektromagnetického záření začínají projevovat vlastnosti charakteristické spíše pro proud částic. Tento charakter elektromagnetického záření se pak nejvýrazněji projevuje v krátkovlnných oblastech záření gama. [3]

Elektromagnetické vlny se šíří ve vakuu rychlostí $c = 299792458$ ms⁻¹. Pro vlnovou délku λ a frekvenci záření f platí vztah:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f \quad (3)$$

Každý foton nese energii E úměrnou frekvenci záření f podle vztahu:

$$E = h \cdot f = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

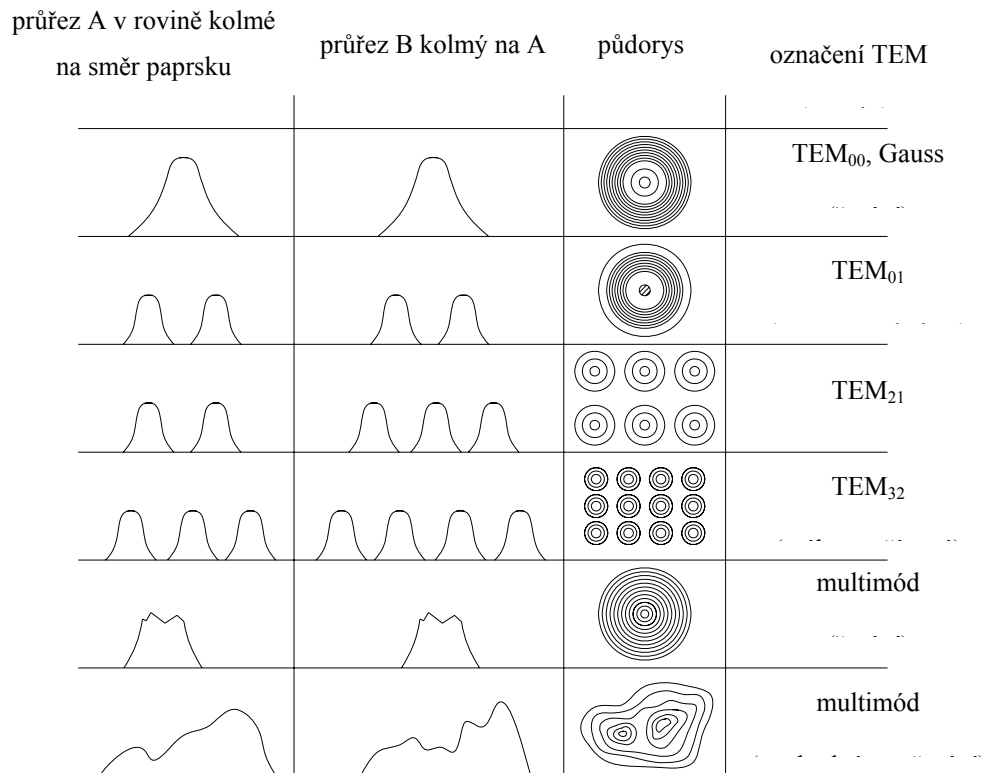
Hmotnost fotonu je pak dána rovnicí:

$$m = \frac{h}{c} \lambda \quad (5)$$

kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s je univerzální Planckova konstanta

Je zřejmé, že čím menší je vlnová délka záření, tím větší je energie fotonu a hmotnost fotonu. Rádiové vlny o frekvenci 100MHz nedokáží vlivem své malé energie změnit vodivost např. u fotodiody, ale světlo má již na tuto změnu energie dostatek. [2]

energie při dané výstupní energii laseru je možné dosáhnout lasery pracujícími v základním módu označovaném TEM_{00} (index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině kolmé na směr šíření paprsku). Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, jako například pro řezání, svařování apod.



Obr. 6. Modova struktura laserů [2]

4.1 Fyzikální princip laseru

Aby mohl být vyzářen laserový paprsek musí dojít k tzv. emisi, což je jak již bylo uvedeno výše vyzáření elektromagnetického záření vlivem přechodu elektronu z energeticky vyšší hladiny na hladinu energeticky nižší.

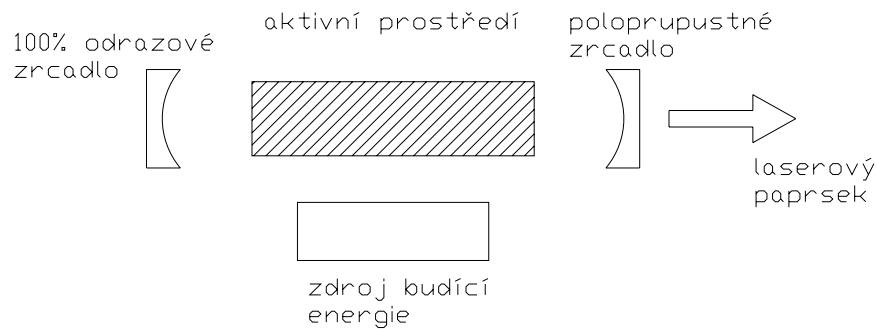
Emise může být dvojí druhu:

Spontánní emise probíhá náhodně, neuspořádaně. Charakteristickým znakem je široké spektrum výstupního záření, jehož přechody se uskutečňují mezi různými energetickými hladinami.

Stimulovaná emise nastává, jestliže elektronu na vyšší energetické hladině, určené energií $h \cdot f$ dodáme foton o stejné frekvenci. Vybuzený elektron se vrací na nižší energetickou hladinu, přičemž odevzdá energii $h \cdot f$ a dojde k zesílení energie. Charakteristickým

znakem vynucené emise je shodná frekvence, fáze a směru záření se stimulujícím zářením. Stimulovaná emise je základem pro činnost laseru.

Všechny lasery mají víceméně shodnou konstrukci:



Obr. 7. Schéma laseru

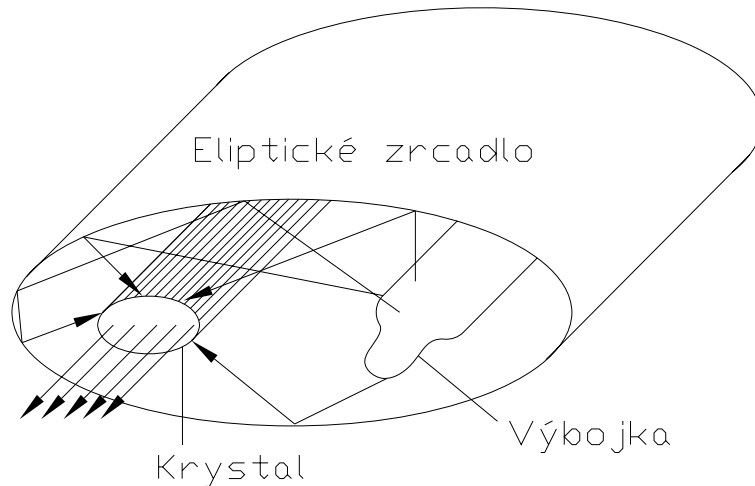
4.2 Hlavní typy laserů

Hlavní dělení laserů vychází z typu aktivního prostředí, jsou to pevnolátkové, kapalinové, plynové plazmatické a polovodičové lasery. Dalším kriteriem dělení může být dělení podle způsobu čerpání na opticky čerpané, čerpané elektrickým výbojem, chemickou reakcí elektronovým svazkem a radioaktivním zářením.

4.2.1 Pevnolátkové lasery

U pevnolátkových laserů je prostředí tvořeno monokrystaly, případně skly se zabudovanými ionty přechodových kovů (Cr^{3+}) nebo vzácných zemin (Nd^{3+}). K nejnámějším patří rubínový laser (aktivní prostředí tvoří krystal Al_2O_3 s ionty Cr^{3+} – rubín) vlnové délky $0,69\mu\text{m}$. Tento typ pracuje ve všech provozních režimech – kontinuálním i pulsním. Perspektivní je neodymový laser (tzv. neodymové sklo) na bázi yttrioaluminiového granátu s ionty Nd^{3+} (YAG:Nd). Může také pracovat ve všech režimech a parametry lze ovlivnit volbou čerpacích výbojek (wolfram – jodová, xenonová, kryptonová).

Zkracování délky impulsu při stejné energii stoupá hustota světelného toku. Proto se používají pulsní lasery s řízeným provozem, tzv. lasery s obřími pulsy. [5]



Obr. 8. Laser s krystalem rubínu [1]

4.2.2 Kapalinové lasery

Jako aktivní prostředí kapalinových laserů se obvykle používá opticky buzené roztoky organických barviv. Jejich široké fluorescenční spektrum umožňuje spojitě menit vlnovou délku záření (300 – 1500nm) generovaného těmito lasery.

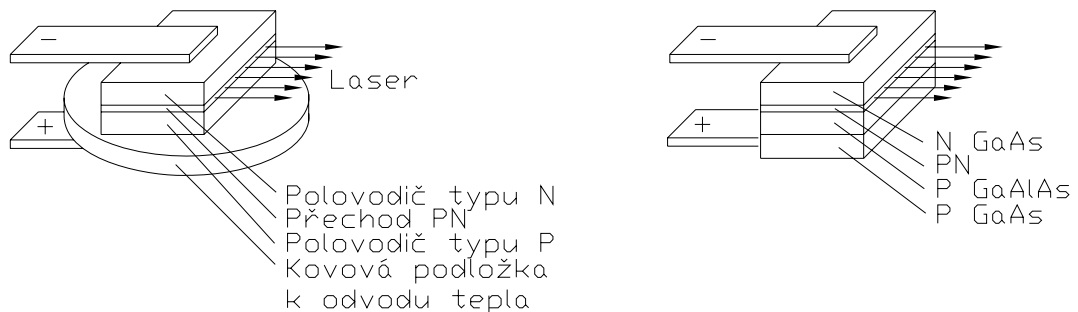
Typickým představitelem je rhodamonový laser generující pulsní záření od zelené až po červenou oblast spektra. Velkou nevýhodou těchto laserů je toxicita a krátká životnost aktivního prostředí. [6]

4.2.3 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery jsou poměrně rozšířeným typem laserů. Používá se pro ně označení laserová dioda. Mají velmi malé rozměry, což má za následek větší divergenci výstupního svazku než je tomu u jiných typů laserů. Jsou velmi citlivé na změnu teploty. Laserový paprsek lze snadno modulovat změnou budícího elektrického proudu. Vyznačují nevysokou účinností (běžně až 50%), pracují jak v kontinuálním tak v pulsním režimu a mohou dosahovat relativně vysokých výstupních výkonů při velmi kompaktním uspořádání. Své uplatnění našly především v oblasti telekomunikací a výpočetní techniky. Dnes se jich také používá pro čerpání pevnolátkových laserů a tak vznikají vysoce výkonné miniaturní a flexibilní laserové generátory. [7]

První polovodičové lasery byly tzv. injekčního typu, využívali tedy vlastnosti PN přechodu a jako nejvhodnější materiál se ukázal arsenik galitý. K nevýhodám tohoto typu patří nutnost chladit jej na teplotu kolem -196°C . Jeho výkon závisí na provozní teplotě.

Dalším vývojovým stupněm byl laser s heterostrukturou, který již může pracovat při pokojové teplotě s účinností kolem 20% a dávat kolem 200mW nepřetržitého výkonu. [1]

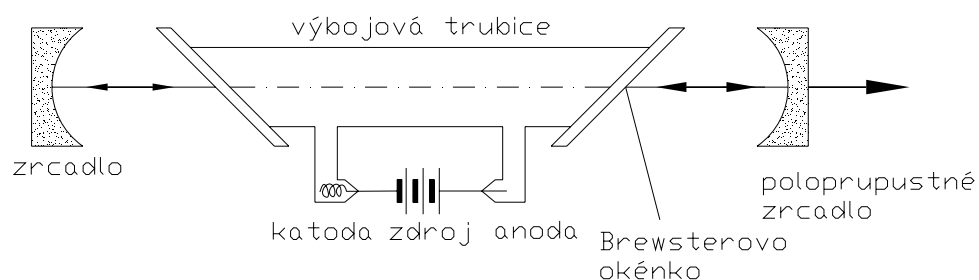


Obr. 9. Polovodičové lasery - injekční a s heterostrukturou [1]

4.2.4 Plynové lasery

Úlohu aktivního prostředí u plynových laserů hrají atomy plynu uzavřené ve směsi s dalšími vhodnými plyny ve skleněné trubici. Vzniká zde určitá potíž s nastavováním zrcadel. Pokryjeme-li odrazovou vrstvou přímo konce trubice, vzniknou problémy jak zrcadla přesně nastavovat a vyloučit vnitřní odrazy. Pomohl zde jiný fyzikální jev. Dopadá-li světlo na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, potom je-li polarizováno kolmo k rovině dopadu, prochází rozhraním bez odrazu. Zkosíme-li tedy konce trubice pod tímto úhlem, bude (polarizovaný) laserový paprsek vycházet z trubice, aniž by se na koncích odrazil a rezonátor můžeme vytvořit soustavou vnějších nastavovatelných zrcadel.

Zástupcem plynových laserů je např. helium-neonový generující jak červené tak infračervené záření. [1]



Obr. 10. Helium – neonový laser [1]

Předností těchto laserů je možnost získat malé šířky spektrální linie výstupního světla, dále jejich vysoká účinnost (CO₂ laser 40%), naopak nevýhodou jsou jejich značné rozměry. [4]

Nejvýkonnějšími z plynových laserů se staly laser s oxidem uhličitým (CO₂ laser). Laser s oxidem uhličitým generuje infračervené záření na vlně 10,6 mikrometru, tedy právě uprostřed atmosférického okna. Vzhledem k velikosti trubice může podávat vysoké výkony. U tohoto laseru se postupně uplatňovaly nové způsoby čerpání energie. V roce 1966 využití tepelné energie, která vzniká při prudké expanzi zahřátého plynu. Tak byly realizovány gazodynamické lasery s rychlým, nadzvukovým proudem oxidu uhličitého. V letech 1970-1971 to pak bylo čerpání pomocí svazku elektronů (elektroionizační lasery EIL). To umožnilo použít plyn pod vysokým tlakem a dále zvýšit laserový výkon. V roce 1969 vznikly v USA lasery s oxidem uhličitým pod atmosférickým tlakem a s příčným buzením (tak zvané TEA lasery, *transverse excitation atmospheric* - příčné buzení, atmosférický). Takové lasery umožní vytvořit výkonné tepelné stroje s uzavřenou cirkulací plynu, v nichž se tepelná energie mění v obrovskou energii infračerveného záření (více než 100kW). CO₂ laser nachází uplatnění v technologii, ve vojenské a kosmické technice a ve vědeckém výzkumu. [9]

Tab. 3. Přehled laserů jejich vlastností a použití [9]

laser (pracovní látka)	vlnová délka (v mikrometrech)	střední výkon	režim	poznámka
rubín	0,6943	1 W	impulsní	červený
neodymové sklo	1,058	1 W	impulsní	infračervený
YAG:Nd	1,064	150 W	spojitý	infračervený
arsenid galitý	0,840	0,01 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
AlGaAs	0,7-0,9	1 W	spojitý	vysoká účinnost, chlazení
sulfid kademnatý	0,5-0,7		impulsní	EIL
KCl:Li	2,5-2,9		spojitý	brevná centra, přeladitelný
organická barviva	0,55-0,67	100 W	spojitý	přeladitelné
rhodamin	0,590			
helium-neon	0,6328; 1,15; 3,39	0,05 W	spojitý	měřicí účely
helium-kadmium	0,325; 0,442	0,1 W	spojitý	“bílý”
argon	0,33; 0,48; 0,51	150 W	spojitý	modrozelený
krypton	0,46; 0,64		spojitý	
oxid uhličitý	10,6	100 W	spojitý	infračervený
-“- s průtokem plynu	10,6	10 kW	spojitý	
-“- elektroionizační	10,6	10 kW	spojitý	EIL
-“- gazodynamický	10,6	100 kW	spojitý	
-“- s příčným buzením	10,6		impulsní	TEA
oxid uhelnatý	5,0-6,6		spojitý	vysoká účinnost
kyanovodík	128,6; až 773	1 W	spojitý	submilimetrový
páry mědi	0,51; 0,58	40 W	impulsní	
dusík	0,337			ultrafialový
vodík	0,116; 0,160			ultrafialový
fluorovodík	2,6-3,5	10 kW	spojitý	chemický
fluorodeuterium	3,6-5,0	10 kW	spojitý	chemický

4.2.5 Lasery pracující v pulsním režimu

V pulsním režimu pracují nejčastěji pevnolátkové lasery s kontinuálním čerpáním. Průběh, velikost a tvar pulsu je řízen světelným modulátorem. Obvykle se frekvence pulsů pohybují od desítek do stovek kHz. Světelný modulátor je umístěn v dutině rezonátoru v dráze stimulovaného laserového paprsku a tento laserový paprsek pulsně přerušuje. Přerušení může trvat i stomiliontinu sekundy. Výsledkem je okamžitý výstupní výkon o vysoké hustotě energie. [11]

4.2.6 Lasery pracující v kontinuálním režimu

V tomto provozu pracují převážně plynové lasery. V plynu je kontinuální záření vyvoláno pomocí srážek s elektrony. Tento způsob buzení je nejsnáze realizovatelný elektrickým výbojem v plynu, při kterém vznikají ionty a volné elektrony. Volné elektrony přebírají energii zdroje a předávají ji atomům při srážkách. Získání kontinuálního provozu v pevnolátkových laserech je obtížné, je nutné použít dostatečně silný zdroj energie a odvádět velké množství vzniklého tepla. [11]

Pro účely obrábění se jeví v současné době nejvhodnější použití plynových CO₂ laserů. Většinou jsou to kontinuální, lineárně polarizované lasery pracující s vlnovou délkou 10,6 μm s výkonem od stovek W do několik kW. Při obrábění plastů se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější laser o výkonu kolem 1500W. Velice příznivým jevem při laserovém řezání je skutečnost, že se zlepšuje kvalita povrchu jak z hlediska zbytkového pnutí tak i drsnosti a přesnosti.

Pro CO₂ laser můžeme vypočítat energii jednoho fotonu $E_p = 1,88 \cdot 10^{-20}$ J. Energie chemické vazby C–H je $7,2 \cdot 10^{-19}$ J, energie C=H vazby je $5,6 \cdot 10^{-19}$ J. Každý foton má tedy dostatečnou energii pro rozbití chemické vazby v polymeru.

4.3 Kriteria hodnocení povrchu po obrábění laserovým paprskem

Podobně jako při klasickém řezání nástrojem s určitou geometrií břitu, při posuzování kvality řezu laserem je potřeba brát do úvahy spektrum vlivů, které se dělí do tří skupin:

a) Parametry procesu – tyto parametry zahrnují:

- výkon paprsku
- rychlost posuvu

- šířku vytvořené drážky
 - druh paprsku a jeho mód
 - ohniskovou vzdálenost
 - průměr zaostřeného paprsku
 - úhel vychýlení paprsku α , který je důsledkem přechodu paprsku materiálem
 - přídavný plyn
- a) Parametry materiálu obrobku – tyto jsou charakterizované
- fyzikálně-chemickými vlastnostmi materiálu
 - typem materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit...)
 - termofyzikálními vlastnostmi (tepelná vodivost, viskozita taveniny, odrazivost ...)
 - geometrie obrobku
- a) Kvalita řezu – při sledování samotné kvality řezu je potřebné brát v úvahu parametry zóny řezu, které zároveň mohou sloužit jako kritéria pro hodnocení laserem řezaného povrchu
- šířka řezu
 - zaoblení hrany vlivem řezání
 - nepravidelnost hrany
 - šířka tepelně ovlivněné vrstvy
 - kuželovitost řezaného otvoru
 - tvoření trhlin
 - úbytek materiálu
 - šířka kráteru
 - vychýlení paprsku
 - změna struktury povrchu materiálu
 - zpevnění
 - zvyšování napětí

Pro jednotlivé druhy materiálů je charakterizována kvalita povrchu řezaného CO₂ laserem s podporou přídavného plynu, následujícími veličinami:

- množství zbylých otřepů ve formě kapek nataveného a ztuhnutého materiálu na spodní části řezu
- drsností povrchu
- šířkou řezu

Při řezání CO₂ laserem přídavný plyn O₂ urychluje oxidační proces nižších rychlostech posuvu. Avšak se zvyšováním rychlosti proudění přídavného plynu se drsnost povrchu tvořením výrazného rýhování zhoršuje. Naopak když se zvyšuje rychlost posuvu paprsku, ohřev povrchu je plynulejší a dosahuje se hladší povrch.

4.4 Řezání nekovových materiálů

Řezný proces nekovových materiálů zahrnuje tři hlavní mechanismy:

- dělení tavením a následným smykem – je velmi rychlým způsobem dělení s vysokou kvalitou řezu, je typický pro termoplasty a pro keramické materiály
- odpařováním – natavením a následným odpařením materiálu v zóně řezu vzniká vysoce kvalitní řezná dráha, plocha řezu je hladká, lesklá, při řezání vlivem vysoké teploty dochází k fázovým změnám z pevné na kapalnou a následně na plynnou (vypaření). Mechanismus řezání je typický pro PMMA, polyacetát, akryl ...
- chemická degradace, která vzniká vlivem vysoké teploty a různorodosti složení materiálu. Některé fáze materiálu zaznamenávají chemické změny. Laserová energie láme chemické vazby a integritu materiálu. Hrany po řezání jsou rovné a povrch řezu je hladký, ale je pokryt jemnou vrstvou zbytkového uhlíkového prachu. Tento mechanismus je typický pro řezání produktů na bázi dřeva, kompozitních materiálů, ale i PVC, polyuretan ...

Při řezání kompozitních materiálů se doporučuje výkon laseru volit s ohledem na vlastnosti použitých vláken (skleněné, uhlíkové, aramidové ...), ne na vlastnosti matrice. Vysoký výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně

polymerové matrice. Matrice a vlákna mají rozdílné teploty odpařování a tedy i časy natavení materiálu. Tepelná vodivost kompozitních materiálů je anizotropní.

Laserový paprsek způsobuje poškození kompozitních materiálů tavením matrice, tepelnou roztažností uhlíkových vláken (pro CFC kompozity), vznikem kráterů na povrchu rezně dráhy, delaminací vláken a jejich lomem. Po řezání vzniká rýhovaný povrch. Při porovnávání účinku Nd–YAG a excimerového laseru na degradaci povrchu se ukazuje, že excimerový laser má nižší tepelné destruktivní účinky než Nd–YAG laser.

4.5 Klasifikace procesu mikroobrábění

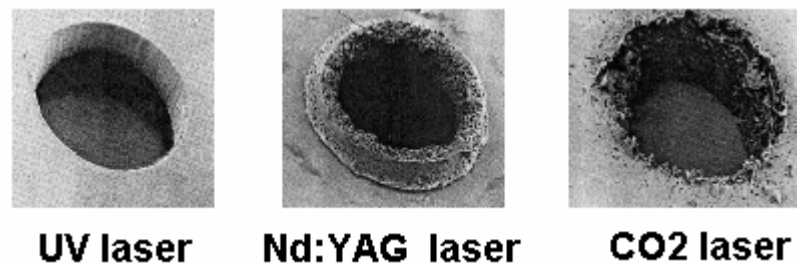
Obvykle jsou pro technologii mikroobrábění používány UV-lasery a některé pevnolátkové lasery. Proces ablace (neboli odstraňování) materiálu je složitá kombinace procesu fotochemického a fototermického. Při dopadu záření dochází jednak k porušení chemických vazeb absorpcí kvant energie a jednak porušením vazeb termicky (zvýšením teploty). UV-laser způsobuje zejména fotochemickou ablaci. CO₂ laser, který emituje tepelné záření o vlnové délce 10 600 nm, způsobuje zejména fototermickou ablaci. Rozměry a tvary jakékoliv laserem obrobené struktury závisí na optice a mechanice laserového zařízení a také na vlastnostech obráběného polymeru. Nejdůležitějšími parametry jsou f -číslo (poměr hloubky ohniska a ohniskové vzdálenosti f -theta objektivu) a vlnová délka laseru. Čím je vlnová délka laseru nižší a čím má obráběný polymer nižší tepelnou vodivost, tím lépe je mikroobráběn [19]. Pro konkrétní aplikace jsou pak důležité parametry jako výkon laseru, posuv a počet přejezdů paprsku ve stejné drážce.

UV-lasery pracují ponejvíce v pulzním režimu a vytváří pulzy v trvání několik nanosekund. Vlivem malé vlnové délky a fotochemické ablace je dosaženo menších rozměrů a přesnějších tvarů obráběných struktur. Pokud dojde k fototermické ablaci, tak je jí ovlivněn jenom velice malý objem materiálu díky nanosekundovým pulsům. Nicméně tyto pulsy způsobují nerovnoměrné odebírání materiálu a také jsou UV-lasery poměrně drahá zařízení [19].

CO₂ lasery pracují většinou v kontinuálním režimu. Jakmile je laserové záření fokusováno na povrch obrobku, dojde k velmi rychlému zvýšení teploty, což způsobí roztavení (nebo sublimaci) a následné rozložení materiálu, který je odpařen nebo jinak

odtransportován. Konkrétní mechanismus rozpadu polymeru závisí na pevnosti chemických vazeb monomeru a na struktuře samotného polymeru. V případě PMMA dochází k přeměně na monomer a vypaření. To vede k tomu, že obrobená plocha není znečištěna zbytky po degradaci polymeru.

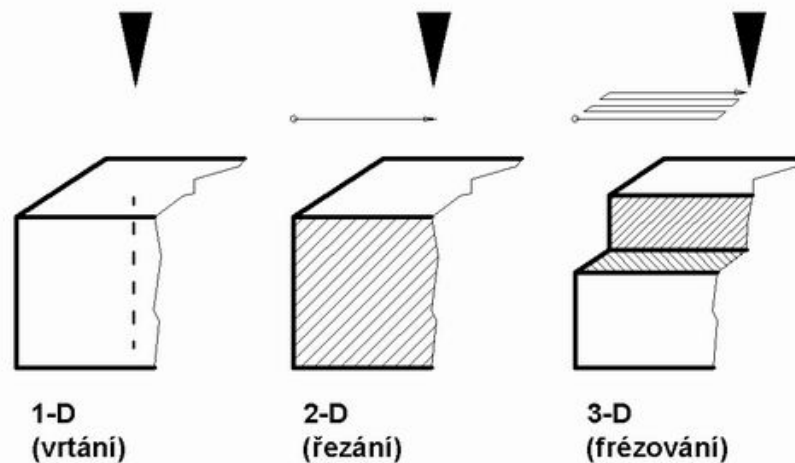
Obr. 11. Vliv kvality otvoru na použitém typu laseru [4] ukazuje kvalitu obrobení otvoru různými typy laserů v polyamidu (10). Při použití UV a excimerových laserů dochází k minimální fototermitické ablaci a obrobená plocha vykazuje velmi ostré hrany.



Obr. 11. Vliv kvality otvoru na použitém typu laseru [4]

4.6 Možnosti mikroobrábění laserem

Pro mikroobrábění laserem mohou být použity téměř všechny materiály, rozměry součástí se pohybují od několika μm do stovek μm . Procesy MEMS (MicroElectroMechanical System) slouží pro výrobu různých senzorů a ovladačů. Rozměry těchto součástí se pohybují od 10 μm do několika mm. Nanotechnologie pak pracují v submikronových rozměrech. V tab.IV. je uvedeno přehledné srovnání různých metod mikroobrábění. Prostorové možnosti obrábění laserem ukazuje Obr. 12. Možnosti laserového obrábění [4].



Obr. 12. Možnosti laserového obrábění [4]

4.6.1 Laserové popisování a gravírování

Laser vytváří na povrchu materiálu s vysokou přesností stálý, mechanicky odolný, velmi kontrastní a jinak nenapodobitelný popis. Vše probíhá v jediné krátké operaci bez použití chemických přísad, inkoustu nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Vhodným typem laseru (Nd:YAG nebo CO₂) lze označit prakticky jakýkoliv materiál, přičemž povrch značeného výrobku může mít proměnný tvar a různou povrchovou úpravu. Změnou parametrů laseru lze spojitě přecházet od povrchového popisu v několika mikronové vrstvě materiálu až po laserové gravírování do větší hloubky. V průmyslové výrobě se používá dvou metod laserového popisu - maskovací metody a metody vychylování svazku. Značované výrobky jsou buď v klidu, nebo se pohybují [13].

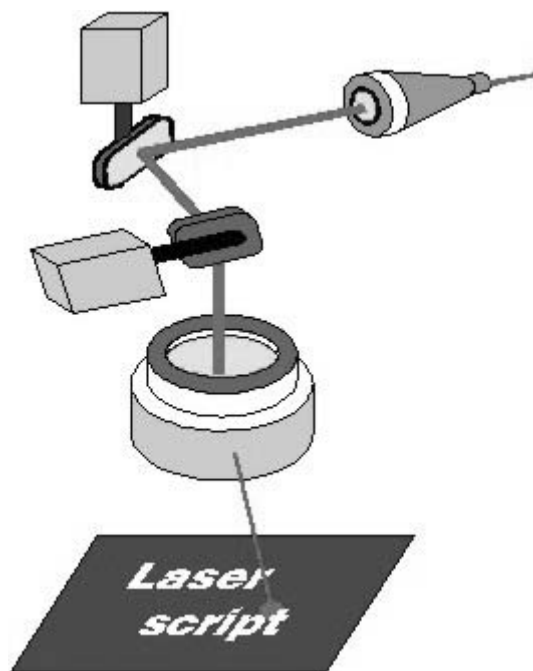
1) Maskovací metoda

U této metody se používá masky (obsahující kopii popisu, který má být proveden). Laserový paprsek prochází maskou a požadovaný symbol je tvořen do materiálu. Výhodou této techniky je velká rychlost popisu a vysoká produkce (od 25 kusů popsaných výrobku za sekundu). Obvykle jsou maximální rozměry popisované plochy 10 x 20 mm². Nevýhodou je, že se změnou symbolu je nutné vyrobit novou masku [20].

2) Metoda popisu vychylováním svazku

Laserový svazek veden pomocí dvou galvanometrických zrcadel a přenáší se optickou soustavou na popisovaný výrobek. Zrcadla se pohybují v osách x a y, čímž mění tvar popisu (můžeme si představit vedení laserového svazku jako "psaní perem").

V kontrolním softwaru se vytvoří požadovaný symbol popisu, obvykle se navrhne v programech Corel Draw, CAD/CAM, které nabízí široké možnosti pro tvorbu grafiky, textu, log, čísel a podobně. Následně se nastaví vhodné procesní parametry obrábění. Výhodou systému je jeho flexibilita a mnohem větší popisovací plocha. Rychlost popisu polymerních materiálů se pohybuje v rozmezí $300 - 1000 \text{ mms}^{-1}$ [20].



Obr. 13. Schema popisu laserem metodou vychylování paprsku [13]

5 PLASTY A JEJICH VLASTNOSTI

5.1 Základní pojmy a rozdělení polymerů

Plasty jsou materiály založené na makromolekulárních látkách, polymerech. Teplem a tlakem lze měnit jejich formu a tvar, tedy tvářet je a tvarovat. Polymery jsou přírodní nebo syntetické sloučeniny, v jejichž velké molekule (makromolekule) se jako články řetězu mnohokrát opakuje základní monomerní jednotka. Představují tedy jakousi chemickou stavebnici, která umožňuje neobyčejnou proměnlivost struktur i vlastností výsledných látek. Plastem se polymer stává tak, že jej smísíme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování.

V tomto textu dáváme přednost obecnému termínu polymery. Ten totiž vyjadřuje, že jde o látky s velkými molekulami, v nichž se jako články v řetězu mnohokrát opakuje základní "monomerní" jednotka. Řecká předpona poly- znamená mnoho nebo více.

Zatímco polymer je chemická látka, plast je technický materiál, který musí mít vhodné užitné vlastnosti. Podle chování za zvýšené teploty se plasty dělí na termoplasty a reaktoplasty (dříve termosety nebo duromery). Termoplasty při zahřátí měknou a postupně přecházejí ve viskózní taveninu. V tomto stavu se dají tvářet a různými technologiemi zpracovávat. Po ochlazení ztuhnou do formy konečného výrobku. Celý pochod lze mnohokrát zopakovat. Reaktoplasty naopak při zahřátí dále tuhnou, protože vyšší teplota urychluje reakci - tvorbu jejich vnitřní struktury, trojrozměrné polymerní sítě. Takový plast je již nerozpustný a netavitelný. Mezi reaktoplasty patří různé typy syntetických pryskyřic - polyesterové, epoxidové a fenolformaldehydové.

5.2 Výroba a vlastnosti reaktoplastů

Reaktoplasty jsou makromolekulární materiály tvořené hustě a trojrozměrně zesíťovanou molekulární strukturou. Vznikají chemickou reakcí z termoreaktivních pryskyřic, označovaných někdy jako předpolymery, se síťovacími činidly (tvrdidly). Této síťovací reakci se v praxi říká vytvrzování.

Reaktoplasty se tedy významně liší od termoplastů. Z jejich specifické chemické struktury vyplývají rozdílné užitné vlastnosti. Také postupy, kterými vznikají a příslušné zpracovatelské technologie se od termoplastů zcela odlišují. Zatímco tváření termoplastů je fyzikálním procesem, založeném na procesu tavení a ochlazování, zpracování reaktoplastů je chemickým pochodem, nazývaným síťování. K tomu dochází mezi různými složkami v průběhu tvarování: předpolymer nebo pryskyřice, síťovací prostředek neboli tvrdilo (tužidlo) a případně další přísady. Vznik konečného výrobku je tedy výsledkem spojení pochodu chemického (síťování) a fyzikálního (odlévání, kladení apod.).

Podobně jako v případě kaučuků je celý vytvrzený výrobek tvořen jedinou velkou zesíťovanou makromolekulou. Hlavními zástupci skupiny reaktoplastů jsou nenasycené polyestery (UP), epoxidy (EP), fenoplasty neboli fenolformaldehydové pryskyřice (PF), aminoplasty, tedy melaminoformaldehydové (MF) a močovinoformaldehydové (UF) pryskyřice. Tyto hmoty nalézají uplatnění nejen samotné, ale také jako matrice v kompozitních materiálech. Kompozity tvořené epoxidovou pryskyřicí vyztuženou vlákny se začaly používat už ve 40. letech v letecké technice jako kryty radarových antén, protože propouštějí mikrovlnné paprsky. Jejich výhodný poměr mezi pevností a hmotností jim však zabezpečil široké uplatnění i v dalších částech letounů a také v pozemních dopravních prostředcích, lodích a různé sportovní výzbroji. Významná část reaktoplastů se uplatňuje jako lepidla a tmely pro nejrůznější účely od nábytkářství až po stavebnictví. Velké množství kvalitních pryskyřic se používá na lité plastové podlahy a také na opravy poškozených betonových staveb. Kompozitní materiály tvořené minerálními částicemi v polyesterové nebo epoxidové pryskyřici jsou takzvané polymerní betony. Zalévací pryskyřice se dále používají v elektrotechnice a elektronice pro své izolační vlastnosti.

Reaktoplasty jsou na rozdíl od termoplastů většinou tuhé a tvrdé. Jsou relativně dobře odolné proti zvýšeným teplotám a odolávají také chemicky agresivním látkám. Nedají se tavit, neboť chemické vazby, které je drží pohromadě, jsou velmi pevné a nelze je zvýšením teploty rozštěpit, aniž by se narušila struktura hmoty. Fyzikální vazby mezi jednotlivými makromolekulami termoplastů se naopak přerušují zvýšením teploty termoplastu. Nicméně u některých reaktoplastů existuje oblast teplotního změkčení, v níž materiál ztrácí svoji tuhost až na 1/100 své počáteční hodnoty. Při ještě vyšších teplotách se chemické kovalentní vazby mohou teplotně štěpit, stejně jako u termoplastů.

5.3 Výroba a vlastnosti termoplastů - PMMA

Polymethylmethakrylát se vyrábí blokovou nebo suspenzní polymerací methylnmethakrylátu. Oba způsoby vedou k čirým materiálům. Při suspenzní polymeraci vznikají perličky. Bloková polymerace slouží především pro výrobu bloků a desek, případně polotovarů jiných tvarů. Použijeme-li rotační formy, můžeme tímto postupem vyrábět také trubky. Blokovou polymerací se dosahuje vysokých hodnot polymeračního stupně. Tím se zlepšují mechanické vlastnosti desek a zejména kvalita jejich povrchu.

Polymethylmethakrylát se pro další termoplastické zpracování dodává jako granulát. V přírodním provedení je čirý, kopolymery a modifikované typy jsou zakalené. Lze jej barvit na odstíny nebo krycí barvy. Polotovary se dodávají převážně jako desky, případně bloky, k dostání jsou také trubky, tyče nebo různé profily.

Polymethylmethakrylát je křehký materiál. Směšováním nebo roubovací polymerací s polybutadiénem nebo jinými elastomery lze tuto vlastnost potlačit a vyrobit houževnaté materiály. Bohužel tím se ztrácí kvalitní optické vlastnosti a takový PMMA se stává mléčně zakaleným.

Přednosti polymethylmethakrylátu jsou následující:

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

K nevýhodám patří:

- náchylnost ke korozi za napětí,
- hořlavost,

PMMA vyniká především vysokou tuhostí. Jeho modul pružnosti v tahu leží mezi 2300 až 3300 MPa. Vlivem zvyšování teploty ztrácí PMMA tuhost obdobně jako ostatní termoplasty. To znamená, že modul pružnosti se vzrůstající teplotou klesá. Ukazuje se, že pokles tuhosti se vzrůstající teplotou je tím pomalejší, čím je molární hmotnost vyšší.

PMMA se zpracovává především vstřikováním a vytlačováním. Lze používat všechny stroje běžné pro ostatní termoplasty. Předsušení granulátu bývá obvykle nutné, byl-li granulát po dlouhou dobu uskladněn. Teplota sušení závisí na molární hmotnosti PMMA. Vysoce tekuté typy, tedy typy s nízkou molární hmotností se suší 4-6 hodin při 70-80 °C, typy s nízkou tekutostí, tedy typy o vysoké hodnotě molární hmotnosti, se suší při teplotách zvýšených až na 90-100 °C. Při vstřikování ovlivňuje velikost a doba dotlaku významně vlastnosti výstřiku. Pro dosažení vysoce kvalitních výstřiků nesmí být teplota formy příliš nízká a musí být stálá.

Třískové obrábění lze u PMMA snadno provádět. Jedná se o řezání, frézování, broušení, vrtání i leštění. Rychlost obrábění je zapotřebí volit tak, aby nedocházelo k natavování materiálu. Pro řezání lze s výhodou použít například paprsek laseru.

6 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE – SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část ukazuje, jak široká je problematika zavádění a používání nekonvenčních technologií ať už z pohledu technologie jako obecného pojmu označujícího určité postupy, tak i z pohledu samotného obrábění. Nekonvenční metody nabízejí daleko širší možnosti pro zpracování materiálu než standardní technologie.

Z rešerše zaměřené zejména na obrábění laserem plyne, že pro určitý materiál je nutné zvolit s ohledem na ekonomické faktory laser, který bude pro danou aplikaci optimálně dimenzovaný. Pro dosažení cílů v experimentální části je nejvhodnější použití CO₂ laseru, hlavně z důvodu jeho dostupnosti a optimálního výkonu pro dané použití.

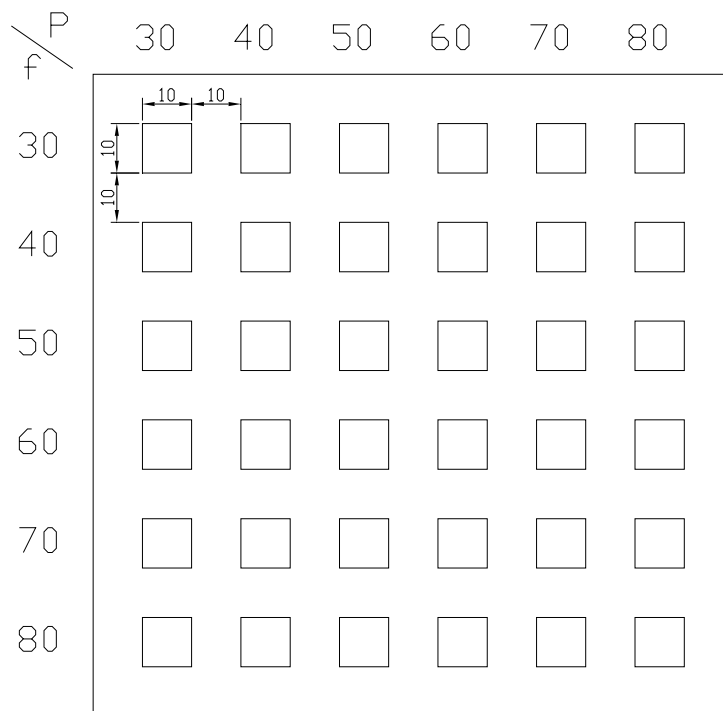
Cíle experimentální části jsou tyto:

1. Vytvořit na CO₂ laseru sérii vzorků, které budou obrobena za různých technologických podmínek – změna výkonu laserového paprsku a rychlosti posuvu. Vytvořit dostatečné množství vzorků, aby bylo možné vysledovat změny na obráběném materiálu, které vznikají při změně technologických podmínek.
2. Provézt měření jednotlivých obroběných vzorků z PMMA. Měřit se bude drsnost povrchu obroběných vzorků a hloubka, kterou laser při určitém výkonu a rychlosti posuvu odpařil z povrchu obráběného vzorku.
3. Vyhodnocení vlivu změny technologických podmínek na jakost obráběných ploch a zhodnocení změny DPI.
4. Posouzení možnosti strukturálních změn, které vznikají vlivem působení koncentrované energie laserového paprsku na obráběný materiál na základě výsledků modelování teplotního pole.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL – PŘÍPRAVA VZORKU

Pro obrábění laserem byl použit běžně dostupný konstrukční PMMA ve formě desky. Pro optimální zhodnocení vlivu změny technologických podmínek na obrobenou plochu se jeví jako nejvhodnější obrobit na desce matici polí o rozměru 1cm^2 s tím, že každé políčko je obrobena za jiných technologických podmínek – viz. Obr. 14. Matice obrobených plošek na PMMA desce.



Obr. 14. Matice obrobených plošek na PMMA desce

Čísla na osách x a y udávají výkon P a posuv f v procentech (maximální hodnoty viz. níže – specifikace použitého laseru). Tento způsob volby zadání technologických podmínek byl zvolen hlavně s ohledem na způsob nastavení v ovladačích laseru. Hodnoty menší než 30% výkonu a posuvu nemají pro tento typ zkoumání význam, protože laser odpaří tak malou část materiálu, že se měření může pohybovat v rozmezí statistické chyby. Podobně i při obrábění nad 80% výkonu a posuvu má laser snahu materiál spalovat a výsledky měření pak nejsou korektní. Z toho důvodu byly tyto extrémní hodnoty vypuštěny – při měření v rozmezí hodnot 30 – 80% jsou výsledky přesnější a změna rozdílu DPI patrnější.

8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCI

8.1 Laser – Mercury L30

Pro obrábění PMMA desky byl použit CO₂ laser Merkury L30. Tento laser byl zvolen pro jeho dostupnost a výkon odpovídající potřebám pro zkoumání zadaných veličin. Laser Merkury L30 disponuje těmito parametry:

Tab. 4. Technické parametry laseru Mercury L30 [21]

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

Výkon laseru se nastavuje v % z maximálního výkonu. Fokuse se většinou provádí automaticky a to na průměr paprsku 186 μ m. Laser pracuje stejně jako ostatní CO₂ lasery v kontinuálním režimu.

Pohyb popisovací hlavy je ovládán některým z grafických programů jako např. AutoCAD, CorelDraw apod.

Tento typ laseru se komerčně používá především pro popisování a gravírování různých materiálů (plasty, kov, pryž atd.)

8.2 Drsnoměr – SJ 301

Pro měření drsností jednotlivých obrobených plošek byl použit přístroj na měření drsnosti od firmy Mitutoyo – Surftest SJ 301. Přístroj je primárně určen do dílenského provozu, ale svými parametry splňuje požadavky kladené na tento výzkumný cíl. Výsledky měření je možné zobrazovat podle několika mezinárodních norem – DIN, JIS, ISO, ANSI. Výsledek měření je zobrazen jak číselnou hodnotou tak i graficky na displeji přístroje, případně může být vytištěn.

Vlastní měření probíhá tak, že se měřící hrot, který je upevněn na ramenu položí na měřenou plochu a po zapnutí přístroje je rameno s hrotem posouváno automaticky po měřené ploše. Tím se dosáhne konstantních podmínek pro všechna měření. Při posuvu ramene přes měřený povrch dochází ke zdvihu hrotu, který je přenášen na rameno a tento zdvih je měřen a zaznamenám jako drsnost.

Tab. 5. Technické parametry drsnoměru Surftest SJ 301

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

8.3 Lineární výškoměr LH – 600 B

K měření hloubky obrobenej plochy jsem použil lineární výškoměr od firmy Mitutoyo Linear Height LH – 600 B. Tento přístroj nabízí široké možnosti použití a následného vyhodnocení naměřených hodnot. Pracuje v režimu kdy obsluha pouze nastaví měřený objekt k měřicímu hrotu a dojezd dotyku popř. dráhu potřebnou pro změření rozměru vykoná přístroj sám. Přes rozhraní RS 232 je možné jej propojit s externím počítačem.

Tab. 6. Technické parametry výškoměru LH - 600B

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

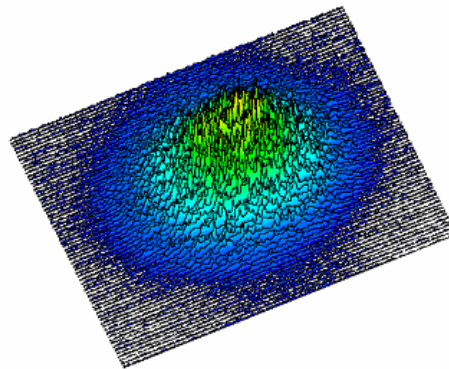


Obr. 15. Lineární výškoměr LH - 600B

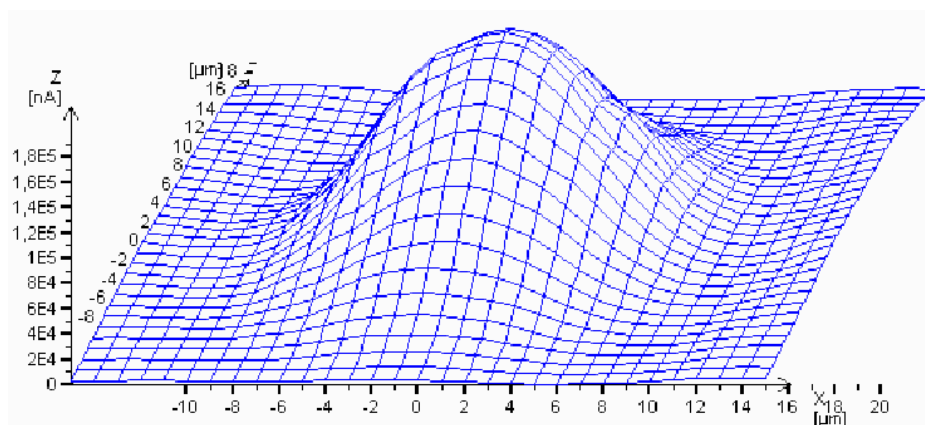
9 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

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

Při obrábění PMMA laserem vznikají na obráběné ploše drážky ve směru pohybu paprsku. Tyto nerovnosti jsou způsobeny především rozdělením výkonu po průřezu laserového paprsku a použitým módem laseru. Laser Merkury L30 pracuje v módu TEM_{00} a výkon je tedy rozdělen po průřezu paprsku podle Gaussovy křivky četnosti, kdy maximum výkonu je uprostřed paprsku a směrem k okraji se výkon snižuje.



Obr. 16. Tvar laserového paprsku v modu TEM_{00} [22]



Obr. 17. Profil fokusovaného laserového svazku [23]

Rozložení energie v Gaussově křivce je dáno rovnicí:

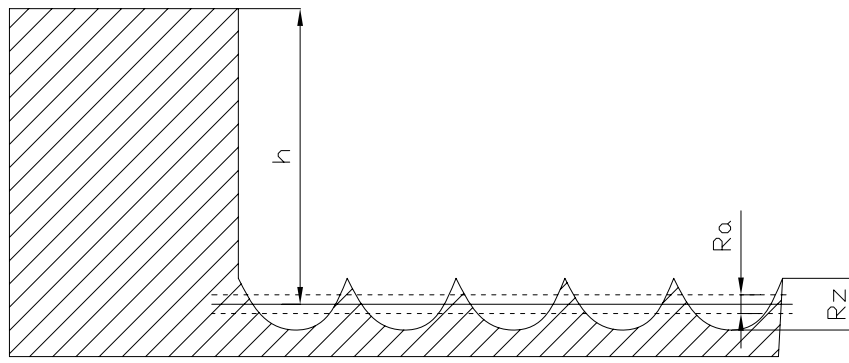
$$E(x,y) = E_{\max} \exp\left(-\frac{\rho^2}{a_0^2}\right) = E_{\max} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}\right] \quad (6)$$

kde:

ρ – radiální vzdálenost bodu (x,y) od osy svazku

a_0 – poloměr svazku (radiální vzdálenost od osy svazku, v níž poklesne intenzita pole na hodnotu E_{\max}/e ; $e = 2.718\dots$)

Profil příčné drsnosti má pak opačný tvar než Gaussova křivka:



Obr. 18. Příčný profil drsnosti po obrábění laserovým paprskem

Měřil jsem tyto hodnoty:

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

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y(x)| dx \quad (7)$$

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

$$R_z (JIS) = Y_p + Y_v \quad (8)$$

c) h – hloubka obrobené plochy – svislá vzdálenost neobrobené plochy od střední čáry profilu – střední čára se uvažuje z toho důvodu, že na konci měřicího hrotu je kulička.

Experimentální obrábění desky z PMMA popsané v kap. 7 probíhalo ve firmě Mechanika PV.

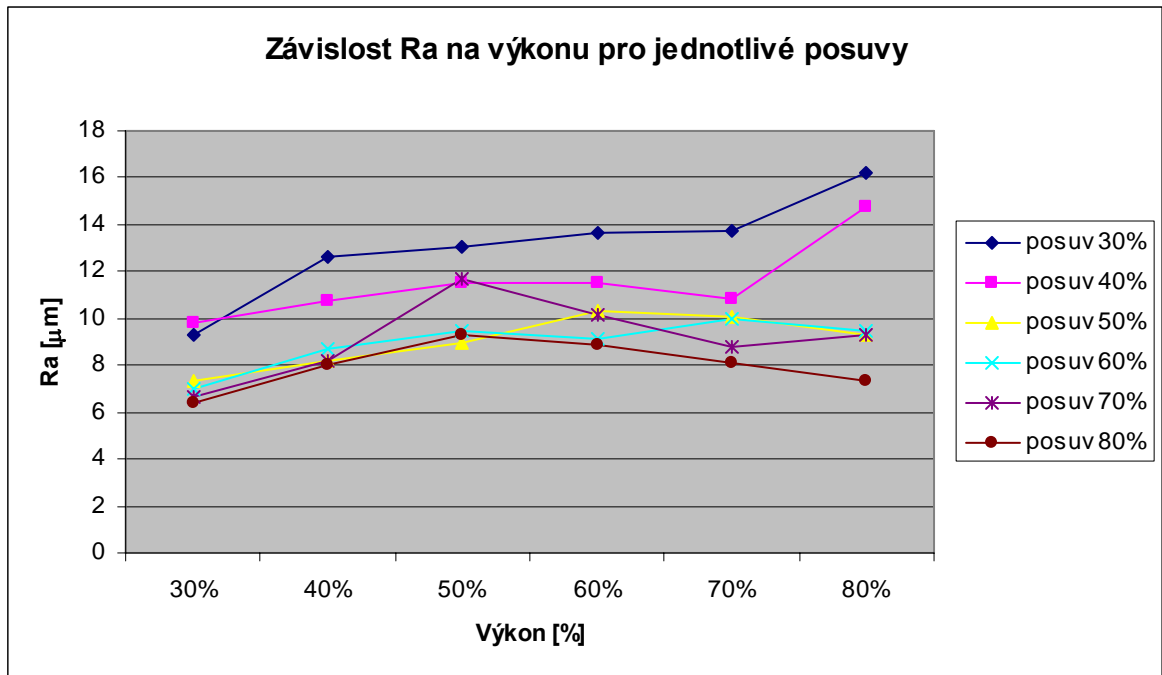
Vlastní vyhodnocení měření drsnosti a hloubky obráběných políček jsem prováděl v laboratoři UVI. Vzhledem k zadanému úkolu = porovnání povrchu při změně DPI jsem vyhodnocoval pouze příčnou drsnost.

Naměřené hodnoty jsou zpracovány a vyhodnoceny v následujících tabulkách a grafech.

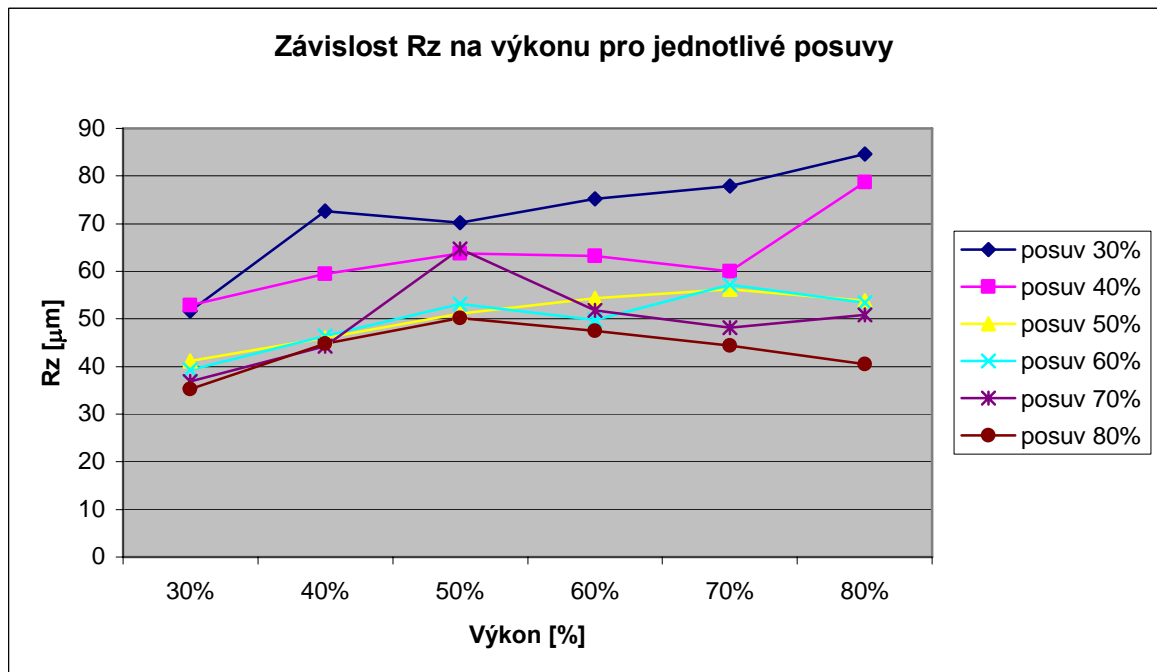
Vzhledem ke korektnosti výsledků byly všechny hodnoty naměřeny 10x a vypočítaná jejich střední hodnota, která je uvedena v tabulkách.

Tab. 7. Naměřené hodnoty R_a a R_z ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při rozlišení 1000DPI

Výkon P [%]	30	40	50	60	70	80
Posun f: 30%						
R_a [μm]	9,325	12,586	13,058	13,631	13,745	16,24
R_z [μm]	51,642	72,619	70,222	75,174	77,845	84,656
Posun f: 40%						
R_a [μm]	9,809	10,725	11,54	11,493	10,84	14,783
R_z [μm]	52,806	59,433	63,806	63,231	59,934	78,727
Posun f: 50%						
R_a [μm]	7,327	8,187	8,986	10,337	10,072	9,301
R_z [μm]	41,138	46,026	51,07	54,332	56,229	53,873
Posun f: 60%						
R_a [μm]	7,017	8,724	9,486	9,139	9,977	9,498
R_z [μm]	39,241	46,439	53,072	49,782	57,11	53,38
Posun f: 70%						
R_a [μm]	6,694	8,163	11,674	10,131	8,797	9,267
R_z [μm]	36,821	44,304	64,756	51,855	48,215	48,215
Posun f: 80%						
R_a [μm]	6,439	8,013	9,28	8,838	8,077	7,362
R_z [μm]	35,225	44,839	50,136	47,522	44,347	40,534



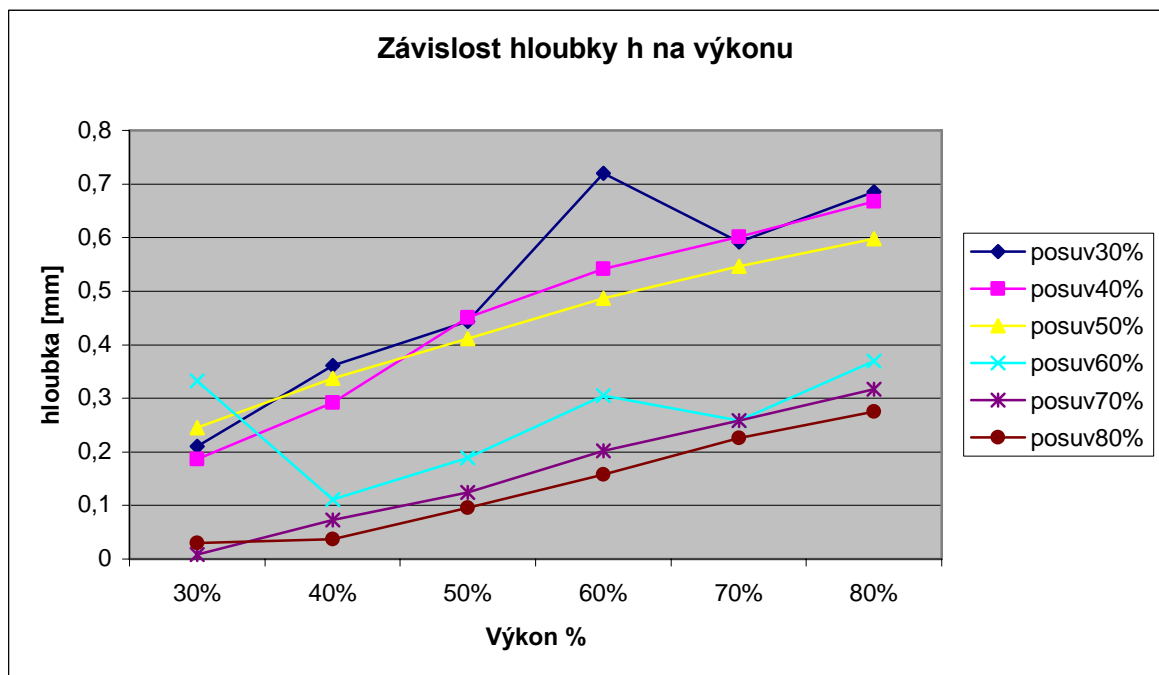
Obr. 19. Závislost střední aritmetické úchytky Ra na výkonu P a posuvu f



Obr. 20. Závislost maximální výšky profilu Rz na výkonu P a posuvu f

Tab. 8. Naměřené hodnoty hloubky h při 1000DPI

Výkon P [%]	30	40	50	60	70	80
Posun f: 30%						
h [mm]	0,2103	0,3609	0,444	0,7203	0,5917	0,685
Posun f: 40%						
h [mm]	0,1867	0,2923	0,451	0,5414	0,6012	0,6671
Posun f: 50%						
h [mm]	0,2448	0,3376	0,4108	0,4867	0,5465	0,5983
Posun f: 60%						
h [mm]	0,3321	0,1118	0,1884	0,3051	0,2577	0,3693
Posun f: 70%						
h [mm]	0,0078	0,0725	0,1248	0,2022	0,2578	0,3172
Posun f: 80%						
h [mm]	0,0293	0,0368	0,0956	0,1584	0,2258	0,2548



Obr. 21. Závislost hloubky obrobenej plochy na výkonu P a posuvu f

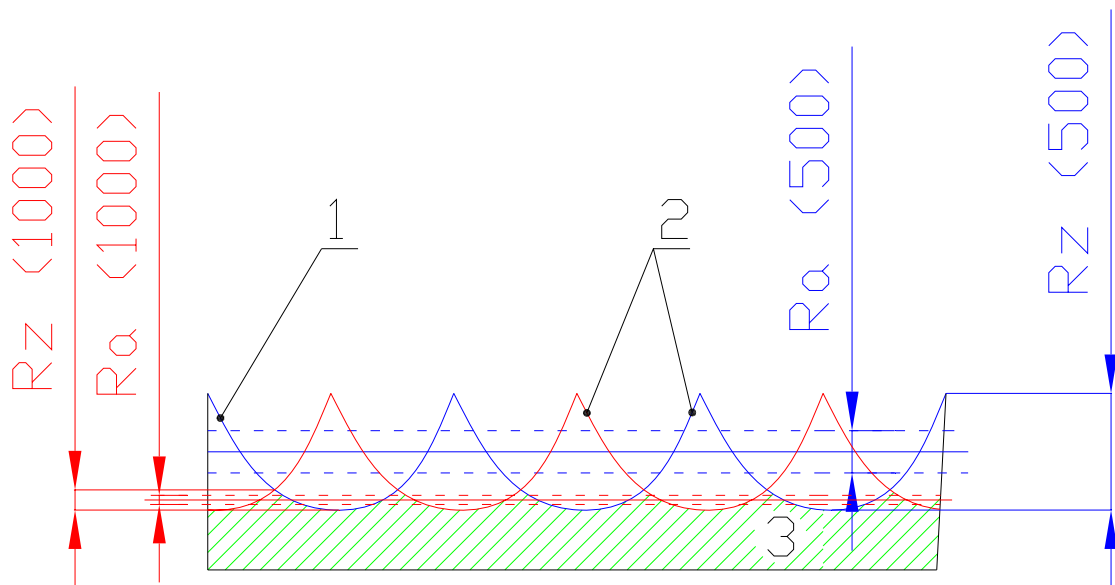
10 ZHODNOCENÍ VLIVU ZMĚNY DPI NA JAKOST OBRÁBĚNÉ PLOCHY

Jak je již uvedeno v kapitole 9 příčná drsnost obráběné plochy je dána posuvem laserového paprsku – paprsek postupně v materiálu vypaluje drážky. Samozřejmě na výslednou drsnost povrchu má vliv více faktorů mezi základní patří:

- průměr laserového paprsku
- DPI (hustota drah paprsku)
- výkonem laseru
- mód laseru – rozložení výkonu po průřezu plochy na niž dopadá paprsek

Při obrábění jsem použil stejnou desku jako použila Dosedělová v práci [24] aby bylo zaručeno stejné chování materiálu a nedocházelo k ovlivnění výsledků změnou chemické struktury nebo zpracováním desky. Samotné obrábění pak bylo provedeno na stejném typu laseru. Tato práce byla zaměřena na obrábění laserovým paprskem při rozlišení 500DPI.

Přestože jednotka DPI vyjadřuje hustotu bodů na ploše je obecně používána i pro označení hustoty drah – v tomto případě pak udává počet drážek, které laserový paprsek vytvoří na dráze o délce 1“ (25,4mm). Teoreticky by se tedy měla drsnost povrchu obráběného při rozlišení 1000DPI snížit oproti drsnosti obráběného při rozlišení 500DPI. Názorně to demonstruje Obr. 22. Obrázek není vyhotoven v měřítku, slouží pouze pro demonstraci řešené problematiky.



Obr. 22. Teoretický předpoklad změny drsnosti při obrábění s rozlišením 1000DPI

- Legenda: 1 – dráha paprsku při rozlišení 500DPI
 2 – dráha paprsku při rozlišení 1000DPI
 3 – vyšrafovaný výsledný profil obrobeneé plochy

Předpoklad je tedy takový, že se při zvýšení rozlišení odstraní špičky mezi jednotlivými drahami, které laserový paprsek vypaluje do obráběného materiálu. Výsledkem pak je snížení výsledné drsnosti povrchu. Teoreticky by se také měla zvětšit hloubka obrobeneých ploch. Jak již bylo uvedeno není obrázek v měřítku a proto není možné usuzovat, že změna drsnosti bude tak výrazná.

Tab. 9. Naměřené hodnoty Ra a Rz ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při rozlišení 500DPI [24]

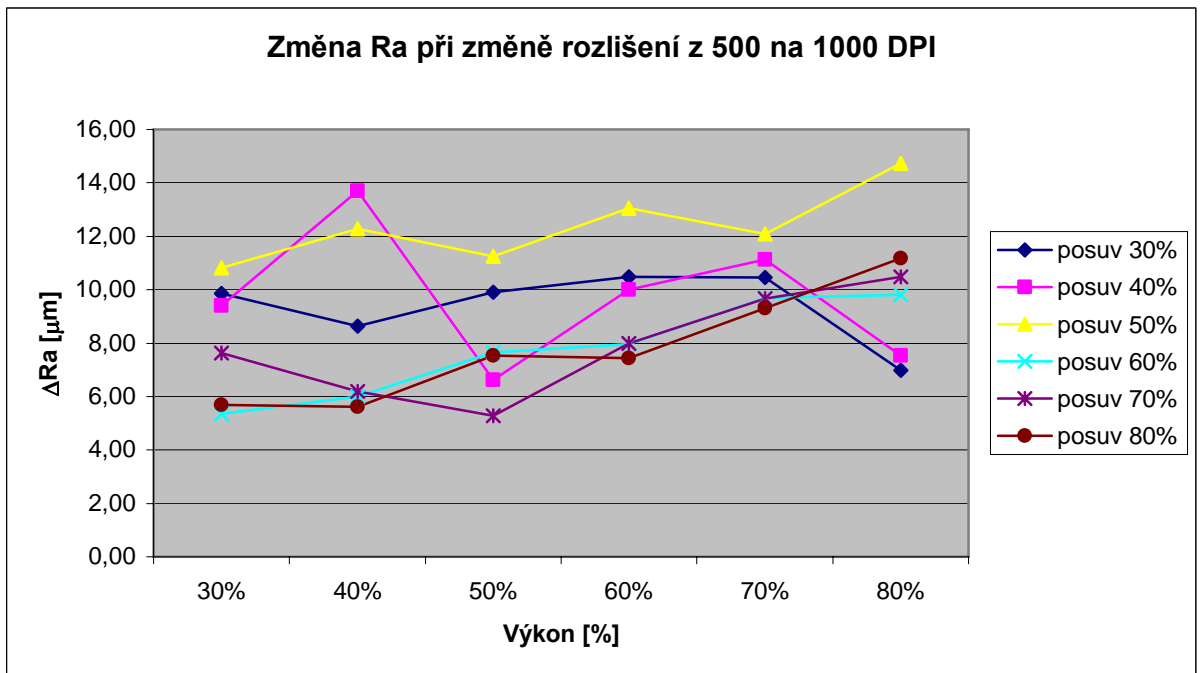
Výkon P [%]	30	40	50	60	70	80
Posuv f 30%						
R _a [μm]	19,18	21,21	22,97	24,11	24,21	23,23
R _z [μm]	102,13	116,08	124,31	130,25	124,71	135,50
Posuv f 40%						
R _a [μm]	19,22	24,43	18,15	21,49	21,98	22,32
R _z [μm]	101,96	113,90	106,21	118,79	120,55	123,89
Posuv f 50%						
R _a [μm]	18,15	20,46	20,23	23,39	22,15	24,03
R _z [μm]	89,30	106,65	108,35	125,61	126,80	126,60
Posuv f 60%						
R _a [μm]	12,37	14,72	17,13	17,11	19,68	19,30
R _z [μm]	72,90	79,91	94,78	98,13	95,34	100,51
Posuv f 70%						
R _a [μm]	14,33	14,34	16,94	18,13	18,47	19,74
R _z [μm]	78,20	89,29	96,88	98,35	113,44	108,36
Posuv f 80%						
R _a [μm]	12,12	13,63	16,82	16,28	17,38	18,53
R _z [μm]	68,86	77,75	94,10	94,26	110,30	104,47

Dále jsem hodnotil jaký je rozdíl mezi hodnotami drsnosti naměřenými po obrábění při rozlišení 500DPI a při rozlišení 1000DPI. V Tab. 10 jsou uvedeny rozdíly jak v absolutních jednotkách tak i procentuální změna – kladná hodnota znamená zlepšení jakosti povrchu, záporná hodnota by znamenala zhoršení jakosti povrchu.

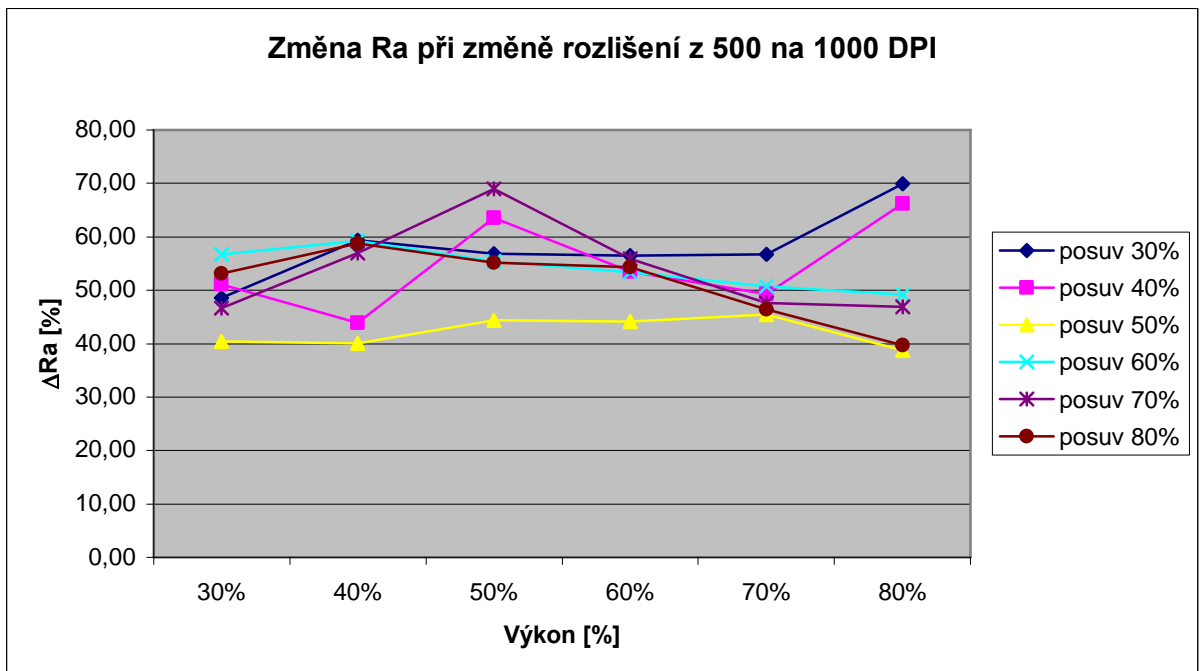
Po vyhodnocení jsem zjistil že naměřené hodnoty se změnily takto:

Tab. 10. Změna hodnoty Ra a Rz ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při změně rozlišení z 500DPI na 1000DPI

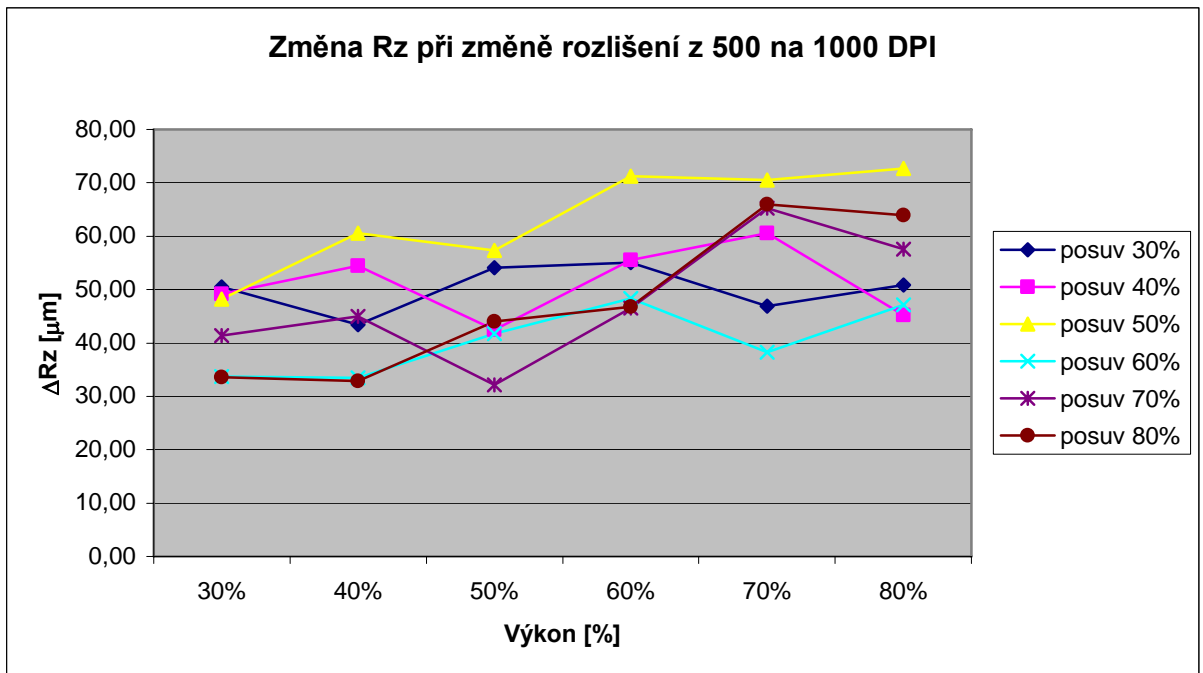
Výkon P [%]	30	40	50	60	70	80
Posuv f 30%						
R _a [μm]	9,86	8,62	9,91	10,48	10,47	6,99
R _a [%]	48,62	59,34	56,85	56,54	56,77	69,91
R _z [μm]	50,49	43,46	54,09	55,08	46,87	50,84
R _z [%]	50,56	62,56	56,49	57,72	62,42	62,48
Posuv f 40%						
R _a [μm]	9,41	13,71	6,61	10	11,14	7,54
R _a [%]	51,04	43,9	63,58	53,48	49,32	66,23
R _z [μm]	49,15	54,47	42,4	55,56	60,62	45,16
R _z [%]	51,79	52,18	60,08	53,23	49,72	63,55
Posuv f 50%						
R _a [μm]	10,82	12,27	11,24	13,05	12,08	14,73
R _a [%]	40,37	40,01	44,42	44,19	45,47	38,71
R _z [μm]	48,16	60,62	57,28	81,28	70,57	72,73
R _z [%]	46,07	43,16	47,13	43,25	44,34	42,55
Posuv f 60%						
R _a [μm]	5,35	6	7,64	7,97	9,7	9,8
R _a [%]	56,73	59,27	55,38	53,41	50,70	49,21
R _z [μm]	33,66	33,47	41,71	48,35	38,23	47,13
R _z [%]	53,83	58,11	55,99	50,73	59,90	53,11
Posuv f 70%						
R _a [μm]	7,64	6,18	5,27	8	9,67	10,47
R _a [%]	46,71	56,92	68,91	55,88	47,63	46,95
R _z [μm]	41,38	44,99	32,12	46,5	65,23	57,52
R _z [%]	47,09	49,62	66,84	52,72	42,50	46,92
Posuv f 80%						
R _a [μm]	5,68	5,62	7,54	7,44	9,3	11,17
R _a [%]	53,13	58,79	55,17	54,29	46,47	39,73
R _z [μm]	33,64	32,91	43,96	46,74	65,95	63,94
R _z [%]	51,15	57,67	53,28	50,42	40,21	38,80



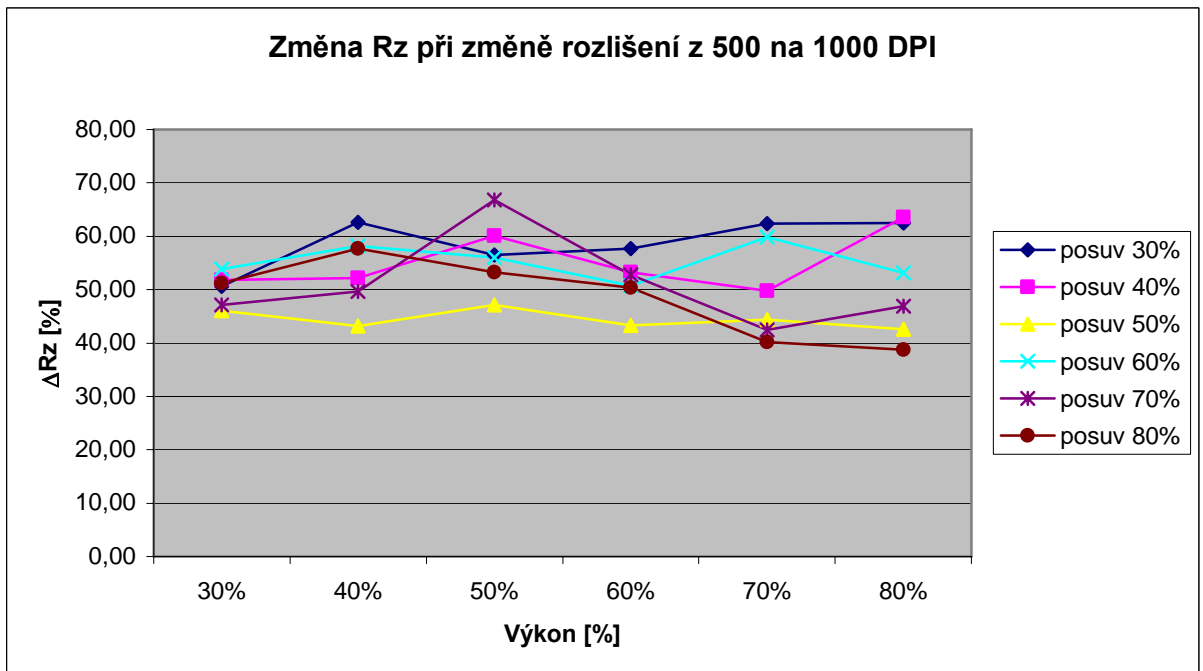
Obr. 23. Změna hodnoty Ra při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [μm]



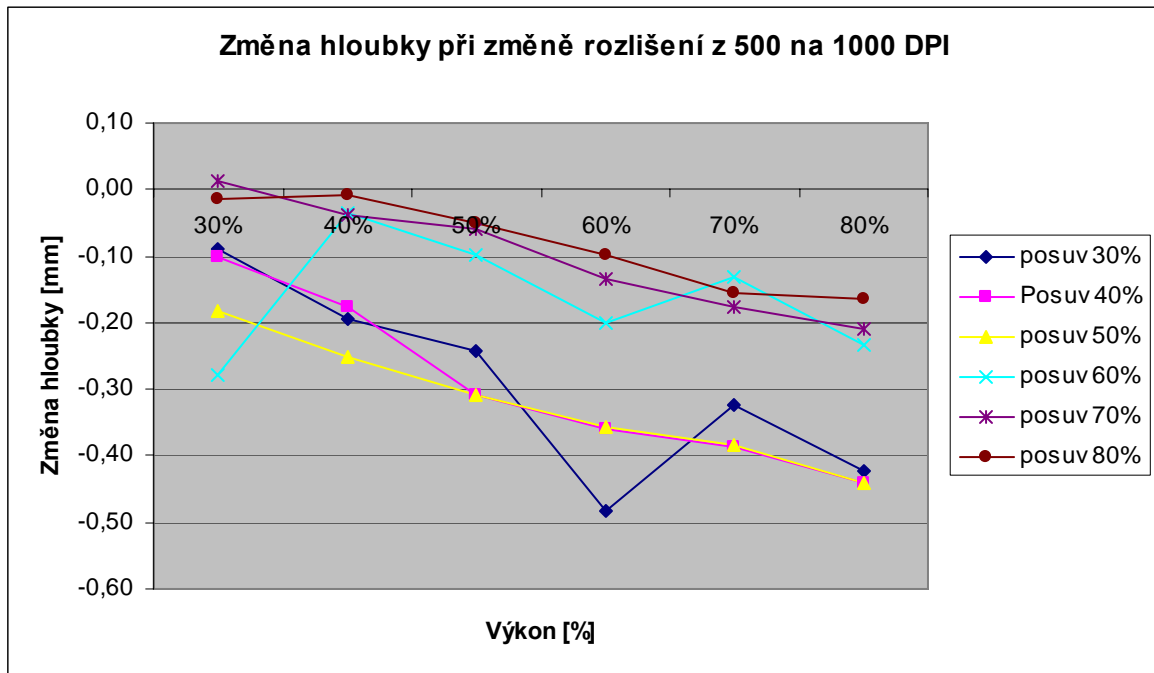
Obr. 24. Změna hodnoty Ra při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [%]



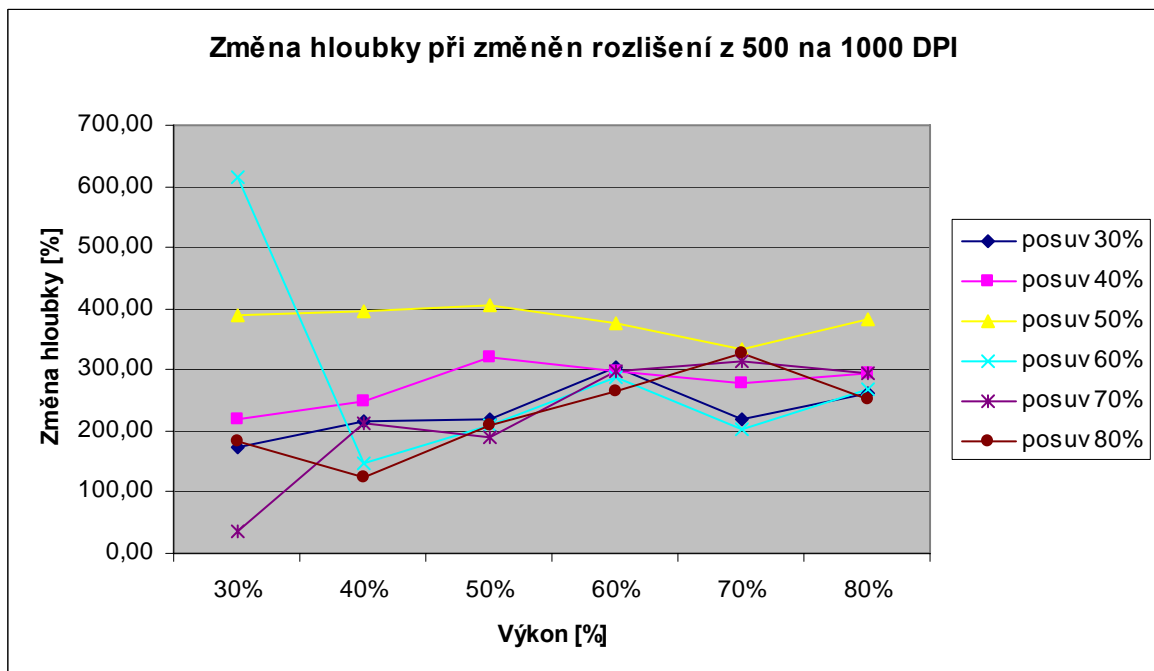
Obr. 25. Změna hodnoty Rz při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [μm]



Obr. 26. Změna hodnoty Rz při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [%]



Obr. 27. Změna hloubky obrobenej plochy při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI v mm (záporná hodnota vyjadřuje, že při 1000DPI je hloubka větší)



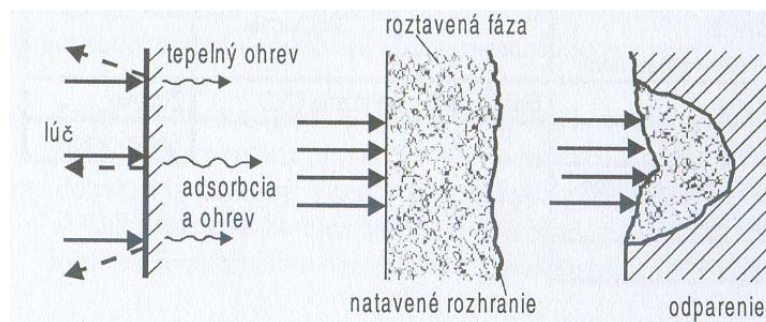
Obr. 28. Změna hloubky obrobenej plochy při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI v %

11 ROZBOR PŮSOBNÍ KONCENTROVANÉ ENERGIE NA PMMA – TEPLOTNÍ POLE

11.1 Účinek laserového paprsku na materiál

Podstatou tohoto způsobu obrábění je soustředění energie – elektromagnetického záření viditelného světla – na malou plošku obrobku. Přeměnou energie tohoto záření viditelného světla na energii tepelnou se místo dopadu zahřeje na teplotu značně přesahující teplotu tavení obráběného materiálu. Materiál se v místě dopadu taví a vypařuje.

V technologii se využívá paprsků vyzářených laserem ve vodorovném směru tak, že se optickou čočkou soustředí na malou plošku obrobku (řádově 0,001 až 0,01mm), na níž se jejich dopadem vyvine tak vysoká teplota, že stačí k vypaření materiálu obrobku. [15]



Obr. 29: Účinek laserového paprsku při dopadu na materiál [18]

Po dopadu paprsku na materiál se část paprsku odrazí, část se absorbuje a část projde materiálem. Absorbované paprsky se podílejí na ohřevu materiálu. Množství odražených paprsků závisí na odrazivosti materiálu. Odrazivost R [%] kovového povrchu pro vlnovou délku větší než $10\mu\text{m}$, je vyjádřena Hagen-Rubensovým vztahem:

$$R = 1 - \sqrt{\frac{f}{\sigma_0}} \quad (9)$$

kde σ_0 je elektrická vodivost kovu [$\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$]

Absorpce A [%] světelného záření způsobuje ohřev povrchové vrstvy. Odrazivost a absorpce jsou komplexní jevy a jejich vzájemný vztah vyjadřuje vztah:

$$R + A = 100\% \quad (10)$$

Odrazivost infračerveného světla od povrchů je různá. Některé hodnoty odrazivosti pro Nd-YAG laser a CO₂ laser (vlnová délka 10,6 μ m) uvádí tabulka. Tyto hodnoty platí pro leštěné povrchy, není udána kvalifikovaná hodnota drsnosti. Na odrazivost také působí vrstva oxidace na povrchu takže reálné hodnoty odrazivosti můžou být jiné. Odrazivost se dá snížit zdrsňením povrchu, překrytím povrchu nekovovou vrstvou nebo zahřátím materiálu.

Tab. 11. Odrazivost vybraných materiálů [18]

Odrazivost R [%]		
Materiál	Vlnová délka [μ m]	
	0,9 – 1,1	9 – 11
PMMA	0,8	1
Stříbro	96,4	99
Hliník	73,3	96,9
Měď	90,1	98,9
Železo	65	93,8
Nikl	72	95,6
Zinek	49	98,1
Chrom	57	93
Křemík	28	28
Ocel (1% uhlíku)	63,1	93 – 96
Uhlík (grafit)	26,8	59

Absorpce světelného záření a následný ohřev kovového povrchu závisí na tepelné vodivosti materiálu. Vedení tepla z laseru do materiálu je komplikovaný jev. V současnosti není odpovídající teorie pro vyjádření tepelné vodivosti a výpočet teploty, protože přestup tepla je velmi rychlý. Na vyjádření přestupu tepla pro pohyblivý zdroj s rychlostí v (m/s) se používá postup, který navrhli Carslaw-Jaeger. Představuje řešení parciální diferenciální rovnice pro vedení tepla od zdroje s rozměry zaostřeného paprsku do

povrchové vrstvy a dovnitř materiálu za určitých okrajových podmínek. Vychází se ze zjednodušeného předpokladu, že materiál obrobku je izotropní a přestup tepla se může popsat rovnicí difúze:

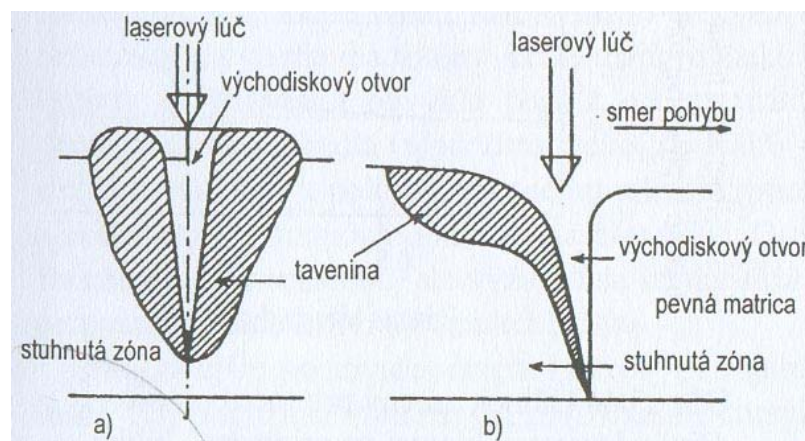
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta_L T \quad (11)$$

kde T je absolutní teplota (K), t je čas (s), Δ_L je relativní prodloužení, α tepelná difuzita daná vztahem:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (12)$$

kde k je koeficient tepelné vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), ρ je hustota materiálu ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), c je specifické teplo ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) tuhého materiálu.

Působením intenzivního zaostřeného laserového paprsku na materiál dochází k jeho natavení, viz obr. 11. Průřez natavené vrstvy je znázorněn na obr. 12. Když laserový paprsek s určitou hustotou výkonu ozáří povrch materiálu, absorbované paprsky lokálně ohřívají částice materiálu až na teplotu tavení. Povrch natavené oblasti se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením paprsku začíná odpařovat. V natavené zóně při odpařování částic vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je vytlačena do vznikajícího otvoru. Příčný řez ukazuje, že materiál je vytlačěn na obě strany. V podélném řezu je tlačení dozadu za pohybující se paprsek. Když záření přestane nebo když se paprsek posouvá dopředu, tavenina začíná tuhnout nebo rekrystalizovat a v tuhnoucí tavenině zůstávají zbytková napětí.



Obr. 30. Chování materiálu při působení laserového paprsku [18]

a) v příčném směru

b) v podélném směru

11.2 Simulace teplotního pole

Zbytkové teplo, které se nespotřebuje na odpaření materiálu v místě působení laserového paprsku se šíří zbytkem materiálu.

Při simulaci teplotního pole je možné postupovat několika metodami:

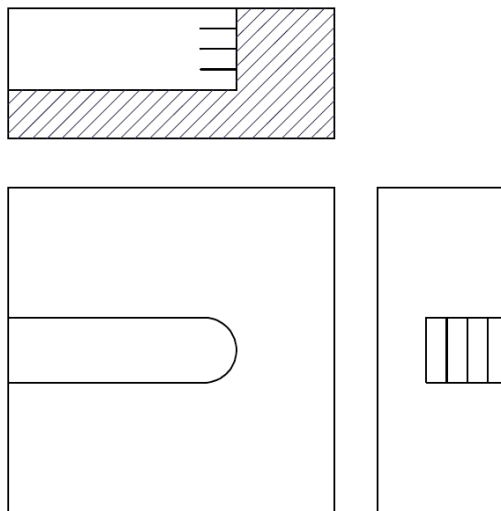
1. Zohlednit při působení laserového paprsku změnu fází, změnu pohltivosti záření, strukturální změny materiálu (depolymerace ...) a změnu geometrie. V závislosti na těchto změnách uvažovat fyzikální veličiny obráběného materiálu v čase proměnné (měnící se během působení tepelné energie).
2. Změnu fází a struktury materiálu neuvažovat a brát je jako konstantní. I když tento model přesně neodpovídá skutečnosti je možné jej vzhledem k rychlosti průběhu teploty v místě obrábění použít pro posouzení teplotního pole.
3. Řešit teplotní pole bez ohledu na odpařený materiál – uvažovat model pouze jako ohřev vzorku koncentrovanou energií na ploše působení laserového paprsku.

Při použití 1. metody je největším problémem sestavení modelu, který respektuje změnu fyzikálních vlastností a chování materiálu při zahřívání a změně fází. Se změnou teploty a fáze se mění jak měrná tepelná kapacita c_p , která se pohybuje v závislosti na teplotě od 0,585 kJ/kgK (při -173°C) až po 2,5 kJ/kgK (při 300°C) [25]. Při změně teploty také dochází ke změně tepelné vodivosti a to od 0,20 W/mK (při 25°C) do 0,16 W/mK (při 150°C) [8]. Při sestavování modelu by bylo nutné počítat ještě se změnou řezného profilu. Paprsek při posuvu neodpařuje materiál celou plochou průřezu. Při posuvu paprsku nad neobrobenou část materiálu se tento materiál zahřívá a po dodání dostatečné energie se odpaří – viz. Obr. 30

Druhá metoda řešení již nezohledňuje změnu fází a geometrie řezu, ale bere v úvahu odpaření materiálu při obrábění. U tohoto modelu je třeba uvažovat s postupným úběrem materiálu vlivem působení laserového paprsku. Zjednodušeně by se dalo uvažovat, že

paprsek v ohraničených časových intervalech odebírá vždy část materiálu odpovídající ploše paprsku a nastavenému výkonu.

Model by se tedy skládal z několika vrstev, kdy každá vrstva by reprezentovala určitý časový interval působení paprsku. Tímto by se dosáhlo simulace postupného úběru materiálu. Model založený na vrstvách by celkem přesně simuloval prostup tepelné energie v tloušťce materiálu se zachováním reálné hloubky obrobené dráhy. Při nastavení konstantního času pro všechny vrstvy by se také dala určit hloubka obrobené drážky – místo působení teploty potřebné pro odpaření.



Obr. 31. Postupné odebírání materiálu paprskem

Třetí model nezohledňuje odpařený materiál. Výsledkem je pak model, který zobrazuje postup teploty v materiálu. Pro posouzení teplotního pole jsem zvolil, s ohledem na možnosti softwaru Cosmos DesignStar v 4.5, právě tento model.

Při sestavování modelu jsem vycházel z několika předpokladů:

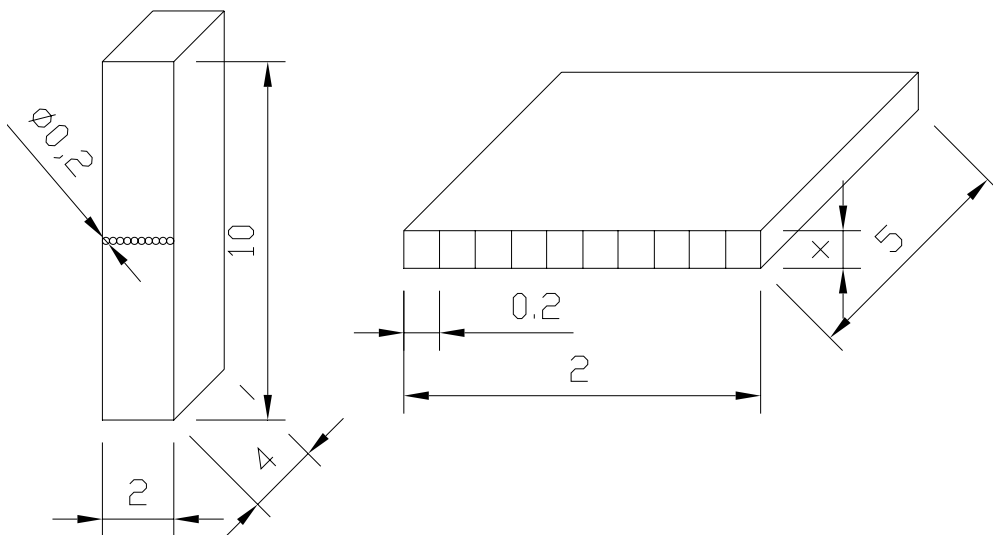
1. Veškerá dodaná energie se promění na teplo.
2. Použitý materiál absorbuje laserové záření v maximální možné hodnotě pro tento typ polymeru.
3. Dochází k extrémně rychlému přehřátí materiálu.
4. Teplotní profil se šíří ve všech směrech materiálu stejně.

První a druhý bod umožňují výpočet energie dodané za jednotku času a vzhledem k použitému materiálu zanedbat případné energetické ztráty způsobené odrazem elektromagnetického záření od materiálu. Třetí bod umožňuje zanedbat změny na rozhraní fází, protože přehřátí materiálu je tak rychlé, že změna fází nemá v důsledku pro výsledek žádný význam. Čtvrtý bod umožňuje modelovat teplotní pole na ploše materiálu ve 2D s tím, že je pak možné sledovat šíření tepla uvnitř materiálu.

Jednotlivé kroky při sestavování modelu:

1. Geometrie vzorku

Pro sledování teplotního pole jsem použil dva modely o rozměrech 10 x 2 mm (dále model č.1) a 5 x 2 mm (dále model č.2). Na modelu č. 1 (10 x 2 mm) jsem vytvořil pole na povrchu materiálu o průřezu a tvaru laserového paprsku $d = 0,2\text{mm}$. U modelu č. 2 (5 x 2 mm) jsem zvolil jiný postup a vytvořil pole, které simuluje působení paprsku po průřezu materiálem, pro tento model jsem vytvořil dva vzorky, které jsou obráběny za rozdílných technologických podmínek. Tento model má výšku, která odpovídá hloubce obrobené drážky. Pro vzorek č. 1 ($P = 30\%$ a $f = 30\%$) hodnota $x = 0,2103\text{mm}$, pro vzorek č. 2 ($P = 80\%$ a $f = 30\%$) hodnota $x = 0,685\text{mm}$.



Obr. 32. Geometrie zkušebních vzorků – model č. 1 a model č. 2

Pro určení hustoty dodané energie platí:

$$q = \frac{P}{S} = \frac{30}{0,0314} = 0,954\text{MW} / \text{mm}^2 \quad (13)$$

kde q je hustota dodané energie, P je výkon a S je plocha na kterou působí energie.

2. Definice materiálových vlastností

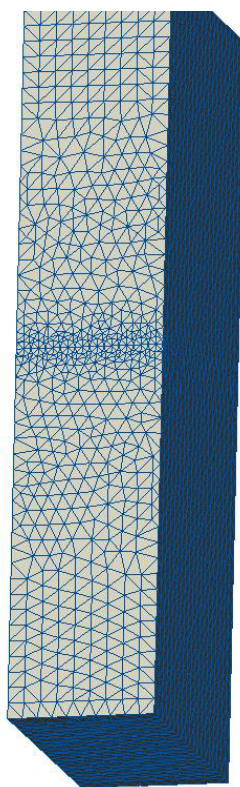
Materiálové vlastnosti byly zadány dle tab.

Tab. 12. Vlastnosti PMMA

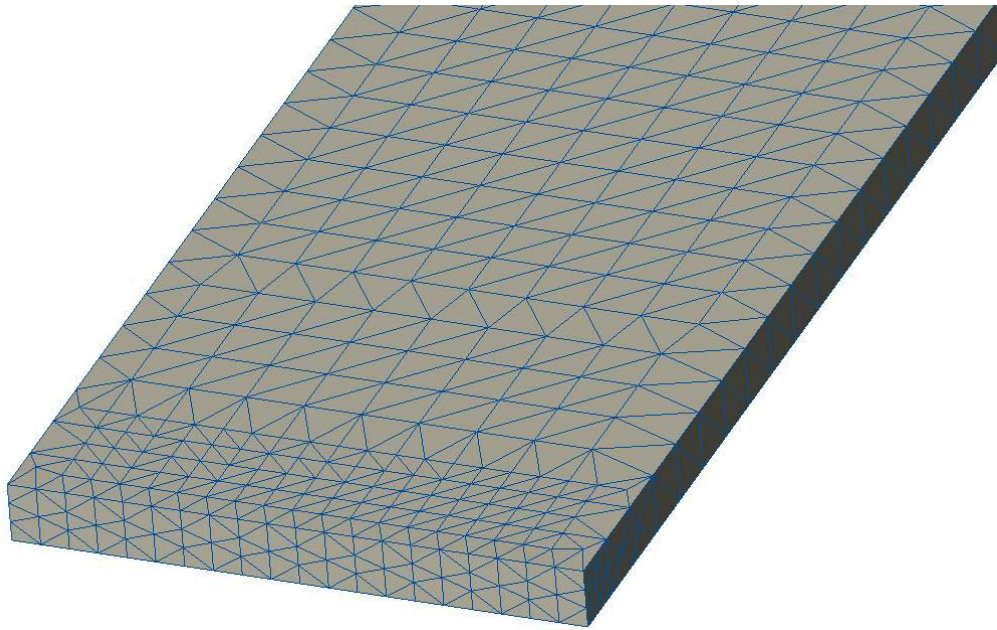
Tepelná kapacita c_p	1420 J/kgK
Absorpce A pro CO ₂ laser	99%
Tepelná vodivost	0,2 W/mK (pro 25°C)
Hustota ρ	1420 kg/m ³
Teplota rozkladu Td	300°C

3. Vytvoření sítě

Na model byla použita síť s trojúhelníkovými elementy typu tetra-10 o velikosti strany 0,2mm a zahuštěna v místě působení laserového paprsku na velikost 0,1mm počet vrstev zahuštění sítě jsem volil 5.



Obr. 33. Geometrie sítě
u modelu č. 1



Obr. 34. Geometrie sítě u modelu č. 2

4. Volba okrajových a počátečních podmínek

Model jsem sestavoval pro 2 vzorky u nichž byla nastavena stejná hodnota posuvu 30% a měnila se pouze hodnota výkonu. V absolutních jednotkách se jednalo o výkon 9W resp. 24W a posuv 319mm/s. Při dané velikosti vzorku je tedy doba obrobení vzorku dána vztahem:

$$t_{vz} = \frac{L}{v} = \frac{2}{320} = 0,00625s \quad (14)$$

kde L je délka obráběné dráhy vzorku (2mm), v je rychlost posuvu (320mm/s)

pak doba působení laserového paprsku na jedno pole je:

$$t_{pole} = \frac{t_{vz}}{n} = \frac{0,00625}{10} = 0,000625s \quad (15)$$

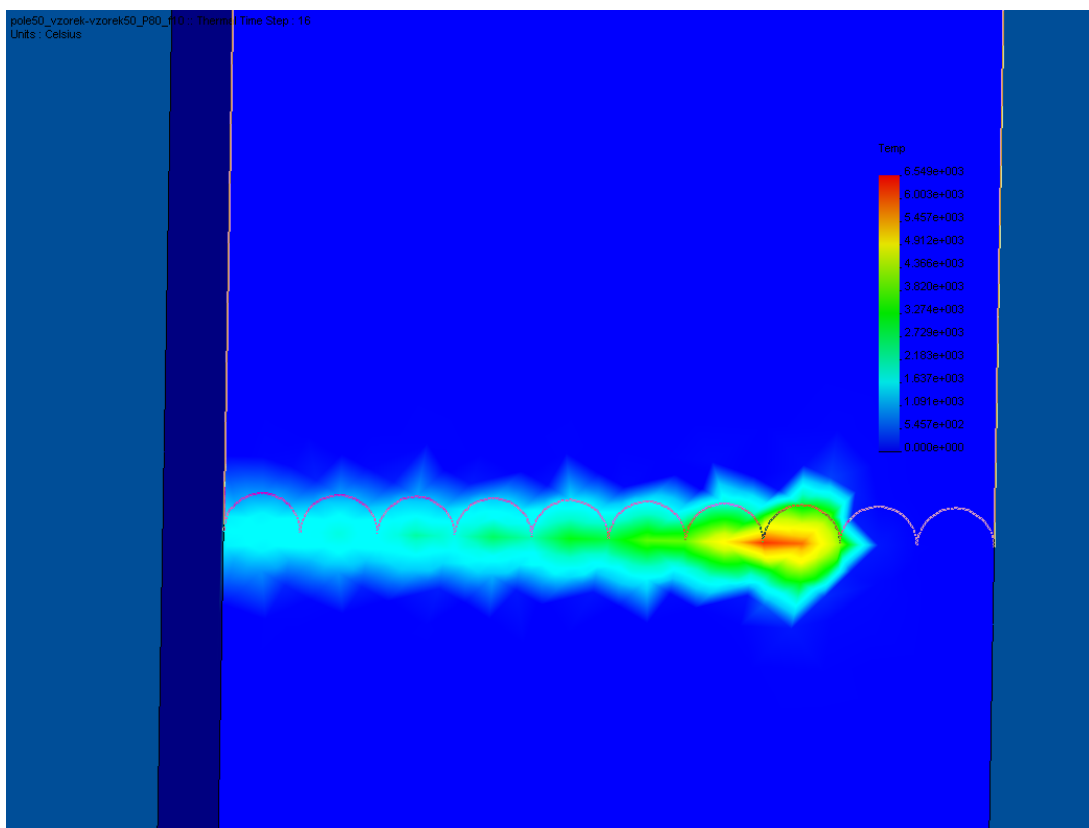
kde t_{vz} je celková doba obrábění vzorku a n je počet polí na které působí paprsek

Vzhledem k absorpci záření PMMA 99% jsem odraz paprsku zanedbal.

5. Doba pozorování, časové kroky

Dobu pozorování vzorku jsem volil 0,01s s časem výpočtového kroku 0,0002s, což dává 50 výpočtových kroků – při počtu 10 obráběných polí pak připadá na každé pole 5 výpočtových kroků. Doba pozorování je dostatečně dlouhá pro zjištění chování tepla v obrobeném materiálu vzhledem k době působení tepelného zatížení 0,000625 na jedno pole.

Po provedení první simulace se ukázalo, že model č.1 není vhodným řešením pro tento typ simulace, protože při zvolených omezeních není možné zadat působení tepelné energie do průřezu materiálu – při nastaveném čase působení paprsku se teplota v materiálu šíří všemi směry stejně a narůstá do extrémních hodnot. Výsledkem je, že teplota v řádu 10^3 °C působí i za hranicí paprsku což neodpovídá realitě – obrobená drážka by výrazně přesahovala tloušťku paprsku a drážka by nedosáhla hloubky, která byla zjištěna v kapitole 9.

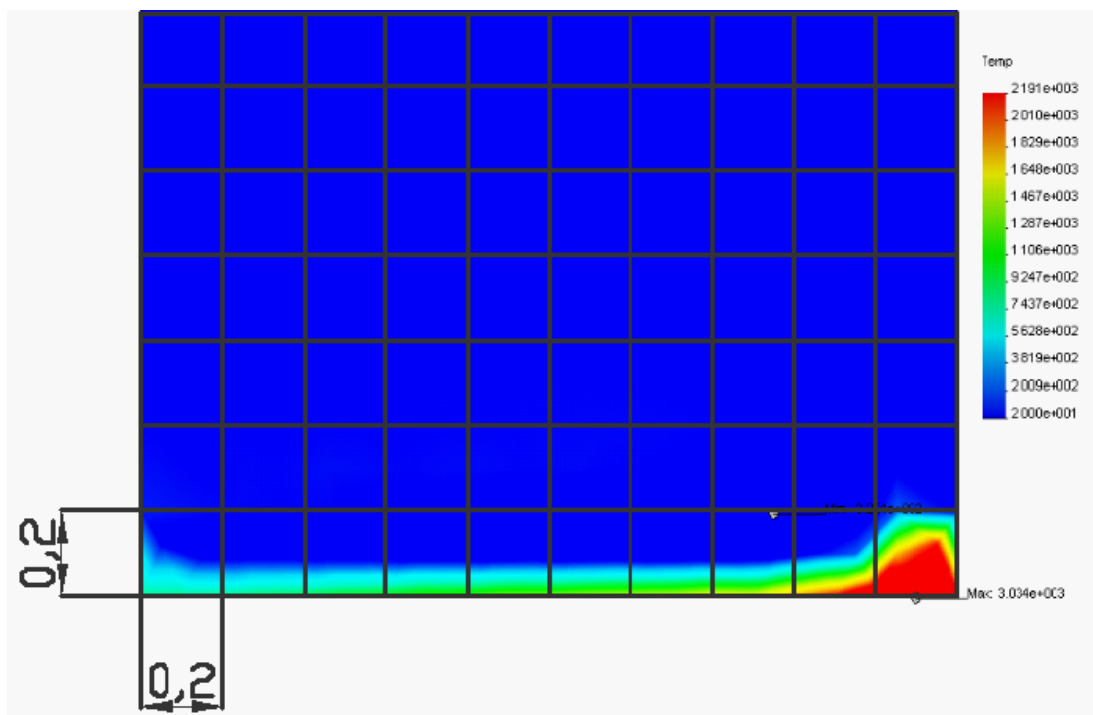


Obr. 35. Simulace teplotního pole s použitím modelu č.1 při $P = 30\%$ a $f = 30\%$

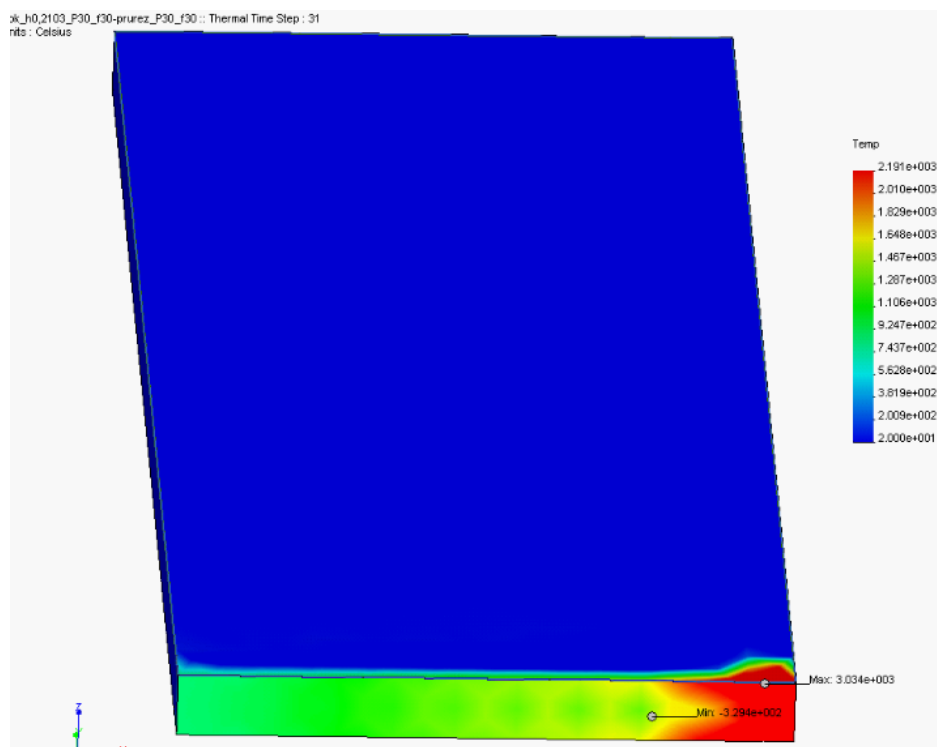
Naznačené oblouky opisují plochy působení paprsku. Jak je tedy z obrázku zřejmé, ještě na kružnici o dvojnásobném průměru než je průměr paprsku působí teplota 1091°C .

Model č.1 jsem tedy zhodnotil jako nepoužitelný a v dalších simulacích jsem pracoval pouze s modelem č.2.

Model č.2 se ukazuje v rámci omezujících podmínek reálné šíření teploty materiálem. Na obrázek teplotního pole je položen rastr v odpovídajícím měřítku, aby bylo možno odhadnout šíření tepla obráběným materiálem.

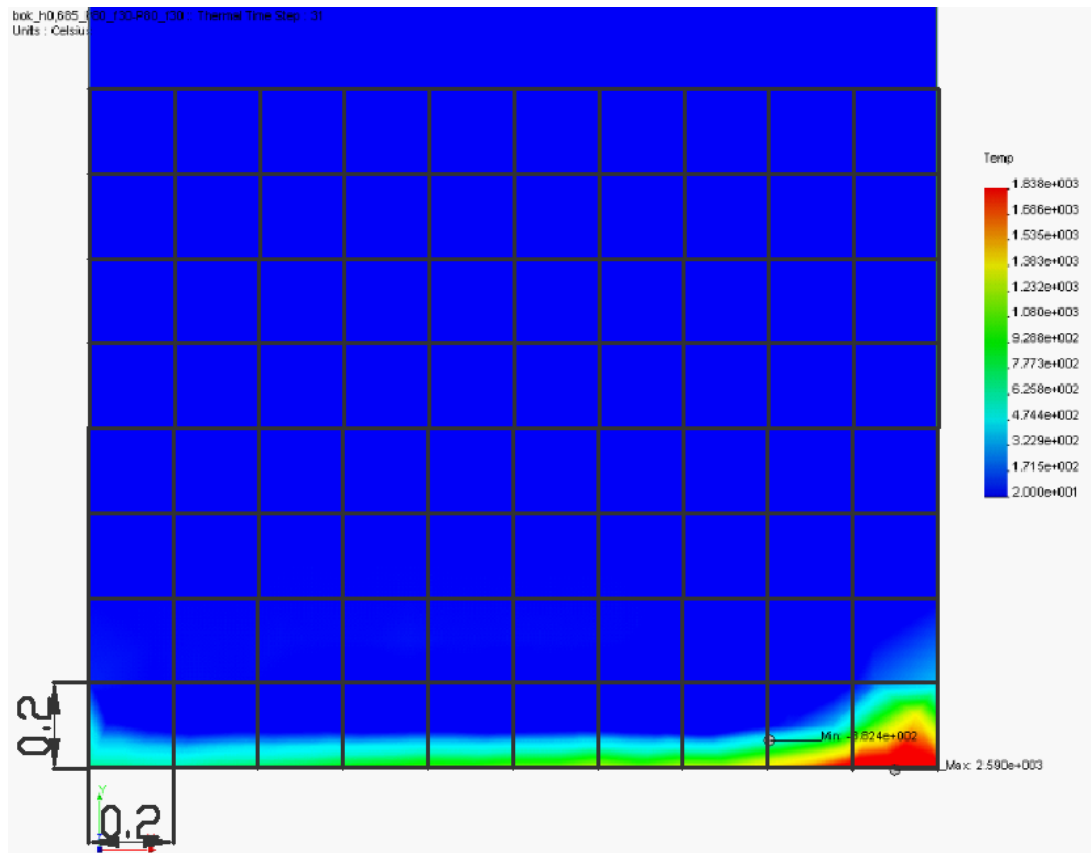


Obr. 36. Teplotní pole pro vzorek č.1 P = 30%,f = 30% v čase 0,005625s

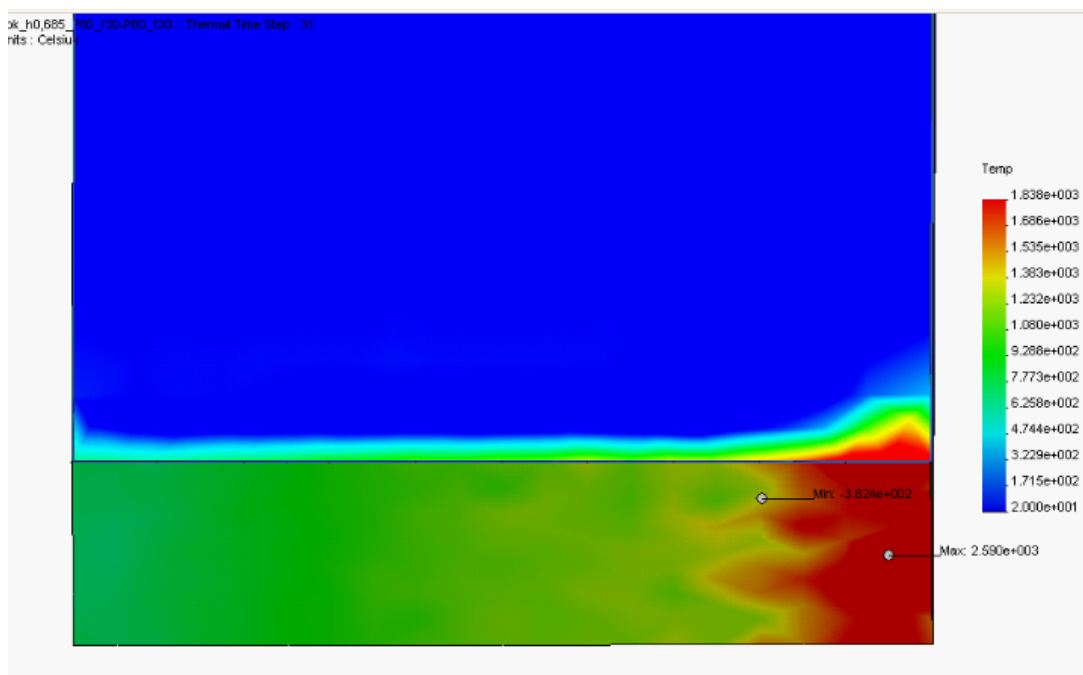


Obr. 37. Teplotní pole pro vzorek č. 1 P = 30%, f = 30% v čase 0,005625s

Pro ověření výsledků jsem provedl simulaci na vzorku č.2 opět s použitím modelu č 2.



Obr. 38. Teplotní pole pro vzorek č.2 P = 80%,f = 30% v čase 0,005625s



Obr. 39. Teplotní pole pro vzorek č.2 P = 80%,f = 30% v čase 0,005625s

12 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z praktické části plyne, že změna technologických podmínek má při obrábění polymerního materiálu PMMA významný vliv na výslednou obrobenou plochu. Při změnách výkonu a posuvu se nemění pouze hloubka obrobené drážky, ale dochází také k výrazné změně povrchu obrobené plochy.

12.1 Měření drsnosti povrchu a hloubky drážky

Při měření bylo zjištěno, že se zvyšujícím se výkonem a snižující se rychlostí laserového paprsku se hloubka obrobené drážky zvyšuje téměř lineárně a drsnost povrchu se zvyšuje. Na výsledek obrábění má vliv především množství dodané energie na jednotku plochy bez ohledu jestli se změna provede změnou rychlosti paprsku nebo změnou výkonu.

Odchytky od linearit byly zaznamenány u obráběných políček při hodnotách nastavení $f = 70\%$, $P = 50\%$ - viz. Obr. 19 a Obr. 20. Jednou z možných příčin výkyvu naměřených veličin může být použitý materiál především jeho homogenita. Při obrábění za konstantních technologických podmínek (1 obráběná plocha na zkušební desce) není možné zjistit, zda se v materiálu nevyskytuje nehomogenita, která může mít výrazný vliv na výsledek obrábění.

Dalším faktorem ovlivňujícím výsledek je také způsob a přesnost měření. Způsobem měření je myšleno počet bodů (drah) na kterých je měření realizováno. Samozřejmě platí, že čím více je měřených bodů tím se výsledek zpřesňuje. Přesnost měření pak ovlivňuje použití určitého měřicího přístroje a také okolní podmínky, ve kterých měření probíhá. Mnou naměřené hodnoty byly dle základních požadavků pro statistické vyhodnocení změřeny vždy 12x, vyřazena byla nejmenší a nejvyšší hodnota. Možnost ovlivnění střední hodnoty počtem realizovaných měření lze tedy v tomto případě vyloučit. Pro přesné vyhodnocení drsnosti povrchu by bylo vhodné použít bezdotykové metody měření založené na principech optické interferenci světla. Tento přístroj jsem bohužel neměl k dispozici.

12.2 Vyhodnocení vlivu změny DPI na jakost obráběných ploch

Srovnání výsledků z měření obrobených ploch při nastaveném rozlišení 500 a 1000 DPI potvrdilo očekávaný předpoklad, že se zvýšením rozlišení se jakost obrobeného povrchu zlepšuje. Toto zlepšení je možné považovat za výrazné, neboť se u R_a pohybuje v rozmezí 38,71 až 69,91% a u R_z od 38,8 do 66,84%. Průměrně se zlepšilo R_a o 52,33% a R_z o 52,17%.

12.3 Zhodnocení vlivu koncentrované energie na obráběný materiál

Po provedení simulace teplotního pole šířícího se ve zkušebních vzorcích po obrábění laserovým paprskem bylo zřejmé, že vzhledem k velmi krátkému času obrábění dochází v místě působení koncentrované energie k zahřátí materiálu na vysokou teplotu a k jeho odpaření. Teplo se pak materiálem prakticky nešíří, resp. dochází k jeho šíření, ale ne v takové míře aby zásadně ovlivnilo strukturu okolního materiálu. Ve vzdálenosti cca 0,02mm od stěny obrobené drážky (tj. 10% šířky obrobené drážky) dosahuje teplota u vzorku č. 1 ($P = 30\%$, $f = 30\%$) hodnoty menší než 200°C a ve vzdálenosti 0,04 mm již není teplota zaznamenána. U vzorku č. 2 ($P = 80\%$, $f = 30\%$) je samozřejmě šíření tepla větší. Ve vzdálenosti 0,02mm od stěny obrobené drážky dosahuje teplota hodnoty cca 250°C . Šíření tepla se zastaví ve vzdálenosti cca 0,1mm, ale jak je patrné z Obr. 38. Teplotní pole pro vzorek č.2 $P = 80\%$, $f = 30\%$ v čase 0,005625s teplota v rozmezí 0,02 až 0,1mm rychle klesá.

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsou zkoumány možnosti obrábění materiálu PMMA se zaměřením na mikroobrábění. Zkušební obrábění proběhlo na komerčně běžně dostupném CO₂ laseru, který je využívám především ke gravírování a popisování. Vzhledem k možnostem změny nastavení vstupních technologických parametrů výkonu, posuvu a rozlišení bylo možné zkoumat jejich vliv na výslednou obrobenu plochu, především kvalitu a také její hloubku. Měření proběhlo na dostatečném počtu polí, tak aby výsledné závislosti dávali korektní hodnoty. Cílem bylo srovnání výstupních veličin při stejných vstupních hodnotách P a f avšak při změně DPI z 500 na 1000.

Změna DPI není technologicky nijak náročná, avšak dochází k nárůstu doby obrábění. Je proto nutné ekonomické posouzení výhodnosti změny DPI v závislosti na konkrétních požadavcích jakosti povrchu. Na straně druhé je však se změnou DPI jednoznačně zaručena vyšší kvalita obráběné plochy, a tím zvýšení užitné hodnoty daného výrobku.

Poslední oblastí zájmu bylo studium teplotního pole při působení koncentrované energie na povrch materiálu a jeho šíření uvnitř obráběného vzorku. Tato simulace však byla omezena výpočetními možnostmi programu Cosmos DesignStar v. 4.5, který neumožňuje zohlednit všechny změny probíhající v materiálu při jeho ohřevu. Dle modelovaných výsledků lze konstatovat, že laserový paprsek má minimální vliv na strukturu obráběného materiálu, konkrétně PMMA.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STRUMBAN, E.J., ŠTOLL, I.: Lasery a optoelektronika, Panorama, Praha 1989
- [2] GÖRFÖLOVÁ, R.: Porovnání laserového a laserového obrábění polymerů – Diplomová práce, UTB, Zlín 2004
- [3] ENGST, P., HORÁK, M.: Aplikace laserů, SNTL, Praha 1989
- [4] HENDRYCHOVÁ, B.: Výzkum mikroobrábění polymerních materiálů laserem – Diplomová práce, UTB, Zlín 2003
- [5] HOLÍKOVÁ, Š.: Řezání polymethylmetakrylátu laserem – Diplomová práce, VUT Brno 1993
- [6] ŠULC, J.: Lasery a jejich aplikace. Odborný článek, 2002
- [7] VRBOVÁ, M. a kol.: Lasery a moderní optika – oborová encyklopedie, Prométheus, Praha 1994
- [8] KRYŠTŮFEK, M.: Řezání polymerních materiálů laserem – Diplomová práce, VUT Brno 2000
- [9] www.mendelova.cz
- [10] SEDLÁČEK, K.: Laser v mnoha podobách, Naše vojsko, Praha 1982
- [11] RŮŽIČKA, Z.: Výzkum použití laseru a paseru při opracování plastů – Diplomová práce, VUT Brno 1995
- [12] www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358
- [13] www.medicom.cz
- [14] LYSHEVSKI, S. E.: Nano- and Micro-Electromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering. CRC Press, 2000
- [15] LUKOVICS, I., Konstrukční materiály a technologie, VUT Brno 1992
- [16] BROWN, I. J.: Laser micromachining principles and systems.
- [17] ZÁMORSKÝ, Z., Nauka o polymerech II, VUT Brno 1980
- [18] MAŇKOVÁ, I.: Progresivné technologie, Vienala, Košice 2000

[19] Klank, H., Kutter, J.: CO₂ laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA – based microfluidic systems. Microelectronic centre, Denmark, 2002.

[20] www.altec.com

[21] www.laserprousa.com

[22] <http://repairfag.ece.erexel.edu>

[23] <http://www.elektrorevue.cz/clanky>

[24] DOSEDĚLOVÁ, P.: Výzkum procesu laserového popisování polymerních materiálů – Diplomová práce, UTB, Zlín 2005

[25] <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=1163>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Absorpce záření [%]
a_0	poloměr svazku (radiální vzdálenost od osy svazku, v níž poklesne intenzita pole na hodnotu E_{\max}/e ; $e = 2.718\dots$)
c	Rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$
c	Specifické teplo [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
DPI	Rozlišení (počet bodů - dráh na palec čtvereční)
E	Energie elektronu [J]
E_0	Základní energetická hladina elektronu [J]
E_1	Excitovaná energetická hladina elektronu [J]
E_{\max}	Maximální energie [J]
E_p	Energie fotonu [J]
f	Rezonanční frekvence záření [Hz]
f	Rychlost posuvu [ms^{-1}], [%]
h	Planckova konstanta [$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$]
h	Hloubka obrobené plochy [mm]
k	Koeficient tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
L	Délka dráhy [m]
m	Hmotnost [kg]
P	Výkon [W], [%]
R	Odrazivost povrchu [%]
R_a	Aritmetická úchylka profilu [μm]
R_z	Maximální výška profilu [μm]
T	Teplota [$^{\circ}\text{C}$], [K]
t	Čas [s]
T_m	

T_g	Teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]
v	Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
σ_o	Rychlost posuvu [ms^{-1}]
ρ	Elektrická vodivost kovu [$\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$]
ρ	radiální vzdálenost bodu (x,y) od osy svazku [m]
λ	hustota materiálu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
Δ_L	Vlnová délka [μm]
C–H	Relativní prodloužení
C=H	Nenasycená vazba uhlík – vodík Nenasycená vazba uhlík – vodík
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření)
Nd:YAG	Neodymem (Nd^{+3}) dopovaný yttrito-hlinitým granátem
TEM _{xx}	Transverse Electromagnetic Mode – Mód laserového paprsku
PMMA	
UV	Polymethylmetakrylát Ultrafialové záření

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Hlavní typy výrobních procesů [18].....	13
Obr. 2. Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění [18].....	17
Obr. 3. Model atomu.....	25
Obr. 4. Skokové změny hodnot energie.....	25
Obr. 5. Spektrum elektromagnetických vln.....	27
Obr. 6. Modova struktura laserů [2]	28
Obr. 7. Schéma laseru	29
Obr. 8. Laser s krystalem rubínu [1].....	30
Obr. 9. Polovodičové lasery - injekční a s heterostrukturou [1].....	31
Obr. 10. Helium – neonový laser [1]	31
Obr. 11. Vliv kvality otvoru na použitém typu laseru [4]	38
Obr. 12. Možnosti laserového obrábění [4].....	39
Obr. 13. Schema popisu laserem metodou vychylování paprsku [13]	40
Obr. 14. Matice obrobených plošek na PMMA desce.....	47
Obr. 15. Lineární výškoměr LH - 600B.....	51
Obr. 16. Tvar laserového paprsku v modu TEM00 [22]	52
Obr. 17. Profil fokusovaného laserového svazku [23].....	52
Obr. 18. Příčný profil drsnosti po obrábění laserovým paprskem.....	53
Obr. 19. Závislost střední aritmetické úchylny Ra na výkonu P a posuvu f.....	55
Obr. 20. Závislost maximální výšky profilu Rz na výkonu P a posuvu f.....	55
Obr. 21. Závislost hloubky obrobené plochy na výkonu P a posuvu f.....	56
Obr. 22. Teoretický předpoklad změny drsnosti při obrábění s rozlišením 1000DPI	58
Obr. 23. Změna hodnoty Ra při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [μm]	61
Obr. 24. Změna hodnoty Ra při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [%]	61
Obr. 25. Změna hodnoty Rz při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [μm]	62
Obr. 26. Změna hodnoty Rz při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI Ra [%]	62
Obr. 27. Změna hloubky obrobené plochy při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI v mm (záporná hodnota vyjadřuje, že při 1000DPI je hloubka větší).....	63
Obr. 28. Změna hloubky obrobené plochy při změně rozlišení z 500 na 1000 DPI v %.....	63
Obr. 29: Účinek laserového paprsku při dopadu na materiál [18].....	64

Obr. 30. Chování materiálu při působení laserového paprsku [18].....	66
Obr. 31. Postupné odebrání materiálu paprskem.....	68
Obr. 32. Geometrie zkušebních vzorků – model č. 1 a model č. 2.....	69
Obr. 33. Geometrie sítě u modelu č. 1	70
Obr. 34. Geometrie sítě u modelu č. 2	71
Obr. 35. Simulace teplotního pole s použitím modelu č.1 při $P = 30\%$ a $f = 30\%$	72
Obr. 36. Teplotní pole pro vzorek č.1 $P = 30\%$, $f = 30\%$ v čase 0,005625s.....	74
Obr. 37. Teplotní pole pro vzorek č. 1 $P = 30\%$, $f = 30\%$ v čase 0,005625s.....	74
Obr. 38. Teplotní pole pro vzorek č.2 $P = 80\%$, $f = 30\%$ v čase 0,005625s.....	75
Obr. 39. Teplotní pole pro vzorek č.2 $P = 80\%$, $f = 30\%$ v čase 0,005625s.....	75

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Znázornění principu technologie a stručná charakteristika [18]	20
Tab. 2. Posouzení vhodnosti progresivních technologií pro opracování vybraných druhů konstrukčních materiálů [18]	23
Tab. 3. Přehled laserů jejich vlastností a použití [9].....	33
Tab. 4. Technické parametry laseru Mercury L30 [21].....	49
Tab. 5. Technické parametry drsnoměru Surfrest SJ 301	50
Tab. 6. Technické parametry výškoměru LH - 600B	51
Tab. 7. Naměřené hodnoty Ra a Rz ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při rozlišení 1000DPI.....	54
Tab. 8. Naměřené hodnoty hloubky h při 1000DPI.....	55
Tab. 9. Naměřené hodnoty Ra a Rz ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při rozlišení 500DPI [24]	59
Tab. 10. Změna hodnoty Ra a Rz ve směru kolmém na směr posuvu paprsku při změně rozlišení z 500DPI na 1000DPI	60
Tab. 11. Odrazivost vybraných materiálů [18].....	65
Tab. 12. Vlastnosti PMMA.....	70