

Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály.

Bc. Jan Brimus

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

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

Téma práce: **Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály**

Zásady pro vypracování:

- A) Vypracujte rešerši se zaměřením na tyto oblasti :**
- 1. obrábění laserem a jeho charakteristika**
 - 2. polymerní materiály, rozdělení, výroba, vlastnosti**
 - 3. studie vlivu koncentrované energie na různé polymerní materiály**
- B) Experimentální část:**
- 1. obrábění vzorků z různých polymerních materiálů při konstantních technologických parametrech (výkonu, posuvu a DPI).**
 - 2. provedte vyhodnocení obrobených ploch za účelem simulace teplotního pole**
 - 3. sestavte reálný model pro přestup tepla, který respektuje změnu fyzikálních vlastností a chování materiálu při zahřívání a změně fází a provedte parametrickou studii přestupu tepla pro jednotlivé materiály za použití software COSMOS.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1.ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o polymerech, VUT, Brno 1980

2.MAŇKOVÁ, I.: Progressivné technologie, Viena, Košice 2000

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

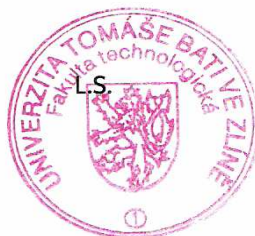
Ústav výrobního inženýrství

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

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

Ve Zlíně dne 29. ledna 2007


prof. Ing. Ignác Hoza, CSc.
děkan




doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály. Konkrétně vlivem laserového paprsku na strukturu a charakter teplotní pole v polymeru, které vzniká v materiálu při jeho vzájemné interakci. Hlavními částmi teoretické části práce je popis: charakteristik zadaných typů polymerů, principu funkce laseru, vlastností laserového paprsku, dělení laserů, jednotlivých typů laserů. Praktická část práce je zaměřena na určení výsledků laserového obrábění a simulaci teplotního pole vznikajícího při tomto obrábění. Simulace je prováděna pomocí softwaru COSMOS/M.

Klíčová slova: laser, polymerní materiály, teplotní pole, COSMOS/M

ABSTRACT

This diploma work is concerned with owing to concentrated energy of laser beam to various polymeric materials. By specific owing to laser beam to structure and character field of temperature in polymer, which is made in material during its own interaction. The theoretical part includes description: characterization of engaged type polymeric materials, principle function of laser, properties of laser beam, dividing of laser, single type of laser. The practical part is sight on outcome of laser machining and filed of temperature, which rising during the machining. The simulation is provided by the COSMOS/M software.

Keywords: laser, polymeric materials, field of temperature, COSMOS/M

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval všem, kteří se podíleli na vzniku této práce. V první řadě především děkuji své vedoucí paní Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D. za její odborné vedení, rady a pomoc při vypracování. Mé poděkování za rady, pomoc a předání zkušeností při tvorbě modelu teplotního pole v programu COSMOS/M patří také panu Doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. Dále děkuji firmě Mechanika Prostějov za možnost uskutečnění experimentálního obrábění na CO₂ laseru a také Mgr. Rýcovi za pomoc při provedení tohoto obrábění.

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

Ve Zlíně, 21. 05. 2007

.....

jméno diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PLASTY A JEJICH VLASTNOSTI	12
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	12
1.2 CHARAKTERISTIKY ZADANÝCH POLYMERŮ	13
1.2.1 PMMA (Polymethylmethakrylát).....	13
1.2.2 Standardní PS (Polystyren)	15
1.2.3 POM (Polyoxymethylen).....	16
1.2.4 Polymery ABS (kombinace monomerů akrylonitryl-butadien-styrenu).....	17
1.2.5 PA 6 (Polyamid 6).....	18
1.2.6 PA 66 (Polyamid 66).....	20
1.2.7 PC (Polykarbonát)	21
1.2.8 PTFE (Polytetrafluorethylen)	22
1.2.9 PP (Polypropylen)	24
1.2.10 PVC (Polyvinylchlorid).....	26
2 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	32
2.1 ÚVOD A ZÁKLADNÍ INFORMACE O PROGRESIVNÍCH TECHNOLOGIÍCH	32
2.2 KLASIFIKACE PROGRESIVNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	34
3 LASER	37
3.1 HISTORIE LASERU	37
3.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP FUNKCE LASERU.....	39
3.3 LASEROVÝ PAPERSEK A JEHO VLASTNOSTI	42
3.4 KONSTRUKČNÍ SLOŽENÍ LASERU	47
3.5 VÝKON A ÚČINNOST LASERU	48
3.5.1 Výkon laseru.....	48
3.5.2 Účinnost laseru.....	49
3.6 DĚLENÍ ZÁKLADNÍCH DRUHŮ LASERŮ	49
3.6.1 Dělení laserů podle aktivního prostředí	50
3.6.2 Dělení laserů podle vlnové délky generovaného laserového paprsku.....	52
3.6.3 Dělení laserů podle způsobu čerpání energie	52
3.6.4 Dělení laserů podle režimu paprsku	52
3.6.5 Dělení laserů podle dosahovaného výkonu	54
3.6.6 Dělení laserů podle konstrukce zařízení.....	54
3.6.7 Dělení laserů podle jejich použití.....	55
3.7 PEVNOLÁTKOVÉ LASERY	57
3.7.1 Rubínový laser.....	57
3.7.2 Nd-YAG laser	58
3.7.3 Nd-sklo laser	58
3.7.4 Nd-LF laser.....	59
3.7.5 Alexandritový laser	59

3.7.6	Ho/CTH-YAG laser	59
3.7.7	Er-YAG laser.....	59
3.8	PLYNOVÉ LASERY	59
3.8.1	He-Ne laser.....	60
3.8.2	CO ₂ laser	61
3.8.3	Dusíkový laser.....	61
3.8.4	Excimerové lasery	62
3.8.5	Argonový laser	62
3.8.6	Vodíkový laser	62
3.8.7	Měděný laser	63
3.8.8	Jodový laser.....	63
3.8.9	Helium-kadmiový laser	63
3.8.10	CO laser.....	64
3.9	KAPALINOVÉ LASERY	64
3.10	POLOVODIČOVÉ LASERY	65
3.11	PLAZMATICKÉ LASERY	66
3.12	CHEMICKÉ LASERY	66
3.13	CO ₂ LASER	67
3.14	PŘEHLED OBECNÉHO POUŽITÍ LASERŮ	73
3.15	POUŽITÍ LASEROVÉHO PAPRSKU PRO OPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ.....	75
4	VLIV KONCENTROVANÉ ENERGIE LASEROVÉHO PAPRSKU NA POLYMERNÍ MATERIÁLY	77
4.1	SDÍLENÍ TEPLA.....	77
4.1.1	Úvod ke sdílení tepla.....	77
4.1.2	Teplotní pole	78
4.1.3	Gradient teploty.....	78
4.1.4	Určení směru gradientu teploty	80
4.1.5	Napětí teplotního pole	81
4.1.6	Tepelný tok a hustota tepelného toku.....	81
4.1.7	Obecná rovnice sdílení tepla vedením	82
4.1.8	Obecná rovnice sdílení tepla vedením – výpočet průběhu teplotního pole.....	82
4.1.9	Podmínky úloh pro vedení tepla v tělesech.....	86
4.2	ENERGETICKÁ BILANCE PŘI LASEROVÉM OBRÁBĚNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	88
5	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	89
II	PRAKTICKÁ ČÁST	90
6	INTERAKCE (VZÁJEMNÉ PŮSOBENÍ) POLYMERNÍCH MATERIÁLU S LASEREM.....	91
6.1.1	Odrazivost	93
6.1.2	Absorpce (pohlcování) laserového záření polymery	93
6.1.3	Vlivy na odpařování materiálu	94

6.1.4	Vlastnosti polymerů ovlivňující intenzitu a druh účinku laserového paprsku	94
6.1.5	Hloubka proniknutí záření laseru do materiálu	94
6.2	STRUKTURNÍ ZMĚNY POLYMERŮ ZPŮSOBENÉ VLIVEM ENERGIE LASEROVÉ PAPERU.....	95
6.3	MECHANISMY PŘI ŘEZÁNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ LASEREM	95
7	MATERIÁLY	97
8	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PŘI EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE	98
8.1	CO ₂ LASER MERCURY L-30	98
8.2	KONEČNĚPRVKOVÝ SOFTWARE COSMOS/M	100
8.2.1	Metoda konečných prvků – MKP (The Finite Element Method – FEM)	101
8.3	OPTICKÉ MIKROSKOPY.....	102
9	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	103
9.1	OBRÁBĚNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ NA CO ₂ LASERU MERCURY L-30	103
10	MĚŘENÍ ROZMĚRŮ (HLOUBKY) OBROBENÝCH DRÁŽEK.....	105
10.1	NAMĚŘENÉ ROZMĚRY (HLOUBKY) OBROBENÝCH DRÁŽEK PRO JEDNOTLIVÉ TYPY MATERIÁLŮ	105
10.2	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ NAMĚŘENÝCH ROZMĚRŮ (HLOUBEK) OBROBENÝCH DRÁŽEK PRO JEDNOTLIVÉ TYPY MATERIÁLŮ	109
10.3	POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH ROZMĚRŮ (HLOUBEK) DRÁŽEK, VYTVOŘENÝCH PŘI STEJNÝCH PARAMETRECH OBRÁBĚNÍ PRO RŮZNÉ TYPY MATERIÁLŮ.....	114
10.4	ZHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH ROZMĚRŮ (HLOUBEK) OBROBENÝCH DRÁŽEK.....	119
10.5	VIZUÁLNÍ UKÁZKA OBROBENÝCH DRÁŽEK	120
10.6	VIZUÁLNÍ VYHODNOCENÍ OBROBENÝCH DRÁŽEK	127
10.6.1	PA 66 (Polyamid 66).....	127
10.6.2	PC (Polykarbonát)	127
10.6.3	PP (Polypropylen)	127
10.6.4	PTFE (Polytetrafluoretylen)	128
10.6.5	PVC (polyvinylchlorid).....	128
11	MODELOVÁNÍ (SIMULACE) TEPLOTNÍHO POLE.....	129
11.1	OBEČNÝ ÚVOD K MODELOVÁNÍ (SIMULACI) TEPLOTNÍHO POLE POMOCÍ VÝPOČETNÍ TECHNIKY	129
11.2	MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍHO POLE PŘI LASEROVÉM OBRÁBĚNÍ	131
11.3	SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE PŘI LASEROVÉM OBRÁBĚNÍ POMOCÍ SOFTWARE COSMOS/M.....	132
11.3.1	Možné metody pro simulaci teplotního pole.....	132
11.3.2	Úvahy, předpoklady a postupy při sestavování našich modelů.....	133
11.3.3	Postup při samotné tvorbě modelů v programu COSMOS/M	134

11.4	ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ TEPLOTNÍHO POLE (TEPLOTNÍCH ANALÝZ) PRO JEDNOTLIVÉ TYPY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	139
11.4.1	PVC (polyvinylchlorid)	140
11.4.2	PS (Polystyren)	142
11.4.3	PMMA (Polymethylmethakrylát)	145
11.4.4	PC (Polykarbonát)	147
11.4.5	PA 6 (Polyamid 6)	149
11.4.6	PA 66 (Polyamid 66)	151
11.4.7	ABS (akrylonitril-butadien-styren)	153
11.4.8	POM (Polyoxymethylen)	154
11.4.9	PP (Polypropylen)	155
11.4.10	PTFE (Polytetrafluorethylen)	156
11.4.11	Ocel s obsahem uhlíku okolo 0,2%	157
11.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TEPLOTNÍCH ANALÝZ	158
11.5.1	Fázové stavy polymerních materiálů	158
11.5.2	Procesy probíhající při zahřívání polymeru	159
11.5.3	Přechod taveniny zpět na tuhou fázi	160
11.5.4	Tepelná degradace polymerů	160
11.5.5	Průběh tepelné degradace u některých typů polymerů	161
11.6	SAMOTNÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDŮ TEPLOTNÍCH ANALÝZ	161
	ZÁVĚR	165
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	168
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	169
	SEZNAM OBRÁZKŮ	174
	SEZNAM TABULEK	178
	SEZNAM PŘÍLOH	1780

ÚVOD

Současné požadavky na kvalitu, životnost a přesnost výrobků vyžadují stále nové aplikace materiálů při výrobě. Zároveň tyto nově používané materiály kladou vysoké požadavky při jejich zpracování a jsme tak mnohdy nuceni při jejich obrábění aplikovat nekonvekční technologie obrábění, jelikož klasické metody obrábění často nesplňují zmíněné požadavky. Jako nekonvekční označujeme většinou technologie, u kterých nedochází k úběru materiálu v důsledku využití mechanické práce, ale využívají fyzikálních, chemických či kombinaci těchto dvou principů. Proto se stále častěji při výrobě setkáváme s technologiemi, které mnohdy ekonomičtěji za kratší čas dosahují mnohem lepších výsledků. Jednou z těchto technologií může být laser. Objev laseru bezesporu patří mezi nejdůležitější objevy minulého století, neboť v současnosti nachází uplatnění v široké škále oborů. Například našel uplatnění v: medicíně, holografii, mikroelektronice, astronomii, metrologii, výpočetní technice, měřicí technice, průmyslu atd. Nás bude zajímat zejména jeho průmyslové využití, konkrétně jeho schopnost obrábět téměř všechny druhy materiálů, kterými mohou být i materiály polymerní. V praktické části práce se tedy budeme zajímat laserovou obrobiteľností různých typů polymerních materiálů (PMMA, PS, POM, ABS, PA 6, PA 66, PC, PTFE, PP, PVC) a také simulací teplotního pole vznikajícího při tomto obrábění.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PLASTY A JEJICH VLASTNOSTI

1.1 Základní pojmy a rozdělení polymerů

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

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

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

- elastomery, tj. polymery, které rychle obnovují původní tvar a rozměry, které měli před deformací malým napětím (kaučuky); (1)
- plastomery (plasty), tj. polymery, které zůstávají deformovány, i když deformující napětí přestane působit (deformace je nevratná). (1)

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

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

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

- komoditní polymery, ty představují největší objem výroby i spotřeby, ale současně jsou ze všech polymerů nejlevnější. Do této skupiny patří v podstatě jen čtyři základní skupiny polymerů, totiž polytheny (zejména nízkohustotní polyethylen PE-LD, vysokohustotní polyethylen PE-HD a další typy polyethylenu), polypropylen, polystyren a polvinylchlorid.
- konstrukční polymery, ty jsou oproti komoditním zřetelně dražší, ale nabízejí mnohem lepší užitné vlastnosti a také zřetelně vyšší teplotní odolnost. Do této skupiny patří polyamidy, kopolymery ABS a různé kompozity a směsi.
- speciální polymery, ty nabízejí unikátní užitné vlastnosti, ale jsou velmi drahé. Sem patří polysulfony, polyamidy, kapalně krystalické polymery a materiály pro lékařské aplikace.

1.2 Charakteristiky zadaných polymerů

1.2.1 PMMA (Polymethylmethakrylát)

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

Výroba:

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

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

Poté následuje dokončovací polymerace:

- a) diskontinuální - do forem - ve skleněných deskách se stlačitelnou distancí. Mezi desky se nalije předpolymer, vloží se do horkého tunelu o teplotě 40 - 130 °C na dobu 4 - 9 h podle tloušťky stěny.
- b) kontinuální - mezi ocelovými pásy s flexibilním utěsněním okrajů – nevýhodou je horší kvalita povrchu, která je závislá na úpravě ocelových pásů. (1)

Bloková polymerace se používá především pro výrobu bloků a desek, případně polotovárů jiných tvarů. Použijeme-li rotační formy, lze tímto postupem vyrábět také trubky. Bloková polymerace umožňuje dosáhnout vysokých hodnot polymeračního stupně. Tím se zlepšují mechanické vlastnosti desek.

- Suspenzní polymerace: se používá převážně pro výrobu termoplastických materiálu zpracovávaných vytlačováním a vstřikováním. (1)

Polymerace probíhá v polymeračních kotlích opatřených vhodnými míchadly, přívody pro suroviny a pláštěm, který umožňuje temperování kotle. Polymerace probíhá při teplotě mezi 80 - 130 °C . Po ochlazení se granule promývají a suší. (4)

- Emulzní polymerace: Produkty slouží jako nátěrové hmoty. Polymerace se v hlavních rysech podobá suspenzní, jen udržování rovnoměrné teploty je třeba věnovat větší pozornost a používané teploty bývají nižší. (4)

Vlastnosti PMMA:

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

Do 80 °C, dobře se mechanicky obrábí, je rozpustný v aromatických uhlovodících, esterech, ketonech a éterech. Odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. PMMA vyniká především vysokou tuhostí. Jeho modul pružnosti v tahu leží mezi 2300 až 3300 MPa. (4)

Zpracování:

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

Použití:

Blokový typ se používá k výrobě desek, trubek, tyčí, profilů, částí svítidel, vstřikovaných výrobků domácí spotřeby, krytů kabin letadel, v zubní technice – protetika, kancelářských potřeb, hodinkových sklíček. Ze suspenzního typu se vyrábí plnicí pera, tužky, knof-

líky, tlačítka, ochranné kryty apod. Emulzního typu se užívá k výrobě latexových nátěrových barev.

1.2.2 Standardní PS (Polystyren)

Monomerem je styren (vinylbenzén), což je intenzivně charakteristicky páchnoucí kapalina, silně lámající světlo.

Výroba:

Styren polymeruje snadno všemi polymeračními mechanismy. Prakticky se v praxi ale uplatňuje výhradně radikálový mechanismus. Nejdůležitější výrobní technologií je bloková a suspenzní polymerace. (1)

- Bloková polymerace: Provádí se ve vertikálních nebo horizontálních reaktorech s pístovým tokem materiálu nebo v reaktorech s promíchávaným obsahem. Monomer se mísí s 5 až 10% ethylbenzenu a je přes ohřívák veden do reaktoru. Polymerace je iniciována termicky. Vysoce vzniklý roztok vzniklého polymeru je veden do filmové odparky, kde se za sníženého tlaku destiluje nezreagovaný styren a ethylbenzen. Roztavený polystyrén je dále veden do granulačního zařízení. (1)

Takto vzniklý PS je velmi čistý a používá se pro elektrotechnické účely.

- Suspenzní polymerace: Probíhá v míchané násadě. Její složení je monomer styren, demineralizovaná voda a plastifikátory. Přidá se stabilizátor suspenze, modřidlo a směs iniciátorů při teplotě 90 °C po dobu 6 - 7 hodin, nebo 125 °C po dobu 2 hodin. Po ochlazení na 60 °C se reakční směs přetlačí přes koš do neutralizátoru, odstředí se a po promývání vodou se polymer suší za teplot max. 50 °C.

Získaný polymer není tak kvalitní jako při blokové polymeraci, ale má lepší mechanické vlastnosti.

- Emulzní polymerace: Není tak často používaná a slouží jen pro výrobu latexů sloužících k výrobě nátěrových hmot.

Vlastnosti PS:

Je použitelný do +80 °C, stárne fotooxitačně (žloutne), rozpustný v aromatických uhlovodících, vyšších ketonech, tetrahydrofuranu, odolává vodě, alkoholům, olejům, zředěným anorganickým kyselinám, má sklon ke vzniku trhlin koroze za napětí - nevhodný pro me-

chanicky namáhané výrobky, zvláště ve styku s tenzory a rozpouštědly, je tvrdý a značně křehký. (1) Dále má vynikající elektrické vlastnosti, je netoxický, neomezeně barvitelný.

Zpracování:

Dá se v podstatě zpracovávat všemi známými technologiemi, avšak převážně vstřikováním při 180 - 240 °C, či vyfukováním. Dá se také dobře obrábět, a na povrchu lakovat a pokovovat.

Použití:

Využívá se pro výrobu spotřebních předmětů, obalů, hraček, potravinových misek, různých kelímků, podnosů, dále jako součásti osvětlovacích těles.(1) Dále pro výrobu fólií, desek, tvarově členitých výrobků a elektrotechnických součástí.

1.2.3 POM (Polyoxymethylen)

Je lineární, vysoce krystalický, monomerem je formaldehyd.

Výroba:

- Z formaldehydu (CH_2O), který se vede přes vymrazovač, kde při -15 °C dochází k částečné polymeraci, a zároveň dochází i ke stržení nečistot. Čistý monomer se vede do vysušeného heptanu v reaktoru, kde je ještě rozpuštěn aniontový katalyzátor. Polymeruje se v inertní atmosféře při 20 – 60 °C. Polymer je v použitém rozpouštědle nerozpustný a vypadáva z reakce ve formě bílého prášku. Polymeruje se do obsahu 10 – 20 % polymeru v suspenzi, neboť při vyšší koncentraci jsou obtíže s odvodem tepla. Pak se polymer oddělí odstředěním a po promývání heptanem a acetonem se suší ve vakuu při 80 °C. Stabilizuje se esterifikací acetanhydridem v reaktoru, v prostředí lakového benzínu. (1)

- Z trioxanu, tento výrobní postup nabývá v poslední době na významu, plynoucího z výhodných vlastností trioxanu, který je stálejší, lépe skladovatelný a snázeji se čistí ve srovnání s formaldehydem.

a) bloková polymerace: kationtový katalyzátor ve speciálních hnětačích při 70 - 90 °C.

b) roztoková polymerace v cyklohexanu při 30 °C. Stabilizace se zajišťuje kopolymerací s 2 – 4 % etylenoxidu. (1)

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

Vlastnosti:

Je lineární, vysoce krystalický, má nejvyšší odolnost vůči oděru (vedle PA), do 70 °C se nerozpouští v žádném rozpouštědle, nad 70 °C se rozpouští v chlorfenolech, ketonech a halogenuhlovodících, trpí korozí za napětí v organických rozpouštědlech, při $9 < \text{pH} < 4$ je povrch hydrolyticky naleptáván (1). Dále má dobrou odolnost proti vytváření skvrn (např. od káva, čaj.....), dlouhodobé působení ultrafialového záření způsobuje zkřídovatění povrchu a zkrěhnutí, je houževnatý s vysokým modulem a pevností v tahu i ohybu. Dobrá je i rozměrová stabilita.

Zpracování:

Dá se také zpracovávat všemi známými technologiemi, avšak převážně se zpracovává vstřikováním, vytlačováním, vyfukováním při 200 - 210 °C. Dá se i svařovat pomocí horké desky či horkého plynu. Při třískovém obrábění musí být posuv poměrně velký, aby nedocházelo k vydutí. Lze jej, také pokovovat, lakovat a potiskovat.

Použití:

Je to konstrukční plast užívaný na výrobu: ozubených kol, západky namáhané rázem, různá ložiska, tlakové nádoby, čerpadla, ventilů, vaček, součásti automobilů, trubek, kloubových čepů.

1.2.4 Polymery ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu)

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

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

Výroba:

Základem výroby je oddělená příprava elastomerního podílu, v němž převládá butadien, a jeho dokonalá dispergace v kopolymeru SAN. Podle způsobu dispergace se pak rozlišují postupy:

- Mísením, tj. dispergace mechanickým mísením butadien-akrylonitrilového kaučuku ze SAN.

- Roubováním, při němž se monomerní styren a akrylonitril nejprve do určitého stupně naroubují na předem připravený elastomer a pak se produkt smísí s dostatečným množstvím kopolymeru styren-akrylonitrilu. Tímto způsobem vzniká nejkvalitnější produkt. (1)

Vlastnosti:

ABS má heterogenní strukturu, odolný vůči chemikáliím a olejům, je tvrdý a lesklý, povrch je možné pokovovat, v esterech a ketonech rozpustný. Dále odolný vůči nárazům, oděru, praskání a trhání.

Zpracování:

Zpracovává se všemi běžnými technologiemi používanými u termoplastů: vstřikováním, válcováním, vytlačováním, vyfukováním a tvarováním. Lze jej lepit svařovat, povrchově upravit a také obrábět.

Použití:

Je to levný konstrukční termoplast používaný na přístrojové desky, vysavače, mixéry, pračky, ledničky, zavazadla, telefony, skřínky televizorů, čluny, obytné přívěsy, optické přístroje, kancelářské stroje potrubí aj.

1.2.5 PA 6 (Polyamid 6)

Výroba:

Vyrábí se hydrolytickou polymerací 6 – kaprolaktamu, která se provádí zpravidla kontinuálně (jen výjimečně diskontinuálně v autoklávech).

- Polymerace v autoklávech, laktan se nejprve v tavicím kotli roztaví a rozpustí v 5 až 10 % vody a přidá se k němu stabilizátor polymeračního stupně (obvykle bezvodá kyselina octová). Pak se laktamový roztok filtruje a napustí se do autoklávu, kde se za nepřístupu vzduchu vyhřeje na 250 až 260 °C, za tlaku 1,5 MPa. Tento tlak se udržuje 1 až 2 h, pak se z autoklávu odpustí vodní pára a následuje dopolymerování bez tlaku nebo za sníženého tlaku. Hotový polymer se vytlačuje z autoklávu přetlakem dusíku v podobě pásků, které se sekají na tzv. zrněný polyamid nebo drť. (1)

- Kontinuální beztlaková polymerace, probíhá ve svislých válcových vyhřívaných reaktorech, které mají míchadlo, šnek nebo překážky pro zajištění míchání, dávkovací zařízení, odplyňovač a dole zařízení pro vytlačování polymeru. Do horní části reaktoru se dávkuje

roztavený laktam, voda, kyselina octová a kyselina 6-aminokapronová. Voda se hned vypařuje a pára chrání polymer před oxidací. Kaprolaktam postupně klesá ke dnu a polymeruje. U dna reaktoru se odebírá ve formě pásků, které se chladí vodou a sekají na granulát (při výrobě vláken lze z trysek odtahovat vlákno). (1)

Vlastnosti:

Polyamid 6 je tvrdá, světle žlutá hmota rohovitého vzhledu tající při 215 až 220 °C na nízkoviskózní kapalinu. Nerozpouští se v běžných rozpouštědlech, ale rozpouští se ve fenolech, kyselině mravenčí a bezvodé kyselině octové. Má dobré mechanické vlastnosti, nízký koeficient tření, mimořádnou odolnost proti otěru, dobrou rázovou houževnatost, dobré elektroizolační vlastnosti, ovšem dosti značnou navlhavost. Neodolává anorganickým kyselinám a oxidačním činidlům.

Zpracování:

Lze jej zpracovávat technologiemi, u kterých není na závalu nízká viskozita, jako je vstřikování, odstředivé lití, ale také třískovým obráběním bloků vyrobených odléváním. Důležité je věnovat zvýšenou pozornost chlazení, protože při krystalizaci probíhá značné smrštění a může tak vnikat značné pnutí. Při vytlačování vznikají určité obtíže a válcováním jej nelze zpracovávat vůbec.

Ovšem zpracovává se především na vlákna, vytlačováním taveniny přes kruhovou trysku s daným počtem otvorů. Vytvořené vlákno se pak dluží a práním se zbavuje monomeru. Z kaprolaktamu se pak vyrábějí hedvábná vlákna, stříž, kordy pneumatik, kobercová vlákna, vlasce, síta.

Použití:

Polyamid 6 se používá především pro výrobu textilních vláken, vlasců, strun ale používá se i jako konstrukční plast pro výrobu ložisek, ozubených kol, cívek, vaček a ovládacích elementů.

1.2.6 PA 66 (Polyamid 66)

Je to polyamid z hexamethylendiaminu a kyseliny adipové.

Výroba:

Prvním stupněm výroby je vznik soli z diaminu a dikarboxylové kyseliny. Poté dalším zahříváním soli v inertní atmosféře nastává polykondenzace. Výroba je buď diskontinuální v autoklávech, nebo kontinuální. Smíšením obou monomerů v methanolickém roztoku se získá krystalická, tzv. nylonová sůl. Příprava soli, jako prvního stupně má výhodu v lepším dávkování, kontrole a možnosti čištění. Asi 60 %ní vodný roztok nylonové soli se za přídavku malého množství kyseliny octové (stabilizátor viskozity) a za pečlivého vyloučení vzdušného kyslíku vyhřeje v autoklávu na 220 až 230 °C a na této teplotě a tlaku kolem 1,7 MPa se udržuje asi 1 h. Vytvoří se oligomer rozpustný ve vodě a během dalších fází procesu se brání destilaci reakčních složek. Pak se periodicky odpouští pára a teplota se zvyšuje, směs se udržuje krátkou dobu pod sníženým tlakem, aby se odstranily poslední zbytky vody. Průběh procesu se kontroluje podle množství vydestilované vody. Po skončení polykondenzace se hotový produkt vytlačuje z autoklávu čistým dusíkem (nejčastěji ve formě pásky, která se po ochlazení seká a suší). (1)

Vlastnosti:

PA 66 má vlastnosti vesměs podobné jako PA 6, leze však u něj docílit vyšší pevnosti v tahu a nižší tažnosti, což má význam především při výrobě pneumatikových kordů. Oproti PA 6 má výhodu ve vysokém bodu tání, již zmiňované vyšší pevnosti a také o něco nižší navlhavosti. Další výhodou je, že neobsahuje volný polymer, tudíž odpadá jeho odstraňování.

Zpracování:

Zpracování PA 66 je téměř stejné jako u PA 6, které je uvedeno v předchozí kapitole.

Použití:

Je opět podobné jako u PA 6 a nejčastěji stejně jako PA 6 slouží v širokém rozsahu jako materiál pro výrobu vláken ale také fólií.

1.2.7 PC (Polykarbonát)

Polykarbonáty jsou podstatě polyestery kyseliny uhličitě a dvojsytných alkoholů (dianu, bisfenolu).

Výroba:

Nejčastěji se vyrábí fosgenací, kdy probíhá reakce dianu s fosgenem za přítomnosti látek, které vážou uvolňovaný chlorovodík (vodný roztok NaOH).

Do roztoku dianu ve vodném NaOH se za přítomnosti rozpouštědla při 20 až 30 °C za stálého míchání a chlazení přidává fosgen. Exotermickou reakcí na hranici fází vznikne oligomer, který se převede v polyester přidávkem katalyzátoru (urychlovač reakce). Vzniklý roztok polykarbonátu se odděluje od solného roztoku a promývá se vodou. Polyester lze izolovat (oddělit) odpařením rozpouštědla nebo srážením nerozpouštědlem (acetonem, methanolem). (1)

PC připravený srážením a sušením má malou sypnou hmotnost a obtížně se zpracovává. Konečným odpařením rozpouštědla ve vyhřívaných extrudérech nebo ve vakuu se dospěje k tavenině PC, která se vytlačuje a granuluje. (1)

Vlastnosti:

PC je bezbarvá a téměř průhledná hmota. Vyznačuje se některými vhodnými mechanickými vlastnostmi jako vysoká rázová houževnatost a to i za nízkých teplot. Dále dobrou rozměrovou stabilitou a to až do 140 °C, dobrými elektroizolačními vlastnostmi, vysokou mechanickou pevností (zvláště v tahu), nízkou absorpcí vody, odolností proti UV-záření a povětrnosti, stálostí proti oxidaci. Odolávají roztokům zředěných kyselin, uhlovodíkům a alkoholům. Špatná je jejich odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku či aminům. Rovněž dlouhodobé působení methanolu způsobuje degradaci.

Zpracování:

PC se dá zpracovávat téměř všemi zpracovatelskými technologiemi. Jeho granulát je však potřeba před zpracováním dobře vysušit, nejlépe za vakuu. (4)

Největší podíl polykarbonátů se zpracovává vstřikováním při teplotách okolo 300 °C. Formu, je třeba vyhřívat na teplotu okolo 100 °C. Dalšími často používanými způsoby zpracování je vytlačování a vakuové tvarování. Fólie a filmy se připravují litím z roztoku v rozpouštědle (methylenchloridu). Dají se také dobře třískově opracovávat, svařovat hor-

kým vzduchem a lepit roztokem PC v methylenchloridu. Polykarbonáty lze v tavenině mísit s termoplasty (legovat), tímto způsobem se např. vyrábějí kompaktní disky.

Použití:

Vstřikováním se vyrábějí hlavně technické dílce určené pro použití za vyššího mechanického a tepelného namáhání (ozubená kola, součásti různých přístrojů). Vytlačováním na šnekových strojích se zhotovují zejména trubky, tyče, profily a tlusté fólie. Velkou oblastí použití je elektrotechnický průmysl a to hlavně jako elektroizolační fólie vyráběné litím. Legovaný PC si našel uplatnění zejména v automobilovém průmyslu jako vnitřní součástky automobilů, dále v elektrotechnice a u kancelářských a počítačích strojů. Vakuovým tvarováním se vyrábějí nejrůznější technické výlisky.

1.2.8 PTFE (Polytetrafluorethylen)

Výchozím tetrafluorethylen je netoxický plyn, který je mimořádně reaktivní a velmi snadno polymeruje, zvláště za přítomnosti kyslíku. Proto se musí stabilizovat malým množstvím stabilizátorů a musí být také chráněn před stykem s kyslíkem.

Výroba:

Vyrábí se polymerací, která je technologicky náročná, vzhledem k značné polymerační rychlosti a vysokému polymeračnímu teplu se provádí výhradně ve vodné disperzi. Je-li odvod tepla nedostatečný může mít polymerace až explozivní průběh.

- Emulzní polymerace probíhá v nerezových nebo i vystříbřených autoklávech. Jako iniciátory slouží peroxodisírany za přídavku redukovadel ve slabě alkalickém prostředí. Pracovní teploty jsou zpravidla pod 20 °C, počáteční tlak je kolem 3 MPa. Polymeruje se až do vymizení tlaku. (1)

- Při suspenzní polymeraci se používají organické peroxidy a jako dispergační prostředek sodné soli perfluorkarboxylových kyselin. Teplota je 70 °C, tlak 4 až 10 MPa. Polymer se po odstředění, propírání vodou a po vysušení izoluje v práškové formě. (1)

Vlastnosti:

Symetrie řetězce způsobuje sklon ke krystalizaci polymeru. Krystalizace však není velkého rozsahu. PTFE je tvořen nerozvětveným uhlíkovým řetězcem. Je bílý až šedavý a v amorfním stavu je měkký. Přechází pomalu samovolně, zahřátím rychleji do tvrdšího

krystalického stavu a jeho pevnost v tahu vzrůstá. Při dlouhodobém zatížení dochází u něho k toku. Výlisky dobře odolávají střídavému napětí, hodí se tedy pro membrány. Tvrdost není vysoká, povrch se snadno poškrábe. Koeficient tření je velmi nízký, lze jej použít na samomazná ložiska. Lepivost je velmi špatná vzhledem k nepatrným adhezivním vlastnostem. Tepelné vlastnosti jsou neobvyklé. Reverzibilní přechod (něco jako bod tání) je při 327 °C (při této teplotě podstatě přechází z krystalického do amorfního stavu), pak se mění v gelovitou konzistenci, do viskózní taveniny se nedá převést. (4)

Také elektrické vlastnosti polymeru jsou vynikající a v určitém rozsahu teplot se nemění. Dále je PTFE nehořlavý, v plameni pouze žhne. Je to chemicky nejodolnější polymer a předčí téměř všechny kovy. Není totiž nepadán kyselinami, zásadami, oxidačními činidly a rozpouštědly, a to dokonce ani za zvýšených teplot. Teprve při teplotách nad 200 °C je napadán roztavenými alkalickými kovy nebo fluorem. Mrazuvzdornost je také vynikající, stejně jako odolnost vůči povětrnosti. Vlastnosti PTFE se značně dají ovlivnit plněním (např. skleněnými vlákny), změna vlastností poté závisí na druhu a množství plniva.

Zpracování:

Neobyčejná kombinace vlastností PTFE vede k těžkostem ve výrobním procesu. Jeho vysoký bod tání a ještě více jeho extrémně vysoká viskozita taveniny znemožňují zpracování běžnými technologiemi. (1)

PTFE se tedy zpracovává technologií odlišnou od zpracovávání ostatních plastů. Prášek polymeru se za studena lisuje ve formách tlakem až 40 MPa. Vylisované předlisky se pak nechají slinout v sušárnách při teplotě okolo 370 °C. Doba slinování je závislá na tloušťce předlisku. Následuje ochlazení výlisku, jehož rychlost ovlivňuje vlastnosti produktu.

Polymer lze zpracovávat též vytlačováním prášku nebo lépe past, které jsou vytvořeny polymerem a 20 až 25 % parafínu a esterů. Následuje odstranění mazadla teplem nebo extrakcí rozpouštědly a slinování při teplotě 350 až 370 °C. Tímto způsobem se vyrábějí profily a trubky. (1)

Fólie lze získat válcováním na nerezových kalandrech při 400 °C nebo odřezáváním z bloků a následujícím dlužením. Polymer lze svařovat pod tlakem při teplotě 370 °C. Adhezi polymeru, lze zlepšit mechanickým opracováním povrchu nebo jeho naleptáním.

Použití:

Nejpoužívanějším obchodním názvem je teflon. Je používán na různé ochranné povlaky, impregnaci žáruvzdorných tkanin. Značné uplatnění našel ve výrobě armatur a trubek pro silně korozivní nebo tepelně namáhaná prostředí. Slouží také k výrobě pístních kroužků, membrán, samomazných ložisek (z PTFE plněného grafitem) a k izolaci drátů a kabelů vystavené vysokým teplotám. Lze jej použít i jako antiadhezní vrstvu.

1.2.9 PP (Polypropylen)

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

Výroba:

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

Propylen je před polymerací zbaven vodíku, ethanu, ethylenu a propanu destilací na koloně, pak se vápnem odděluje CO a CO₂ a molekulovými sítí se odstraní přebytečná voda. Katalyzátorem polymerace je modifikovaný chlorid titanitý. Polymerace probíhá ve třech reaktorech. Rozpouštědlem je hexan, teplota při polymeraci je 50 až 70 °C, tlak 0,7 až 1 MPa. Regulátorem molekulové hmotnosti je vodík. Suspenze polymeru v hexanu se z reaktoru vede do uvolňovací věže, odkud nezreagovaný monomer a hexan odcházejí

k recyklaci. V uvolňovací věži se (rovněž hexanem) vypírá ataktický polypropylen (jehož podíl snižuje teplotu taní a zhoršuje mechanické vlastnosti a odolnost vůči rozpouštědlům). Suspenze polymeru se vede do dezaktivátoru, kde se zbytky katalyzátoru rozkládají methanolem za vzniku alkoholátů Ti, Al a chlorovodíku, který se neutralizuje roztokem NaOH. (1)

Následně se odděluje methanol a suspenze se na odstředivkách dále odděluje od hexanu a potom se polymer suší ve fluidní sušárně. Prášek se smíchá s přísadami (zejména s antioxidačními stabilizátory) a může se granulovat na extruderech. Zefektivnění původních technologií bylo umožněno pomocí vývoje nových katalyzátorů, kdy při jejich vysoké vytiženosti odpadá nutnost jejich odstraňování z výsledného produktu, což vede ke snížení investičních a provozních nákladů.

Vlastnosti:

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

Zpracování:

Před zpracování je potřeba polymer upravit přidáním vhodných tepelných a světelných stabilizátorů.

PP lze zpracovávat většinou zpracovatelských technologií a to vytlačováním na jednošnekových nebo lépe na dvoušnekových vlačovacích strojích, vstřikováním, lisováním, žárovým stříkáním, nanášením a samozřejmě také obráběním. Dá se orientovat dlužením, což se provádí hlavně u vláken a fólií. (4)

Vytlačováním se vyrábějí trubky, desky, fólie a profily při. Desky a bloky lze také lisovat z granulí. Desky a trubky se spojují svařováním polypropylenovým drátem (pistolí pro svařování horkým plynem). Fólie lze svařovat sálavým teplem nebo tepelným impulsem. (1)

Použití:

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

1.2.10 PVC (Polyvinylchlorid)

Polyvinylchlorid je jedním z nejdůležitějších termoplastů. Má řadu výhodných vlastností a relativně nízkou cenu. Žádný jiný polymer nemá tak široké možnosti použití (používá se k opláštěvání kabelů, pro výrobu potrubí, ubrusů, okenních rámců atd.) Jeho podíl na celkové výrobě plastů se v jednotlivých technicky vyspělých státech pohybuje až okolo 20 %. Monomerní vinylchlorid je plyn. Vinylchlorid polymeruje snadno za různých podmínek (radikálovým a aniontovým mechanismem). V průmyslu se využívá radikálového mechanismu a technik suspenzní, emulzní a blokové polymerace. (1)

Výroba:

- V současné době se nejčastěji pro přípravu PVC používá suspenzní technika. Která obvykle probíhá diskontinuálním způsobem v reaktorech z nerezové oceli, opatřených míchadly a potřebnými armaturami. V autoklávu se monomer rozptýlí ve vodě za intenzivního míchání a za přítomnosti ochranného koloidu (polyvinylalkoholu, celulosy, želatiny). Jako iniciátory se používají peroxidy rozpustné v monomeru (např. dibenzoylperoxid). Polymeruje se při konstantní teplotě a v inertní atmosféře. Průběh reakce lze sledovat podle hodnoty poklesu tlaku. Po poklesu tlaku na nulovou hodnotu se polymer odděluje od vody, promývá se a zbavuje se monomeru. Demonomerace se uskutečňuje při vyšších teplotách

a za sníženého tlaku pomocí páry. Demonomerační zařízení jsou buď diskontinuální, nebo také speciální kontinuálně pracující kolony.

- S postupným rozšiřováním suspenzní techniky, která poskytuje čistší a snáze zpracovatelný polymer, klesá význam a používání emulzní polymerace. Při které se vinylchlorid emulguje ve vodě obsahující emulgátor, iniciátor, popř. i stabilizátor emulze. Použitá voda musí být destilovaná nebo měkčená. Jako emulgátor V se používají alkylsulfonany, sulfochlorované alkany aj. Jako iniciátory slouží peroxid vodíku, peroxidisíran draselný. (1)

Polymerace probíhá buď diskontinuálně v horizontálních rotačních autoklávech, nebo (častěji) kontinuálně ve svislých tlakových reaktorech. Do válcových autoklávů opatřených míchadlem a chladicím pláštěm se kontinuálně přivádí roztok emulgátoru, iniciátoru a monomeru. Polymerující směs postupně prochází reaktorem. Na dně reaktoru se plynule odebírá latex obsahující určité procenta monomeru. Volného monomeru se latex zbavuje odplyněním ve zvláštních odplyňovačích, v nichž se nejprve mísí s vodní párou a pak se zbavuje tlaku. Největší potíže při odplyňování působí sklon latexu k pění. Po přidání stabilizátoru lze polymerní latex zpracovávat. (1)

Latex PVC se nejčastěji rozprašuje v horkém vzduchu v rozprašovacích sušárnách, přičemž se získává polymer v podobě bílého prášku. Vlastní latexové částice mají kulový tvar. Podle způsobu sušení se spojují v sekundární částice. Při sušení rozprašováním zůstává v produktu zadržen emulgátor, popř. i zbytky solí, získávají se proto produkty s nižší transparentí a také s horšími elektroizolačními vlastnostmi než při suspenzní polymeraci.

- Minimální obsah nečistot má polymer připravený blokovou polymerací. Tento postup je také investičně a provozně nejvýhodnější, ovšem zejména potíže ve zvládnutí odvodu tepla způsobily, že se tato technologie zavádí teprve v poslední době. (1)

Ve vertikálním autoklávu s rychlomíchadlem proběhne polymerace monomeru až do konverze asi 10 %. Vzniklá zrna polymeru následně určují velikost zrn a sypnou hmotnost konečného produktu. Stále ještě kapalná směs se převede do horizontálního stabilního autoklávu se spirálovými míchadly a přidá se druhý nízkoteplotní iniciační systém a za pomalého míchání se polymeruje až do konverze okolo 80 %. Polymerační teplo se odvádí stěnami reaktoru, chladicím pláštěm ale i kondenzací odpařeného vinylchloridu a jeho zpětným tokem do autoklávu. V poslední době byl postup inovován tím, že se druhý stupeň uskutečňuje ve speciálním vertikálním autoklávu se dvěma nezávisle poháněnými

míchadly, kde je snazší čištění ale také větší produktivita. Po polymeraci v bloku je zapotřebí navazující intenzivní odplynění, které se uskutečňuje přímo v autoklávu a slouží k odstranění zbytků monomeru. Odplynění se provádí zvýšením teploty při současné redukci tlaku. Demonomerovaný prášek polymeru se poté odvádí z autokávu a třídí se proséváním. Odpadá tak zde filtrace či sušení, nutné při suspenzní polymeraci. Blokovou polymerací se získává nejčistší PVC.

Vlastnosti:

Vyrobený PVC je bílý prášek. Je to termoplastický polymer lineárními slabě rozvětvenými řetězci. Při vyšších teplotách se rozkládá a před zpracováním se musí chránit stabilizátory. Je nerozpustný ve vodě, kyselinách, zásadách benzínu a olejích. Naopak rozpouští se v ketonech a chlorovaných uhlovodících. Je nehořlavý a botná v esterech na čem je založeno jeho změkčování. (4)

PVC se prakticky samotný nezpracovává, ale zpracovává se ve směsích poskytující tvrdý tip PVC, který téměř neobsahuje žádné změkčovadla, ale může obsahovat plniva, a měkký tip PVC se značným obsahem změkčovadel. Změkčovadla snižují pevnost v tahu a tvrdost, ale zvyšují ohebnost. Plniva působí opačným způsobem než změkčovadla, avšak mechanické vlastnosti se obecně zhoršují, tvrdost se naopak zvyšuje.

- Vlastnosti tvrdého PVC: Vynikající odolnost vůči vodě, kyselinám i organickým chemikáliím. Vysoká tvrdost a mechanická pevnost (ovšem závislá na teplotě), odolnost vůči oděru. Dále dobré elektroizolační vlastnosti, vysoký lesk a čirost a v neposlední řadě samozhášivost, danou obsahem chloru. Nezanedbatelná je i odolnost tvrdého PVC proti bakteriím a plísním.

- Vlastnosti měkkého PVC: Pomocí změkčovadel lze docílit elasticity způsobující kaučukovitý charakter hmoty. Mechanické vlastnosti se odvíjí od obsahu změkčovadel, u kterých je důležitá snášlivost s PVC. Má dobré elektroizolační vlastnosti, které jsou závislé na obsahu změkčovadel, která způsobují absorpci vlhkosti a zvyšují tak vodivost. Chemické vlastnosti jsou také ovlivněny obsahem a druhem změkčovadel ale vesměs jsou podobné jako u tvrdého typu.

Zpracování:

- Tvrdého PVC:

K sypkému zrnitému prášku PVC se přidávají stabilizátory, maziva, popř. barviva a vše se smísí v práškovém míšiči nebo přímo ve směšovacím extrudéru, ze kterého se homogenizované materiály vytlačují při teplotách mezi 150 až 200° C a granulují se. (1)

Tenké fólie z tvrdého PVC se vyrábějí válcováním, nejčastěji na vyhřátých čtyřválcích. Vyválcované fólie se pak ochladí na chladicích válcích. Desky se vyrábějí lisováním fólií tlakem v etážových lisech. Ochlazují se před vyjmutím z lisu. (1)

Tlusté Fólie a desky z tvrdého PVC se vyrábějí na vytlačovacích strojích s plochou štěrbínovou hlavou. Podobně se ve šnekových vytlačovacích strojích vytlačují trubky a profily. Technické dílce se vyrábějí přetlačováním do formy nebo vstřikováním na speciálně upravených vstřikovacích strojích. (1)

Polotovary z tvrdého PVC lze tvarovat a svařovat horkým vzduchem. Materiál lze také pilovat, vrtat a třískově obrábět. PVC se může také zvláknovat z roztoku vytlačováním tryskami do srážecího vodného roztoku a s následujícím dloužením.

- Měkčeného PVC:

Směs PVC se změkčovadly, stabilizátory, popř. s pigmenty se zpracovává na polotuhé až měkké výrobky válcováním, vytlačováním a přetlačováním. Přídavkem 30 až 70 hmotnostních dílů změkčovadla na 100 dílů PVC se zpracovatelnost zlepšuje. Směs se zahřívá na teplotu 160 až 180 °C, kdy dochází k želatinaci. Měkčené fólie se dobře svařují vysokofrekvenčně nebo se lepí lepidly na bázi chlorovaného PVC. (1)

Asi třetina vyrobeného PVC se zpracovává ve formě past. Pasty PVC jsou disperze prášku PVC nebo kopolymerů vinylchloridu ve změkčovadle. Pasta je tekutá až kašovitá, její viskozita je dána množstvím a druhem změkčovadla, množstvím přísad, pigmentů a pomocných látek. Pasta PVC používaná pro natírání textilních podkladových tkanin, máčení nebo lití. Pasty PVC se připravují mícháním jednotlivých složek např. v planetové míchačce a homogenizací směsi na chlazených třecích válcích. Získané pasty se pak odvzdušňují za sníženého tlaku, čímž se z nich odstraňují bublinky. (1)

Pasty se mohou nanášet na podklad, buď za studena, nebo za tepla, kdy je máčený předmět předeřhřátý. Závěrečnou fází namáčení je želatinace při teplotách okolo 170 °C.

Vyrábějí se tak např. ochranné rukavice, boty do deště (gumáky) a nanášením na tkaninu vznikají PVC koženky.

Pasty se zpracovávají také odléváním; tato metoda se používá zejména při výrobě hraček a míčů. Do rotujících forem se plní odvážené množství pasty. Rotací forem v želatinné sušárně se pasta rovnoměrně nanese na formu a ve styku s teplou stěnou želatinuje. Po ochlazení se výrobky z formy vyjmou. (1)

Použití:

- Tvrdého PVC:

Požítí je velmi široké, ale téměř polovina tvrdého PVC slouží k výrobě trubek a armatur na pitnou a odpadní vodu. Nemalá část PVC se užívá k výrobě profilů ve stavebnictví (okna) a také v nábytkářství. Ve stavebnictví ještě našel uplatnění jako fólie a desky k obkládání fasád. Duté výrobky (láhve na kosmetiku a čisticí prostředky) se rovněž vyrábí z tvrdého PVC.

- Měkčeného PVC:

Především slouží na výrobu obalových nebo ochranných fólií a desek (ubrusy, plenty) a izolace elektrických vodičů. Dále v nemalé míře na výrobu umělé kůže (PVC koženky), což jsou v podstatě nánosy PVC na textilní podložce (tapety, koženky na sedadla). Velké množství podlahovin pochází také z tohoto typu PVC. Zbylá část produkce měkčeného PVC je spotřebována na vstřikované výrobky, hračky, rukavice, těsnění, dopravní pásy, řemeny a spoustu dalších výrobků.

Lehčený PVC:

Lehčené hmoty na bázi PVC patří k nejstarším známým lehčeným plastům. Ke zpěnění dochází ve vysoce plastickém stavu účinkem chemických nadouvadec. Podle použitého tlaku lze připravit materiály s uzavřenými nebo otevřenými póry. Trubky a profily se vyrábějí vytlačováním, jiné výrobky vstřikováním. Profily z lehčeného tvrdého PVC, které lze opracovávat jako dřevo, se používají ve stavebnictví a v nábytkářství. Lehčený měkký PVC slouží pro těsnění, polštářování, obkládání aj. Běžné je i chemické napěňování past. (1)

Houževnatý PVC:

Pro mnohé oblasti použití, zvláště při nízkých teplotách, není dostačující rázová houževnatost tvrdého PVC, který je při teplotách pod 20 °C křehký. Rázovou houževnatost

PVC lze zvýšit přísadou modifikujících polymerů s dostatečně nízkou teplotou skelného přechodu. Vznikají tzv. slitiny (polyblends). Pro přípravu houževnatého PVC se používá přídavek polymeru ABS nebo kopolymerů methylnmethakrylát-butadien-styren. Tyto produkty jsou s PVC dobře mísitelné. Mísí se na válcích, v hnětičích nebo smíšením latexů. Tyto houževnaté typy PVC se používají k výrobě okenních ráků, okapových žlabů či trubek a k obkládání stěn budov. (1)

2 PROGRESIVNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

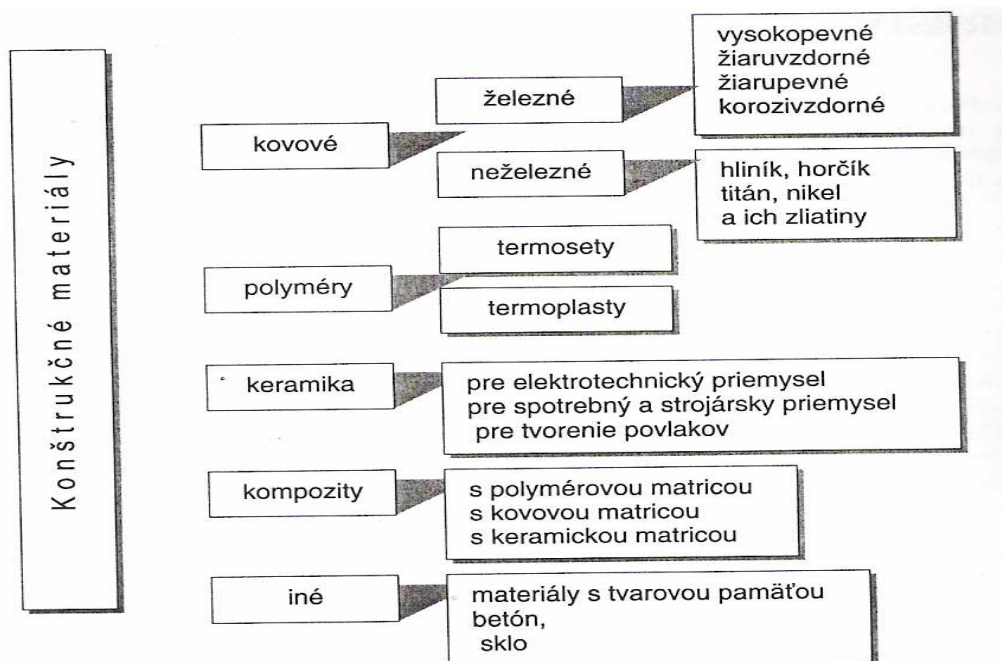
2.1 Úvod a základní informace o progresivních technologiích

Název progresivní technologie obrábění se používá pro velkou řadu mechanických, elektrických tepelných a chemických procesů používaných při úběru či odstraňování materiálu, které byly vyvinuté převážně až po roku 1940. (5)

Konkrétní definici progresivních technologií je těžké zavést a to zejména kvůli široce rozdílným procesům, které do této oblasti spadají.

Původně byly tyto technologie určené pro zvláštní použití, leteckém a kosmonautickém průmyslu v letech 1950 až 1960. Ovšem dnes většina z nich nachází široké uplatnění v různých průmyslových oblastech.

Velmi technicky náročné výrobky a vynálezy posledního století, na které jsou použity nové a také těžko obrobitelné materiály, představují určitý problém při jejich opracování. Na obr. 1 můžeme vidět základní rozdělení konstrukčních materiálů, jejichž obrobitelnost je obtížná a někdy až nemožná. Těžkosti vznikající při obrábění těchto materiálů vyplývají z jejich vysoké tvrdosti a křehkosti, nevhodných tepelných vlastností, chemických vlastností a nehomogenní struktury. Právě zde se projevují výhody progresivních technologií.



Obr. 1. Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění (5)

Vývoj progresivních technologií, které používají jiné zdroje energie, než je pouze energie mechanická, pomáhá při řešení problémů spojených s opotřebením nástrojů při obrábění. Vývoj těchto progresivních technologií z hlediska řešení problému opotřebením nástroje se ubírá následujícími směry:

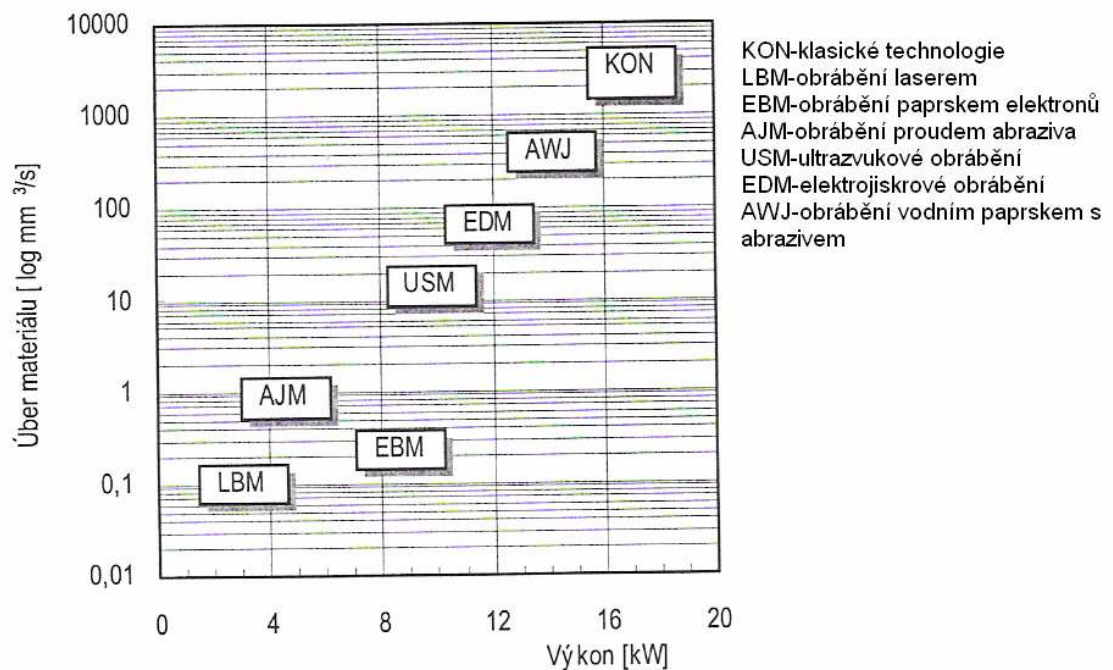
- využívání elektrické, chemické a tepelné energie na podporu klasických metod obrábění s nástrojem jako geometrickým tělesem, které snižují intenzitu jeho opotřebením
- využívání elektrické, chemické a tepelné energie v soustředěném energetickém svazku na opracování materiálů bez použití nástroje jako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

Kromě problematiky opotřebením nástrojů, progresivní technologie obrábění řeší v mnohých případech zvyšující se požadavky průmyslu na kvalitu výrobků, jejich tvarovou složitost, dokončování povrchů, ale i problém se zpracováním těžkoobrobitelných materiálů.

Výhody progresivních technologií ve srovnání s klasickými technologiemi obrábění:

- Úběr nezávisí na mechanických vlastnostech materiálu, jako jsou tvrdost, pevnost, houževnatost, pojem obrobitelnost materiálů typická pro obrábění řezáním a broušením ztrácí svůj klasický význam. (5)
- V místě oddělování částic materiálu nepůsobí řezná síla, nevzniká řezný odpor, obrobky se vlivem mechanického zatížení vyplývající z technologického procesu nedeformují. (5)
- Z místa úběru materiálu přechází méně tepla do hmoty obrobku, jelikož oddělování částic je mikrorozměrové a dochází k němu na velkém počtu míst a frekvence elementárních úběrů je vysoká. (5)
- Opracovává se celý povrch obrobku naráz. (5)
- Možnost mikroobrábění a dosahovat „nano“ 10^{-9} mm rozměrů. (5)
- Nevýhodou v porovnání s klasickými procesy vykazují vyšší spotřebu energie při úběru materiálu a nižší poměrný úběr.

Na obr. 2 můžeme vidět porovnání daných progresivních technologií z hlediska požadovaného výkonu potřebného na realizaci procesu a poměrného úběru materiálu a zároveň ukazuje energetickou náročnost jednotlivých procesů.



Obr. 2. Porovnání výkonových charakteristik a úberu materiálu daných technologií (5)

2.2 Klasifikace progresivních technologií

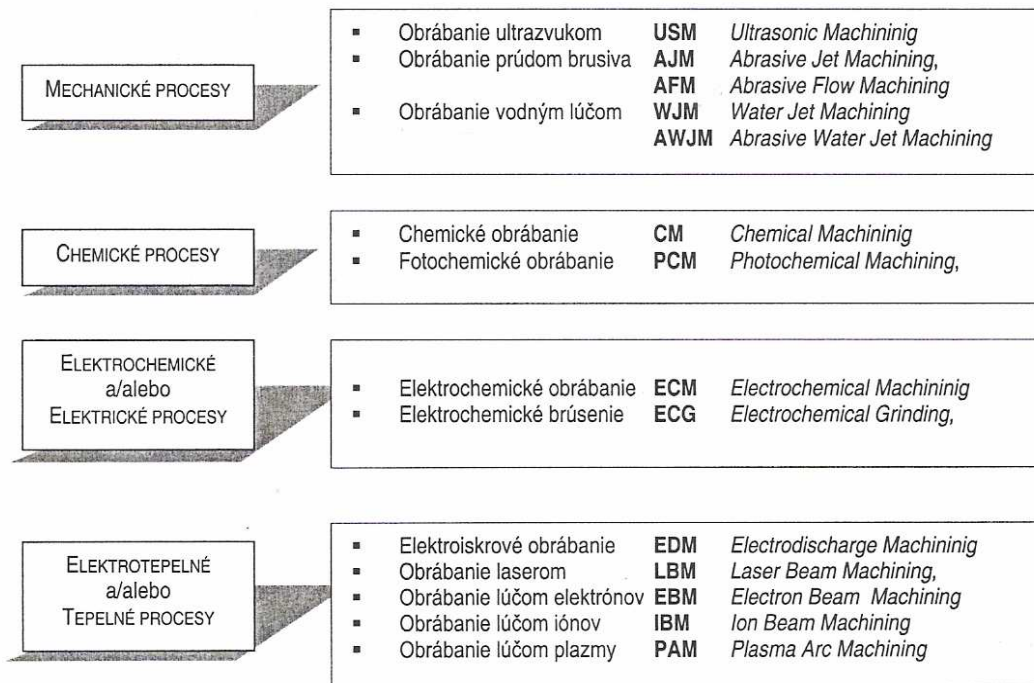
Klasifikaci těchto technologií je možné rozdělit z různých hledisek. Obvykle se ale dělí podle:

- hlavního energetického zdroje úberu,
- přítomnosti nástroje jako geometrického tělesa,
- převládajícího mechanismu úberu materiálu.

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

- mechanické procesy,
- chemické procesy,
- elektrické anebo elektrochemické procesy,
- tepelné anebo elektrotepelné procesy. (5)

Základní rozdělení progresivních technologií je znázorněno na obr. 3, který také zahrnuje anglické názvy technologií a jejich mezinárodně používané zkratky v souladu s normou ISO.



Obr. 3. Základní rozdělení progresivních technologií (5)

b) Dělení podle přítomnosti „nástroje“. Slovo nástroj je uvedené v přeneseném smyslu a to ze dvou důvodů:

- Při vysvětlování teorie úběru materiálu se o nástroji hovoří všeobecně jako o prostředku, který je příčinou úběru materiálu např. laserový nástroj, elektronový paprsek jako nástroj. Přičemž nástroj tu není tuhé geometrické těleso. (5)

- Nástroj, vnímaný jako tuhé geometrické těleso, které na rozdíl od klasického řezání není v přímém kontaktu s obráběným materiálem, ale v procese úběru materiálu podléhá více či méně intenzivnímu opotřebení. Slouží v tomto případě na zabezpečení geometrie vytvářeného tvaru dutiny, otvoru, drážky a na zabezpečení optimálního průběhu procesu. (5)

Nástroj jako podpůrné geometrické těleso se používá v následujících procesech:

- obrábění ultrazvukem (USM),
- elektrochemické obrábění (ECM),
- elektroiskrové obrábění (EDM). (5)

c) Dělení podle převládajícího mechanismu úběru materiálu rozlišujeme:

- procesy s převládajícím brusným účinkem: opracování ultrazvukem (USM), opracování proudem brusiva (AJM, AFM),
- procesy s erozivním účinkem jako obrábění vodním paprskem (WJM, AWJM)
- procesy chemického rozpouštění materiálu: zahrnují chemické frézování (CM), fotochemické obrábění (PCM), elektrochemické obrábění (ECM), elektrochemické broušení (ECG),
- procesy s převládajícím tepelným účinkem na úběr materiálu, označované také jako energopaprskové technologie a to elektrojiskrové obrábění (EDM), opracování laserem (LBM), obrábění paprskem plazmy (PAM), obrábění paprskem elektronů (EBM), obrábění iontovým paprskem (IBM). (5)

3 LASER

3.1 Historie laseru

Název laser je akronym tvořený počátečními písmeny z anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což by se dalo přeložit jako „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“.

Cesta, která vedla k sestrojení prvního přístroje, začala už před staletími. O světelný paprsek se zajímali už staří Řekové, ovšem znalosti o podstatě světla se až do 17. století nijak podstatně nezměnily. (2)

Teprve až v 17. století se podařilo Isaacu Newtonovi rozložit bílé světlo skleněným hranolem na spektrum barev a ukázal, že se bílé světlo skládá z mnoha barev. Newton si tehdy představoval, že světlo má korpuskulární (částicový) charakter. Se svou teorií dokázal vysvětlit všechny tehdy známé vlastnosti světla, jako je odraz, lom a další. (2)

Jeho současník Christian Huyghes však podstatu světla viděl ve vlnění, které se šíří prostorem stejnou rychlostí všemi směry z každého bodu na povrchu svítícího tělesa. Měl také pravdu. Spor rozhodl až v 19. století svými pokusy s ohybem a interferencí světla Thomas Young. Interference je záležitost čistě vlnová, je to vlastně interakce (vzájemné působení) dvou stejných světelných vln (stejnou frekvenci a amplitudu) v daném okamžiku a místě. Vlnové rozruchy se vzájemně sčítají. Setkají-li se ve fázi, je výsledkem zesílení, v proti fázi zase zeslabení. (2)

Co se vlastně vlní? Na tuto otázku odpověděl na přelomu padesátých a šedesátých let 19. století svými výpočty James Clerk Maxwell. Svou teorií překlenul propast mezi optickými a elektromagnetickými jevy. Z jeho teorie vyplynulo, že světlo není nic jiného než vlnění elektromagnetického pole. (2)

Se senzační hypotézou přišel v roce 1900 Max Planck. Prohlásil, že záření, světlo, je tvořeno malými částčkami energie – „kvanty“. Energie každého kvanta je úměrná kmitočtu záření. Tak byly položeny základy kvantové fyziky. Podle ní má světlo charakter vlnový a korpuskulární (částicový). (2)

Planckova kvanta energie byla později nazvána fotony. Fotony letí prostorem a při srážce s jinou částicí se chovají jako částice. Mezi sebou se však fotony interferují

jako vlny. Planckova hypotéza však nevysvětlovala principy vyzařování a pohlcování záření atomy. To se povedlo v letech 1912 – 1913 dánskému fyzikovi Nielsnu Bohrovi. Ten vypracoval planetární model vodíku, podle něhož obíhají elektrony kolem jádra po vymezených drahách podobně jako planety kolem slunce. Přeskočí-li elektron z jedné dráhy na druhou, může atom získat nebo ztratit energii v podobě elektromagnetického záření. Energie atomu se změní právě o vyzářené nebo pohlcené kvantum. (2)

Samotná historie laseru začíná v roce 1917, kdy Albert Einstein ukázal, že kromě jevů jako jsou spontánní emise a absorpce, musí existovat ještě stimulovaná emise. Následující krok směrem k vynálezu laseru udělal ruský fyzik V. A. Fabrikant, který v roce 1939 poukázal na možnost použití stimulované emise, k zesilování elektromagnetického záření procházejícího prostředím. Později v roce 1951, spolu s M. M. Vudynským a F. A. Butajevovou přihlásili patent na metodu zesilování elektromagnetického záření (ultrafialového, viditelného, infračerveného a pásma radiových vln) tím způsobem, že záření prochází prostředím, ve kterém je vytvořen nerovnovážený stav. Stav takového charakteru, že je preferováno obsazení horních energetických stavů atomů popř. jiných elementů prostředí. (3)

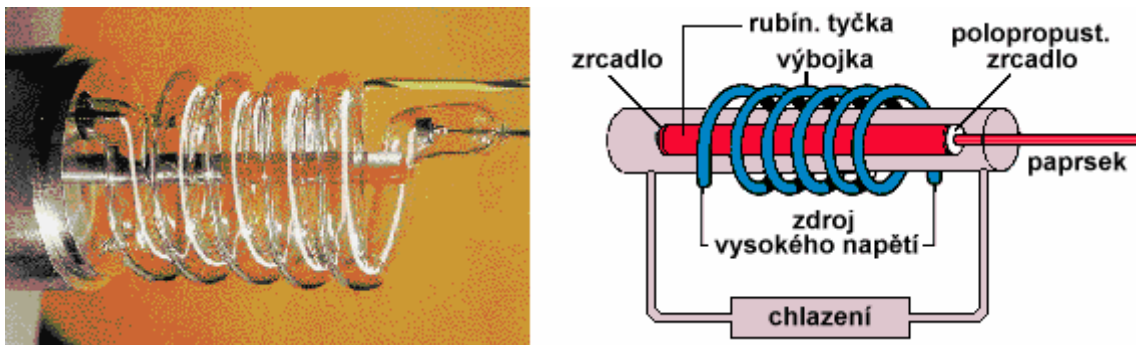
Poprvé byla tato idea realizována pro zesilování záření v mikrovlnné oblasti. V roce 1952 moskevští fyzikové N. G. Basov a A. M. Prochorov na konferenci o radiospektroskopii referovali o molekulárním svazkovém generátoru – MASERU pracujícím se svazkem molekulárního čpavku. Prakticky současně byla vyjádřena myšlenka použití stimulované emise k zesílení a generaci milimetrových vln americkým fyzikem Ch. H. Townesem. V roce 1954 byl sestaven první molekulární generátor. Realizace maseru dala vznik novému vědnímu oboru – kvantové elektronice. Basov, Prochorov a Townes dostali společně za vynález maseru Nobelovu cenu v roce 1964. (6)

Mezi realizací prvního maseru a prvního laseru uplynulo šest let. V roce 1955 Basov a Prochorov navrhli optické buzení a prostředek pro dosažení populační inverze. V roce 1957 pak Basov uvažoval o využití polovodičových materiálů pro kvantové oscilátory a realizoval optický rezonátor leštěnými planparalelními stěnami na polovodičovém čipu. V téže roce Fabrikant a Butajevová pozorovali zesílení optického záření v experimentu s elektrickým výbojem procházejícím směsí par rtuti, vodíku a helia. V roce 1958 Prochorov, Schawlow a Townes vyslovili nezávisle na sobě ideu, že jev stimulované emise, užitý v maseru, může být použit i v infračervené a optické oblasti spektra. R. H. Dicke

(Princeton University) navrhl použití otevřeného rezonátoru pro realizaci kladné zpětné vazby v optické oblasti. V roce 1960 Theodore Maiman publikoval článek o generaci záření ve viditelné oblasti světla v rubínové tyči. Byl vynalezen rubínový laser. V témže roce (1960) A. Javan, W. R. Bennett a D. R. Herriott demonstrovali laserová akci ve směsi plynů helia a neonu. Od roku 1961 začal bouřlivý vývoj různých typů laserů zároveň s vývojem laserové technologie. (7)

Pevnolátkový laser na bázi neodým (Nd)-sklo použil poprvé Snitzer také v roce 1961. Polovodičový laser byl objeven v roce 1962. V roce 1964 C. H. Patel experimentoval s plynovým CO₂ laserem, který našel v současnosti nejširší uplatnění v průmyslové výrobě. První zmínky o kapalinovém laseru jsou z roku 1966. (5)

První praktické využití laseru bylo v roce 1966 pro vrtání otvorů do diamantových kalibrů pomocí rubínového laseru.



Obr. 4. Obrázek a schéma prvního (rubínového) laseru zkonstruovaného T. H. Maimanem (8)

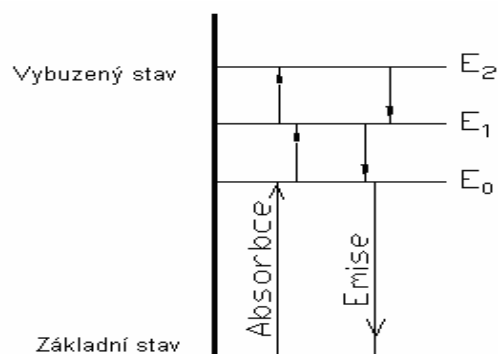
3.2 Fyzikální princip funkce laseru

Princip funkce laseru lze objasnit na základě pojmů kvantové fyziky. Vycházíme přitom ze zjednodušeného planetárního modelu atomu. Kolem kladně nabitého jádra (protonu) krouží po uzavřených drahách elektrony, které podléhají přitažlivým elektrostatickým silám. Přitom každé dráze přísluší přesně určené množství energie, zvané energetická hladina. Vzdálenější dráze elektronu přísluší větší množství energie, což je způsobeno nutností vykonat větší práci na překonání přitažlivé síly protonu. Čím je tato 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

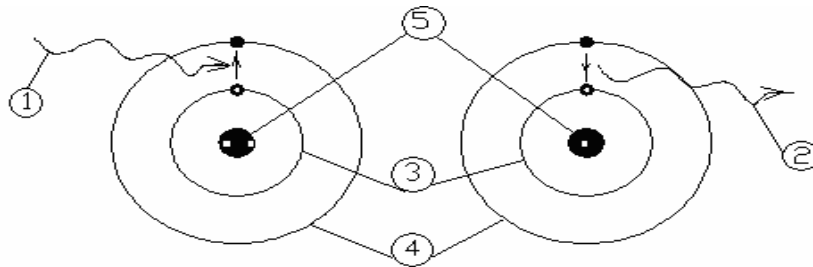
probíhat plynule, nýbrž po skocích odpovídajících drahám, na kterých se může elektron nacházet. Hmotné prostředí může záření buď pohlcovat (absorbovat), anebo také vysílat (emitovat).

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

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



Obr. 5. Skokové změny hodnot energie mezi hladinami

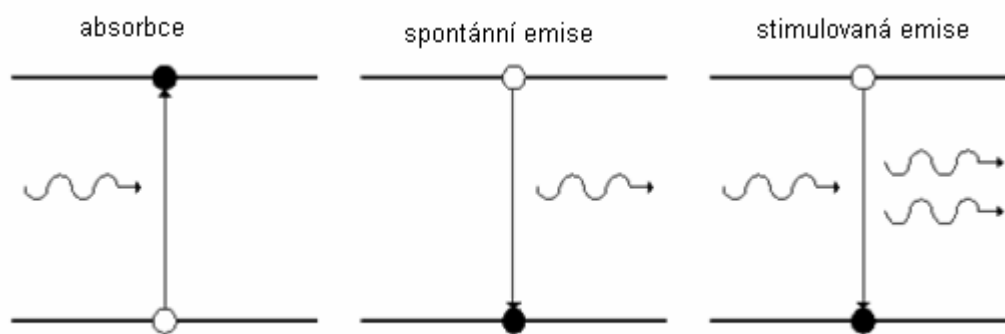


Obr. 6. Model atomu (absorpce, emitace)

Popis obr. 6:

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

Emise může být buď samovolná (spontánní), nebo vynucená (indukovaná či stimulovaná). Jak již bylo řečeno dříve, atom má určitou energii (je na určité energetické hladině) a částice přitom mění své energetické stavy (nabytím energie přecházejí do stavů vyšší energetické hladiny a naopak) a můžou v nich různě dlouho setrávat. U spontánní emise dříve nebo později atom vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum, ovšem učiní tak sám od sebe, spontánně a proto hovoříme o spontánní emisi záření. U vynucené emise dopadá na atom kvantum elektromagnetického záření. Zastihne-li ho na spodní energetické hladině, může být atomem pohlceno a atom přeskočí na horní energetickou hladinu, hovoříme tak o již zmiňované absorpci. Setká-li se naopak záření s atomem na horní energetické hladině, může ho donutit vyzářit další kvantum energie (elektromagnetického záření) a přejít na spodní hladinu, hovoříme o indukované emisi, tedy o fyzikálním jevu, na kterém je založena činnost laserů.



Obr. 7. Absorpce, spontánní a stimulovaná emise

Laserové světlo tedy vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vnitřní energie záření. (5) Při spontánní (samovolné) emisi, která jak už bylo řečeno, vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí f , která se určí z rovnice (2):

$$E = h \cdot f = E_2 - E_1 \quad (2)$$

kde:

h – Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s)

$E_2 - E_1$ – rozdíl energií hladin, mezi kterými nastal přechod.

Vlivem vnějšího podmětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jako měl předcházející kvant. (5) Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření, která zde už také byla popsána dříve.

V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové anebo viditelné světelné záření. (5)

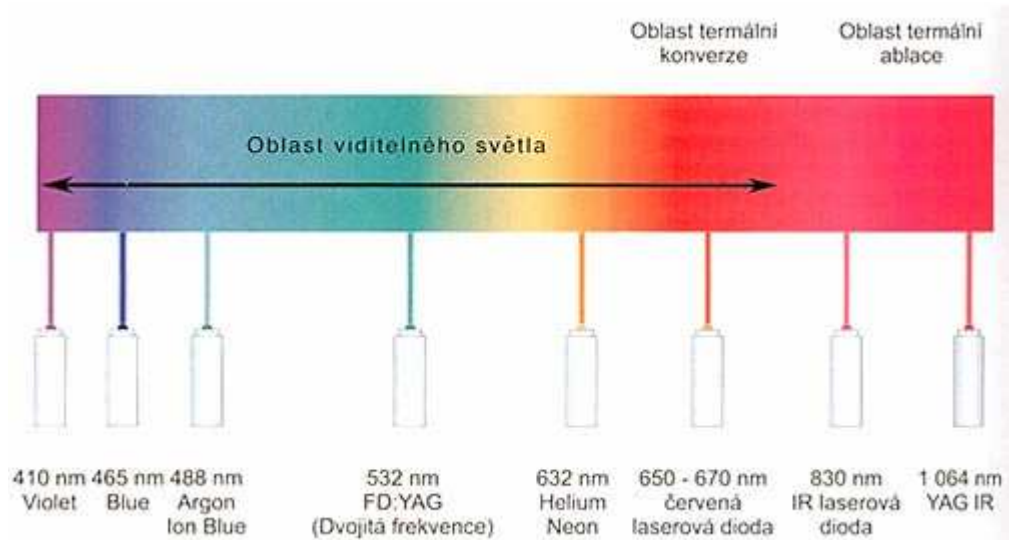
3.3 Laserový paprsek a jeho vlastnosti

Fyzikální princip vzniku laserového paprsku byl již popsán v předešlé kapitole (3.2). Bylo již uvedeno, že laser využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má tyto základní vlastnosti:

- je vysoce monochromatické (jednobarevné) – světlo laserového paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku.

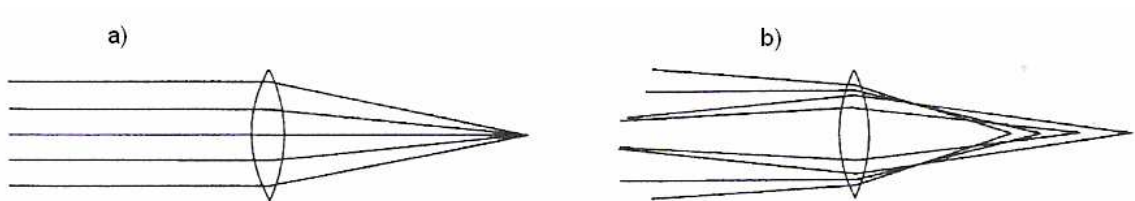
Vlnová délka (udávaná v nanometrech) určuje, v jaké části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Jak víme, vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. Podle vlnové délky se také dělí lasery na termální (IR), u kterých je vlnová délka vyšší než 630 nm, lasery pracující ve viditelném světle (380 – 630 nm) a lasery pracující v UV oblasti (pod 380 nm). (9)

Laserovým paprskem v současnosti s nejnižší vlnovou délkou v oblasti viditelného spektra je fialový laser (violet, 395 - 410 nm). Jde o laserovou diodu s velmi nízkou energetickou náročností (asi 5 mW). Druhou laserovou diodou s velmi nízkou vlnovou délkou a podobnou energetickou náročností je modrý laser (blue, 465 nm). Oba tyto druhy jsou žhavými favority v oblasti viditelného spektra. Nejnižší vlnovou délku mezi plynovými lasery má argonový laser (Argon Ion Blue 488 nm). Jedním z nejběžněji používaných laserů je krystalový Nd:YAG laser se zdvojenou frekvencí o vlnové délce 532 nm s energetickou náročností okolo 100 mW. Dalším používaným laserem je plynový, Helium Neon laser o vlnové délce 632 nm. Na vlnové délce 650 nm začíná skupina červených laserových diod, emitujících na vlnových délkách 650, 670, 680 nebo 780 nm. Následují výkonné laserové diody s vlnovou délkou 830 a 870 nm a Nd:YAG IR lasery s vlnovou délkou 1 064 nm. (9)



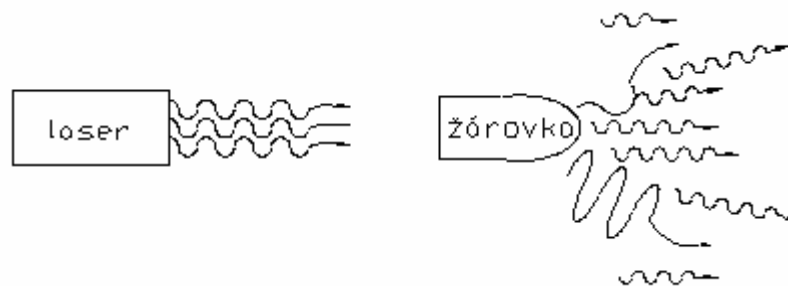
Obr. 8. Vlnové délky pro různé typy laserů (9)

Díky tomu, že laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, lze ho soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku. Na obr. 9 vidíme srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalerního světla (b), kde ohnisková vzdálenost závisí na úhlu dopadu částic paprsku.



Obr. 9. Srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalerního světla (b)

- má vysoký stupeň prostorové a časové koherence (uspořádanosti) - záření je prostoro-
ově koherentní (všechny částice světelné vlny kmitají se stejnou fází v rovině kol-
mé na směr šíření paprsku), záření je časově koherentní (všechny částice světelné
vlny kmitají se stejnou fází ve směru šíření paprsku).
- má minimální divergenci (rozbíhavost) - záření se v prostoru nešíří všemi směry,
ale v úzkém svazku (viz. obr 10) a fokusací na malou plochu (viz. obr 9a) lze do-
sáhnout extrémně vysoké hustoty výkonu (až 10^{14} Wcm^{-2}).



Obr. 10. Srovnání světla vyzařovaného laserem se světlem žárovky (3)

- má vysokou výstupní intenzitu I [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], která není nijak limitována zákony záření absolutně černého tělesa a platí pro ni vztah:

$$I = I_0 \cdot \exp\left(-2r^2 / r_0^2\right) \quad (3)$$

kde I_0 je intenzita záření ve středu paprsku, r_0 je poloměr, ve kterém je intenzita redukovana ze střední hodnoty faktorem e^2 .

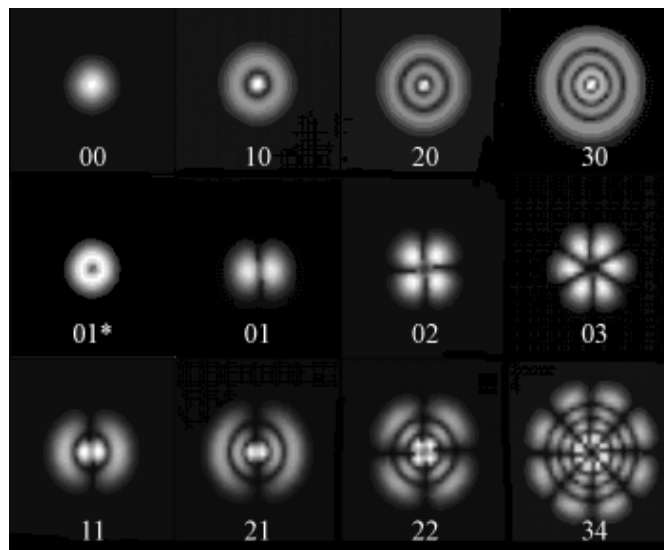
- má módovou strukturu (TEM – „transverse electromagnetic mode“) - tvar průřezu svazku záření je významně závislý nejen na vlnové délce fotonů, ale také na souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadel a na průměru laserové trubice (u CO_2 laserů výbojové trubice).

V příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu – základní mód nebo složitější obrazce pravoúhle nebo kruhově symetrické. Je to dané tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci – mód, v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Největší hustoty 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. (5)

průřez A v rovině kolmé na směr paprsko	průřez B kolmý na A	půdorys	označení TEM (použití)
			TEM00 řezání
			TEM01 svařování, kalení
			TEM21
			TEM32
			multimód (řezání)
			multimód (nehodné pro řezání)

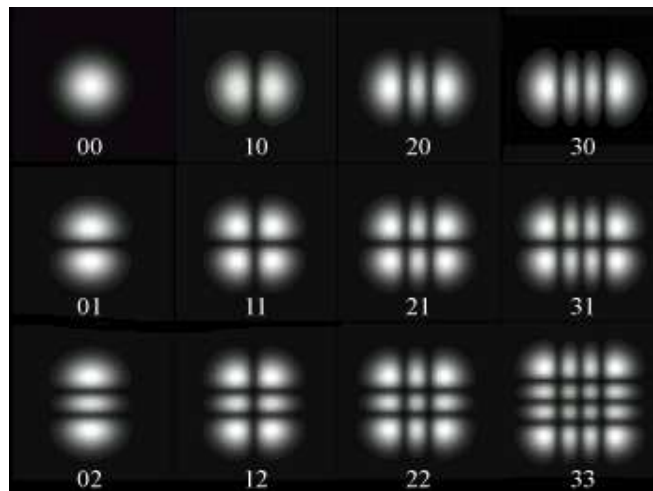
Obr. 11. Vybrané módy s jejich označením a vhodností použití

Na obr. 12 jsou příklady osově symetrických módů (válcovité módy) zachycených CCD kamerou. V symbolech $TEM_{m,n}$ vyjadřují indexy m, n počty minim intenzity ve směrech dvou na sebe kolmých os.



Obr. 12. Příklady osově symetrických módů - válcovité módy (12)

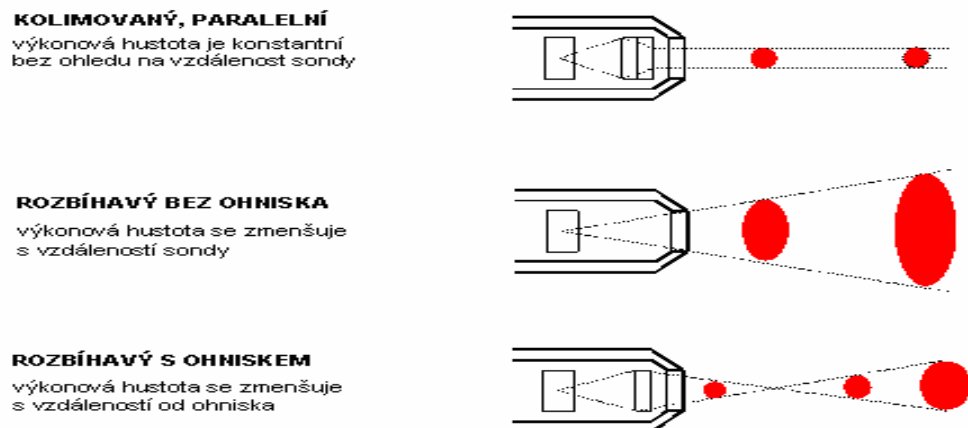
Na obr. 13 jsou příklady středově symetrických módů (obdélníkových módů) zachycených CCD kamerou.



Obr. 13. Příklady středově symetrických módů - obdélníkových módů (12)

Jak již bylo řečeno dříve, laserový paprsek díky jeho vlastnostem umožňuje jeho fokusaci (pomocí vhodné optické soustavy) do malého bodu s mimořádně vysokou hustotou energie v místě dopadu paprsku což má za následek natavení až odpaření materiálu, čímž se dosahuje výsledného efektu obrábění. Průměr nefokusovaného paprsku bývá řádově až několik milimetrů, takový paprsek není vhodný pro aplikace, kde je potřeba malá tepelně ovlivněná oblast jako třeba u řezání a svařování, proto je nutné laserový paprsek soustředit do úzkého svazku. Například fokusovaný paprsek pro řezání CO₂ laserem s výkonem do 1kW má průměr okolo 0,3 mm a dosahuje energie až $1,4 \cdot 10^{10} \text{ Wcm}^{-2}$.

Na obr. 14 můžeme vidět různé tvary paprsku laseru, které jsou určeny tvarem zrcadel rezonátoru, případně optickou soustavou na výstupu laseru.



Obr. 14. Tvary paprsku laseru (3)

3.4 Konstrukční složení laseru

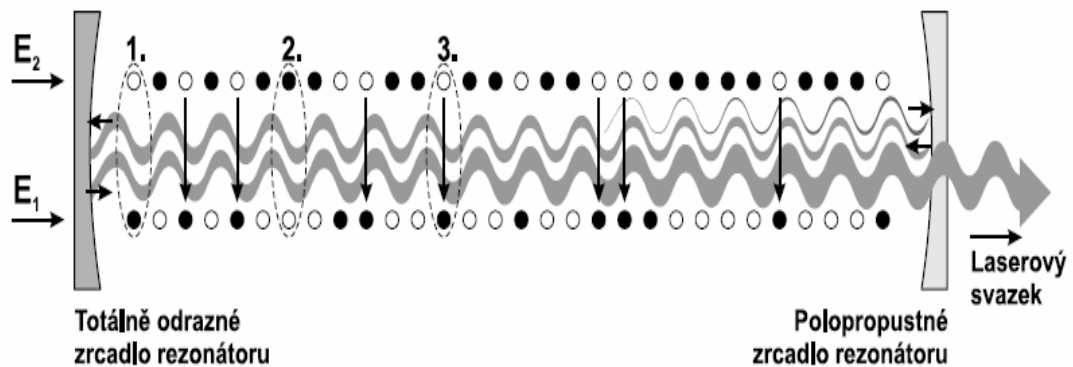
Každá struktura laseru (obr. 16) se skládá ze tří hlavních částí: z aktivního prostředí (aktivní látka), z budícího zdroje (čerpání) a z rezonančního systému.

- Vhodným čerpáním aktivní látky se docílí jevu zvaného inverze populace: Situace, při které je na vybuzené hladině více elektronů než na hladině základní. Inverze populace je uvnitř aktivního prostředí nutnou podmínkou pro to, aby docházelo k zesilování světla. Čerpání je tedy způsob, jakým je do aktivního prostředí dodávána excitační energie, přičemž excitace je děj, při kterém přechází kvantová soustava ze stavu s nižší energií do stavu s vyšší energií. K tomu, aby tento děj nastal, musí kvantová soustava přijmout zcela přesné množství tzv. excitační energie charakteristické pro daný přechod, odpovídající rozdílu energie kvantové soustavy před a po excitaci. Excitace (vzbuzení) kvantové soustavy lze dosáhnout různými prostředky. Způsob buzení závisí na použitém aktivním prostředí. Čerpání (buzení) může být optické (výbojka nebo dioda), elektrické (výboj nebo proud), chemické (chemické reakce vytvářející vhodné molekuly nebo ionty), čerpání jadernými reakcemi, expanzí plynu atd. Např. pro krystalový laser se jako zdroj buzení užívá výboje, pro plynný laser je zdrojem buzení vysokofrekvenční generátor, který ionizuje plynné prostředí. Zdroje buzení mohou pracovat buď kontinuálně, nebo pulzně.

- Aktivní prostředí je látka, ve které se elektrony nebo molekuly dají vhodným čerpáním (přívodem excitační energie) vybudit na požadovanou pracovní hladinu, ze které pak mohou emitovat záření. Aktivní prostředí je jedna z nejdůležitějších částí laseru, jelikož v něm vzniká stimulovaná emise. Pracovní látkou v aktivním prostředí může být plyn (He:Ne laser, oxid uhličitý), kapalina (Rhodamin-barvivo), krystal (rubín), polovodič, molekuly nebo plazma.

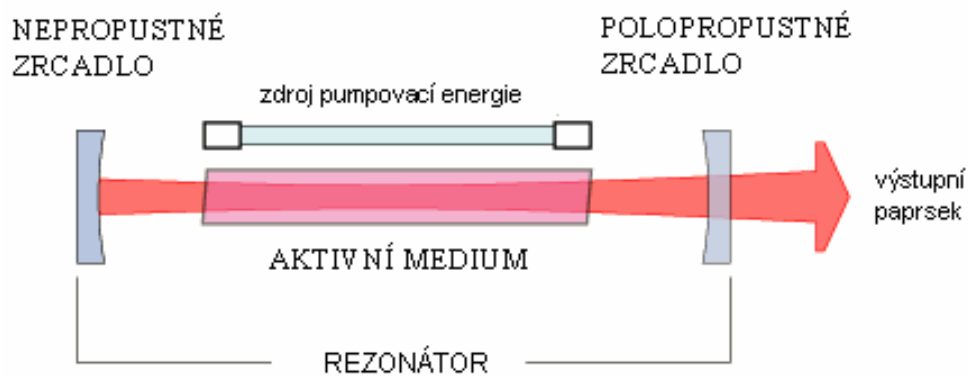
- Rezonátor (obr. 15) je dutina, do které se vkládá aktivní látka a která zajišťuje jev zpětné vazby. Většinou je tvořena dvěma zrcadly (naproti sobě umístěná rovinná či sférická zrcadla), ze kterých je jedno polopropustné a druhé odrazné. V podstatě jde o to, že emitovaná vlna z aktivní látky se odráží nazpět a při zpětném přechodu vzbuzuje další a další vynucené emise fotonů. Při překročení prahové výkonné hustoty polopropustného zrcadla dojde k jeho otevření výstupu fotonů z rezonátoru a začne tedy emitovat záření na vlnové délce charakteristické pro dané aktivní laserové prostředí. Pro správnou realizaci laseru je třeba zvolit takové aktivní prostředí, ve kterém lze vytvořit inverzi populace energetických hla-

din elektronů a současně zabezpečit pomocí otevřeného rezonátoru kladnou zpětnou vazbu pro zesilování generovaného záření.



Na obrázku jsou vyznačeny kvantové soustavy v základním (1.) a v excitovaném (2.) stavu, stimulovaná emise (3.) a energetické hladiny kvantových soustav E_1 a E_2 .

Obr. 15. Rezonátor (10)



Obr. 16. Schéma struktury laseru

3.5 Výkon a účinnost laseru

3.5.1 Výkon laseru

Výkon laseru je množství vyzářené energie za určitý čas, označuje se ve wattech (W). Množství vyzářené energie se udává v jednotkách zvaných joule (J). Jestliže svítí laser nepřetržitě, většinou vystačíme s pouhým označením výkonu. Jestliže však laser pracuje v krátkých záblescích, které trvají milisekundy (ms) až pikosekundy (ps) a dokonce i femtosekundy (fs), je pro odborníky důležité vědět, jak kratičké jsou a jak je velká vyzářená energie. Čím kratší je doba trvání záblesku, tím větší je špičková energie a výkon. Tak je možné v nepatrném zlomku sekundy vyzářit veliké množství energie (nejen jednotky, de-

sítky, stovky, ale i tisíce joulů). Výkony laserů se v takových případech pohybují nejen ve wattch (W), kilowattch (KW), ale i megawattch (MW), gigawattch (GW) a dokonce i v terawattch (TW). (2)

3.5.2 Účinnost laseru

Účinnost je poměr mezi množstvím energie dodané do zařízení a množstvím energie, které z něho vystupuje. V různých typech laserů totiž dochází k různě velkým ztrátám. Účinnost laserů, která se pohybuje v rozmezí od 0,1% do 80%, je často hlavním faktorem pro jejich použití. Významná je především v případech, kdy je důležitý vysoký výstupní výkon laserů, tj. při použití tzv. výkonových laserů. Do laseru musíme sice přivádět více energie, než jí získáme, ale vyplatí se to. (2) Laser totiž opouští paprsek zvláštních a pro nás výhodných vlastností, které již byly zmiňovány výše. Jsou to monochromaticnost (jednobarevnost), koherence (uspořádanost) a malá divergence (rozbíhavost). Díky těmto charakteristickým vlastnostem potom nacházejí lasery stále větší uplatnění v nejrůznějších oborech.

3.6 Dělení základních druhů laserů

Od doby spuštění prvního laseru uběhlo více než čtyřicet let. Během této doby, zejména v šedesátých letech, se začaly objevovat další nové typy laserů, lišící se aktivním prostředím, nebo konstrukčním uspořádáním. Vznikaly ovšem také lasery s dalšími vlnovými délkami v oblasti viditelného, infračerveného, ultrafialového a dokonce i rentgenového záření. Každý z těchto laserů si našel uplatnění v jiné oblasti použití. Při sváření a vrtání je určující charakteristikou především výkon laseru, proto se zde uplatňují hlavně impulsní lasery. Zvyšování výkonu laseru se ovšem nedělo zvyšováním energie vyzářené laserem. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám širokého spektra použití. Laserů je tedy velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Postupem času se jednotlivé typy zdokonalovaly a vylepšovaly se tak jejich parametry.

Tedy vzhledem rozmanitosti dostupných laserů, rozdílnosti vlastností, dosahovaných výkonů, oblasti použití, je potřebné dělení laseru do určitých kategorií, které může být následující:

Lasery je možné dělit podle:

- aktivního prostředí
- vlnové délky
- podle způsobu čerpání energie
- druhu paprsku, resp. režimu paprsku
- výkonu
- konstrukce laserového zařízení
- použití.

3.6.1 Dělení laserů podle aktivního prostředí

Lasery se v tomto způsobu dělí podle skupenství materiálů, které se používají na generování záření, tedy podle skupenství aktivní látky a to na:

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

Vybrané typy laserů a informace o jejich aktivní látce, vlnové délce, typu paprsku (jeho režimu), výkonu a oblasti použití můžeme vidět v tabulce I.

Jednotlivým typům laserů podle tohoto způsobu (dělení dle aktivního prostředí) se budeme věnovat v další kapitole.

Tab. 1. Vybrané typy laserů (základní informace)

Aktivní médium:	Vlnová délka	Barva / spektrální oblast	Příklady použití	Poznámky
Plynové excimerové lasery:				Pulsní, výkon 20W až 250W
ArF	193 nm	UV	oční lékařství, fotolitografie	
KrCl	222 nm	UV	oční lékařství, laserová ablace	
KrF	248 nm	UV	oční lékařství	
XeCl	308 nm	UV	oční lékařství	
XeF	351 nm	UV	oční lékařství	
Ostatní plynové lasery:				
Argonový	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oční lékařství, spektroskopie	Kontinuální nebo pulsní, výkon 1 až 5000W
dusíkový	337 nm	UV		Pulsní
fluorovodíkový	2,7 μm	IR	nedestruktivní testování	Kontinuální, střední výkon 10KW
hélium-neonový	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy	Kontinuální, stř. výkon 0,05W
hélium-kadmiový	325 nm, 442 nm	UV, modrá		Kontinuální, stř. výkon 0,1W
kryptonový	476 nm, 528 nm, 568 nm, 647 nm	modrá, zelená, žlutá, červená	světelné show, oční lékařství	
CO ₂	10,6 μm	IR	svaření, řezání, zubní lékařství, strojírenství	vysoký výkon až 15 000W, kontinuální či pulsní
Barvivové (kapalinové) lasery:				
Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie	Laditelný
Kumarin C30	504 nm	zelená	oční lékařství, chirurgie	
Pevnolátkové lasery:				
rubínový	694 nm	červená	holografie, odstraňování tetování	Výkon 5W, pulsní
Nd:YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, pájení, spektroskopie, strojírenství	Kontinuální, výkon až 1200W
Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, zubní lékařství	pulsní
Er:YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, zubní lékařství	pulsní
Ti:safir	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie	laditelný
Polovodičové lasery:				
GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, tiskárny	Výkon 2 až 10mW, pulsní
GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje	barva závisí na složení, střední výkon 1W
AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD	
GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky	
InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství	

poznámka k tabulce 1.: UV - ultraviolet (ultrafialová), IR - infrared (infračervená)

3.6.2 Dělení laserů podle vlnové délky generovaného laserového paprsku

Podle vlnových délek optického záření, které vysílají, se tedy dělí na:

- submilimetrové
- infračervené lasery
- lasery viditelného pásma
- ultrafialové lasery
- rentgenové lasery

Vlnové délky pro různé typy laserů můžeme vidět na obr. 8 v kapitole 3.3.

3.6.3 Dělení laserů podle způsobu čerpání energie

Podle typu buzení se lasery tedy dělí na buzené:

- opticky - (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením)
- elektricky - (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic)
- chemicky - (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy)
- tepelnými změnami (termodynamicky) - (zahřáním a ochlazením plynu)
- jadernou energií - (reaktorem, jaderným výbuchem)

3.6.4 Dělení laserů podle režimu paprsku

Lasery mohou pracovat v rozdílných časově závislých režimech a to v:

- kontinuálním režimu (continuous wave – CW)
- pulsním režimu (pulsed wave – PW)
- tzv. Q režimu (switched – Q_S)

V kontinuálním provozu pracují převážně plynové lasery. V plynu je kontinuální záření vyvoláno pomocí srážek s elektrony. Tento způsob buzení je nejnáze 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. (15) Dobré výkony laseru v kontinuálním režimu jsou řádově $10^4 - 10^5$ W.

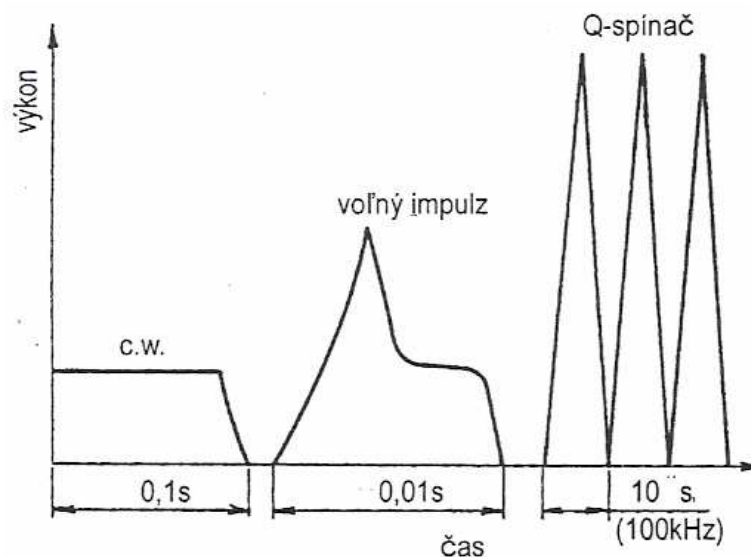
Pulsní vzniká režim přerušováním budícího elektrického výboje v dutině laseru. Dobré výkony laseru v pulsním režimu jsou řádově $10^{12} - 10^{13}$ W. (5)

V Q - switched 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. Přerušování může trvat i stamiliontinu sekundy. Výsledkem je okamžitý výstupní výkon o vysoké hustotě energie. (15)

Pulsní a hlavně Q - switched provoz umožňuje:

- využití vysoké hustoty pulsu pro zvýšení absorpce záření v materiálu s vysokou odrazivostí,
- snížení objemového ohřevu materiálu při jeho zpracování laserem v důsledku krátké doby interakce laserového svazku s materiálem,
- provedení řady vysokorychlostních operací v důsledku schopnosti rychlého zažhání a zhasínání svazku. (16)

Na obr.17 jsou znázorněny časové závislosti jednotlivých režimů laseru.



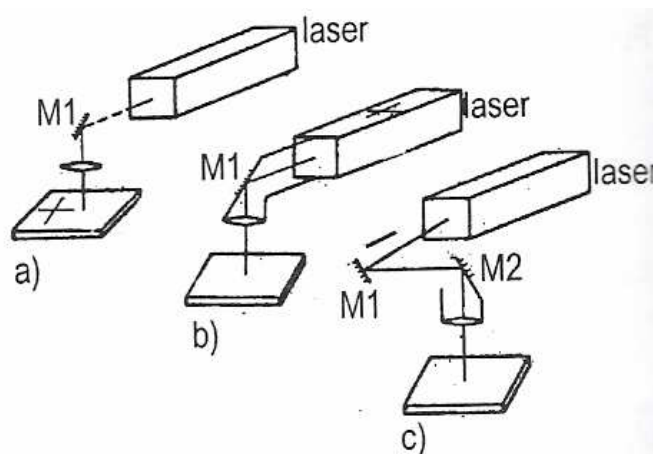
Obr. 17. Druhy režimu laserového paprsku (5)

3.6.5 Dělení laserů podle dosahovaného výkonu

- nízkovýkonové - desetiny W až stovky W (doporučené použití je pro řezání a vrtání keramiky, vrtání rubínů, plastických hmot)
- vysokovýkonné - 1 kW až 30 kW (hlavní oblasti použití jsou sváření, tepelné zpracování klikových hřídelů, skříní převodovek atd.) (5)

3.6.6 Dělení laserů podle konstrukce zařízení

Z hlediska konstrukce laserového zařízení má velmi důležitou úlohu přenos laserového paprsku k pracovnímu stolu a také zabezpečení vzájemného relativního pohybu mezi paprskem a dílcem. Budeme vycházet za tři základních konstrukčních typů laserových zařízení, zobrazených na obr.18. Přitom výběr typu záleží na velikosti obráběného předmětu, kvalitě a rychlosti paprsku a také na požadované přesnosti.



Obr. 18. Základní typy konstrukčního řešení vzájemného pohybu paprsku a obrobku (5)

Popis k obr.18:

- Systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek. Omezujícím parametrem používání je tvar, velikost a hmotnost obrobku. (5)
- Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek. Při tomto systému se používá malá a lehká laserová hlava s nízkým výkonem a poměrně nízkou řeznou rychlostí. Výhodou systému je minimální omezení tvaru a hmotnosti obrobku. (5)
- Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečen zrcadly, když laserové hlava a obrobek jsou stacionární. Tento systém je vysoko flexibilní. Využívá se při požadavku na vyso-

ké řezné rychlosti a úsporu prostoru. Nevýhodou je vysoká citlivost na vibrace a přesnost nastavení, což může způsobovat větší rozdíl paprsku. (5)

V současnosti jsou vyvinuté systémy řízení pohybu paprsku pomocí CNC systémů a také laserová hlava může být součástí chapadla robota, které zabezpečí pohyb paprsku v pěti osách. Tyto systémy se používají přednostně pro řezání a vyřezávání složitých tvarů a při svařování. Nejnověji se přenos laserového paprsku zabezpečuje optickými vlákny. Použití optických kabelů je velmi vhodné při požadavku na rozdělení laserového paprsku a jeho odeslání do více pracovních stanic, které mohou pracovat současně. (5)

3.6.7 Dělení laserů podle jejich použití

Oblasti v použití laseru jsou velmi široké a zasahují do nejrůznějších odvětví. Dle použití můžeme lasery rámcově dělit na:

- výzkumné
- měřicí
- lékařské
- technologické
- energetické
- vojenské

Pro nás nejdůležitější jsou lasery technologické, kde se budeme zajímat dělením laserů podle oblastí průmyslového využití pro procesy zpracování materiálu, podle něhož je dělení následující:

- úběr materiálu - do této oblasti spadá řezání, vrtání, mikroobrábění a čištění pomocí laseru, protože při procesech dochází k úběru materiálu. Mikroobrábění zahrnuje technologie jako přistřihování, ořezávání, značkování, glavírování a rytí. Čištění je odstraňování tenké povrchové vrstvy kontaminované např. oleji a plyny. (5)

- spojování a zpevňování - zahrnuje svařování, pájení a povlakování.

- tepelné zpracování povrchu - jako kalení, žhání, povrchové legování, rekrytalizace, povlakování.

- nové procesy - které byli nedávno vyvinuté na základech požadavku průmyslu jako je tažení optických vláken, barvení, dělení skla a keramiky či laserem podporované obráběcí procesy jako je soustružení a jiné kombinované procesy využívající laser. (5)

V tab. 2 můžeme vidět klasifikaci technologií zpracování materiálů laserem podle normy DIN.

Tab. 2. Klasifikace laserových technologických operací dle normy DIN (5)

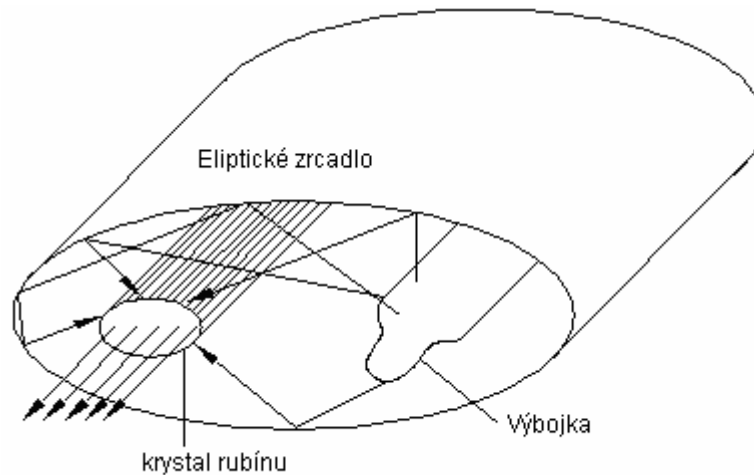
Primární tvarování	Tváření	Řezání	Spojování	Povlakování	Tepelné zpracování
Stereolitografie	Tváření laserovým ohřevem (ohýbání)	Řezání - sublimační - tavné - s aktivním plynem	Sváření	Povrchové legování	Kalení
Spékání		Vrtání	Pájení	Chemické nanášení povlaků - CVD	Žihání
		Gravírování			Zpevňování
		LAM (<i>laser assisted machining</i>)			
		Označování			

3.7 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery pracují především v pulsním režimu. Aktivním prostředím této skupiny laserů bývají pevné krystalické, případně amorfnní látky s příměsí vhodných iontů. Pevná fáze tvoří jen nosný skelet aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování přitom dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. U krystalických materiálů jsou aktivní ionty zabudovány přímo v krystalové mřížce a mají stálou, orientovanou polohu v silovém poli mřížky. Jako příměsí v krystalických aktivních prostředích se nejčastěji používá iontů ze skupiny prvků vzácných zemin. Ionty příměsí jsou v krystalu vystaveny působení poměrně velkých vazbových sil, které ovlivňují energetické hladiny jejich valenčních elektronů. Důsledkem tohoto působení je posun, štěpení a rozšiřování energetických hladin. Jako nosného prostředí pro aktivní ionty se používá i amorfnních materiálů. Materiál nosného prostředí krystalické povahy tvoří často oxid hlinitý. U pevnolátkových typů laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje, kterým je obvykle výbojka, vyvolá změna v obsazení energetických hladin. Tyto lasery mohou pracovat v různých režimech a také za různých provozních podmínek, jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu. Jejich záření má vlnové délky v oblasti infračerveného a viditelného světla.

3.7.1 Rubínový laser

K neznámějším a také k prvním vyrobeným laserům patří rubínový laser na obr. 4 a obr. 19 (jeho aktivní prostředí tvoří krystal Al_2O_3 s ionty Cr^{3+} – rubín). Monokrystaly rubínu se získávají z taveniny Al_2O_3 s příměsí sloučenin trojmocného chrómu pozvolným ochlazováním. K optickému zesilování v rubínu dochází mezi energetickými hladinami trojmocného chrómu v Al_2O_3 . Laser vyzařuje červené světlo o vlnové délce 0,6943 mikrometru a pohlcuje energii světla výbojky. Dříve se používalo výbojky tvaru šroubovice, která ovíjela krystal. Výroba takové výbojky ale činí potíže, proto se přešlo na lasery s eliptickými zrcadly. Světlo vydávané výbojkou umístěnou v jednom ohnisku se soustřeďuje v druhém ohnisku, kde je umístěn krystal. Tento typ pracuje v pulsním režimu. Pulsní režim je nutný, protože se krystal při čerpání energie silně zahřívá. Rubínového laseru se v průmyslu využívá k vrtání tvrdých materiálů, v lékařství v dermatologii, a v laserové lokaci družic atd.



Obr. 19. Rubínový laser (13)

3.7.2 Nd-YAG laser

Perspektivní a dnes nejrozšířenější pevnolátkový laser je neodýmový laser (tzv. neodýmové sklo) na bázi yttrioaluminiového granátu s ionty Nd^{3+} (Nd-YAG). Neodýmové sklo může být vyráběno v prakticky neomezených rozměrech a dosahováno tak velkých laserových konstrukcí a tedy i energií. Laser vyzařuje infračervený paprsek o velké energii. Vyznačuje se vysokou účinností, stačí jej totiž osvětlit pouhou žárovkou a může vydávat spojité světlo o výkonu stovky wattů. V průmyslu se využívá při vrtání, svážení, řezání a žhání materiálu. V lékařství se používá kontinuální Nd-YAG laser jako skalpel v chirurgii a pulsní Nd-YAG laser v oční mikrochirurgii. Dále našel uplatnění v radarové technice a ve spektroskopii.

3.7.3 Nd-sklo laser

Dalším poměrně rozšířeným pevnolátkovým typem laseru je Nd-sklo laser. Aktivní prostředí v tomto laseru je tvořeno amorfním materiálem - sklem, v němž jsou rozptýleny ionty Nd^{3+} . Při výrobě se neodým do skla vpravuje v podobě oxidu Nd_2O_3 a to v koncentraci okolo 2%. Nevýhodou tohoto typu laseru je tepelná vodivost skla, substrát se zahřívá a tak není možno efektivně dosáhnout kontinuálního provozu laseru. Na druhé straně se sklo vyrábí mnohem jednodušeji než-li krystaly YAG, je tak možno dosahovat až 10 krát větších rozměrů laseru tedy i většího výkonu. Nd-sklo lasery jsou vhodné pro vysoce – energetické pulsní režimy práce s malou opakovací frekvencí, např. pro velké termojaderné systémy.

3.7.4 Nd-LF laser

Matricí materiálu Nd-YLF je materiál lithium-yttrium-fluorid. Laserový přechod je na vlnové délce 1053 nm. Nd-YLF laserová krystal se používá dnes v průmyslových aplikacích i v medicíně. (2)

3.7.5 Alexandritový laser

Přírodní alexandritový krystal byl poprvé nalezen v roce 1880. Chemicky je alexandrit krystalem chrysoberylu BeAl_2O_4 (matrice) dopovanými ionty Cr^{3+} (aktivátor). Alexandrit je opticky a mechanicky velmi podobný krystalu rubínu. Alexandritový laser může pracovat jak v kontinuálním, tak v impulsním režimu. Z hlediska využití se alexandritové lasery začínají prosazovat v lékařských aplikacích (dermatologie, fotodynamická terapie), dále v průmyslu a ve spektroskopii. (2)

3.7.6 Ho/CTH-YAG laser

Generace laserového záření na vlnové délce 2,1 μm na iontu holmia zabudovaného do matrice yttrium aluminium granátu byla poprvé dosažena v roce 1962. Atomy holmia mají jen několik slabých absorpčních čar na vlnových délkách produkovaných výbojkovým čerpáním, a proto byly do matrice yttrium-aluminium-granátu dodány postupně další ionty vzácných zemin – erbia (Er) a thulia (Tm), které přenášejí absorbovanou výbojkovou energii na ionty holmia. Systém se uplatňuje především v medicíně. (2)

3.7.7 Er-YAG laser

Absorpční a fluorescenční vlastnosti iontu erbia byly zkoumány v různých maticích, aby byly určeny vlastnosti erbia jako aktivního iontu umožňujícího laserovou akci. Materiál matrice pro Er iont dnes tvoří převážně YAG. Dominantními vlnovými délkami generovaného záření jsou 1,56 a 2,94 μm . Záření Er:YAG laseru 1,56 μm se používá v laserových dálkoměrech. (2)

3.8 Plynové lasery

Hlavní rozdíl mezi plynovým a krystalovým laserem je ve způsobu buzení a v prostředí, ve kterém dané zesílení vzniká. Pracovním prostředím plynového laseru bývá směs atomů (He-Ne laser, měděný laser, jodový laser) různých plynů či je tvořeno molekulu-

lami (CO₂ laser, CO laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerový laser) nebo ionty (Ar laser, Helium-kadmiový laser). Nejčastěji se užívá směsi hélia a neónu, ve které se vytvoří vysokofrekvenční elektrický výboj, čímž se z elektricky neutrálního prostředí stává prostředí ionizované. Směs plynu je uzavřena ve skleněné trubce. Vzniká zde určitý problém s nastavováním zrcadel. Pokryjeme-li totiž odrazovou vrstvou přímo konce trubice, vzniknou problémy jak zrcadla přesně nastavovat a vyloučit případné vnitřní odrazy. Pomohl zde fyzikální jev, který říká, 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 odrážel a rezonátor tak můžeme vytvořit soustavou vnějších nastavovatelných zrcadel. Při průchodu aktivním prostředím bývá optický svazek méně deformován než u laserů s kondenzovaným prostředím, neboť plyny jsou obecně homogennější. Nevýhodou plynových laserů je poměrně malá objemová hustota počtu částí, která se poté odráží v malých objemových výkonech. Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní, což je dáno také tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí a je možno je čerpat nejrůznějšími mechanismy. K nejčastějším patří buzení pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, ale efektivně se používá také příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků, buzení elektronovým svazkem, chemickou reakcí či expanzí horkého plynu. Optického buzení se používá jen zřídka. Plynové lasery mají vyšší účinnost (u CO₂ laseru okolo 40 %), protože přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Plynové lasery pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulsním režimu. Většinou však pracují v nepřetržitém režimu, ale jejich trvalý výkon není moc velký.

3.8.1 He-Ne laser

Nejznámějším, a do nedávna nejrozšířenějším a zároveň prvním vyrobeným plynovým laserem je červeně zářící atomární He-Ne laser. Aktivní prostředí je tvořeno vzbuzenými (excitovanými) atomy neónu. Excitují se nejčastěji v elektrickém výboji ve směsi plynů hélia a neónu. Elektrony výboje předávají při nepružných srážkách část své kinetické energie vnitřním stavům atomů a vyvolávají jejich přechod na vyšší energetické hladiny. Populace hladin atomů je určována nejen buzením, ale i současně probíhající relaxací. Tento laser, jak již bylo, řečeno vyzařuje infračervené záření o vlnové délce 1,15 μm, 3,39 μm

a 0,633 μm . Paprsek má vysokou stabilitu kmitočtu a malou rozbíhavost. Tím je předurčeno použití hélíum-neonových laserů k funkci přesných hodin, přesného dálkoměru a k účelům telekomunikačním a geodetickým.



Obr. 20. He-Ne (Helium – neonový) laser (11)

3.8.2 CO₂ laser

Nejvýkonnější a také v průmyslu a medicíně nejpoužívanější z plynových laserů se stal laser s oxidem uhličitým tzv. CO₂ laser. O tomhle typu laseru bude samostatně a podrobně pojednáno v následující kapitole, jelikož tento typ bude používán v praktické části diplomové práce.

3.8.3 Dusíkový laser

Další z laserů je dusíkový laser, který je nejjednodušší laser buzený pomocí výboje. Jako laserové aktivní prostředí se používá molekulární dusík, ale ke generaci postačí i vzduch, který obsahuje kolem 80 % dusíku. Dusíkové lasery mají úplně shodné principy jako lasery pevnolátkové lasery, s tím rozdílem, že zde není přítomna budicí dutina, ani vnější výbojka. Proto jsou tyto lasery také o mnoho levnější, spolehlivější a také výkonnější. Tyto lasery mohou pracovat v kontinuálním režimu. Molekula N₂ může být využita ke generaci záření na několika přechodech. Zesílení v dusíkovém laseru je veliké, laser může pracovat bez optického rezonátoru. Záření je na dráze 1 m zesíleno více než 100 000

krát. Dusíkový laser může generovat záření ve třech oblastech optického spektra a to ultrafialové záření (337 až 328 nm), viditelné a blízké infračervené (754 až 1235 nm), infračervené (3,29 až 3,47 μm a 8,15 až 8,21 μm). Buzení se u tohoto typu laseru jak bylo zmíněno, provádí elektrickým výbojem. Největšího využití se dusíkovému laseru se dostalo jako generátoru laserového ultrafialového sváření.

3.8.4 Excimerové lasery

Zvláštním typem plynových laserů jsou Excimerové lasery – excimer je nestabilní molekula, která vzniká jen na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vzbuzeného atomu s atomem v základním stavu. Tato skupina laserů tedy využívá jako aktivního prostředí zvláštního druhu molekul, excimerů, vytvářených za účasti atomů vzácných plynů. Tyto molekuly, jinak nestabilní, mohou existovat jen za zvláštních podmínek, například v plynovém výboji, s atomy ve vysoce vybuzených, excitovaných stavech. Při rozpadu těchto excitovaných molekul vzniká právě ultrafialové záření. Dosud známé excimerové lasery pracují buď s excitovanými dimery vzácných plynů (argon), s halogenidy vzácných plynů (např. krypton, fluor), nebo s oxidy vzácných plynů (xenonu). Buzení excimerových laserů se provádí elektrickým výbojem, nebo svazkem rychlých elektronů. Buzením elektronovým svazkem se však dosahujeme vyšší účinnosti než buzením elektrickým výbojem (a to až 10 krát).

3.8.5 Argonový laser

Aktivní prostředí zde tvoří ionty argonu. Budí se elektrickým výbojem. Vydává modrozelené světlo (zelené na vlně 0,514 mikrometru a modré na vlně 0,488 mikrometru). Je pro něj typická vysoká hustota elektrického proudu protékajícího výbojem a vysoká teplota. Výbojová trubice se obvykle zhotovuje z keramického materiálu a proud se izoluje od stěn magnetickým polem. Laser je schopen generovat desítky wattů ve spojitěm režimu a je vhodný i pro technologické účely. (14)

3.8.6 Vodíkový laser

Aktivním prostředím je vodík. Elektronové kvantové přechody v molekulárním vodíku jsou používány pro generaci ultrafialového záření v oblasti vlnových délek 140 až 165 nm

a 100 až 120 nm. Buzení se provádí elektrickým výbojem. Laser pracuje zpravidla v tzv. režimu zesílené spontánní emise (tj. bez zrcadel tvořících optický rezonátor). (3)

3.8.7 Měděný laser

Aktivní prostředí tvoří neutrální atomy mědi. Vysílá zelené světlo s vlnovou délkou 510,5 nm a 578,2 nm. Inverze populace mezi energetickými hladinami se vytváří v elektrickém výboji ve směsi par mědi a dalšího nárazníkového plynu (helia, argonu). Střední výstupní výkon měděného laseru bývá až 40 W. Aby tlak měděných par ve výbojové trubici byl dostatečně velký, pracují měděné lasery při vysoké teplotě (1800 K), tj. jejich výbojová trubice je uložena v peci. Měděné lasery jsou dosud neúčinnější lasery v zelené oblasti spektra. Vlnové délce jejich záření odpovídá malá absorpce v mořské vodě, což je předurčuje mj. pro podmořskou komunikaci či lokaci. (2)

3.8.8 Jodový laser

Generuje viditelné nebo infračervené záření v důsledku stimulované emise na kvantových přechodech vzbuzeného atomu jodu. Vlnová délka laserového záření je 1,35 μm . Podle způsobu buzení je možné jodové lasery rozdělit na fotodisociační lasery a lasery buzené rezonančním přenosem energie. Fotodisociační buzení je založeno na rozpadu molekul v důsledku působení ultrafialového záření. Poměrně dlouhá doba (130 ms) života atomu jodu v excitovaném stavu umožňuje dosáhnout generaci impulsů záření s velmi velkou energií a velkým špičkovým výkonem (až několik TW). Jiný způsob excitace využívá přenosu excitace molekuly kyslíku na atom jodu. (2)

3.8.9 Helium-kadmiový laser

Je příkladem laseru pracujícího s ionty kovu. Helium-kadmiový lasery jsou zajímavé tím, že jsou tříbarevné - vyzařují světlo modré, zelené a červené. Vysílají totiž záření ve viditelné oblasti na vlnových délkách 533,7 nm; 537,8 nm a 441,6 nm. Budí se elektrickým výbojem, ve kterém se nejdříve excituje a ionizuje helium. Atomy helia pak dávají vznik iontům kadmia.

3.8.10 CO laser

Aktivním prostředím CO laseru jsou molekuly oxidu uhelnatého. Laserové přechody se uskutečňují mezi vibračně-rotačními hladinami základního elektronového stavu této dvouatomové molekuly. CO lasery vyzařují infračervené záření v pásmu 5 až 6,5 μm a vyznačují se dobrou účinností a velkými výstupními výkony. Buzení CO laseru je provádí obdobnými metodami jako u CO_2 laseru a to především elektrickým výbojem nebo elektronovým svazkem. V CO laserech, kde nejsou kladeny žádné nároky na spektrální čistotu výstupního svazku, se dosahuje účinnosti až 50 %. Jejich většímu rozšíření brání jedovatost CO. (2)

3.9 Kapalinové lasery

Kapalinové lasery pracující s cheláty různých prvků vzácných zemin se objevily již v roce 1963. Výhodou je, že mohou zabírat neomezeně velký objem a jsou dokonale homogenní. Velkou nevýhodou těchto laserů je toxicita (chemicky se rozkládají) a krátká životnost aktivního prostředí. (17)

Jako aktivní prostředí kapalinových laserů se obvykle používají opticky buzené roztoky organických barviv. Jejich široké fluorescenční spektrum umožňuje spojitě měnit vlnovou délku záření (300 - 1 500 nm) generovaného těmito lasery. Důležitou skupinou jsou však zejména barvivové lasery, které využívají roztoků různých organických látek, například rhodaminu. Rhodaminový laser generuje pulsní záření od zelené až po červenou oblast spektra. K těmto kapalinovým laserům patří i lasery na barevných centrech, krystalech s různými defekty vyvolávající absorpci na různobarevných spektrálních čárách (krystal KCl s příměsí lithia). (16)

Pro buzení barvivových laserů se užívá optického záření. Optické buzení těchto laserů je nekoherentní nebo koherentní, pulsní nebo kontinuální a příčné nebo podélné. Při koherentním buzení je barvivové aktivní prostředí ozařováno zářením pomocného laseru na kmitočtu odpovídajícím absorpčnímu pásmu daného barviva. Účinnost barvivových laserů buzených koherentně zářením pomocného laseru dosahuje řádu desítek procent. Při nekoherentním čerpání se pro buzení barvivových laserů užívá podobného uspořádání jako u pevnolátkových laserů. Účinnost nekoherentně čerpaných barvivových laserů dosahuje maximálně 10%. (2)

Použití barvivových laserů je především ve spektroskopii a informační technice. Novou aplikací je využití možnosti naladění přesné vlnové délky v medicíně – ve fotodynamické terapii, kdy se působením záření přesné vlnové délky ničí rakovinotvorný nádor předem „napuštěný“ speciálním organickým barvivem (barvivo se působením záření rozpadá a volný generovaný kyslík ničí rakovinotvorné buňky). (2)

3.10 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 vysokou 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. (18)

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém je možno dosáhnout velkého optického zesílení. Vzhledem k tomu jsou, tedy rozměry aktivního elementu polovodičového laseru mnohem menší než u ostatních laserů. Inverze populace se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje, obecně lze však samozřejmě použít i jiných prostředků buzení, jako např. optického, elektronového svazku, lavinového jevu v polovodičích.

Mezi polovodičové lasery buzené svazkem elektronů, kde jak už bylo řečeno, je aktivní prostředí tvořeno vlastním polovodičem patří např. galium arsenidový (Ga-As) polovodičový laser, kadmium sulfidový (Cd-S) a kadmium selenidový (Cd-Se) polovodičový laser. U těchto laserů je teplotní závislost je natolik velká, že tyto polovodičové lasery mohou generovat záření pouze při nízkých teplotách.

U injekčních polovodičových laserů je ve většině případů aktivní materiál složen z polovodiče typu P a N. Buzení je v tomto případě prováděno přiložením elektrického pole k polovodičovému přechodu. Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu. Nejznámější z nich je Ga-As polovodičový laser.

Velký komerční význam mají polovodičové lasery především pro aplikace v počítačové technice a v samotné technice laserů, protože jsou využívány jako zdroje záření pro buzení pevnolátkových laserů. (2)



Obr. 21. Laserová dioda (11)

3.11 Plazmatické lasery

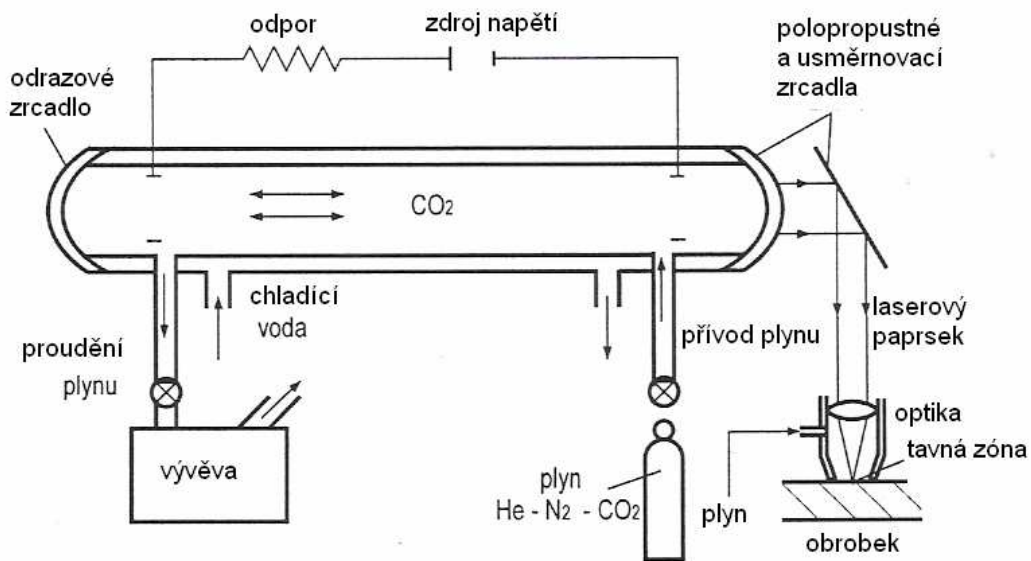
V plazmatickém laseru je inverze populace vytvářena uvnitř chladnouceho plazmatu. U těchto laserů se používají ionty argonu s vlnovou délkou 747 nm, ionty kadmia s vlnovou délkou 537,8 nm a ionty rtuti s vlnovou délkou 567 nm. Plazmatické lasery s aktivním prostředím vytvořeným mnohonásobně nabitými ionty jsou jednou z cest k vytvoření rentgenového laseru. Rentgenový laser je zdrojem koherentního rentgenového záření. U rentgenových laserů jsou ještě mnohé konstrukční problémy. Jedním z těchto problémů je, že potřebná zrcadla s vysokou odrazivostí v oblasti vlnových délek 10 nm prakticky neexistují. (2)

3.12 Chemické lasery

Tento druh laseru využívá k čerpání energie do aktivního prostředí energie exotermických řetězových chemických reakcí. První takový laser s použitím reakce mezi vodíkem a chlorem byl zkonstruován v roce 1965 a první výkonné lasery tohoto druhu založené na reakci vodíku a fluoru vznikly v roce 1969. (17)

3.13 CO₂ laser

CO₂ laser na vznik stimulované emise záření využívá kvantovo – energetické přechody související s oscilací molekul CO₂ a dusíku (N₂). Hlavní součástí laseru obr. 22 je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a hélia (He). Energie potřebná pro excitaci je vytvářena ve formě doutnavého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí. (5)



Obr. 22. Princip CO₂ laseru (5)

Trubice má většinou průměr několik centimetrů, je na bázi křemene a naplněná již zmiňovanou směsí plynů, o velmi nízkém tlaku, aby mohl snáze nastat výboj. Prostor této trubice, která je zakončena zrcadly, tvoří tedy rezonanční dutinu. V takto vzniklém rezonátoru jsou světelné vlny (stimulovaná emise) reflektovány tak dlouho, až se vytvoří kontinuální světelná vlna, která následně polopropustným zrcadlem opouští rezonátor.

V doutnavém výboji jsou molekuli dusíku N₂ srážkami s elektrony excitované ze svého základního energetického stavu E₀ do prvního vibračního stavu na určité energetické hladině E₁, která se blíží k energii asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého E₂. Proto se může nepružnými srážkami excitovaných molekul N₂ s molekulami CO₂ velmi rychle a účelně měnit vibrační energie molekul. Molekuly CO₂ přecházejí ze svých asymetrických vibrací na symetrické vibrace energetickým přeskokem z energetické hladiny E₂ na nižší hladinu, což je provázené vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm. Aby byla v CO₂ laseru trvale zajištěna inverze populace na horní hladině E₂, je potřebné ji jednak

neustále doplňovat (čerpat do systému energii ve formě doutnavého výboje) a jednak je potřebné depopulovat dolní laserovou úroveň, což je zajišťované srážkami s molekulami helia, které přijatou energii odvádí do systému ve formě tepla. Hélium je pro tento účel zvláště vhodné pro velký koeficient tepelné vodivosti. (5)

Nejdůležitějším faktorem, ovlivňující výstupní výkon je asi jako u každého laseru rychlost odvádění tepla z trubice. Teplo je ze systému odváděno chladícím médiem kterým bývá nejčastěji voda, či pro menší výkony laserů vzduch. Průmyslové lasery využívají olejového chlazení se sekundárním olej-voda výměníkem pro lepší stabilitu a jednodušší údržbu. Chlazení musí být přitom natolik účinné, aby teplota v dutině nepřekročila asi 400°K. Potřebný nízký tlak plynu zaručující vznik doutnavého výboje v laserové trubici je udržovaný pomocí vývěvy.

Důležitost chlazení lze prezentovat např. na CO₂ laseru o výkonu 10 kW a účinnosti 25%, který vygeneruje každou sekundu 7500 J parazitní tepelné energie. Tento tepelný výkon ohřeje za 1 hodinu 80 litrů vody k varu. Ohřev způsobuje zejména pokles účinnosti laseru. (6)

V současnosti je technicky možné provádět u CO₂ laserů tyto způsoby buzení:

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

CO₂ laser, jak již bylo zmíněno, patří do skupiny tzv. plynový molekulárních laserů, které jsou charakteristické zejména těmito parametry:

- vysoká účinnost - až 50%
- velký kontinuální výkon záření - až 1 MW
- možnost vyzařování v širokém pásmu - 5 až 700 μm
- velká stabilita frekvence - až 10⁻¹³ Hz

Jednou z předností těchto laserů je možnost získání vysoce monochromatického světla. U CO₂ laseru se k zesilování využívá již zmiňovaného přechodu mezi vibračními hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra. CO₂ lasery zastávají jedno z předních míst v oblasti technologických aplikací.

Podle uspořádání CO₂ laserů je lze dělit na čtyři základní typy, které se liší zejména možnostmi dosahovaných výkonů:

- lasery s výbojkou - mají malé rozměry, výkon je asi do 100 W, výbojka má průměr asi 20 mm a délku do 200 mm, většinou mají vodní chlazení, vlivem rozpadu CO₂ na CO mají malou životnost (asi 10000 h),
- lasery s pomalým průtokem plynu - průtok aktivního plynu znamená na jedné straně více odvádět teplo a dosahovat vyšších výkonů, ale na druhé straně znamená složitější konstrukci. Rychlost plynu je kolem 1 m.s⁻¹, výkon je asi 50-70 W/m (na délku laseru),
- lasery s rychlým průtokem plynu - dovolují ještě intenzivnější odvod tepla a dosahují tak 3 - 4 krát vyššího výkonu než-li lasery s pomalým průtokem plynu, neobejdou se již bez výměníku tepla, místo vývěvy se používá kompresor,
- TEA CO₂ laser (z anglického názvu „Transversal Excitation at Atmospheric Pressure“, což znamená: příčná excitace při atmosférickém tlaku) - výhodou je, že nevyžadují náročnou evakuační techniku, doutnavý výboj je možné uskutečnit pouze při nižších tlacích. (16)

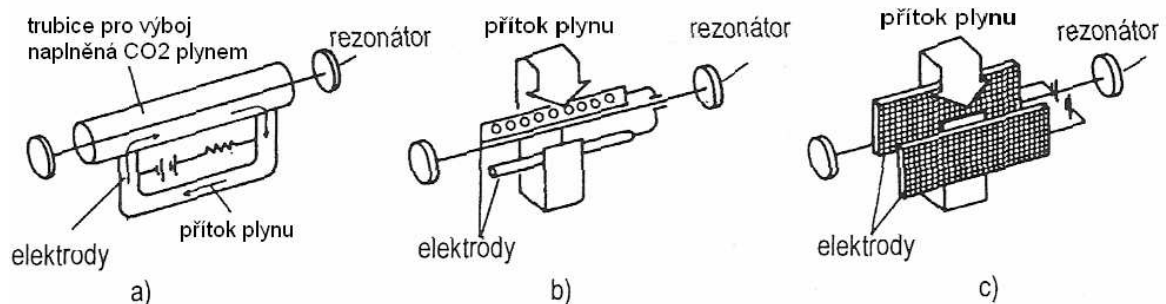
Běžné parametry nejpoužívanějších současných CO₂ laserů jsou následující:

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

Plyn může být po přechodu trubicí vedený na regeneraci a případně znovu použit v okruhu. Plyn se totiž v průběhu procesu v laserové dutině znehodnocuje, tím že CO₂

se částečně rozkládá na CO (oxid uhelnatý) a kyslík (O_2), což vede k poklesu výkonu laseru. CO_2 lasery se podle uspořádání toky plynu v laseru dělí na:

- axiální - plyn proudí ve směru optické osy laseru (obr. 23a), nejčastěji používaný typ,
- transverzální - plyn proudí kolmo na směr optické osy laseru a většinou také kolmo na směr elektrického výboje v dutině, (obr.23b a obr.23c), tento druh oscilátorů (zdrojů buzení) se dělí na dvoj osový a troj osový podle vztahu mezi přítokem plynu a výbojem mezi elektrodami, dosahují se nimi nejvyšší výkony na jednotku objemu dutiny. (5)



Obr. 23. Typy oscilátorů pro CO_2 lasery (a-axiální, b-ortogonální dvoj osový, c-ortogonální troj osový) (5)

Výkon všech axiálních laserů je dán délkou laserové trubice (obvyčně 60 - 70 W na 1m délky), vysoko-výkonové axiální lasery mají délku trubice až 10 m. (5)

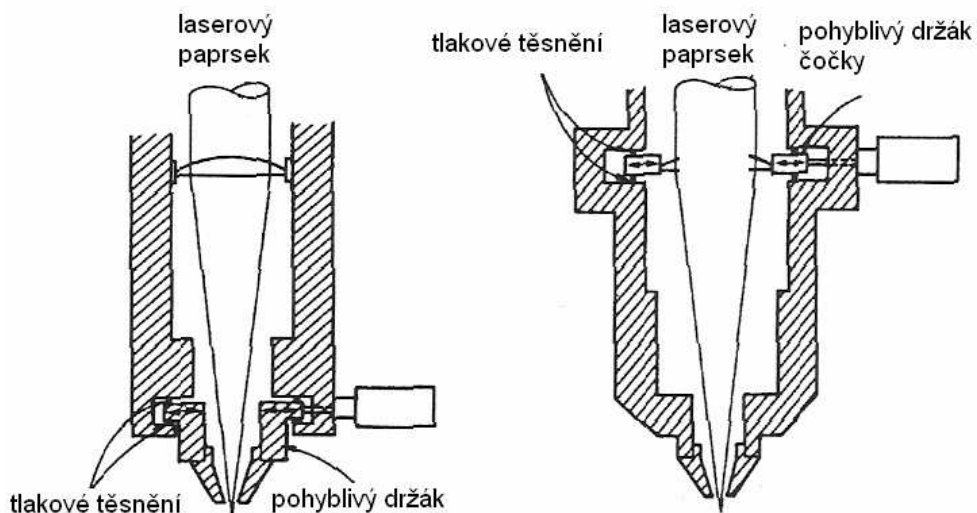
Generovaný laserový paprsek u většiny CO_2 laserů vystupuje z rezonátoru polopropustným zrcadlem a do laserové hlavičky je přiváděn systémem zrcadel. V hlavičce se nachází fokusační čočka, která je chlazená chladícím prstencem. Optika těchto laserů je upravována různými příměsí jako ZnSe (zinek/selen), GaAs (gálium/arsen), Ge (germánium), NaCl (chlorid sodný). Podrobněji bude o optice CO_2 laserů pojednáno v závěru téhle kapitoly.

Do laserové hlavičky je většinou zaváděn také pomocný plyn, který z něj vystupuje spolu s fokusovaným paprskem. Pomocný plyn má následující funkce:

- chránit optiku před produkty rozkladu materiálu opracovaného laserem,
- může vytvářet v dopadu laserového paprsku na materiál ochranou, anebo naopak oxidační či jinak vhodně agresivní atmosféru,

- odstraňuje z obráběného materiálu ohřevem vznikající taveninu a nebo páry, čímž přispívá k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování materiálu. (5)

Např. pro řezání pomocí laseru se využívá laserová hlavice, jejímž hlavním účelem je přivádět pomocný plyn do zóny řezání. Laserová hlavice má různou konstrukci podle uspořádání a uložení přívody stlačeného plynu. Obr. 24 ukazuje dva typy nejčastěji používaných uspořádání. (5)



Obr. 24. Základní uspořádání hlavy u CO₂ laserů (5)

Jak již bylo napsáno dříve pro CO₂ lasery se používají pro fokusační čočky příměsi různých materiálů. V tab. 3 je uveden přehled těchto základních materiálů příměsí.

Tab. 3. Charakteristiky materiálu (3)

Materiál	Absorpce pro 10,6 μm [cm ⁻¹]	Tepelná vodivost [W.cm ⁻¹]	Relativní cena
Ge	0,032	0,59	3,5
GaAs	0,02	0,48	6
ZnSe	0,005	0,18	5
Si	-	1,63	2

Germanium nejpoužívanější výstupní vazební člen pro nízkovýkonové lasery (<100 W) protože je relativně levné. Jeho použití pro vyšší výstupní výkony znemožňuje fakt, že pohlcuje část záření, následkem čehož se zahřívá. To vede k ještě větší absorpci a následnému přehřátí. Následuje znehodnocení materiálu. (3)

Arsenid galia a Selenid zinku se používají pro vysokovýkonové lasery. Arsenid galia má větší optickou propustnost než Galium a snáší vyšší teploty bez poškození. Nevadí mu ani obří impulsy a proto je pro lasery s vyšším výkonem nejpoužívanější. Obou materiálů se hojně využívá, ale ZnSe má větší zastoupení pro kontinuální CO₂ lasery. (3)

Křemík (Si) nepropouští vlnové délky 10,6 μm, ale má vynikající tepelné vlastnosti a proti ostatním nízkou cenu. Výroba sférických dílů je také jednodušší než u jiných materiálů. Stal se nejpoužívanější pro nízkovýkonové lasery jako vysoce odrazné zrcadlo, ale je nahrazován kovy (Cu, atd.) (3)

Běžné uspořádání zrcadel rezonátoru ukazuje tab. 4. Kulová zrcadla s velkým rádiusem efektivně využívá trubici a usnadňují jejich nastavení. Planparalelní zrcadla využívají aktivní medium nejlépe, ale problémy vznikají při jejich seřizování. Tyto varianty se aplikují na lasery, jejichž výkon se pohybuje kolem 1 kilowatu. Jako kompromis mezi nimi jsou zrcadla, z nichž jedno je rovinné a jedno sférické. Tato varianta se uplatňuje ve většině systémů. U laserů s vyššími výstupními výkony (>150 W) se používají kovová zrcadla, chlazená vodou. (3)

Tab. 4. Konfigurace zrcadel rezonátoru (3)

Výstupní výkon [W]	Výstupní zrcadlo - rádius [m] / odrazivost [%]	Rádius vysoce odrazivého zrcadla [m]	Konfigurace dutiny
50	∞ / 85	10	Planárně sférický
100	∞ / 85	10	Sférický s velkým rádiusem
250	∞ / 65	10	Planárně sférický
1000	∞ / 27	∞	Planparalelní

Tab. 5. Pracovní parametry komerčních CO₂ laserů (3)

Aktivní délka [m]	Výstupní výkon [W]	Směs plynu [CO ₂ :N ₂ :He]	Průtok plynu [l.min ⁻¹]	Výkon/délka [W.m ⁻¹]	Průtok vody [l.min ⁻¹]
1	50	1 : 1,5 : 9,3	1,15	50	2
2	100	1 : 1,5 : 9,3	1,15	50	2
5	275	2 : 1,35 : 9,3	4,01	55	10
6	375	1:08:23	4,26	62,5	10
9	525	06:07,7	4,23	58,3	10
18	1000	02:35,3	14,35	55,6	15

Pro obrábění plastů jsou pak optimální CO₂ lasery s kontinuálním provozem s výkonem do 2,5 kW. (16)

3.14 Přehled obecného použití laserů

Laser je obdivuhodné a neobyčejně univerzální zařízení – je schopen měnit prakticky jakýkoli druh energie na energii koherentního elektromagnetického záření. Volbou vhodného aktivního prostředí je možno získat záření nejrůznějších vlnových délek v oboru infračerveného, viditelného i ultrafialového světla. I když se u některých typů laserů přeměňuje energie s poměrně malou účinností, je tento nedostatek bohatě nahrazen vysokou kvalitou laserového světla. Žádný jiný zdroj záření tuto výjimečnou kvalitu nenabízí, a proto se stává laser jedním z nejužitečnějších nástrojů dneška. (8)

- Lasery v medicíně - rozsah použití laseru v současné medicíně je velmi široký a jeho aplikací stále přibývá (dermatologie, plastické chirurgie, neurochirurgie, otolaryngologie, urologie, gynekologie, oční operace).
- Lasery v holografii – hologram vytváří skutečný trojrozměrný obraz, případně i s různými dynamickými prvky.
- Laser v mikroelektronice - pro dělení podložek z keramiky, křemíku nebo arsenidu galia.
- Laser v astronomii, geodézii, geofyzice - pulzními lasery se měří vzdálenosti různých objektů na základě odrazu záření od nich (vzdálenosti družic, určování drah

družic, při studiu zemětřesení nebo měření vzájemného pohybu zemských kontinentů).

- Laser v ekologii a meteorologii – laserové se používají k měření znečištění zemského ovzduší, také měří výška oblačnosti nebo proudění vzduchu a jeho turbulence v atmosféře.
- Laser ve výpočetní technice - do oblasti výpočetní techniky patří např. laserová tiskárna či kopírka. Dále je to čtení disků a zapisování na ně.
- Laserová spektroskopie – obor fyziky zaměřený na studium spektra, která vzniká v procesu interakce mezi látkou a elektromagnetickým vlněním. Prostřednictvím spektroskopie lze studovat kvantové přechody a usuzovat na energetické hladiny atomů, molekul a makroskopických soustav, a tak získat informaci o stavbě a vlastnostech látky (např. lze analyzovat prvky obsažené ve vzorku látky, získat informace o složení hvězd a galaxií atd.).
- Laserová separace izotopů - Laserová separace izotopů je fotofyzikální metoda rozdělení izotopů, využívající optického posuvu v absorpčním spektru, při níž jsou atomy jednoho z izotopů převedeny monochromatickým laserovým zářením zdroje do vzbuzeného stavu, zatímco atomy ostatních izotopů zůstávají v základním stavu.
- Jaderná fyzika - soustředěná energie laserového paprsku by mohla být využita k nastartování jaderné fúze (termonukleární reakce).
- Vojenské aplikace - laserové značkovače na ručních zbraních, které mohou viditelně označit místo zásahu. Laserové dálkoměry slouží na různých zbraních, např. tankách, k přesnému zaměření a určení vzdálenosti cíle. Přesnost leteckých raketových střel s laserovým zaměřováním a naváděním dosahuje hodnot, jinými způsoby těžko dosažitelných.
- Lasery v průmyslu – laserové svařování (svařování laserem téměř vytlačilo obloukové svařování, aby bylo použití laserového svařování hospodárné, je nutná výroba většího počtu kusů), vrtání (je založeno na odstraňování materiálu odpařováním), řezání (laserového řezání se využívá v případě, kdy je nutné oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí, při laserovém řezání je snahou odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky), dekorace a popis skla (v místě dopadu fokusovaného laserového záření na povrch skla dojde k čás-

tečnému odpaření skloviny a k jejímu povrchovému popraskání, na vzniklých trhlinách dochází k rozptylu světla a tím se docíluje zářivého vzhledu dekoru), mikroobrábění laserem - laserové značení, značkování, popisování a glavírování (je založeno na místním odpaření materiálu nebo změně barvy na povrchu daného elementu, při dopadu záření na povrch materiálu vzniká na povrchové vrstvě obrazec daný předlohou, označovat se dá prakticky jakýkoli kovový i nekovový materiál, povrch výrobku může mít libovolný tvar a povrchovou úprav, přičemž gravitování je podstatě popisování do větší hloubky), laserové kalení (je tepelné zpracování kovů, využívající k jejich rychlému ohřevu optického záření laserů, výhodou oproti jiným způsobům ohřevu je opět možnost tepelného zpracování i na místech jinými způsoby nepřístupných), využití laseru při obrábění (1. jako podporu procesu obrábění tak, aby se snížilo opotřebení břitu řezného nástroje, aby bylo možné obrábět vyššími řeznými rychlostmi, anebo aby bylo možné vůbec obrobit těžkoobrobitelné materiály, zde jde o aplikaci obrábění s předeřevem, příp. kombinované obrábění – řezný nástroj a drážkování laserem, 2. integrací laseru do obráběcího stroje jako přídavného nástroje – např. soustružení či frézování laserem), dokončování povrchů laserem (spočívá v tangenciálním působení laserového paprsku na povrch rotujícího obrobku, čímž dochází k zahlazování mikronerovností).

3.15 Použití laserového paprsku pro opracování materiálů

Při opracování materiálů pomocí laseru se především využívá následujících specifických možností a předností této technologie:

- tepelnou energii je možno do velmi malé plochy bez požití mechanických sil, což dává možnost opracovávat i velmi křehké materiály bez mechanického namáhání,
- možnost opracovávat místa, která by byla jinými nástroji nedostupná,
- průměr ohniska laserového svazku lze vhodnou optikou měnit a to v širokém rozsahu, což umožňuje ovládat výkonnou hustotu paprsku,
- použití fokusovaného laserového paprsku umožňuje vytvářet velmi úzkou stopu řezu, což má za následek jednak úsporu materiálu ale také poškození či ovlivnění okolního materiálu,
- možností laserového svazku je jeho zapínání či vypínání vysokými rychlostmi a velkými přesnostmi,

- řezný účinek laserové svazku je v rovině kolmé k ose svazku izotropní, což umožňuje řezání všemi směry, a také změnu směru řezu o libovolný úhel
- opracování laserovým paprskem může být vysoko produktivní, pokud je spojeno s numerickým řízením,
- možností laserového obrábění je započat řez bez předvrtání
- paprsek je jako nástroj chemicky čitý a umožňuje opracování bez znečištění materiálu.

V současnosti se laserové technologie v procesech úběru materiálu, tedy obrábění, dělí do dvou základních skupin:

- laserové obrábění – opracování (LM – Laser Machining), které představuje alternativu k tradičnímu obrábění a používá se pro řezání, vrtání, a tvarové opracování různých materiálů,
 - laserem podporované obrábění (LAM – Laser Assisted Machining), které představuje alternativu k procesu řezání a broušení tvrdých a kalených materiálů a keramiky. Při obrábění s podporou laseru slouží laserový paprsek k ohřevu povrchu obrobku a jeho následné řezání či broušení v plastickém stavu. Při této technologii není materiál nataven a následně odpařen, ale laser pouze slouží jako intenzivní zdroj na změnu deformačního chování materiálu a jeho přeměnu z křehkého na tvárný.
- (5)

4 VLIV KONCENTROVANÉ ENERGIE LASEROVÉHO PAPRSKU NA POLYMERNÍ MATERIÁLY

Stěny polymerních materiálů se po průchodu laserového paprsku postupně ochlazují a to zejména radiací tepla do okolí. Tepelný tok se z místa řezu dále šíří do obrobeneho materiálu nestacionárním sdílením tepla vedením (teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času). Tepelný proces při nestacionárním režimu je popsán Fourier-Kirchhoffovou rovnicí (35), o níž ale i o mechanismech sdílení tepla zejména vedením, podmínkách úloh pro vedení tepla bude pojednáno v následujících kapitolách. Samotný vliv (interakce – vzájemné působení) laserového paprsku na polymerní materiál bude popsán až v praktické části diplomové práce.

4.1 Sdílení tepla

4.1.1 Úvod ke sdílení tepla

Sdílení tepla se zabývá procesy, při kterých dochází k přenosu tepla. Přenos tepla je přitom nerovnovážný termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase. Podmínkou pro sdílení tepla je existence teplotního rozdílu (rozdíl teplot v různých bodech prostoru, v různých bodech dané látky).

Sdílení tepla je složitý proces, u kterého je možné následující dělení:

- Sdílení tepla vedením (kondukcí) – probíhá v pevné fázi, přitom se teplo sdílí od částice k částici jejich přímým stykem. Sdílení tepla vedením je tedy zprostředkováno vzájemnými srážkami stavebních částic hmoty – atomů a molekul. Tím že si vzájemně předávají kinetickou energii, což se navenek projevuje vedením tepla a při neustálenosti procesu i změnou teploty.
- Sdílení tepla prouděním (konvekcí) – intenzita předávání tepla konvekcí závisí zejména na charakteru proudění tekutiny. Při proudění tekutin je teplo přenášeno kombinací vedením od částice k částici a dále také mechanickým přemísťováním jednotlivých částic. Základem sdílení tepla prouděním je tedy pohyb prostředí – proudění tekutin a jejich kontakt s okolními tuhými látkami (resp. tuhými stěnami) s odlišnou teplotou. Tekutiny tuhým látkám tepelnou energii předá-

vají, je-li jejich teplota vyšší. Tekutiny tepelnou energii s povrchu tuhé látky odvádějí, je-li jejich teplota nižší, než je teplota tuhých látek.

- Sdílení tepla sáláním (radiací) – vznik tepelných paprsků, které jsou výsledkem přeměny tepelné energie v energii záření, se nazývá sáláním (radiací). Sálání je tedy šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění, přičemž se tepelná energie (na rozdíl od vedení a proudění) přeměňuje v energii sálavou a naopak.

V praxi se většinou nesetkáváme s jednotlivými druhy sdílení tepla izolovaně, ale s jejich nejrůznějšími kombinacemi.

4.1.2 Teplotní pole

Je-li v každém bodě prostoru anebo jeho části jednoznačně určena skalární veličina, potom hovoříme o skalárním poli, které je dáno spojitou funkcí prostoru (x, y, z) a času (τ) . (19)

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

Teplotní pole takto definované nám představuje prostor, kde každému bodu v každém okamžiku (x, y, z, τ) přísluší určitá teplota t [K či °C]. Jestliže teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času (τ) , hovoříme o teplotním poli nestacionárním a je dáno funkcí dle rovnice (4). Nebo se časem nemění, pak jej nazýváme stacionární a píšeme:

$$t = t\left(x, y, z, \frac{\partial t}{\partial \tau}\right) = 0 \quad (5).$$

Jednotlivé body v prostoru mají vždy určitou teplotu a geometrická místa bodů o stejné teplotě nám v prostoru vytvářejí plochy s konstantní teplotou, které mohou být obecně uzavřené nebo končí na okrajích soustavy. (19)

4.1.3 Gradient teploty

Nechť je stacionární teplotní pole dáno skalární funkcí:

$$t = t(x, y, z) \quad (6).$$

Stanovme nyní změnu funkce dt v ortogonálních souřadnicích (pravoúhlého souřadného systému) při posuvu z bodu L , který je definován souřadnicemi x, y, z , resp. polohovým

vektorem \vec{r} do soumezného bodu L' se souřadnicemi: $x + dx, y + dy, z + dz$, resp. vektoru $\vec{r} + d\vec{r}$.

Vektor elementárního posunutí můžeme vyjádřit vektorem:

$$d\vec{r} = \vec{i} dx + \vec{j} dy + \vec{k} dz \quad (7).$$

Pro změnu funkce $t(x, y, z)$ platí až na veličiny vyšších řádů vztah:

$$dt = \frac{\partial t}{\partial x} dx + \frac{\partial t}{\partial y} dy + \frac{\partial t}{\partial z} dz \quad (8).$$

Změnu funkce (t) můžeme také dostat jako skalární součin vektorů:

$$\vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} dz \quad \text{a} \quad d\vec{r} = \vec{i} dx + \vec{j} dy + \vec{k} dz \quad (9)$$

potom tedy:

$$dt = \left(\vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} dz \right) \cdot \left(\vec{i} dx + \vec{j} dy + \vec{k} dz \right) \quad (10).$$

Vektor:

$$\vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} = \text{grad}(t) \quad (11)$$

označujeme jako $\text{grad}(t) = \nabla t$.

Symbolem ∇ (nabla) označujeme tedy výraz:

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (12)$$

a můžeme, ho považovat za diferenciální operátor, při jehož použití na skalární funkci (t) dostáváme gradient (t). Můžeme tedy psát:

$$dt = \text{grad}(t) \cdot d\vec{r} \quad (13). (19)$$

4.1.4 Určení směru gradientu teploty

Zvolme diferenciální posunutí $d\vec{r}_o$ tak, aby leželo v tangenciální rovině k ekvipotenciální ploše. V tomto případě podle difference ekvipotenciální plochy platí:

$$dt = \text{grad}(t) \cdot d\vec{r}_o = 0 \quad (14).$$

Protože $d\vec{r}_o$ a $\text{grad}(t)$ jsou vektory od nuly různé, musí být vektor $\text{grad}(t)$ kolmý na ekvipotenciální plochu.

Dále z difference skalárního součinu vyplývá, že změna (dt) při stejné hodnotě $\left(d\vec{r}\right)$ dosáhne své maximální hodnoty tehdy, když vektor $\left(d\vec{r}\right)$ a $\text{grad}(t)$ mají stejný směr anebo jinak, směr vektoru $\text{grad}(t)$ určuje směr a velikost největší změny funkce t (odtud název gradient).

Označíme-li jednotkový vektor ve směru normály k ekviskalární ploše jako \vec{K}_n , potom můžeme psát:

$$\text{grad}(t) = \frac{\partial t}{\partial n} \vec{K}_n \quad (15).$$

Absolutní hodnotu gradientu určíme z rovnice:

$$|\text{grad } t|^2 = \left| \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \right| \cdot \left| \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \right| \quad (16)$$

a tedy:

$$|\text{grad } t| = \sqrt{\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z}\right)^2} \quad (17). (19)$$

4.1.5 Napětí teplotního pole

Napětí teplotního pole je definováno je definováno vektorem napětí podle následující rovnice:

$$\vec{E} = -\text{grad } t = -\nabla t = -\left(\vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z}\right) \quad (18).$$

Nutnou podmínkou pro sdílení tepla je existence teplotního gradientu, přičemž směr sdílení tepla je shodný se směrem napětí teplotního pole v daném místě.

4.1.6 Tepelný tok a hustota tepelného toku

Množství tepla Q , které projde plochou S za jednotku času τ , nazýváme tepelný tok \dot{Q} .

$$\dot{Q} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{Q}{\tau} = \frac{dQ}{d\tau} \quad (19)$$

Vztáhneme-li tepelný tok \dot{Q} na jednotku plochy S , dostaneme hustotu tepelného toku q .

$$q = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{d\dot{Q}}{dS} \quad (20).$$

Hustota tepelného toku je tedy množství tepla vyměněné na jednotce plochy za časovou jednotku. Rozměr hustoty tepelného toku vyjádřený v základních jednotkách je $(\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$. Ale běžně jsou v praxi používány jednotky násobné $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$.

Velikost tepelného toku vedením je definována Fourierovým zákonem tepelné vodivosti:

$$dq = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (21),$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti. Znaménko minus vyjadřuje směr tepelného toku do prostoru s nižší teplotou. Tepelná vodivost má jednotku $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}]$ (1 watt je výkon, při němž se vykoná práce 1 joulu za 1 sekundu), v technické praxi se užívá v jednotkách $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hod}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$.

Lze odvodit diferenciální rovnici vedení tepla nepohyblivým prostředím, která se nazývá rovnicí Fourierovou:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (22),$$

kde součinitel a je roven:

$$a = \frac{\tau}{c_p \cdot \rho} \quad (23),$$

kde c_p je měrné teplo [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$] (měrná tepelná kapacita - je množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 teplotní stupeň) a ρ [kg.m^{-3}] je hustota příslušné látky.

Za ustáleného vedení tepla je člen na levé straně diferenciální rovnice vyjadřující vliv času roven nule.

Tepelná vodivost tuhých látek se vzájemně liší v širokém rozmezí. Tepelná vodivost je závislá na chemickém složení látek, vyjadřuje charakteristickou fyzikální vlastnost každé látky.

Tepelná vodivost tuhých látek je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou se zvyšuje, naopak u většiny kapalin je tomu naopak. Závislost tepelné vodivosti na teplotě je přibližně přímková a bývá vyjádřena rovnicí:

$$\lambda = \lambda_o(1 + \alpha \cdot t) \quad (24),$$

kde λ [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$] je tepelná vodivost při teplotě t °C a λ_o je tepelná vodivost při standardní teplotě 0 °C a α je teplotní součinitel.

4.1.7 Obecná rovnice sdílení tepla vedením

Základní zákon pro sdílení tepla vedením je definován rovnicí:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla t \quad (25)$$

Konstanta úměrnosti λ [$\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$] se nazývá součinitel tepelné vodivosti.

Tento zákon byl odvozen z empirického poznatku, že množství tepla, které se převede mezi dvěma rovnoběžnými deskami o různé teplotě, které jsou ve vzdálenosti dl , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. (19)

4.1.8 Obecná rovnice sdílení tepla vedením – výpočet průběhu teplotního pole

Rovnici (25) lze použít k výpočtu tepelného toku, ale nelze ji použít k výpočtu průběhu teplotního pole. V tomto případě je nutno použít vztahů, které odvodíme z energetické bilance elementárního objemu. Při odvozování rovnice budeme předpokládat, že se děje zú-

částní elementární hranol o stranách dx , dy , dz , orientovaný svými stranami v pravouhlém souřadném systému x , y , z . Přepokládejme, že prostředí elementu je izotropní o konstantní hustotě ρ , tepelné vodivosti λ a měrném teple c_p . Odvození provedeme pro nestacionární systém a za předpokladu, že v uvažovaném objemu jsou tepelné zdroje, jejichž celkový měrný výkon je w . (19)

Vzhledem k tomu, že se jedná o nehybný element a také proto, že v běžných problémech sdílení tepla jsou v obecné rovnici energetické bilance významné pouze výrazy pro sdílení tepla a členy vnitřní energie, budeme uvažovat bilanci pouze těchto členů. (19)

Bilanci provedeme podle slovní rovnice:

$$\text{Přivedené teplo} + \text{vnitřní zdroje} = \text{odvedené teplo} + \text{akumulace} \quad (26).$$

Při infinitezimálním (nekonečně malém) objemu prostředí ($dV = dx dy dz$) se v něm za časový interval $d\tau$ akumuluje množství energie dQ :

$$dQ = \rho \cdot dV \cdot \frac{du}{d\tau} d\tau \quad (27),$$

kde ρ je hustota prostředí [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}$], a u měrná vnitřní energie [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{J/kg}$], ($\text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{práce}$, kterou koná síla 1 N působící po dráze 1 m). Vzhledem k tomu, že při celkové bilanci se infinitezimální členy vykrátí, nepoužíváme zápisů vyšších řádů pro diferenciál (nekonečně malý přírůstek proměnné veličiny) tepelné energie. Ve směru osy x je přivedené teplo za interval rovno:

$$Q_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (28)$$

a teplo odvedené je rovno:

$$Q_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau = (q_x + dq_x) dy \cdot dz \cdot d\tau = \left[q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right] dy \cdot dz \cdot d\tau \quad (29)$$

a analogicky je to i pro ostatní směry, takže můžeme sestavit bilanční tabulku:

Tab. 6. Bilanční tabulka

Osa	Vstup	Výstup
X	$q_x dy \cdot dz \cdot d\tau$	$\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \right) dy \cdot dz \cdot d\tau$
Y	$q_y dx \cdot dz \cdot d\tau$	$\left(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \right) dx \cdot dz \cdot d\tau$
Z	$q_z dx \cdot dy \cdot d\tau$	$\left(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \right) dx \cdot dy \cdot d\tau$
zdroje = $w \cdot dV \cdot d\tau$		akumulace = $\rho \cdot dV \frac{\partial u}{\partial \tau} d\tau$

Dosadíme-li uvedené vztahy do slovní bilanční rovnice a vykrátíme nenulovým členem $dV \cdot d\tau$, dostaneme:

$$\rho \cdot w = \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial q}{\partial z} + \rho \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (30).$$

Při izobarickém ději (děj při kterém zůstává konstantní tlak a mění se objem a teplota) z termodynamiky plyne:

$$du = c_p \cdot dt - p \cdot \partial \left(\frac{1}{\rho} \right) \quad (31),$$

$$du = c_p \cdot dt - p \cdot dv \quad (32),$$

kde v je měrný objem [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$], (což je převratnou hodnotou měrné hmotnosti, která je definována podílem hmotnosti a objemu homogenního kovu při určité teplotě) a c_p je již zmiňované měrné teplo při stálém tlaku. Pro nestlačitelné prostředí je ρ , příp. v konstantní a vztahy (31) resp. (32) se zjednoduší na:

$$du = c_p \cdot dt \quad (33).$$

Za hustotu tepelného toku (q) je možné dosadit rovnici (25) a s pomocí vztahu (33) obdržíme:

$$\rho \cdot w + \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = \rho \cdot c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (34),$$

kde jsme předpokládali, že součinitel tepelné vodivosti λ není funkcí teploty.

Pro případ bez tepelných zdrojů lze diferenciální rovnici vedení tepla napsat ve tvaru:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 \cdot t \quad (35),$$

kde jsme zavedli konstantu:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (36),$$

kde a je tedy teplotní vodivost uvažovaného prostředí, symbolem ∇^2 rozumíme Laplaceův diferenciální operátor (je to diferenciální operátor ve vektorové analýze, definovaný jako divergence (rozbíhavost) gradientu daného skalárního, nebo obecně tenzorového pole). Ve vektorovém počtu je divergence diferenciální operátor charakterizující vektorového pole. Je-li např. zkoumaným polem gradientu teploty (vektory necht' udávají např. rychlost vedení tepla), potom kladná divergence v daném bodě znamená, že v daném bodě vzniká teplo, záporná naopak, že v daném místě teplo zaniká. Gradient je diferenciální operátor, jehož výsledkem je vektorové pole vyjadřující směr a velikost největší změny skalárního pole. Při formálním zápisu se používá již zmiňovaný operátor nabla ∇ . Skalární pole je funkce přiřazující skalár v každém bodě prostoru. Skalárem označuje veličinu, která je s ohledem na zvolenou jednotku plně určená jediným číselným údajem. Tenzorovým polem se označuje tenzorová veličina, která je definována v každém bodě zkoumaného prostoru. V každém bodě prostoru je tedy definován určitý tenzor, přičemž řád tohoto tenzoru je v celém uvažovaném prostoru stejný, ale mění se hodnoty jeho složek. Jedná se tedy o skupinu tenzorů nacházejících se v různých bodech prostoru, o nichž tvrdíme, že přísluší jedné veličině. Tenzor je v matematice objekt, který je zobecněním pojmu vektor. Zatímco složky vektoru lze označit jedním indexem, může mít tenzor indexů více.

4.1.9 Podmínky úloh pro vedení tepla v tělesech

Podmínku jednoznačnosti určují:

- geometrické podmínky - charakterizují tvar a rozměry tělesa, ve kterém proces probíhá,
- fyzikální podmínky - charakterizují fyzikální vlastnosti tělesa,
- časové nebo počáteční podmínky - charakterizují rozložení teplot ve vyšetřovaném tělese v počátečním čase,
- okrajové podmínky - charakterizují vzájemné působení vyšetřovaného tělesa s obklopujícím prostředím. (19)

Geometrickými podmínkami se určí tvar a délkové rozměry tělesa, ve kterém proces vedení tepla probíhá. (19)

Fyzikálními podmínkami se určí fyzikální parametry tělesa (např. λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$] - součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti – viz. rovnice (36), ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] - hustota, měrná tepla – měrná tepelná kapacita - c_p [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$], součinitel přestupu tepla – α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$], a může být dán způsob rozdělení vnitřních zdrojů tepla).

Počáteční podmínky jsou nevyhnutelné při vyšetřování nestacionárních procesů a jsou obsaženy v podmínkách zákona rozložení teploty uvnitř tělesa v počátečním časovém okamžiku. (19)

Obecně počáteční podmínky mohou být vyjádřeny následujícím vztahem:

$$\text{při } \tau = 0 \text{ je : } t = t(x, y, z) \quad (37). (19)$$

Při podmínce rovnoměrného rozdělení teploty v tělese mohou být počáteční podmínky zapsány ve tvaru:

$$\text{při } \tau = 0 \text{ je : } t = t_0 = \textit{konst.} \quad (38). (19)$$

Okrajové podmínky mohou být zadány několika způsoby:

- Okrajové podmínky prvního druhu – určují rozdělení teploty na povrchu tělesa v každém časovém okamžiku:

$$t_s = t(x, y, z, \tau) \quad (39),$$

kde t_s je povrchová teplota tělesa a (x, y, z) jsou souřadnice povrchu tělesa. (19)

V případě, že teplota na povrchu tělesa je stálá v čase τ při průtoku tepla, pak rovnice (39) se zjednoduší a nabývá tvaru:

$$t_s = konst. \quad (39). (19)$$

- Okrajové podmínky druhého – určují podmínky tepelného toku v jednotlivých bodech tělesa v libovolném okamžiku. Toto tvrzení můžeme zapsat rovnicí:

$$q_s = q(x, y, z, \tau) \quad (40),$$

kde q_s je hustota tepelného toku na povrchu tělesa a (x, y, z) jsou souřadnice povrchu tělesa. (19)

V jednoduchém případě (stacionární tok) tepelný tok povrchu v čase zůstává konstantní, pak platí:

$$q = q_o = konst. \quad (41). (19)$$

- Okrajová podmínka třetího druhu – je zadána teplota obklopujícího prostředí t_o a zákon výměny tepla mezi povrchem tělesa a obklopujícím prostředím. Okrajová podmínka třetího druhu charakterizuje zákon výměny tepla mezi povrchem a obklopujícím prostředím v procesu ochlazování nebo ohřívání tělesa. Tento stav je popsán Newtonovým zákonem. (19)

Proces výměny tepla mezi povrchem tělesa a prostředím obklopujícím toto je složitý a závisí na mnoha veličinách. V souladu se zákonem Newtonovým je množství tepla procházejícího jednotkou plochy tělesa za jednotku času přímo úměrné rozdílu teplot povrchu tělesa (t_s) a prostředí (t_o), $(t_s - t_o)$ platí:

$$q = \alpha(t_s - t_o) \quad (42),$$

kde α – koeficient úměrnosti se nazývá součinitel přestupu tepla [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]. (19)

Součinitel přestupu tepla přitom charakterizuje intenzivnost výměny tepla mezi povrchem tělesa a jeho prostředím.

V souladu se zákonem o zachování energie je množství tepla, které se odvede jednotkou povrchu za jednotku času v průběhu přestupu tepla rovno teplu přivedenému k jednotce povrchu za jednotku času v průběhu vedení tepla z vnitřních částí tělesa, tj.:

$$\alpha(t_s - t_o) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_s \quad (43),$$

kde \underline{n} je normála k povrchu tělesa. (19)

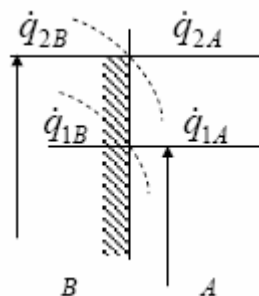
Okrajové podmínky třetího řádu je tedy možné zapsat ve tvaru:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_s = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_s - t_o) \quad (44). (19)$$

- Okrajové podmínky čtvrtého řádu – charakterizují podmínky vedení tepla systémem těles. Budeme předpokládat, že mezi tělesy existuje ideální kontakt (teploty stýkajících se povrchů jsou stejné).

Ve zkoumaných podmínkách bude tepelný tok jednotlivými povrchy těles konstantní a tedy:

$$\frac{q_{1A}}{q_{1B}} = \frac{q_{2A}}{q_{2B}} = konst. \quad (45).$$



Obr. 25. Okrajová podmínka čtvrtého druhu

4.2 Energetická bilance při laserovém obrábění polymerních materiálů

Energetická bilance při laserovém obrábění polymerů je popsána následující rovnicí:

$$E_A + H_r = E_{S \rightarrow m} + \Delta H_m + E_{l \rightarrow v} + \Delta H_v + E_c + E_{rad} \quad (46),$$

kde E_A je energie absorbovaná materiálem [J], H_r je energie vzniklá chemickými reakcemi [J], ΔH_m je energie potřebná pro změnu na taveninu [J], $E_{l \rightarrow v}$ je energie potřebná pro zahřátí taveniny na teplotu varu (vypařování) [J], ΔH_v je energie potřebná pro vypaření veškeré taveniny [J], E_c jsou tepelné ztráty kondukcí (vedením) [J], E_{rad} jsou tepelné ztráty radiací (sáláním do okolí) [J] a $E_{s \rightarrow m}$ je energie potřebná k ohřátí na teplotu tavení [J]. (13)

5 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části diplomové práce byla zpracována rešerše, z předem stanovených témat a oblastí, a z jejího teoretického základu se bude čerpat a vycházet v praktické části této práce, jejíž cíle jsou vzhled k zadání následující:

1. Obrábění vzorků z různých polymerních materiálů při konstantních technologických parametrech (výkonu, posuvu).
2. Vyhodnocení obrobených drážek za účelem stanovení obrobitelnosti těchto materiálů.
3. Sestavení reálného modelu pro přestup tepla, který respektuje změnu fyzikálních vlastností a chování materiálu při zahřívání. Provedení simulace přestupu tepla pro jednotlivé materiály za použití software COSMOS/M.
4. Provedení závěrečného vyhodnocení výsledků simulace teplotního pole a posouzení možnosti vzniku strukturálních změn při laserovém mikroobrábění polymerních materiálů.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

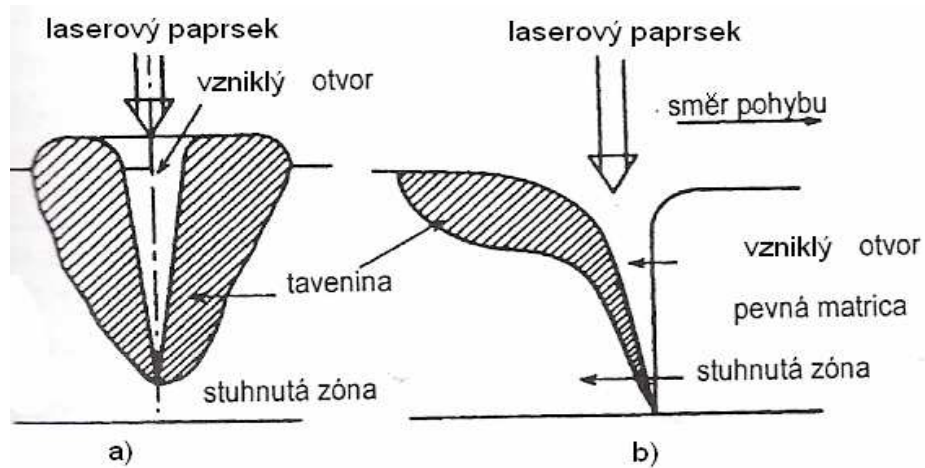
6 INTERAKCE (VZÁJEMNÉ PŮSOBENÍ) POLYMERNÍCH MATERIÁLU S LASEREM

Záření generované laserem, které není odraženo, nebo neprojde materiálem bez účinku, se absorbuje do obráběného materiálu. Výsledkem je zvýšení kmitavé energie molekul, což vede k ohřátí látky (materiálu). Ohřátí je lokálního charakteru a dochází tedy k pouze k ohřátí malého objemu materiálu na tavnou, vypařovací nebo sublimační teplotu (teplotu, při které se pevná látka mění na plyn bez průchodu kapalnou fází).

Nejdůležitější faktory pro použití laserového paprsku jsou následující:

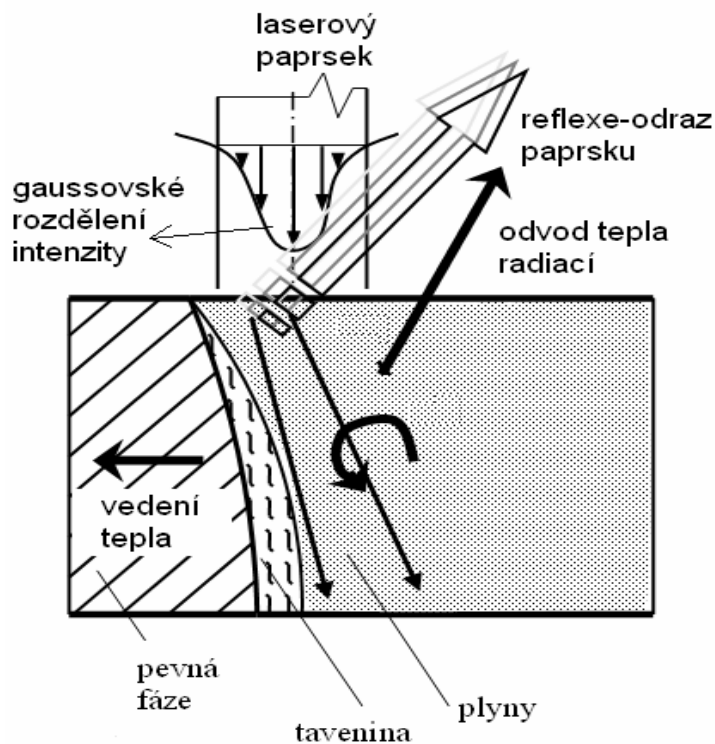
- reflexe (odrazivost povrchu)
- absorpce (pohlcování) laserového záření
- tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]
- tavení povrchové vrstvy
- odpařování

Působením intenzivního fokusovaného laserového paprsku na materiál dochází tedy k jeho natavení. Průřez natavené vrstvy je znázorněn na obr. 26. 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 přemísťovaná a vytlačovaná ze vznikajícího otvoru tlakem páry. V místě dopadu paprsku se vlivem toho vytváří malý otvor a laserový paprsek může pronikat hlouběji do otvoru. Příčný řez na obr. 26 a) ukazuje, že roztavený materiál je vytlačován na obě strany. V podélném řezu na obr. 26 b) je materiál tlačенý dozadu za pohybující se paprsek. (5)



Obr. 26. Chování materiálu při působení laserového paprsku (5)

Na Obr. 27 můžeme vidět procesy, které probíhají při řezání materiálu laserem. Laserový paprsek, jak již bylo řečeno, je z části odražen a z části se absorbuje do materiálu. Teplo vzniklé v řezu se z části odvádí do materiálu vedením, ale vzhledem k malé tepelné vodivosti převažuje u polymerů odvod tepla radiací do okolního prostředí.



Obr. 27. Procesy probíhající při řezání materiálu laserem

6.1.1 Odrazivost

Odrazivost laserového záření od povrchů polymerních materiálů je na rozdíl od kovových materiálů, u kterých je velmi vysoká, celkem nízká. Její velikost záleží samozřejmě na druhu daného polymeru. Většinou se odrazivost zvyšuje se zvyšováním vlnové délky světelného záření. Odrazivost povrchu se dá snížit např. zdrsněním povrchu, či vytvořením krycí povrchové vrstvy. Se zvyšováním teploty povrchu odrazivost klesá a dosahuje minimální hodnoty až při teplotě tavení daného materiálu.

Odrazivost a absorpce jsou komplexní jevy a jejich vzájemné působení je následující:

$$\text{odrazivost} + \text{absorpce} = 100\% \quad (48).$$

6.1.2 Absorpce (pohlcování) laserového záření polymery

Polymery jsou makromolekulární látky, obsahují dlouhé řetězce s opakujícími se skupinami, které jsou spojené vazbami. Polymerní řetězec se nejčastěji skládá z C, O, H, N, Si. Každá vazba je schopna pohltit jiné množství energie. Na absorpci má největší vliv spektrální složení působícího záření a složení polymeru (typ chemických skupin vázaných v polymeru).

Každá z vazeb absorbuje energii při jisté vlnové délce, proto tedy rozlišujeme:

- povrchovou absorpci – při ní vniká záření jen do malé hloubky. Používá se zejména pro dělení materiálů. Právě pro vlnovou délku kolem 10 μm , kterou generuje CO_2 laser vykazuje vazba C-C, která nejčastější z polymerních vazeb maximum absorpce. Podmínka povrchové absorpce je formulována následujícím vztahem:

$$\frac{1}{\alpha_1} \ll s \quad (48),$$

kde α_1 je absorpční koeficient [m^{-1}] a s je tloušťka materiálu [m]. Vztah (48), tak vyjadřuje, že k povrchové absorpci dojde, jestliže k pohlcení energie dojde ve vrstvě mnohem užší jak je tloušťka materiálu. Reciproká (převrácená) hodnota absorpčního koeficientu, který je silně závislý na vlnové délce a teplotě, musí být mnohem menší jak tloušťka materiálu.

- objemovou absorpci – zde záření proniká do mnohem hlubších vrstev, přičemž prohřívá větší objem materiálu. Dochází tak spíše k jeho natavení. Tohoto jevu je využíváno zejména při svařování. Pro objemovou absorpci platí vztah:

$$\frac{1}{\alpha_1} > s \quad (49).$$

Jev objemové absorpce nastává nejčastěji u Nd:YAG laserů generujících záření o vlnové délce 1,06 μm .

6.1.3 Vlivy na odpařování materiálu

Na proces vypařování má největší vliv výstupní výkon laseru. Mezi důležité aspekty interakce materiálu s laserovým zářením ovšem patří další parametry laseru, jako jsou např.: frekvence pulzů, počet pulzů, šířka pulzu, počet opakování, úhel dopadu, posuv laserového svazku.

6.1.4 Vlastnosti polymerů ovlivňující intenzitu a druh účinku laserového paprsku

Intenzitu a druh účinků laserového paprsku na polymerní materiál silně ovlivňují jeho vlastnosti: čistota materiálu, použité přísady (stabilizátory, pigmenty, antioxydanty, retardéry hoření atd.), bod tání materiálu, jeho chemické složení, povrchová reflexe (odrazivost), objemová absorpce, objemový rozptyl, tloušťka materiálu, fyzikální vlastnosti materiálu, hustota absorbované energie v závislosti na čase, teplotně-mechanické změny v materiálu (tavení, štěpení částic, vypařování).

6.1.5 Hloubka proniknutí záření laseru do materiálu

Hloubku proniknutí záření do materiálu (R) popisuje následující rovnice:

$$R = 29000 \sqrt{\frac{\lambda_1}{\mu_r \cdot \gamma}} \quad (47),$$

kde R je hloubka proniknutí záření [μm], λ_1 je vlnová délka záření laseru [μm], μ_r je relativní permeabilita materiálu (fyzikální veličina, udávající míru magnetizace v důsledku působícího magnetického pole) [NA^{-2}] a γ je elektrická konduktivita materiálu (fyzikální veličina, která popisuje schopnost látky vést elektrický proud) [Sm^{-1}], kde S použité v jednotce konduktivity je obsah kolmého průřezu.

6.2 Strukturní změny polymerů způsobené vlivem energie laserové paprsku

Záření o vysoké energii vyvolává také nejrůznější strukturní změny plastů. Může dojít k vytvoření příčných chemických vazeb v polymeru nebo také ke štěpení základních řetězců na nízkomolekulární produkty či nízkomolekulární zplodiny (příčemž dochází ke změně chemického složení), popř. až na monomerní jednotky, aniž se změní jejich chemické složení (depolymerují). U materiálů s menší absorpcí proniká záření méně do materiálu což má za následek ohřívání vrstvy materiálu pod povrchem a následkem tohoto podpovrchového přehřátí může dojít k vytržení velkého objemu materiálu, což je nežádoucím efektem.

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

Tepelnou degradaci jednotlivých polymerů vlivem působení laserové paprsku lze porovnávat sledováním a zkoumáním pomocí pyrolýzy. Pyrolýzou je míněn termický rozklad organických materiálů za nepřístupu médií obsahujících kyslík.

6.3 Mechanismy při řezání polymerních materiálů laserem

Řezný proces polymerních materiálů zahrnuje následující metody (mechanismy) řezání:

- tavné řezání – jedná se o velmi rychlý způsob řezání s poměrně vysokou kvalitou řezu. Při tomhle mechanismu řezání je materiál natavován a převážná část je z řezu vyfouknuta pomocí asistentního plynu (nejčastěji dusík či vzduch). Zároveň asistentní plyn slouží k tvarování tavenina polymeru v řezu. Tento typ řezání je typický pro termoplasty (polypropylén, polystyrén, nylon, polyethylen).
- odpařování (sublimace) – při téhle metodě je vyžadován větší výkon laseru nežli u tavného řezání. Nejdříve dochází k natavení a následnému odpaření materiálu. Plocha řezu je většinou hladká jakoby leštěná. Při průběhu řezání dochází ke změně

fáze materiálu z pevné na kapalnou a následně na páru. Tento typ řezání je typický pro akrylátové polymery (PMMA).

- chemická degradace – tento způsob je typický pro reaktoplasty (pryž, melanin-formaldehydové pryskyřice, polyestery, epoxidové pryskyřice, lamináty na bázi pryskyřic, aj.) ty jsou tvořeny trojrozměrnou zesíťovanou strukturou a jsou tak netavitelné a nerozpustné. Ovšem vlivem vysoké teploty zaznamenávají jednotlivé fáze materiálu chemické změny, jelikož laserová energie láme chemické vazby a integritu materiálu a ten se rozkládá na různé odpadní zplodiny. Opět je zde potřeba vyšší výkon než u první metody.
- pomocí teplotních pnutí - tato metoda je aplikovatelná především u křehkých materiálů. Do materiálu se může vyřezat drážka a vlastní dělení se následně provede mechanickým rozlomením.

Konkrétní mechanismus rozpadu polymeru závisí na pevnosti chemických vazeb monomeru a na struktuře samotného polymeru.

Při řezání kompozitních materiálů se doporučuje výkon laseru volit s ohledem na vlastnosti použitých vláken (skleněné, uhlíkové, aramidové aj.), a ne na vlastnosti matrice. Ovšem vysoký výkon potřebný pro řezání vláken chemicky degraduje hlavně polymernou matrice. Matrice a vlákna mají rozdílné teploty odpařování a tedy i rozdílné časy natažení materiálu. V úvahu je potřeba brát i skutečnost, že tepelná vodivost kompozitních materiálů je anizotropní.

7 MATERIÁLY

Z poznatků získaných v teoretické části práce plyne, že charakter a rozložení teplotního pole polymerů závisí zejména na jejich teplotní vodivosti, která je obecně u polymerů a zejména u termoplastů relativně vysoká (ve srovnání s kovy). Teplotní vodivost je dána vztahem (36) uvedeným v teoretické části práce. Z tohoto vztahu vyplývá, že teplotní vodivost daného materiálu je daná jeho hustotou ρ [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}$], jeho tepelnou vodivostí λ (respektive součinitelem tepelné vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]) a jeho měrným teplem c_p (respektive měrnou tepelnou kapacitou c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]). Jelikož všechny předešlé uvedené vlastnosti jsou závislé na druhu daného materiálu, budeme testovat, konkrétně simulovat (modelovat) teplotní pole u více druhů polymerních materiálů a to u PMMA (Polymethylmethakrylát), PS (Polystyren), POM (Polyoxymethylen), ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu), PA 6 (Polyamid 6), PA 66 (Polyamid 66), PC (Polykarbonát), PTFE (Polytetrafluorethylen), PP (Polypropylen), PVC (Polyvinylchlorid). Je nutné také podotknout, že vlastnosti jednoho typu polymeru se mohou více či méně lišit podle konkrétního druhu vyrobeného jednotlivými výrobci v rámci různých výrobních podmínek. Podrobnější informace o použitých materiálech jako např. jejich výroba, vlastnosti, zpracování, vhodnost pro použití atd. uvádí teoretická část práce, konkrétně kapitola (1. 2).

8 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PŘI EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE

8.1 CO₂ laser MERCURY L-30

Pro obrábění, konkrétně pro zhotovení drážek, do zadaných typů polymerních materiálů byl použit již zmiňovaný komerční CO₂ laser Mercury L-30 firmy LaserPro, USA. Obrábění bylo provedeno ve firmě Mechanika Prostějov. Tento typ laseru byl zvolen pro jeho dostupnost, výkon postačující našim potřebám a hlavně ochotu firmy Mechaniky Prostějov poskytnout ho k našim potřebám. Výkon (který se nastavuje v %) a posuv laserového systému lze měnit podle potřeby. Paprsek laseru je možné fokusovat automaticky a také se fokusace většinou provádí automaticky a to na průměr paprsku $d = 185 \mu\text{m}$. Maximální hodnota hustoty energetického toku dosahované daným typem laseru je $q_1 = 1,1 \text{ GWm}^{-2}$. Laser pracuje za pomoci softwarů Corel Draw či AutoCad, které řídí pohyb popisovací hlavy. Laser pracuje stejně jako ostatní CO₂ v kontinuálním režimu. V možnostech laseru MERCURY L-30 je schopnost popisovat, gravitovat širokou škálu materiálů, jako jsou např.: plasty, pryž, kůže, sklo, povlakované kovy, kámen, dřevo a keramika. Tento typ laseru je určen a ve zmiňované firmě především ke komerčnímu gravírování.

Laser CO₂ MERCURY je tedy vybaven již zmiňovanou popisovací hlavou, dále posuvy v osách x a y, bodovou červenou laserovou diodou (sloužící pro nastavení přesné pozice místa obrábění), LCD displejem potřebného k navolení času obrábění, přesné pozice, výstupního výkonu a dalších parametrů. Mezi volitelné položky patří rotační přípravek, dvojité laserové hlavy, řezací podložka, vzduchový filtr a odsávání. Pracovní prostředí laseru by mělo být čisté, bezprašné a teplota pracovní místnosti by se měla pohybovat v rozmezí 15 - 20°C s 30% - 40% vlhkostí vzduchu.

Laser CO₂ MERCURY je znázorněn na obr. 28 a jeho základní technické parametry jsou uvedeny v tabulce 7.

Obr. 28. CO₂ laser MERCURY L-30Tab. 7. Základní technické parametry CO₂ laseru MERCURY L-30

Výkon laseru [W]	30
Typ laseru	CO ₂ laser
Maximální pracovní plocha (š x h x d), přední a zadní dvířka zavřena [mm]	800 x 570 x 165
Velikost pracovního stolu [mm]	790 x 530
Celkové vnější rozměry (š x h x d) [mm]	1125 x 720 x 1005
Pohon v osách x, y (posuv laserové hlavy)	DC servo
Řízení rychlosti posuvu [mms ⁻¹]	Nastavitelné od 1 do 1066
Řízení výkonu laseru [W]	Nastavitelné od 1 do 30
Nastavení osy Z (nastavení ohniskové vzdálenosti) [mm]	Automatické, v rozmezí 250
Rozlišení – krok posuvu laserového paprsku (DPI)	1000, 600, 500, 300, 250, 200
Ovládací panel	Čtyřřádkový LCD display
Chlazení	Vzduchové/vodní
Příkon [W]	900
Dodavatel	Firma LaserPro, rok výroby 1998

8.2 Konečněprvkový software COSMOS/M

COSMOS/M je moderní výpočetní systém od firmy SRAC (Structural Research and Analysis Corporation), USA pro řešení rozsáhlých úloh v oboru technických analýz založený na metodě konečných prvků - MKP. COSMOS/M přichází se zcela novým pojetím technických analýz speciálně zaměřených na platformu PC. Oproti jiným programům neprocházel systém COSMOS/M postupným vývojem složitými výpočetními algoritmy, ale byl od základů napsán podle nejnovějších poznatků z oblasti algebry a zpracování rozsáhlých databází. Výsledkem je špičkový analytický výpočetní systém, který nemá v poměru cena/výkon konkurenci, o čemž vypovídá i fakt, že COSMOS/M je v současnosti nejprodávanějším analytickým systémem pod operačním systémem Windows.

Modulární stavba systému COSMOS/M dovoluje investovat do nákupu jen nezbytně nutné prostředky, protože v případě potřeby řešení dalších fyzikálních problémů je možné instalaci pouze rozšířit, bez ztráty počáteční investice. Zde jsou uvedeny základní moduly softwaru COSMOS/M:

- GEOSTAR - pre a post-processor, 2D/3D geometrický modelář.
- STATICS - lineární statika, kontakt, řešení sestav.
- DYNAMICS - výpočet vlastních frekvencí a stability.
- THERMAL - stacionární a nestacionární teplotní pole včetně teplotní závislosti materiálů.
- ASTAR - odezva na vnější buzení se zahrnutím tlumení obsahující nestacionární analýzu, spektrum odezvy, generaci spektra odezvy, náhodné kmitání, stacionární harmonickou analýzu, transformaci křivek popisující buzení.
- NSTAR - nelineární statická a dynamická analýza, materiálové a geometrické nelinearity, plasticita, hyper a viskoelasticita, creep, nelineární stabilita, nelineární kontakt.
- FSTAR - únavy a životnost.
- OPSTAR - optimalizace a citlivostní analýza.

Rychlé řešiče systému COSMOS/M umožňují tedy počítat na běžných PC reálné úlohy nejenom z oblasti lineární statiky, vlastních frekvencí, stability a stacionárních i nestacio-

nárních teplotních polí, ale i odezvu na vnější buzení, kontaktní úlohy, geometrické a materiálové nelinearity a únavu.

Program COSMOSM tedy nejenom že splňuje, ale dokonce i určuje kritéria kladená na moderní software sloužící nejenom konstruktérům při jejich práci. Bez přesné a rychlé analýzy, kterou COSMOS/M poskytuje, nelze v současnosti dosáhnout konkurenceschopnosti.

8.2.1 Metoda konečných prvků – MKP (The Finite Element Method – FEM)

Metoda konečných prvků - MKP představuje moderní, vysoce efektivní numerickou metodu pro řešení technických, ale i vědeckých úloh. V současnosti je považována za jednu z neúčinnějších a nejefektivnějších přibližných metod pro řešení problémů popsanych diferenciálními rovnicemi. Metodu konečných prvků navrhl již v roce 1943 Richard Courant, americký matematik německého původu. Ovšem teoretické studium MKP (FEM) začalo až v šedesátých letech, kdy v roce 1968 dokázal jako první konvergenci (sbíhavost) MKP brněnský profesor Miloš Zlámal. Základní myšlenkou této metody je, že se vyšetřované těleso rozdělí se na konečný počet jednotlivých oblastí, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky či čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry a podobně. Poté se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojitých a po částech polynomických (mnohočlenných) funkcí nad již vytvořeným rozdělením na konečný počet jednotlivých oblastí. Potenciální nebo-li polohová energie je druh energie, kterou má každé těleso nacházející se v potenciálovém poli určité síly a podle druhu síly působící na dané těleso lze rozlišit více druhů potenciální energie, např.: gravitační potenciální energie, potenciální energie pružnosti, tlaková potenciální energie, elektrická potenciální energie atd. Spojitá funkce je matematická funkce, jejíž hodnoty se mění plynule, tedy při libovolně malé změně hodnoty x se hodnota $f(x)$ změní libovolně málo. Představa spojitě funkce spočívá ve funkci, jejíž graf lze nakreslit jedním tahem, aniž by se tužka zvedla z papíru. Vhodnou volbou báze (báze je množina vektorů generující vektorový prostor) funkcí lze tuto úlohu převést na řešení soustavy lineárních (rovnice o jedné neznámé, ve které neznámá vystupuje pouze ve první mocnině) či nelineárních algebraických rovnic, jejíž matice je řídká, tj. obsahuje většinou nulové prvky. Řídkost matice snižuje nároky na paměť počítače, počet prováděných aritmetických operací a také

se zvyšuje rychlost prováděných výpočtových operací. Pokud je úloha nelineární, její řešení se většinou převádí na posloupnost lineárních rovnic.

Hlavní výhodou MKP je, že celý výpočtový proces lze na počítačích zcela zautomatizovat. Metoda konečných prvků (nebo také elementů) je v současnosti nejpopulárnější metodou používanou pro numerické modelování okrajových počátečních problémů jak v oblasti mechaniky, tak i pro jevy zaměřené na přenos tepla.

8.3 Optické mikroskopy

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

Pro vizuální zhodnocení obrobených drážek byly pořízeny snímky drážek, vytvořených při různých parametrech obrábění (různém výkonu a posuvu). Pro zhotovení snímků byla použita ruční kamera ProScopeHR. Ovládání tohoto přístroje nebylo složité. Kamera s požadovaným zvětšením se pouze přiložila na zkoumaný vzorek a snímala obraz, který byl přenášen a zobrazován na monitoru počítače. Po zaostření mohla být přímo vytvořena fotografie zvětšeného obrazu drážky. Bylo použito zvětšení 400x.

9 PŘÍPRAVA VZORKŮ

9.1 Obrábění zkušebních vzorků na CO₂ laseru MERCURY L-30

Zkušební vzorky zadaných druhů materiálů ve tvaru kvádro (zhotoveného řezáním) o rozměrech 100x50x20 mm byly umístěny přesně v ose posuvu laserové popisovací hlavy. Hlava laseru přitom konala posuv v ose x a vzorky byly umístěny podélně za sebou (nejdelší strana vzorku byla rovnoběžná s osou y). Požadovaný obráběný tvar, v našem případě drážka, byla nejdříve nakreslena v programu Corel Draw, s kterým daný laser spolupracuje a pomocí něhož je následně řízen pohyb popisovací hlavy. Byly nastaveny parametry obrábění, konkrétně velikost výstupního výkonu laseru a rychlost posuvu. Tyto parametry se postupně měnily a to celkem čtyřikrát. Na každém ze zadaných materiálů byly tedy celkem vytvořeny laserem 4 drážky a každá z nich za jiných parametrů obrábění. Všechny drážky u všech zadaných materiálů byly vytvořeny pouze jedním přejezdem laseru. Jejich šířka tedy odpovídá zhruba průměru fokusovaného laserového paprsku a ten je fokusován na průměr $d = 185 \mu\text{m}$. Konkrétní šířka drážek pro nás není podstatná vzhledem k našemu účelu, kterým je studie (simulace) charakteru teplotního pole vznikajícího při laserovém obrábění různých typů polymerních materiálů, bude postačující znát konkrétní hodnoty hloubky obrobené drážky, velikosti výstupního výkonu a rychlosti posuvu.

V následujících tabulce jsou uvedené kombinace parametrů použitých při obrábění (při tvorbě 4 drážek do každého z daných materiálů) a jsou v ní uvedeny hodnoty výstupního výkonu (P) a posuvu (f) v procentech z maximálního výkonu ($P_{\text{max}} = 30\text{W}$) a maximálního posuvu ($f_{\text{max}} = 1066 \text{ mms}^{-1}$). Hodnoty jsou uváděny v procentech z důvodu toho, že při práci s laserem je to obvyklá praxe, ovládací software laseru pracuje totiž také v procentech z uvedených hodnot.

Tab. 8. Nastavené parametry pro obrábění drážek v [%]

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
Posuv f [%]	50	100	50	100
Výkon laseru P [%]	40	40	80	80

V tabulce 9. jsou uvedeny ty samé kombinace parametrů použitých při obrábění, jako uvádí tabulka 8, pouze jsou v ní hodnoty výkonu a posuvu pro názornost přepočítány na číselnou hodnotu uvedenou v používaných jednotkách pro posuv a výkon.

Tab. 9. Nastavené hodnoty pro obrábění drážek v používaných jednotkách pro posuv a výkon

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
Posuv f [mms^{-1}]	533	1066	533	1066
Výkon laseru P [W]	12	12	24	24

10 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ (HLOUBKY) OBROBENÝCH DRÁŽEK

Postupně byly měřeny hloubky drážek u jednotlivých typů zadaných polymerních materiálů pro jednotlivé kombinace parametrů použitých při obrábění laserem.

Měření bylo provedeno na optickém mikroskopu ZEISS 2772 se zvětšením 117 x. Okraje zkušebních vzorků bylo nutné před měřením začistit broušením. Při broušení ovšem musel být brán ohled na to, aby broušení neovlivnilo hloubku drážek obrobených pomocí laseru. Při vlastním měření pomocí mikroskopu se aktuálně měřený vzorek upevnil pomocí přípravků tak, aby byl ve vodorovné poloze. Poté se optika mikroskopu zaostřila na hranu zkušebního tělesa, aby mohlo dojít k odečtení samotné hloubky aktuálně měřené drážky. Postupně byly změřeny všechny drážky na daném materiálu a poté se stejný postup se opakoval u všech měřených vzorků. Rozměry byly odečteny pomocí mikrometrického posuvu, který je součástí stolu mikroskopu. Každý rozměr byl měřen pětkrát z důvodu vyloučení (lépe řečeno z důvodu minimalizace) chyby měření. V následujících tabulkách budou uvedeny pouze aritmetické průměry z těchto pěti měření.

10.1 Naměřené rozměry (hloubky) obrobených drážek pro jednotlivé typy materiálů

V tabulkách výsledků jsou uvedeny pouze aritmetické průměry z pěti měření hloubky jednotlivých drážek (h) v $[\mu\text{m}]$. Jak již bylo zmiňováno dříve hodnoty výkonu (P) a posuvu (f) pro jednotlivé drážky jsou uvedeny jako procenta z maximálního výkonu ($P_{\text{max}} = 30\text{W}$) a maximálního posuvu ($f_{\text{max}} = 1066 \text{ mms}^{-1}$). Také již bylo řečeno, že hodnoty jsou uváděny v procentech z toho důvodu, že při práci s laserem je to obvyklá praxe, ovládací software laseru pracuje totiž také v procentech z uvedených hodnot. Ovšem pro názornost budou v tabulce také uvedeny přepočítané hodnoty posuvu a výkonu použité pro danou drážku na číselnou hodnotu uvedenou v používaných jednotkách pro posuv a výkon.

Tab. 10. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PA 6 (Polyamid 6)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	53,2	18	144	36

Tab. 11. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PMMA (Polymethylmethakrylát)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	124	26	248	62

Tab. 12. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	100	22	207	87

Tab. 13. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PS (Polystyren)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	78	35	237	70

Tab. 14. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál POM (Polyoxymethylen)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	124	42	210	95

Tab. 15. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PA 66 (Polyamid 66)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	39	12	105	28

Tab. 16. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PC (Polykarbonát)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	36	9	94	25

Tab. 17. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PTFE (Polytetrafluorethylen)

Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	41	9	76	22

Tab. 18. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PP (Polypropylen)

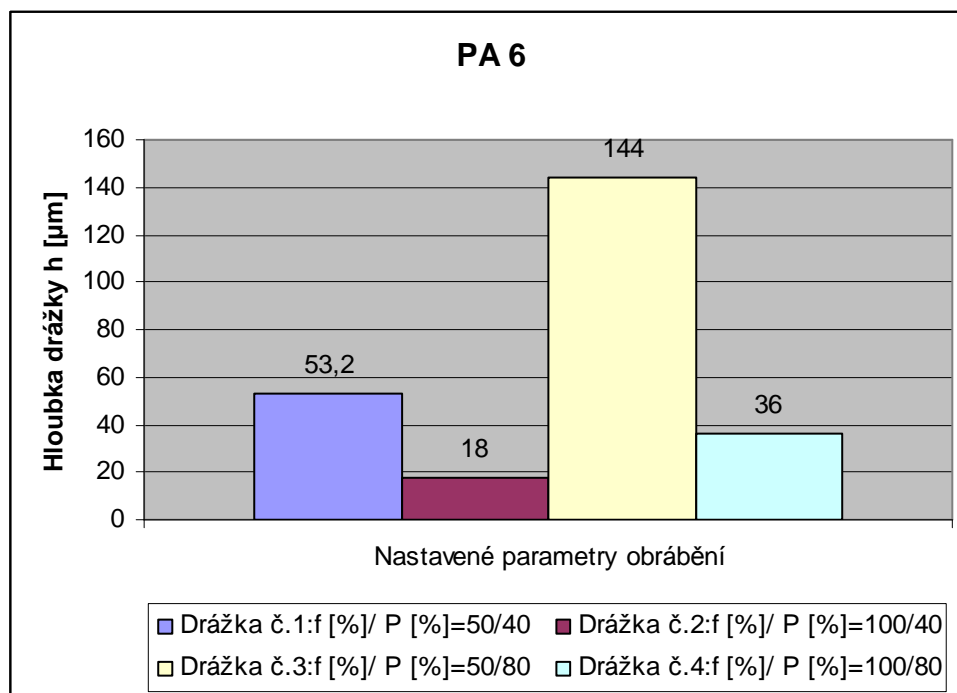
Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	30	11	137	26

Tab. 19. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PVC (Polyvinylchlorid)

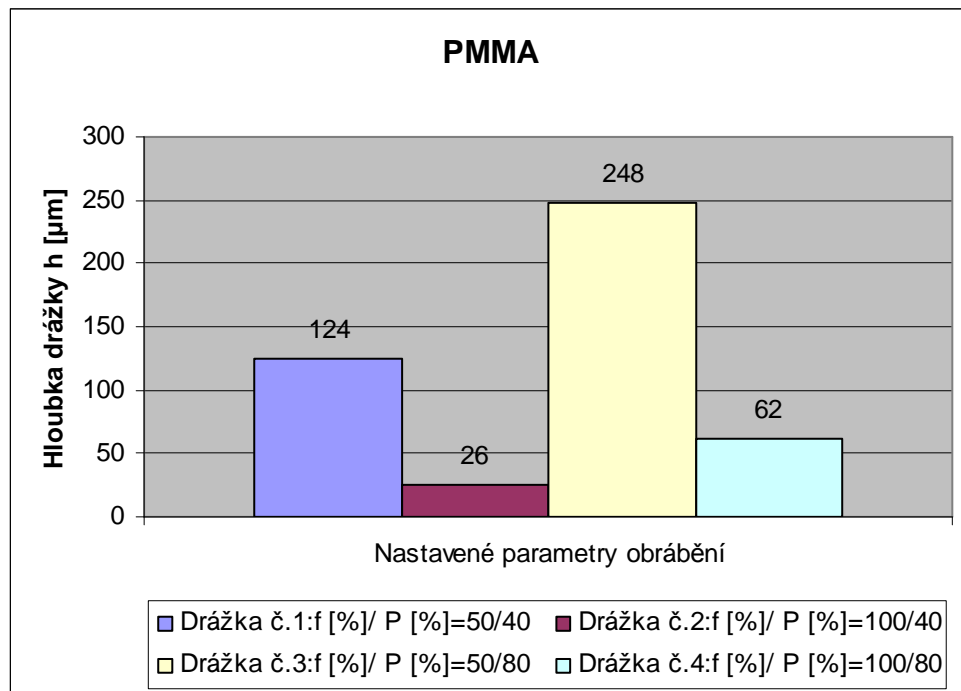
Číslo drážky	1.	2.	3.	4.
f [%]/ P [%]	50/ 40	100/ 40	50/ 80	100/ 80
f [mms^{-1}]/ P [W]	533/ 12	1066/ 12	533/ 24	1066/ 24
h [μm]	57	23	121	29

Hodnoty uvedené v tabulkách jsou v další kapitole pro lepší názornost zpracovány i graficky.

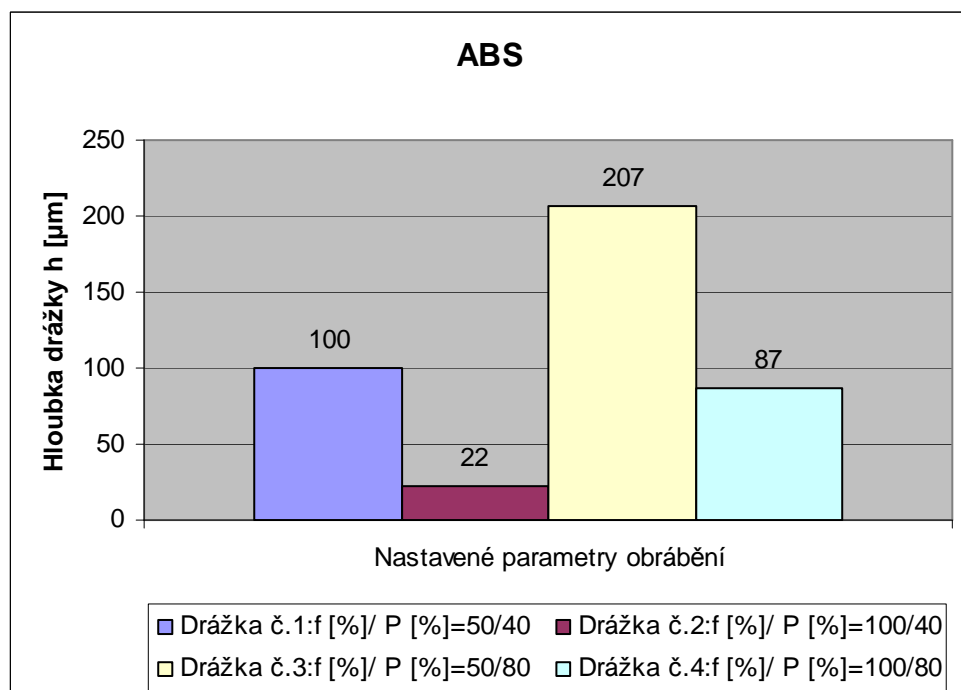
10.2 Grafické znázornění naměřených rozměrů (hloubek) obrobených drážek pro jednotlivé typy materiálů



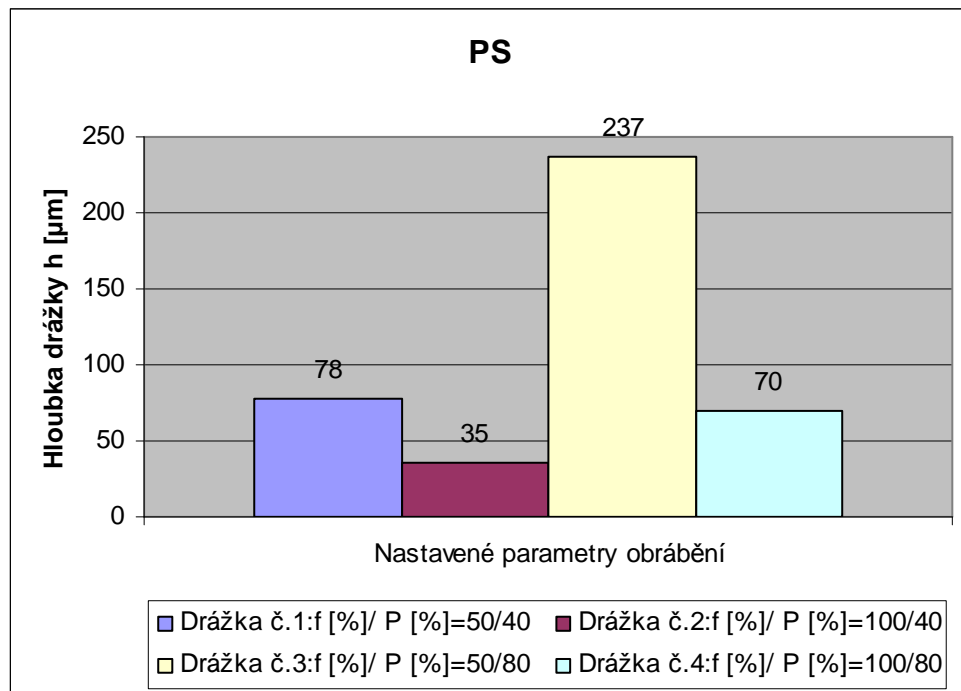
Obr. 29. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PA 6 (Polyamid 6)



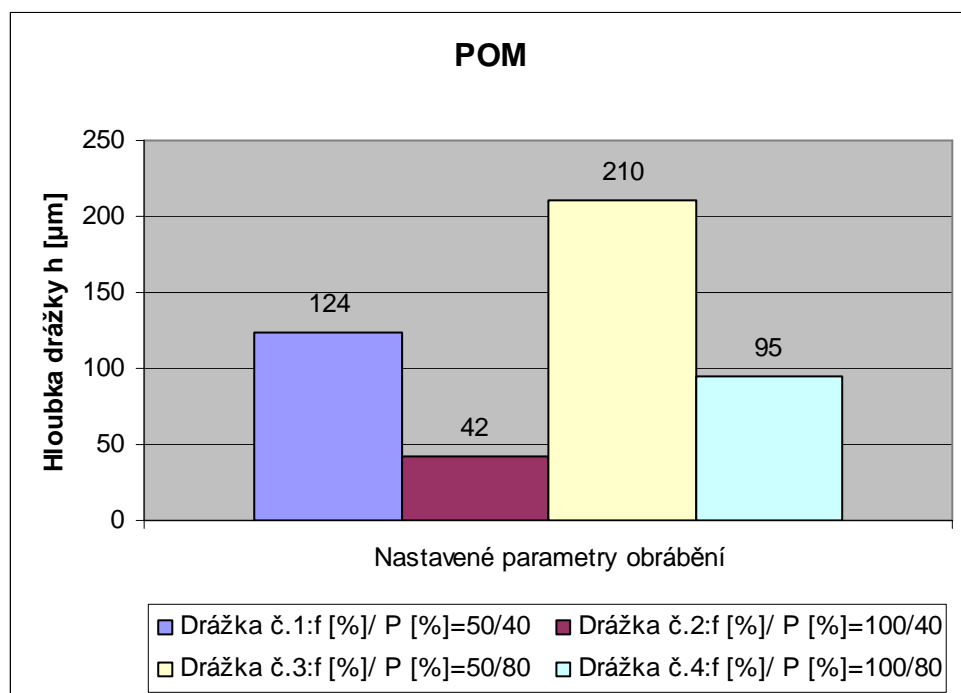
Obr. 30. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PMMA (Polymethylmethakrylát)



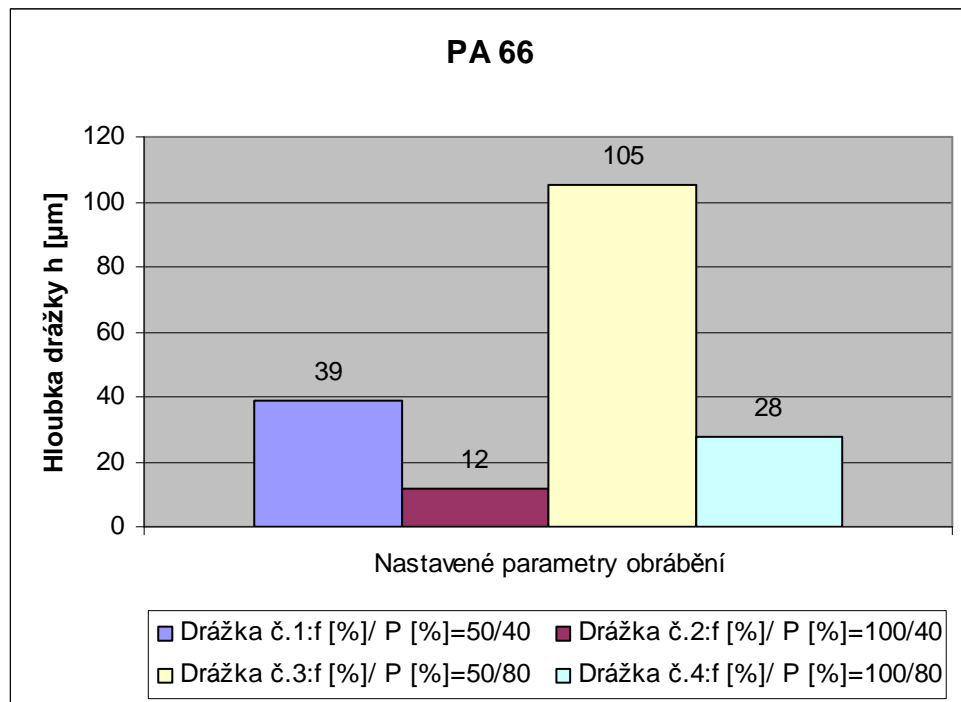
Obr. 31. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu)



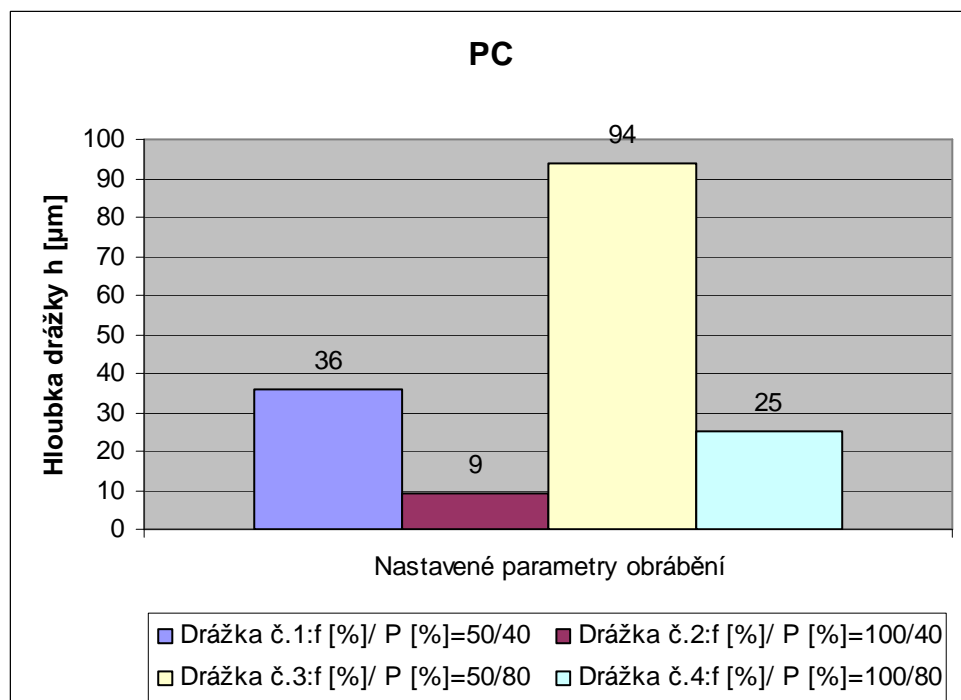
Obr. 32. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PS (Polystyren)



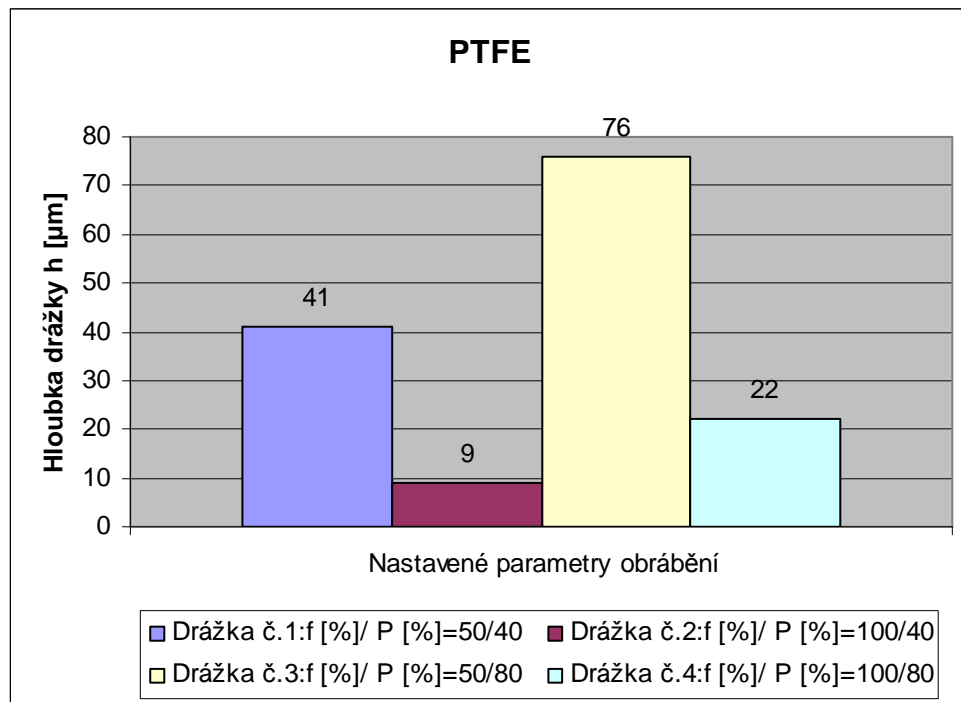
Obr. 33. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál POM (Polyoxymethylen)



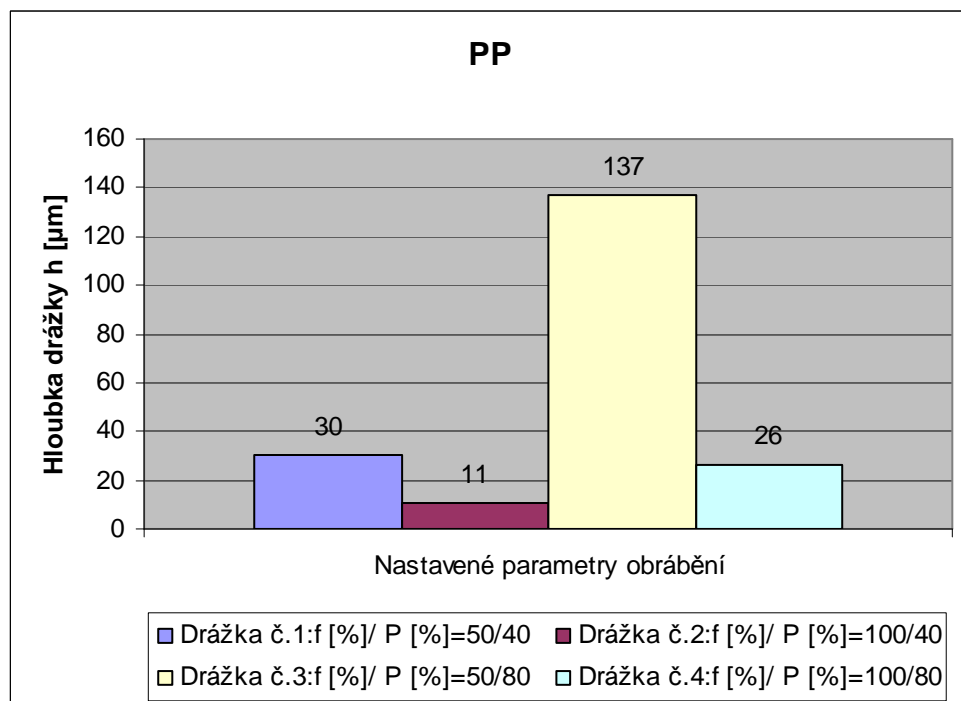
Obr. 34. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PA 66 (Polyamid 66)



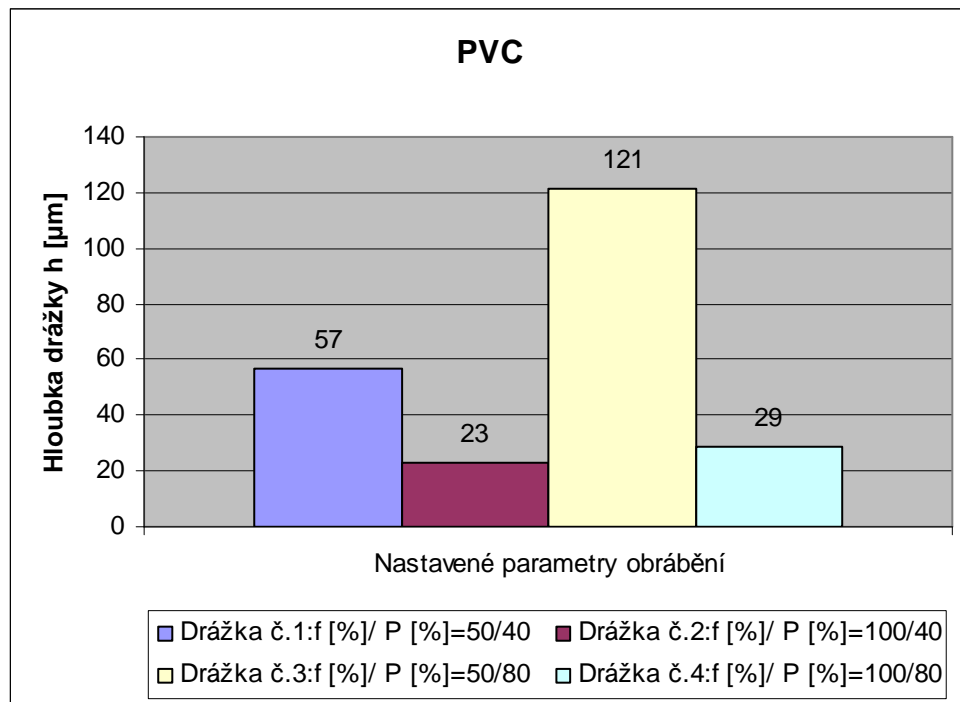
Obr. 35. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PC (Polykarbonát)



Obr. 36. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PTFE (Polytetrafluorethylen)



Obr. 37. Grafické znázornění hloubek obroběných drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PP (Polypropylen)



Obr. 38. Grafické znázornění hloubek obrobeneých drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PVC (Polyvinylchlorid)

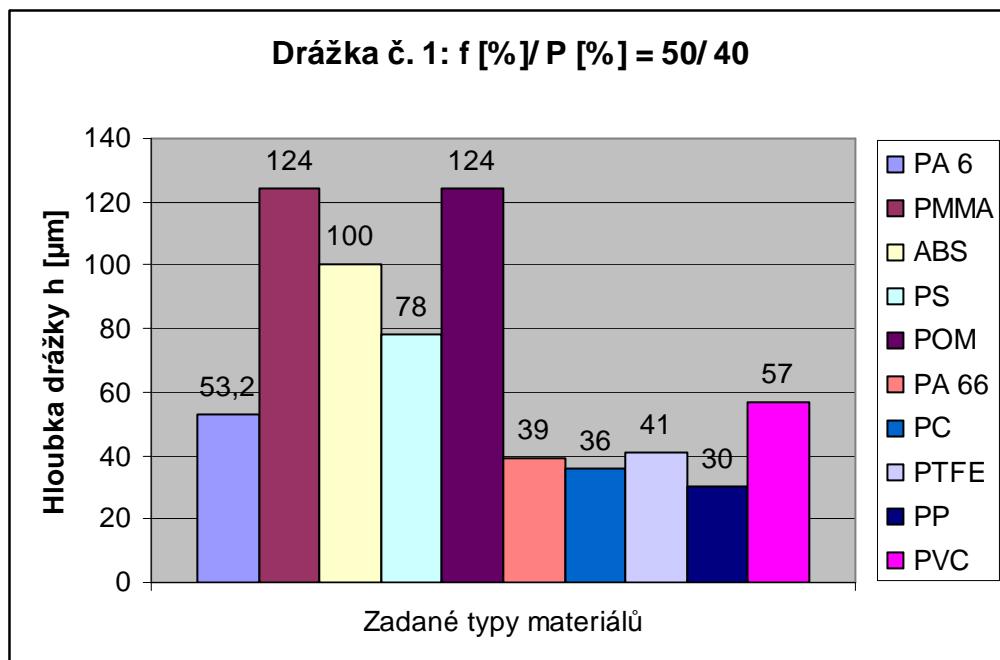
10.3 Porovnání naměřených rozměrů (hloubek) drážek, vytvořených při stejných parametrech obrábění pro různé typy materiálů

V následujících tabulkách budou pro jednotlivé typy materiálů vždy uvedeny hloubky drážky, která je vytvořena u všech materiálu při stejných parametrech obrábění. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty posuvu (f) a výkonu (P) v procentech, ale i přepočítány na číselnou hodnotu uvedenou v používaných jednotkách pro posuv a výkon.

Pod každou tabulkou bude porovnání příslušných hloubek drážek vyrobených za stejných parametrů laseru u zadaných materiálů zobrazeno i graficky.

Tab. 20. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.1, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))

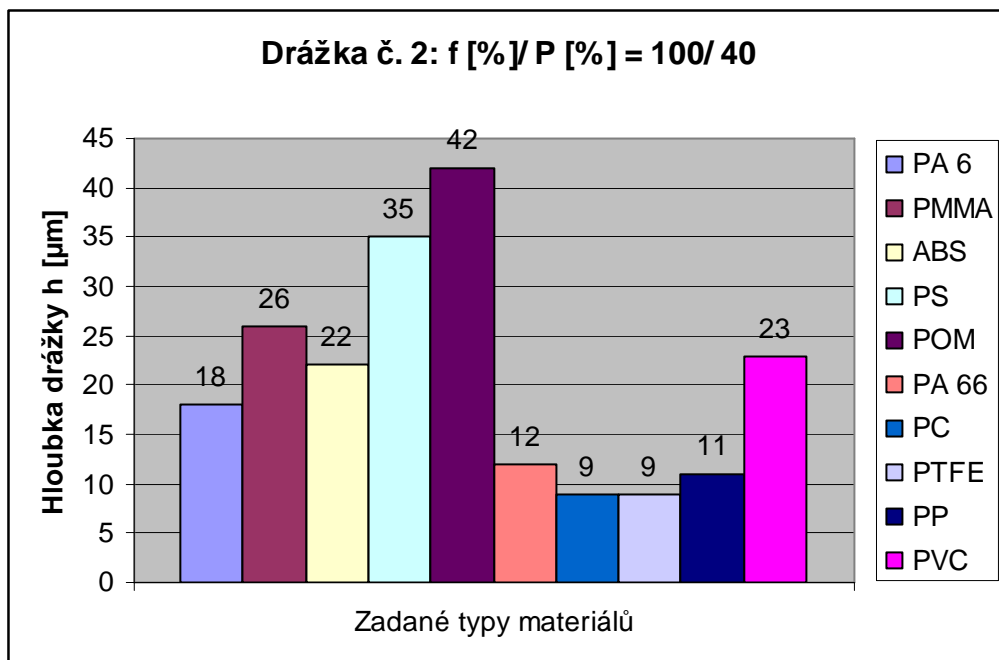
Materiál	f [%]/ P [%]	f [mms^{-1}]/ P [W]	h [μm]
PA 6	50/ 40	533/ 12	53,2
PMMA	50/ 40	533/ 12	124
ABS	50/ 40	533/ 12	100
PS	50/ 40	533/ 12	78
POM	50/ 40	533/ 12	124
PA 66	50/ 40	533/ 12	39
PC	50/ 40	533/ 12	36
PTFE	50/ 40	533/ 12	41
PP	50/ 40	533/ 12	30
PVC	50/ 40	533/ 12	57



Obr. 39. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.1, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění

Tab. 21. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.2, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))

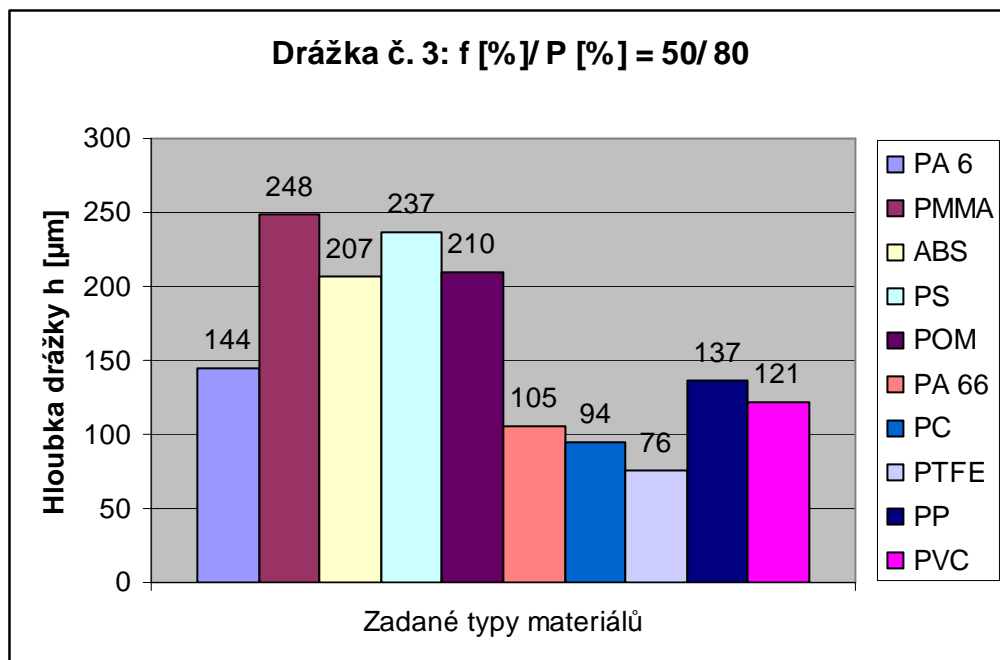
Materiál	f [%]/ P [%]	f [mms^{-1}]/ P [W]	h [μm]
PA 6	100/ 40	1066/ 12	18
PMMA	100/ 40	1066/ 12	26
ABS	100/ 40	1066/ 12	22
PS	100/ 40	1066/ 12	35
POM	100/ 40	1066/ 12	42
PA 66	100/ 40	1066/ 12	12
PC	100/ 40	1066/ 12	9
PTFE	100/ 40	1066/ 12	9
PP	100/ 40	1066/ 12	11
PVC	100/ 40	1066/ 12	23



Obr. 40. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.2, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění

Tab. 22. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.3, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))

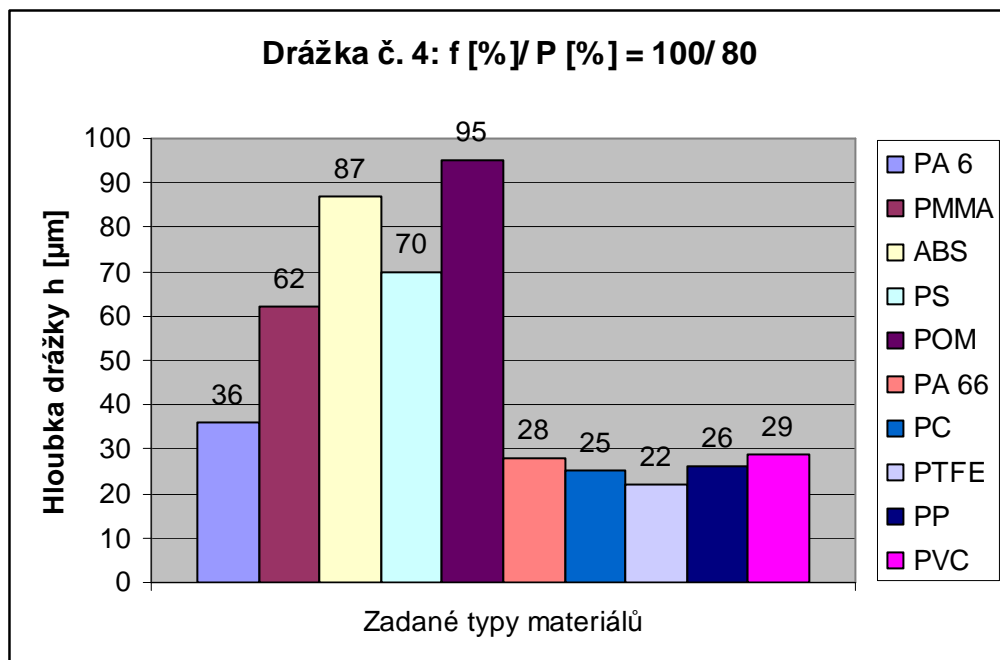
Materiál	f [%]/ P [%]	f [mms^{-1}]/ P [W]	h [μm]
PA 6	50/ 80	533/ 24	144
PMMA	50/ 80	533/ 24	248
ABS	50/ 80	533/ 24	207
PS	50/ 80	533/ 24	237
POM	50/ 80	533/ 24	210
PA 66	50/ 80	533/ 24	105
PC	50/ 80	533/ 24	94
PTFE	50/ 80	533/ 24	76
PP	50/ 80	533/ 24	137
PVC	50/ 80	533/ 24	121



Obr. 41. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.3, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění

Tab. 23. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.4, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))

Materiál	f [%]/ P [%]	f [mms^{-1}]/ P [W]	h [μm]
PA 6	100/ 80	1066/ 24	36
PMMA	100/ 80	1066/ 24	62
ABS	100/ 80	1066/ 24	87
PS	100/ 80	1066/ 24	70
POM	100/ 80	1066/ 24	95
PA 66	100/ 80	1066/ 24	28
PC	100/ 80	1066/ 24	25
PTFE	100/ 80	1066/ 24	22
PP	100/ 80	1066/ 24	26
PVC	100/ 80	1066/ 24	29



Obr. 42. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.4, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění

10.4 Zhodnocení naměřených rozměrů (hloubek) obrobených drážek

Z výsledků naměřených hloubek drážek uvedených v kapitole (10) v tabulkách a grafickém znázornění vyplývá, že u všech materiálů bylo dosahováno nejmenší hloubky drážky při parametrech obrábění, kdy posuv $f = 100 \%$ (tedy $f = 1066 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 40 \%$ (tedy $P = 12 \text{ W}$). O něco větších hloubek u zadaných typů materiálů bylo dosaženo při posuvu $f = 100 \%$ (tedy $f = 1066 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 80 \%$ (tedy $P = 24 \text{ W}$). Druhé největší hloubky drážek v materiálech bylo dosaženo za posuvu $f = 50 \%$ (tedy $f = 533 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 40 \%$ (tedy $P = 12 \text{ W}$). Drážka s největší hloubkou byla u všech zadaných materiálů vytvořena za posuvu $f = 50 \%$ (tedy $f = 533 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 80 \%$ (tedy $P = 24 \text{ W}$).

Z porovnání naměřených rozměrů (hloubek) drážek, vytvořených při stejných parametrech obrábění pro různé typy materiálů (viz. kapitola 10. 3) vyplývá že při parametrech obrábění, kdy byl:

- Posuv $f = 50 \%$ (tedy $f = 533 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 40 \%$ (tedy $P = 12 \text{ W}$) bylo nejmenší hloubky drážky dosaženo u materiálů PP ($h = 30 \mu\text{m}$), PC ($h = 36 \mu\text{m}$), PA 66 ($h = 39 \mu\text{m}$) a naopak největší hloubky bylo dosaženo u materiálů PMMA ($h = 124 \mu\text{m}$), POM ($h = 124 \mu\text{m}$) a ABS ($h = 100 \mu\text{m}$).
- Posuv $f = 100 \%$ (tedy $f = 1066 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 40 \%$ (tedy $P = 12 \text{ W}$) bylo nejmenší hloubky drážky dosaženo u materiálů PC ($h = 9 \mu\text{m}$), PTFE ($h = 9 \mu\text{m}$), PP ($h = 12 \mu\text{m}$) a naopak největší hloubky bylo dosaženo u materiálů POM ($h = 42 \mu\text{m}$), PS ($h = 35 \mu\text{m}$) a PMMA ($h = 26 \mu\text{m}$).
- Posuv $f = 50 \%$ (tedy $f = 533 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 80 \%$ (tedy $P = 24 \text{ W}$) bylo nejmenší hloubky drážky dosaženo u materiálů PTFE ($h = 76 \mu\text{m}$), PC ($h = 94 \mu\text{m}$), PA 66 ($h = 105 \mu\text{m}$) a naopak největší hloubky bylo dosaženo u materiálů PMMA ($h = 248 \mu\text{m}$), PS ($h = 237 \mu\text{m}$) a POM ($h = 210 \mu\text{m}$).
- Posuv $f = 100 \%$ (tedy $f = 1066 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 80 \%$ (tedy $P = 24 \text{ W}$) bylo nejmenší hloubky drážky dosaženo u materiálů PTFE ($h = 22 \mu\text{m}$), PC ($h = 25 \mu\text{m}$), PP ($h = 26 \mu\text{m}$) a naopak největší hloubky bylo dosaženo u materiálů POM ($h = 95 \mu\text{m}$), ABS ($h = 87 \mu\text{m}$) a PS ($h = 70 \mu\text{m}$).

Z uvedeného tedy vyplývá, že hloubka drážky se zvyšuje spolu se zvyšujícím se výkonem laseru u každé konkrétní hodnoty nastaveného posuvu. Tento poznatek byl stejný u všech typů obráběných materiálů.

10.5 Vizuální ukázka obrobených drážek

Z obrázků 44. a 45. na kterých jsou pro ukázkou uvedeny snímky s detaily profilu obrobených drážek materiálů ABS (červené) a PMMA vyplývá, že obrobené drážky nemají obdélníkový tvar profilu, nýbrž jejich tvar odpovídá gaussovské distribuci hustoty energie laserového paprsku, která je zobrazena na obr. 27 v kapitole 6 a je charakterizována tím, že maximum energie se nachází ve středu laserového svazku. Gaussovská distribuce tvaru drážky je samozřejmě charakteristická pro všechny typy námi obráběných materiálů. Rozdílnost spočívá pouze v průběhu (charakteru) této distribuce a kvalitě povrchu drážky (její drsnosti), oboje je závislá jednak na typu obráběného materiálu, ale také na parametrech laseru nastavených při obrábění (tedy na výkonu a posuvu).

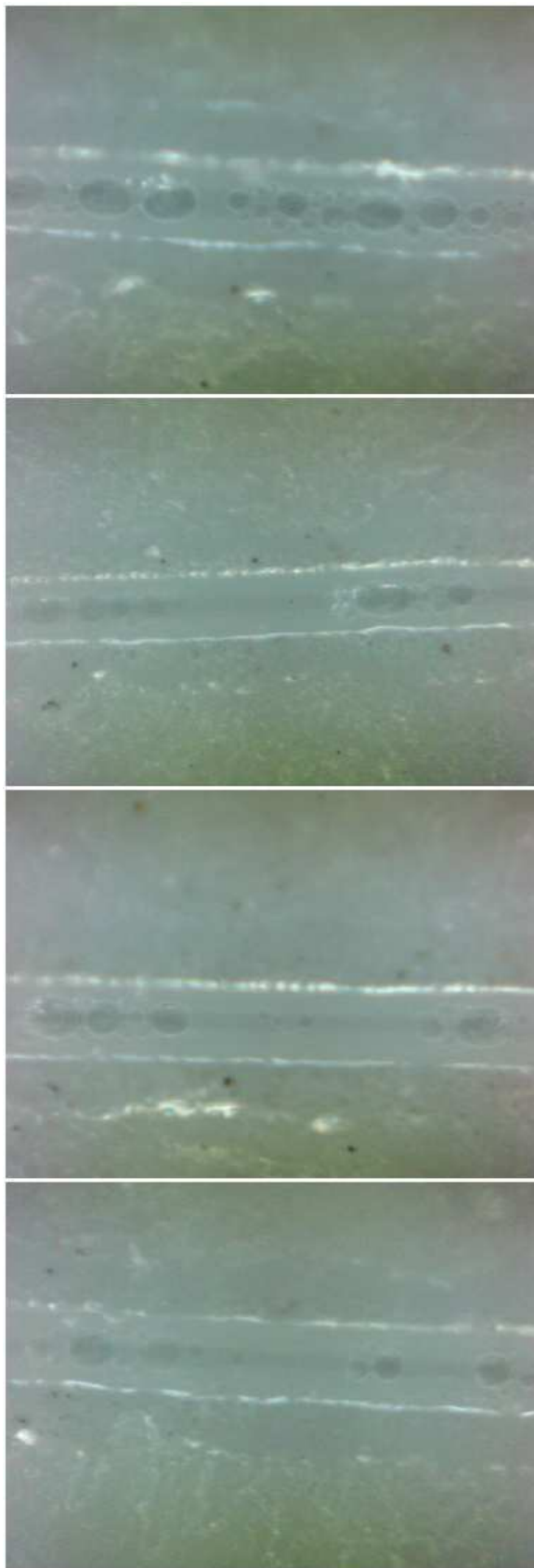


Obr. 43. Ukázka gaussovské distribuce tvaru drážky. Materiál ABS (13)



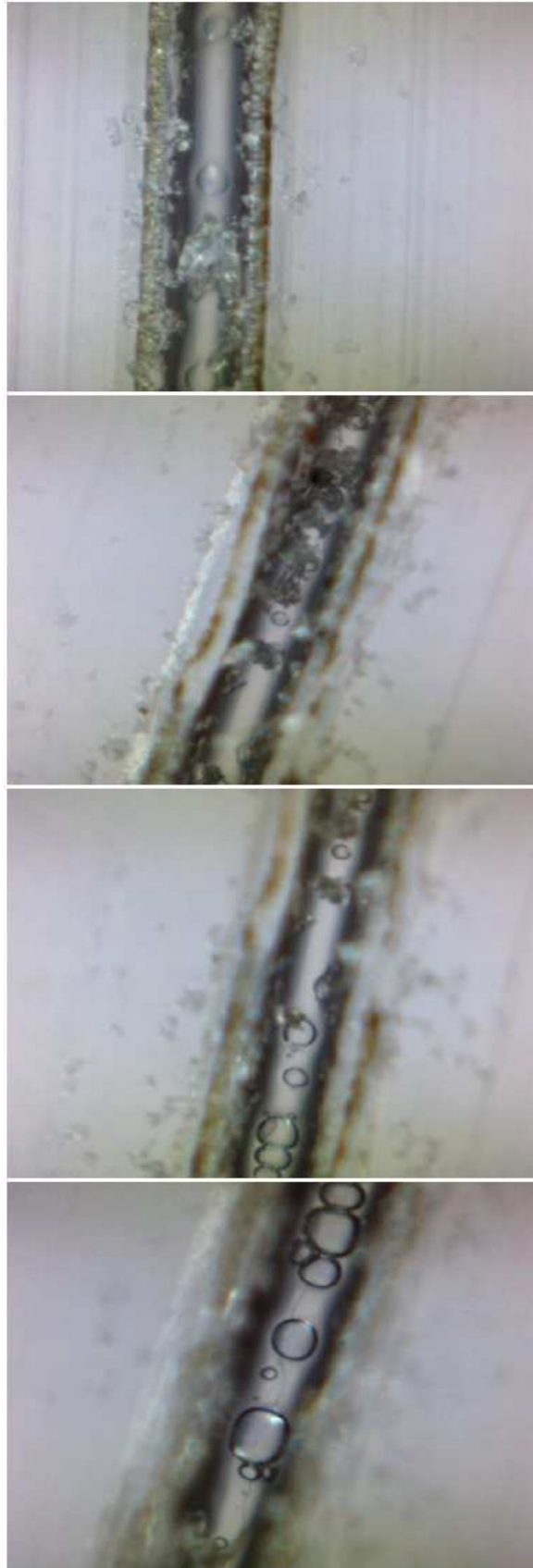
Obr. 44. Ukázka gaussovské distribuce tvaru drážky. Materiál POM (13)

Na následujících obrázcích budou pro ukázkou uvedeny u některých typů materiálů snímky drážek, vytvořených při různých parametrech obrábění (různém výkonu a posuvu). Pro zhotovení snímků byla použita ruční kamera ProScopeHR. Ovládání tohoto přístroje nebylo složité. Kamera s požadovaným zvětšením se pouze přiložila na zkoumaný vzorek a snímala obraz, který byl přenášen a zobrazován na monitoru počítače. Po zaostření mohla být přímo vytvořena fotografie zvětšeného obrazu drážky. Bylo použito zvětšení 250x.



Obr. 45. Snímky drážek u PA 66, vytvořené při následujících parametrech obrábění:

f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80



Obr. 46. Snímky drážek u PC, vytvořené při následujících parametrech obrábění:

f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80



Obr. 47. Snímky drážek u PTFE, vytvořené při následujících parametrech obrábění:

f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80



Obr. 48. Snímky drážek u PP, vytvořené při následujících parametrech obrábění:

f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80



Obr. 49. Snímky drážek u PVC, vytvořené při následujících parametrech obrábění:

f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80

10.6 Vizuální vyhodnocení obrobených drážek

10.6.1 PA 66 (Polyamid 66)

Drážky zhotovené laserem na tomto typu polymerního materiálu byly pouhým okem jen slabě viditelné. Ze zhotovených snímků je znatelné, že obrobený povrch obrobených drážek je lesklý a jeví jemnější než povrch neobrobený. Hrany, které ohraničují profil drážek, se jeví jako ostré, ale pouhým hmatem po materiálu jsou téměř neznatelné. Na povrchu drážek jsou viditelné mikroskopické kapky. Ty mohly vzniknout při obrábění, kdy byl roztavený materiál odstraňován proudem vysokotlakého plynu. Plyn také chránil před vzplanutím roztavený prachový oblak. Největší výskyt mikroskopických kapek na povrchu drážky byl zaznamenán při parametrech obrábění f [%]/ P [%] = 50/ 40.

10.6.2 PC (Polykarbonát)

U tohoto typu materiálu jsou obrobené drážky poměrně dobře viditelné i pouhým okem, jelikož povrch PC je částečně průhledný a po vytvoření drážek vlivem interakce laserového paprsku ztratil z části svoji průhlednost. U všech nastavených parametrů je na získaných snímcích patrné, že obvody obrobených drážek získaly žlutou až hnědou barvu, což vypovídá o tom, že materiál se zřejmě páčil (degradoval). Hrany drážek jsou ostré i při pouhém pohmatu. Povrch po obvodu drážek se jeví jako vrásčitý (tedy s vysokou drsností). Na povrchu drážek jsou opět viditelné mikroskopické kapky. Nejmenší hustota jejich výskytu na rozdíl je při parametrech obrábění f [%]/ P [%] = 50/ 40 na rozdíl od PA 66, kdy je při těchto parametrech největší.

10.6.3 PP (Polypropylen)

Na povrchu materiálu je pouhým okem viditelná jen nepatrná stopa po obrábění, tedy obrobená drážka je jen slabě viditelná. Hrany drážek se zdají být ostré, ale pohmatem jsou stěží zjistitelné. Na pořízených snímcích se povrch obrobených drážek jeví jako lesklý, tedy lze předpokládat, že je hladký. Ovšem jsou na něm patrné malé puchýřky, pravděpodobně ztuhlé taveniny, jejich barva naznačuje se materiál mohl částečně pálit.

10.6.4 PTFE (Polytetrafluoretylen)

Viditelnost drážek vzniklých po laserovém obrábění je pouhým okem dobře viditelná jen částečně a to zejména při dopadu světla na plochu drážky. Na snímcích se zdá, že drsnost obrobených drážek by mohla být podobná drsnosti neobrobeného materiálu. Při parametrech obrábění f [%]/ P [%] = 100/ 80 nemá hrana drážky rovný tvar, nýbrž je lehce zvlněná a na povrchu drážky jsou patrné drobné zbytky ztuhlého polymeru, který se zřejmě neodpařil a znovu ztuhl. Zvlnění drážky může být způsobeno tím, že PTFE patří mezi polymery, které podléhají tepelné degradaci, která se projevuje tím, že polymer měkne popřípadě taje a chová se jako kapalina snadno měnící tvar nebo také může docházet ke změně struktury. Změna struktury je patrná z pásu (odlišné barvy ve srovnání s neobrobeným povrchem), který lemuje podélně vytvořené drážky, a jeho šířka je několikanásobně větší než šířka drážky.

10.6.5 PVC (polyvinylchlorid)

Obrobené drážky jsou velmi dobře viditelné i pouhým okem, to hlavně díky tomu, že polymer má tmavou barvu a vytvořené drážky světle hnědou až zlatavou. Hrany drážek jsou ostré a také dobře zjištělné pohmatem. PVC patří do skupiny polymerů, které při styku s vysokou teplotou chemicky degradují, což se zřejmě projevilo tak výraznou změnou barvy obrobených drážek, která jak již bylo řečeno má nádech zlatavé. Chemická degradace je také zřejmě příčinou toho, že povrch drážek je kráterovitý až útržkovitý.

11 MODELOVÁNÍ (SIMULACE) TEPLOTNÍHO POLE

11.1 Obecný úvod k modelování (simulaci) teplotního pole pomocí výpočetní techniky

Modelováním rozumíme v technické praxi „napodobování“ reálného stavu a to buď stavu, který již existuje, nebo stavu, který chceme vytvořit pro dosažení daných cílů. Modelovaná sestava, nebo modelovaný proces, musí mít jisté charakteristiky (znaky) související s reálným stavem. To jest odpovídající rozměry, či poměr rozměrů modelu a reálného dílu, odpovídající přiřazená termofyzikální data, okrajové podmínky (většinou se jedná o provozní podmínky, podmínky simulující daný proces či technologii) atd.

Proces modelování je komplexní proces sestávající se z několika etap. Za vstup do počítačové simulace lze považovat několik základních parametrů, které se samozřejmě mohou lišit podle druhu dané simulace:

- geometrie,
- výpočetní technika,
- matematický aparát,
- okrajové podmínky,
- termofyzikální veličiny.

Výstupem z procesu simulace je model reálného děje či procesu, který vždy hodnotíme z hlediska jeho správnosti. Nemáme-li doposud vytvořenu reálnou situaci lze správnost modelu potvrdit jen na základě zkušeností či podobnosti s podobně řešeným zadáním nebo podobě řešeným problémem. Máme-li však již vytvořenu reálnou situaci, lze se opřít při hodnocení modelu o data zjištěná např. při měření teplotního pole pomocí termočlánků. Budou-li zmíněné kontroly odpovídat námi modelované situaci, lze považovat modelování a simulaci za adekvátní. Termín adekvátní zavádíme z důvodu, že pravděpodobně nikdy nedospějeme ke zcela shodným výsledkům mezi modelem a skutečností. Vždy se zde bude nacházet, třeba jen nepatrný rozdíl. Otázkou zůstává, pouze jak velkého rozdílu se lze dopustit, abychom provedenou simulaci mohli považovat za adekvátní, vůči reálnému stavu. Ukáže-li se však, ať již při hodnocení podle prvního či druhého postupu ověření adekvát-

nosti, že náš model neodpovídá skutečnosti, je zapotřebí vrátit se zpět do procesu modelování a použít jiných podmínek či předpokladů při vytváření modelu.

Základní chyby a vlivy, které mohou ovlivnit modelování, jsou následující:

- geometrie - chyby způsobené nepřesností geometrie či jejím špatným přenesením do příslušného softwaru.
- zesíťování geometrie (tzv. meshing) - chyb se lze dopustit i při špatném, tj. malém zesíťování geometrie (rozdělení na jednotlivé elementy pro následné výpočty). Zde platí jistá pravidla o hustotě sítě. Je zapotřebí volit vhodnou hustotu sítě elementů. Malá hustota sítě má za následek nepřesnost výpočtů. Naopak její přílišné zjemnění znásobí jen čas výpočtu, ale již nepřinese zpřesnění simulace.
- výpočetní technika - použití osobních počítačů pro různé aplikace většinou nerozhoduje o přesnosti simulace, ale jen o čase potřebného pro výpočet.
- matematický aparát – tento pojmem zahrnujeme zejména matematický algoritmus řešící jednotlivé úkoly simulace. Např. jsou otázky spojené s přestupem a šířením tepla (Fourierova rovnice), zadávání nejrůznějších okrajových podmínek a to jak provozních tak například okrajových podmínek pro vedení tepla. Co se týká výpočetní stránky, jsou si jednotlivé matematické metody výpočtů téměř rovnocenné a nelze se dopustit rozdílnějších výsledků při výpočtu podle dvou či více metod řešení matematických výpočtů.
- termofyzikální veličiny – u prvních tří bodů se zvýšení přesnosti nedá téměř docílit. Zato největší vliv na přesnost při modelování mají termofyzikální data a veličiny popisující jednotlivé materiály v řešené sestavě, respektive průběh těchto veličin za rozdílných teplot (tedy jejich teplotní závislost) a přestupy tepla mezi nimi.
- zjednodušení a předpoklady – tenhle bod zahrnuje nejrůznější zjednodušení a předpoklady, které jsou někdy vzhled k složitosti, komplikovatelnosti či nepředvídatelnosti simulovaného procesu či jevu nezbytná.

11.2 Matematické modelování teplotního pole při laserovém obrábění

Matematické modelování nahrazuje fyzikální experiment matematickou simulací modelu. Matematického modelování se využívá zejména z důvodu nákladnosti experimentů či z důvodu praktické neproveditelnosti experimentu. Dříve než se model bude řešit, je samozřejmě nutné ho nejdříve sestavit. Konstrukce modelu je většinou založena na fyzikálních úvahách. Většina modelů je reprezentována bilancí hmoty, energie či hybnosti.

Jelikož je vedení z laseru do materiálu velmi komplikovaný jev, není v současnosti odpovídající teorie pro vyjádření tepelné vodivosti a výpočet teploty, hlavně proto že přestup tepla je velmi rychlý a tepelný zdroj je pohyblivý.

Proces laserového řezání samozřejmě představuje komplikovanou nestacionární a nelineární výměnu energie a hmoty s proměnným rozhraním. Tepelný tok se tedy z místa řezu dále šíří do obrobeného materiálu nestacionárním sdílením tepla vedením (teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času). Tepelný proces při nestacionárním režimu je popsán Fourier-Kirchhoffovou rovnicí (35), která je uvedena v teoretické části diplomové práce. Z téhle rovnice vyplývá, že rychlost teplotních změn obecně určuje koeficient teplotní vodivosti, jehož výpočet uvádí rovnice (36), taktéž uvedená v teoretické části práce. V teoretické části práce jsou také uvedeny podmínky pro vedení tepla v tělesech včetně okrajových podmínek pro vedení (konkrétně v kapitole 4. 1. 9).

Dostupná literatura pouze uvádí různé pokusy, jak co nejjednodušeji popsat výměnu hmoty a energie při laserovém obrábění. Elementární modely jsou přitom založeny na jednoduché geometrii, lineárnosti a stacionárnosti procesu. Dovedou vlastně jen popsat proces laserové obrábění z hlediska energie nutné pro roztavení a vypaření známého objemu materiálu. Je také jasné, že tyto modely se vzhledem k složitosti problému laserového obrábění budou svými výpočtovými hodnotami shodovat s reálnými jen řádově.

Z důvodu neadekvátnosti matematických modelů a existenci velkého množství softwarů, které se zabývají řešením zejména nestacionárních a nelineárních problémů sdílení tepla, je tedy matematické modelování těchto problémů téměř bezpředmětné. Proto se budu v dalších částech práce zabývat modelováním teplotního pole v okolí řezu pomocí konečně prvkového softwaru COSMOS/M.

11.3 Simulace teplotního pole při laserovém obrábění pomocí softwaru COSMOS/M

V této části diplomové práce se budeme zabývat studií a hlavně modelováním charakteru teplotního pole vznikajícího v okolí řezu polymerních materiálu, při obrábění laserovým paprskem. Zbytkové teplo, které není spotřebováno při obráběním laserem na odpaření materiálu, se dále šíří ve formě tepelného toku od místa řezu do vnitřního objemu materiálu. Jak již bylo řečeno dříve, tepelný tok se z místa řezu dále šíří do obrobeného materiálu nestacionárním sdílením tepla vedením (teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času). Cílem téhle části práce bude tedy modelování (respektive šíření) tepelného toku, vznikajícího při obrábění, do zbylé části materiálu z místa řezu. Modelování, nebo-li simulace teplotního pole, bude provedeno konečně prvkovou metodou pomocí softwaru COSMOS/M (v aktuální verzi 2.5, pro kterou má fakulta licenci), respektive pomocí teplotního modulu, který tento program zahrnuje. O programu COSMOS/M již bylo pojednáno v kapitole 8. 2.

11.3.1 Možné metody pro simulaci teplotního pole

Při simulaci teplotního pole je možné postupovat následujícími metodami:

1. Respektovat při působení laserové paprsku změnu fází, která bezpochyby v materiálu probíhá a také respektovat změnu rozhraní těchto fází a tedy i geometrii obráběného vzorku. Brát také v úvahu změnu pohltivosti (absorpce) a také strukturální změny v materiálu (depolymerace, degradace, síťování atd.). Uvažovat změnu fyzikálních veličin (zejména hustoty, měrného tepla a tepelné vodivosti) v závislosti na čase (tedy mění se s teplotou). Tohle všechno v praxi znamená sestavit reálný model materiálu, tepelného zatížení, okrajových (provozních) podmínek a také proměnné geometrie, což je vzhledem ke složitosti procesu laserového obrábění velmi složité až nemožné.
2. Neuvažovat změnu fází, rozhraní a struktury materiálu. Což tedy znamená vzdát se možnosti brát v úvahu děje, které probíhají v oblasti odtransportování (odpaření) materiálu a řešit tak pouze sdílení tepla v rámci pevné fáze materiálu jako ohřev vzorku koncentrovanou energií působící na ploše působení laserového paprsku.

I když tento model neodpovídá zcela skutečnosti, lze jej s určitou přesností využít, vzhledem k rychlosti průběhu teploty v místě obrábění.

11.3.2 Úvahy, předpoklady a postupy při sestavování našich modelů

Námi sestavený model byl určitým kompromisem mezi oběma metodami, uvedenými v předchozí kapitole. Neuvažovali jsme změnu fází a rozhraní, (protože přehřátí materiálu je tak rychlé, že změna fází nemá na správnost výsledku velký vliv) dále pak změnu struktury materiálu a vzdali se tak možnosti brát v úvahu děje, které probíhají v oblasti odtransportování (odpaření) materiálu a řešit tak pouze sdílení tepla v rámci pevné fáze materiálu jako ohřev vzorku koncentrovanou energií působící na ploše působení laserového paprsku. Ovšem byla brána v úvahu změna fyzikálních veličin (konkrétně měrného tepla a tepelné vodivosti) v závislosti na teplotě (tedy měnící se s teplotou), jelikož program COSMOS/M umožňuje řešit i případy teplotně závislých materiálových vlastností, jelikož materiálové charakteristiky lze zadávat jako funkce teploty pomocí tzv. teplotních křivek.

Jelikož nebyl brán v úvahu odpařený materiál a tedy ani změna fází a rozhraní bylo možno předpokládat, že charakter teplotního pole v jakémkoli řezu materiálu v době jeho vzájemné interakce s laserovým paprskem stejný, což umožnilo řešení simulace (modelace) v rovině bez použití 3D geometrie. Výsledkem je pak model, zobrazující prostup teploty a její šíření (teplotní pole) po průřezu (tedy uvnitř) materiálu. Pro možnost tvorby 2D modelu bylo nutné také předpokládat, že teplotní profil se šíří ve všech směrech materiálu stejně.

Dalším předpokladem bylo, že se veškerá dodaná energie laserového záření do materiálu okamžitě mění v teplo. Tento předpoklad nám tedy říká, že energie laserového paprsku se realizuje jako tepelný tok určité hodnoty vstupující do povrchu materiálu. Dále jsme předpokládali, že tuhá část materiálu v daném řezu (tuhá z toho důvodu, že jsme zanedbávali změnu fází), která se vlivem působení laserového paprsku neodpaří je ohraničena či určena teplotou termického rozkladu, která je samozřejmě závislá na daném druhu polymeru. Za tímto účelem byl do jednotlivých nodů (uzlových bodů jednotlivých elementů) s celkovým rozptylem odpovídajícím šířce (průměru laserového paprsku, tedy 0,2 mm) zadáván tepelný tok, jehož největší hodnota byla zadávána jako proměnný parametr pomocí tzv. časové křivky, čímž bylo dosaženo opakované změny hodnoty tepelného toku a následného výpočtu teplotního pole po zadaných časových krocích. Při vyhodnocování vý-

sledků teplotního pole se poté vyházel z takové hodnoty tepelného toku, tedy takového časové kroku, kdy hodnota teploty v pevné fázi materiálu nepřesáhla, lépe řečeno dosáhla, již zmiňované teploty rozkladu.

V programu COSMOS/M byla také nadefinována počáteční teplotní podmínka po celé ploše průřezu modelovaného materiálu. Počáteční teplota byla předepsána na 20°C.

Při simulaci byla zanedbána gaussovská distribuce hustoty energie laserového paprsku, která je zobrazena na obr. 27 v kapitole 6 a jak již bylo řečeno je charakterizována tím, že maximum energie se nachází ve středu laserového svazku. V modelaci se vycházelo z toho, že hustota energie laserového paprsku je po celém jeho průměru neměnná, tedy konstantní, což se v simulaci projevilo tím, že do jednotlivých nodů (uzlových bodů jednotlivých elementů) s celkovým rozptylem odpovídajícím průměru laserového paprsku byl zadáván tepelný tok, jehož hodnota byla v celém rozptylu, tedy v jednotlivých nodech stejná.

11.3.3 Postup při samotné tvorbě modelů v programu COSMOS/M

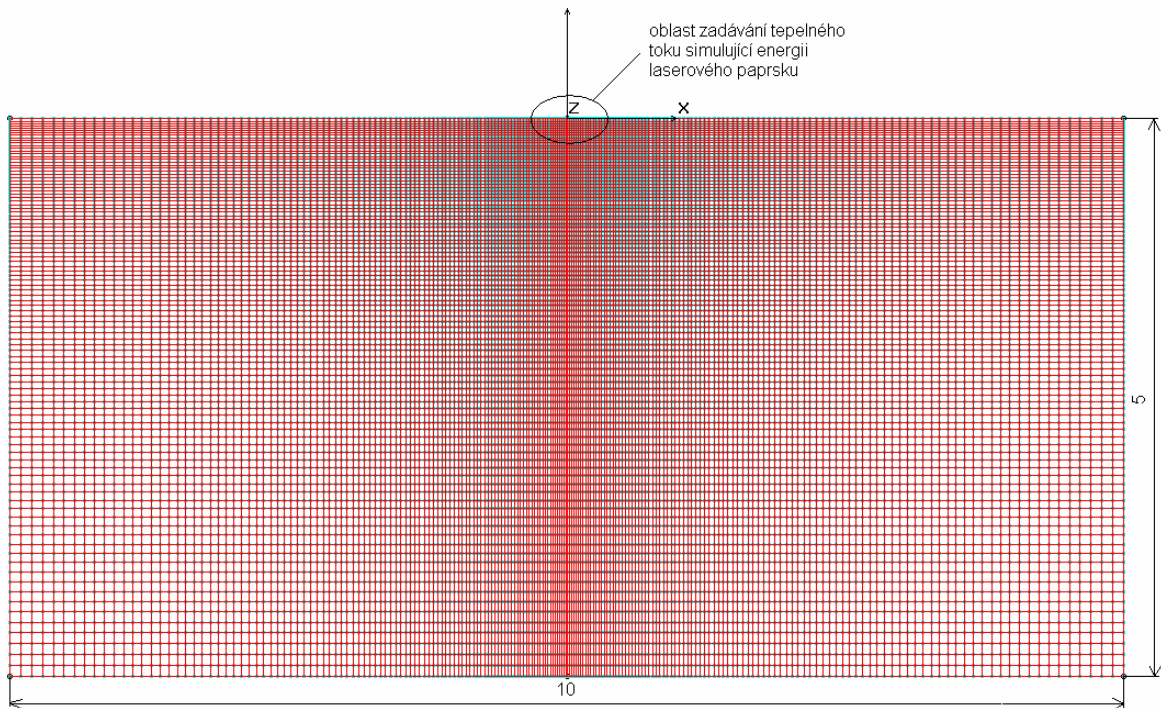
1. Geometrie modelů:

Při obrábění polymerních materiálů dochází k významným efektům, tedy výraznému tepelnému ovlivnění materiálu pouze v blízkosti interakce laserového paprsku s materiálem. Proto nebylo nutné volit při 2D simulaci celkové rozměry průřezu materiálů, ale zvolili jsme jen určitý element z celkové průřezu, což umožnilo řešit modelaci jako izolovanou soustavu (tedy bez ovlivnění okolním prostředím). Samotné modely měly tedy konečné rozměry 10x5 mm a při jejich tvorbě bylo využito symetrie, kdy byla nejdříve vytvořena plocha modelu o rozměrech 5x5 a po jejím mashingu (zesíťování) bylo pomocí příkazu SFSYM využito již zmiňované symetrie modelu.

2. Meshing (síťování):

Pro tvorbu sítě bylo využito příkazu M_SF, který slouží k vytvoření sítě elementů na každém povrchu ležícím ve specifikovaném rozmezí. Počet uzlových bodů v jednom elementu modelu byl zvolen na 4, tedy čtyřúhelníkové prvky. A bylo také využito možnosti v příkazu M_SF zadávat parametry udávající počet elementů a zjemnění na sítě na první a druhé parametrické křivce povrchu, čímž bylo dosaženo zjemnění sítě elementů v oblasti, kde se poté bude zadávat do uzlových bodů elementů tepelný tok simulující energii lasero-

vého paprsku. Tepelný tok se bude zadávat v oblasti osového kříže (kde je patrné síťové zjemnění) a bude zadáván symetricky k ose Y. Vytvořenou a zesíťovanou plochu modelu i s jejím zmiňovaným zjemněním zobrazuje obr. 51.



Obr. 50. Vytvořená a zesíťovaná plocha modelů

3. Definice skupiny elementů:

K definici skupiny elementů slouží příkaz EGROU, pomocí kterého byla zvolena skupina elementů PLANE2D, která je charakterizována tím, že se jedná 4 až 8 uzlový dvoudimenzionální element (v našem případě 4 uzlový) v rovině X-Y určený pro analýzu rovinné napjatosti, vedení tepla, proudění kapaliny a osově symetrických úloh (v našem případě jde o vedení tepla). V každém uzlovém bodě elementu jsou uvažovány tyto stupně volnosti: dva posuvy a teplota. Třetí posuv a tři rotační stupně volnosti v každém uzlovém bodě jsou odstraněny. Po zadání příkazu EGROU byly tedy postupně voleny parametry charakterizující, že se jedná o: zmiňovanou skupinu elementů PLANE2D, teplotní analýzu, element s vnitřní tvarovou funkcí, rovinnou napjatost, globální souřadný systém a dále už šlo jen standardní hodnoty nabízené program COSMOS/M.

4. Definice materiálových vlastností elementů:

K této definici byl nejdříve použit příkaz RCONT, který slouží k definici skupiny reálných konstant, kterými jsou definovány tloušťky elementů. V našem případě byla nadefinována podstatě jednotková tloušťka elementů (1 mm).

K definici dalších materiálových vlastností elementů byl použit příkaz MPROP. Tento příkaz byl zadáván při analýze u vybraných typů polymerů ve dvou modifikacích. V první z nich byly materiálové vlastnosti, konkrétně to byla: hustota (DENS), tepelná vodivost (KX) a měrné teplo-měrná tepelná kapacita (C) zadávány jako konstantní, tedy neměnné s teplotou a s takto zadanými materiálovými vlastnostmi byla provedena analýza. Ve druhé modifikaci byl zadáván jako konstantní parametr pouze hustota materiálu, zbylé dva parametry (tedy tepelná vodivost a měrné teplo-měrná tepelná kapacita) byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí tzv. teplotních křivek, pomocí kterých je daný parametr definován jako funkční závislost na teplotě a s takto zadanými parametry byla opět provedena analýza. U vybraných typů polymerů byly tedy provedeny dvě nezávislé analýzy. Konkrétní hodnoty materiálových vlastností, čili parametrů, v jednotkách ve kterých byly zadávány v obou modifikacích do programu COSMOS/M, budou uvedeny až před výsledky analýz jednotlivých typů materiálů.

Pro zadávání teplotních křivek byl použit příkaz CURDEF, ve kterém byla poté zvolena funkce TEMP, definující funkční závislost daného parametru na teplotě a následně byly zadávány konkrétní hodnoty daného parametru (buď tepelné vodivosti či měrné tepla) při zvolených a nadefinovaných teplotách.

5. Definice počátečních a okrajových podmínek:

Jak již bylo řečeno dříve, při simulaci se nevycházelo z celkového rozměru průřezu materiálů, ale zvolili jsme jen určitý element z celkové průřezu, což umožnilo řešit modelaci jako izolovanou soustavu, tedy bez ovlivnění okolním prostředím. Z tohoto důvodu byla tedy na celém modelu předepsána pomocí příkazu INITIAL pouze počáteční teplota na všech elementech modelu a její hodnota činila 20°C.

6. Volba časového kroku řešení:

Volba časového kroku byla nezbytná z toho důvodu, aby byl tepelný tok (simulující energii laserového paprsku) zadávaný do jednotlivých nodů (uzlových bodů jednotlivých elementů) s celkovým rozptylem odpovídajícím průměru laserového paprsku zadáván jako proměnný parametr, konkrétně, aby jeho největší hodnota (která je stejná pro celý rozptyl vybraných nodů) byla zadávána jako proměnný parametr. Toho bylo docílené pomocí tzv. časové křivky, která byla nadefinována příkazem CURDEF a následnou volbou nabízeného parametru TIME, poté následovalo zadání počtu časových kroků, který byl stanoven na 100. Tím bylo dosaženo opakované změny hodnoty tepelného toku a následného výpočtu teplotního pole po zadaných časových krocích (celkově bylo tedy provedeno 100 samostatných početních úloh). Při vyhodnocování výsledků teplotního pole se poté vyháze- lo z takové hodnoty tepelného toku, tedy takového časové kroku, kdy hodnota teploty v pevné fázi materiálu nepřesáhla, lépe řečeno dosáhla, již zmiňované teploty rozkladu.

Poté následovalo zadání příkazu A_THERMAL, kde byly použity standardní hodnoty nabízené program COSMOS/M, které slouží např. pro nastavení: požadované přesnosti výpočtu, počtu kroků kdy je aktualizována matice tuhosti atd.

7. NMERGE a NCOMPRES:

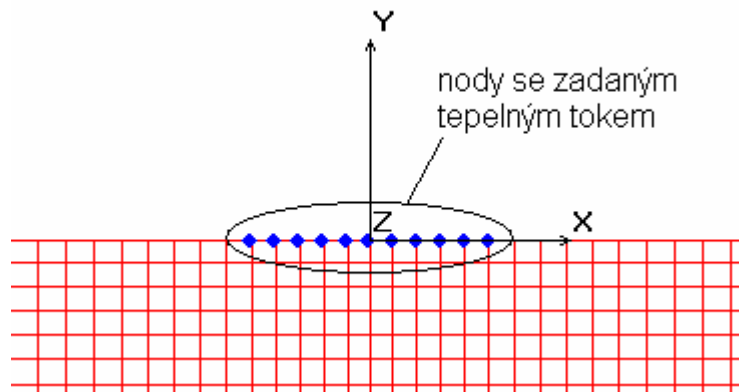
První z příkazů slouží ke spojení všech uzlových bodů ležících blíže než je zadaná hodnota, která byla 0,0000001 mm. Spojování probíhá na všech bodech ve specifikovaném rozmezí, které bylo v našem případě stanoveno na celý model.

Druhý z uvedených příkazů slouží pouze k přečíslování uzlových bodů ležících ve specifikovaném rozmezí, tudíž se to také týkalo celého modelu.

8. Tepelné zatížení:

Tepelné zatížení bylo zadáváno za již zmíněné předpokladu, že se veškerá dodaná energie laserového záření do materiálu se okamžitě mění v teplo, tedy že energie laserového paprsku se realizuje jako tepelný tok určité hodnoty vstupující do povrchu materiálu. S tímto předpokladem byl do jednotlivých uzlových bodů elementů (zvaných též nody) s celkovým rozptylem odpovídajícím zmiňovanému průměru laserového paprsku (tedy 0,2 mm) zadáván tepelný tok. K tomu byl použit příkaz QND pomocí kterého byl tedy zadán do požadovaného rozptylu (tedy požadovaného počtu nodů) tepelný tok, přitom daný rozptyl byl vybrán pomocí příkazu SELPIC a v něm následně volby parametru ND s pokli-

káním na požadované nody. Hodnota zadávaného tepelného toku byla podstatě libovolná, jelikož byla zadávaná díky předešlé volbě časového kroku řešení (tedy tzv. časové křivky) jako proměnný parametr, což mělo za následek opakovanou změnu hodnoty tepelného toku a následného výpočtu teplotního pole po zadaných časových krocích. Na obr. 52 můžeme vidět část vytvořeného modelu s detailem na nody, do kterých byl zadáván tepelný tok.



Obr. 51. Část vytvořeného modelu s detailem na nody, do kterých byl zadáván tepelný tok

9. *R_THERMAL*:

Zadání příkazu *R_THERMAL* byl poslední krok naší modelace, jelikož slouží ke spuštění teplotní analýzy.

10. *Zobrazení výsledků analýzy*:

Po výpočtu analýzy už následovalo pouze zobrazení jejích výsledků, k čemuž sloužily příkazy *ACTTEMP*, pomocí kterého byl zvolen časový krok analýzy, který má být aktuálně zobrazen a příkaz *TEMPLOT*, který slouží pouze k zobrazení (vykreslení) výsledků analýzy (teplotního pole) v předchozím příkazu zvoleného časového kroku.

Výpisy příkazů z jednotlivých analýz pro zadané typy polymerních materiálů budou uvedeny příloze.

11.4 Zobrazení výsledků simulací teplotního pole (teplotních analýz) pro jednotlivé typy polymerních materiálů

V následující kapitole budou zobrazeny (uvedeny) jak výsledky jednotlivých analýz u zadaných typů polymerních materiálů, tak nadefinované materiálové vlastnosti (hustota, tepelná vodivost a měrné teplo) daných typů materiálů, které byly při jednotlivých analýzách v programu COSMOS/M zadávány pomocí příkazu MPROP.

U následujících typů materiálů: PA 6, PA 66, PC, PMMA, PVC a PS byla provedena analýza v již zmiňovaných dvou modifikacích. Jak již bylo uvedeno dříve, v první modifikaci byly zadávány materiálové vlastnosti (hustota, tepelná vodivost a měrné teplo-měrná tepelná kapacita) zadávány jako konstantní, tedy neměnné s teplotou a s takto zadanými materiálovými vlastnostmi byla provedena analýza. Ve druhé modifikaci byl zadáván jako konstantní parametr pouze hustota materiálu, zbylé dva parametry (tepelná vodivost a měrné teplo) byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí již také dříve zmiňovaných teplotních křivek, tedy daný parametr byl definován jako funkční závislost na teplotě a s takto zadanými parametry byla opět provedena analýza. U zmíněných 6 typů polymerních materiálů byly provedeny dvě nezávislé teplotní analýzy. Jelikož se u těchto 6 typů materiálů neprojevil téměř žádný rozdíl ve výsledcích (rozdíl v charakteru a rozložení teplotního pole) u obou modifikací teplotních analýz pro jednotlivé typy polymerů a také vzhledem k tomu, že dostupná literatura neuvádí pro zbylé typy materiálů (tedy pro ABS, POM, PP, PTFE) teplotní závislosti pro tepelnou vodivost a měrné teplo (u předchozích 6 typů polymerů se vycházelo z experimentálně zjištěných křivkových závislostí těchto dvou materiálových parametrů na teplotě uvedených v odborné literatuře) byly teplotní analýzy u zbylých 4 typů polymerních materiálů provedeny pouze v první modifikaci, tedy s konstantními (s teplotou neměnnými) materiálovými parametry.

Pro zajímavost, porovnání a ověření správnosti námi vytvořených modelů pro polymerní materiály byla provedena teplotní analýza v první modifikaci také pro kovový materiál, konkrétně u oceli. Při této analýze byly zachovány veškeré vlastnosti a parametry modelu použitého u polymerů, změněny byly pouze materiálové vlastnosti (hustota, tepelná vodivost a měrné teplo), které v daném modelu odpovídaly vlastnostem pro ocel s obsahem uhlíku okolo 0,2%. Výsledky této analýzy včetně použitých hodnot materiálových vlastností budou rovněž uvedeny v této kapitole.

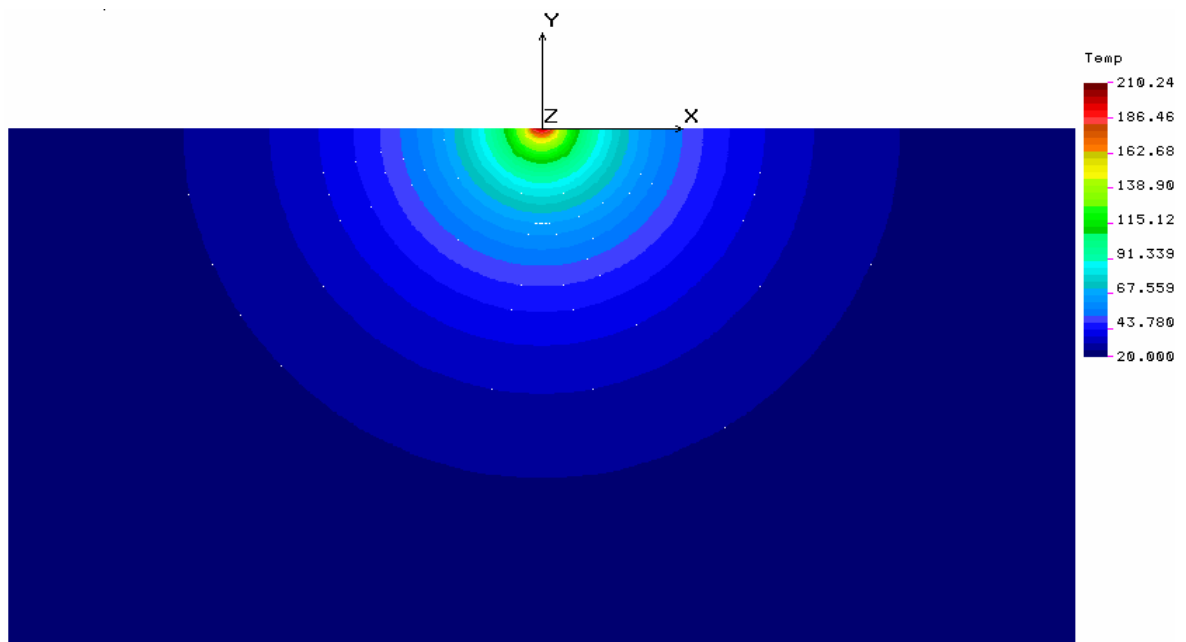
11.4.1 PVC (polyvinylchlorid)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Hodnoty materiálových vlastností, které byly při analýze zadávány, jsou uvedeny v následující tabulce a to v jednotkách, ve kterých byly nadefinovány do programu COSMOS/M. V tabulce je také uvedena hodnota teploty termického rozkladu polymeru, z které jak už bylo uvedeno dříve se vycházelo při vyhodnocování výsledků teplotního pole, jelikož výsledky byly zobrazovány v takovém časovém kroku, kdy hodnota teploty v pevné fázi materiálu nepřesáhla, lépe řečeno dosáhla, právě teploty rozkladu.

Tab. 24. Materiálové vlastnosti PVC použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		210 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1480 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	900 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,15 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



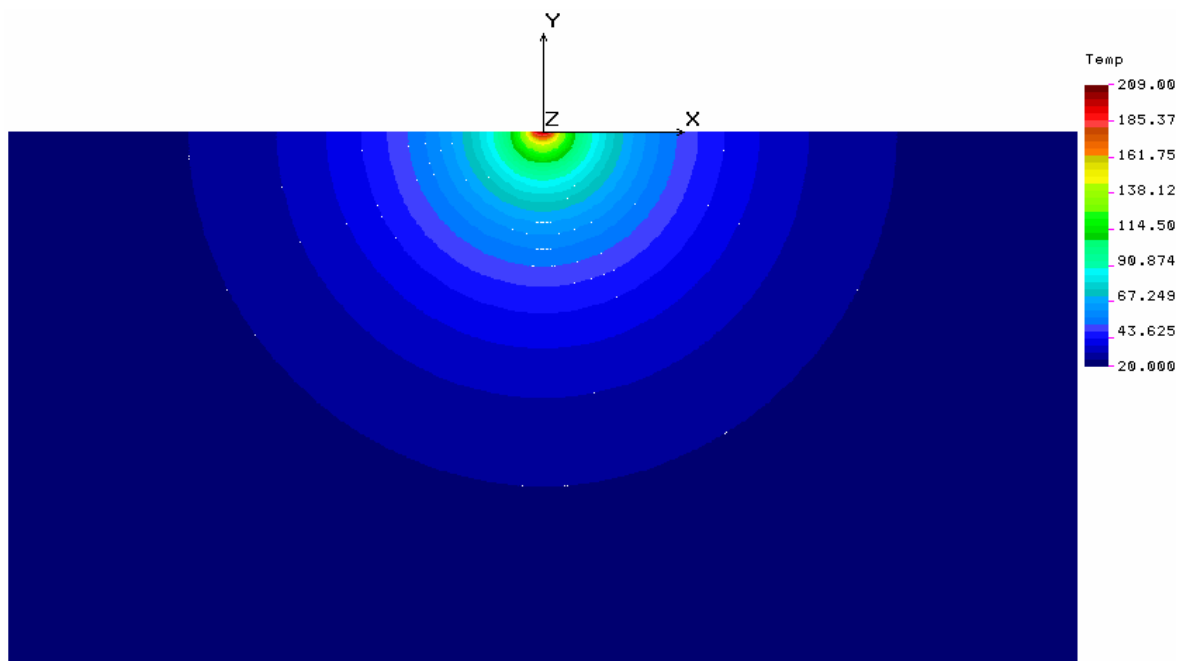
Obr. 52. Model teplotního pole u PVC s konstantně zadávanými materiálovými parametry

2. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:

Hodnoty materiálových vlastností zadávaných při analýze uvádí tabulka 25. Opět jsou uvedeny v jednotkách, ve kterých byly zadávány v programu COSMOS/M. Samozřejmě je v tabulce také uvedena hodnota teploty termického rozkladu polymeru, z níž se vycházelo při vyhodnocování výsledků teplotního pole, jelikož už bylo mnohokrát řečeno, že výsledky byly zobrazovány v takovém časovém kroku, kdy hodnota teploty v pevné fázi materiálu nepřesáhla, lépe řečeno dosáhla, právě teploty rozkladu.

Tab. 25. Materiálové vlastnosti PVC použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		210 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1480 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C = 900 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] V 80°C = 1100 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] V 90°C = 1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 210°C = 1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,15 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 80°C = 0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 90°C = 0,15 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 110°C = 0,15 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 120°C = 0,14 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 210°C = 0,14 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



Obr. 53. Model teplotního pole u PVC s proměnnými materiálovými parametry

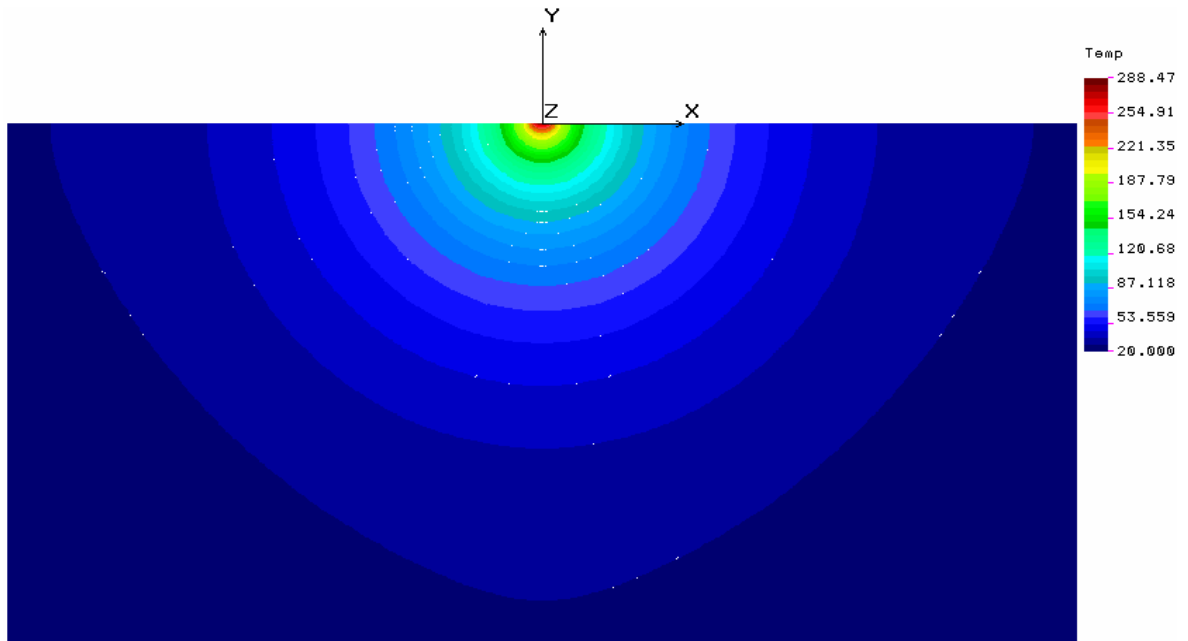
11.4.2 PS (Polystyren)

1. *Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-
měrnou tepelnou kapacitou):*

Pro hodnoty materiálových vlastností, které byly při analýze zadávány a jsou uvedeny v následující tabulce, platí to samé, co už bylo řečeno v kapitole 11. 4. 1, ve které jsou uvedeny výsledky analýzy u PVC s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem. Stejně tak tomu bude i pro hodnoty materiálových vlastností, které byly zadávány při tomto typu analýzy i u zbylých polymerních materiálů.

Tab. 26. Materiálové vlastnosti PS použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		290 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1030 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1300 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



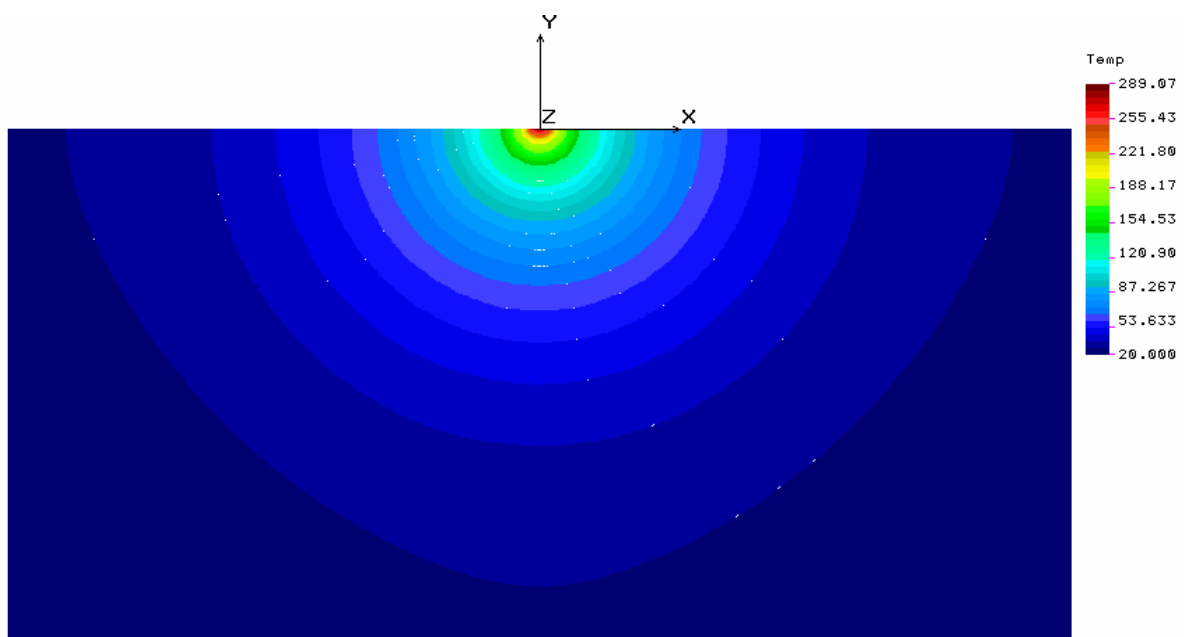
Obr. 54. Model teplotního pole u PS s konstantně zadávanými materiálovými parametry

2. *Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:*

Pro hodnoty materiálových vlastností, které byly při tomto typu analýzy zadávány a uvádí je tabulka 27., platí totéž, co už bylo řečeno v kapitole 11. 4. 1, ve které jsou uvedeny výsledky analýzy u PVC s konstantně zadávanou hustotou materiálu a hodnotami tepelné vodivosti a měrného tepla zadávanými jako s teplotou proměnnými parametry pomocí teplotních křivek. Stejně tak tomu bude i pro hodnoty materiálových vlastností, které byly zadávány při tomto typu analýzy i u zbylých polymerních materiálů.

Tab. 27. Materiálové vlastnosti PS použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		290 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1030 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C =1300 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 200°C=2500 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 290°C=2500 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,15 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 50°C = 0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 70°C = 0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 80°C = 0,17 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 100°C =0,17 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 110°C =0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 290°C= 0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



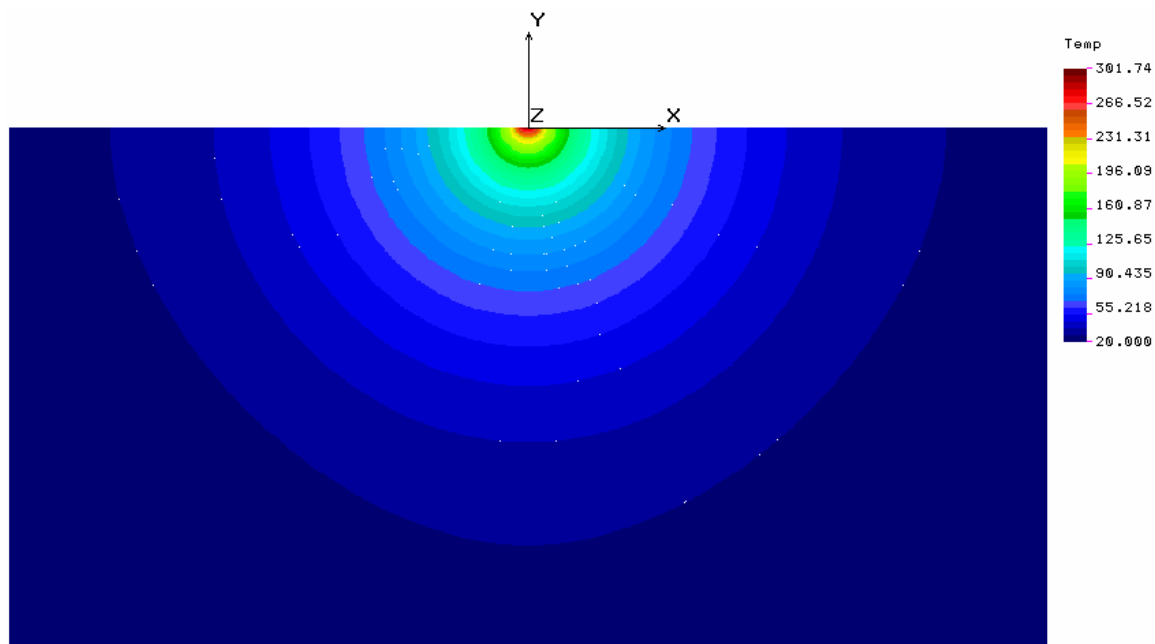
Obr. 55. Model teplotního pole u PS s proměnnými materiálovými parametry

11.4.3 PMMA (Polymethylmethakrylát)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 28. Materiálové vlastnosti PMMA použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		300 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1200 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1500 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,2 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]

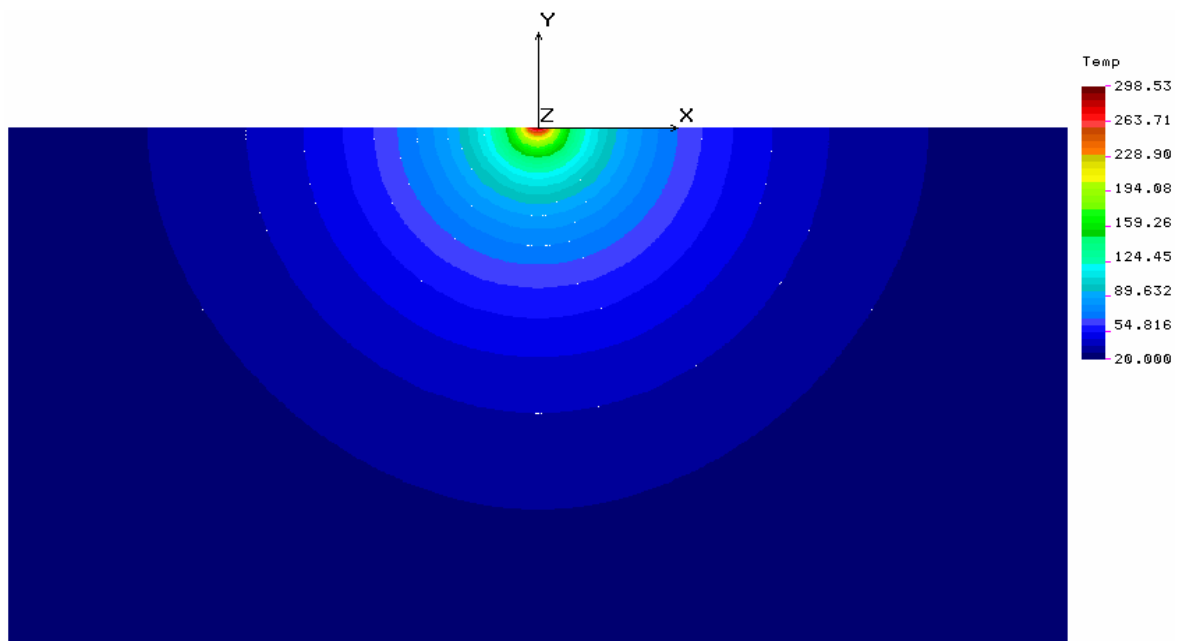


Obr. 56. Model teplotního pole u PMMA s konstantními materiálovými parametry

2. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:

Tab. 29. Materiálové vlastnosti PMMA použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		300 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1200 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C =1500 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 200°C=2400 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 300°C=2400 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,2 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 80°C = 0,22 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 110°C = 0,2 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 140°C =0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 300°C =0,16 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



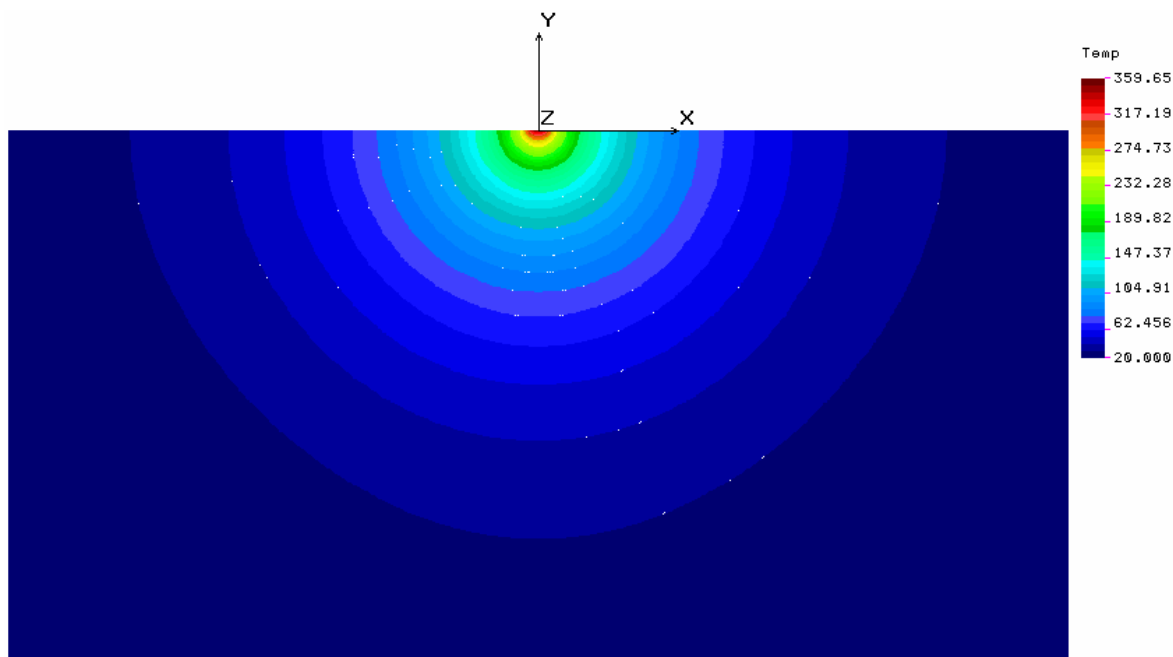
Obr. 57. Model teplotního pole u PMMA s proměnnými materiálovými parametry

11.4.4 PC (Polykarbonát)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 30. Materiálové vlastnosti PC použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		360 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1210 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1170 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,19 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]

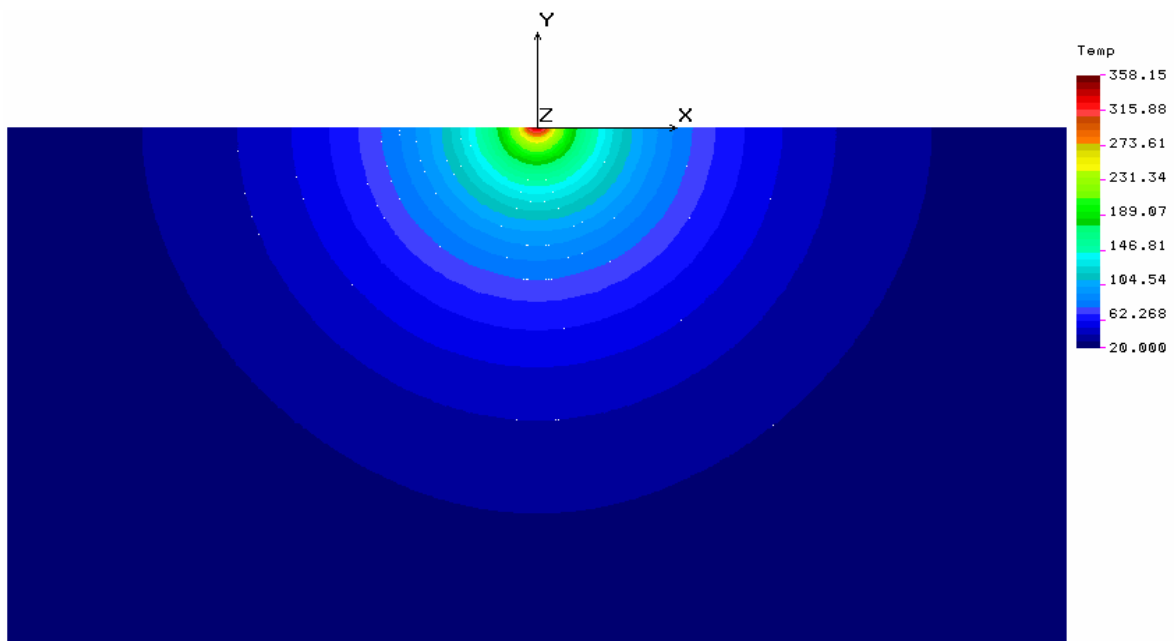


Obr. 58. Model teplotního pole u PC s konstantními materiálovými parametry

2. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:

Tab. 31. Materiálové vlastnosti PC použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		360 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1210 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C =1170 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 250°C=2400 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 360°C=2400 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,18 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 100°C =0,18 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 130°C =0,19 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 250°C =0,19 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 360°C =0,19 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



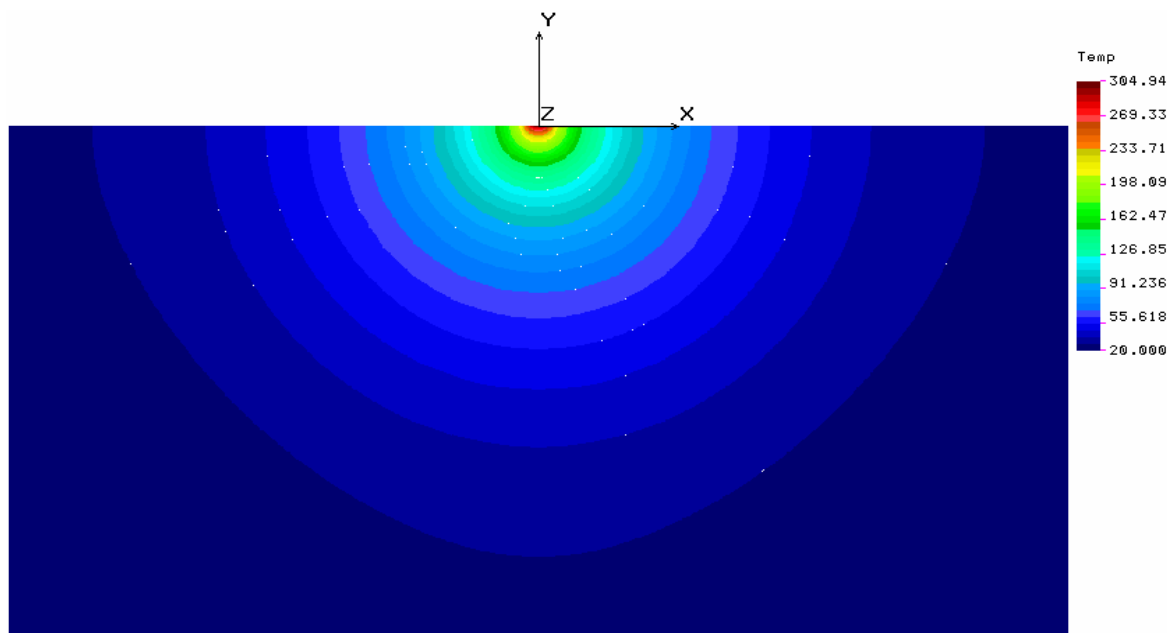
Obr. 59. Model teplotního pole u PC s proměnnými materiálovými parametry

11.4.5 PA 6 (Polyamid 6)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 32. Materiálové vlastnosti PA 6 použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		305 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1130 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,28 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]

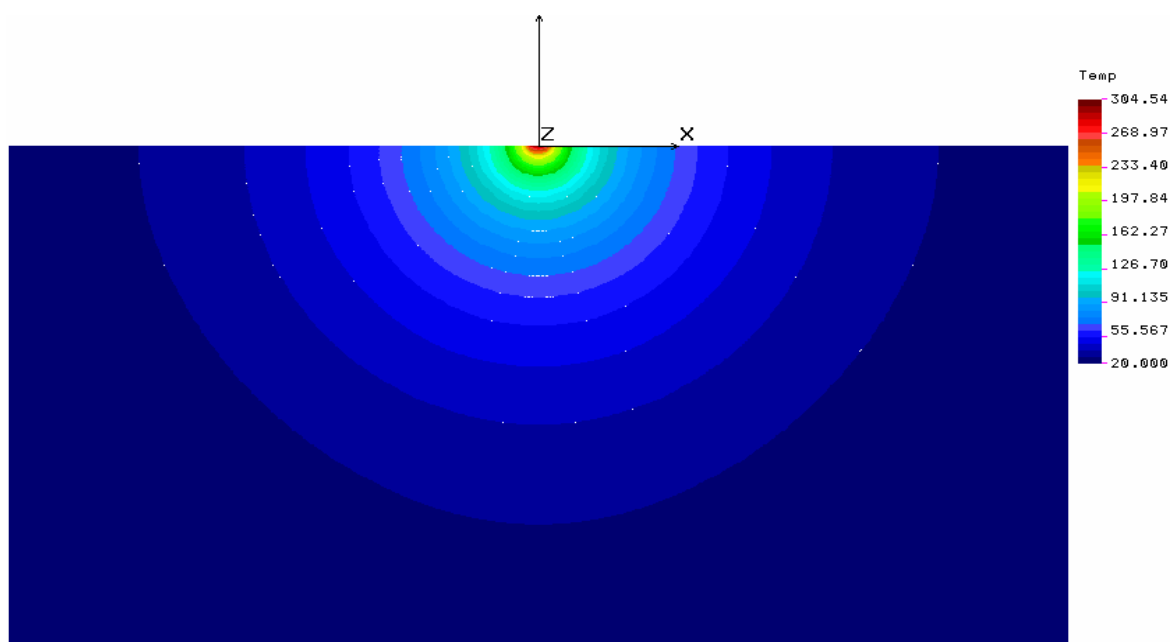


Obr. 60. Model teplotního pole u PA 6 s konstantními materiálovými parametry

2. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:

Tab. 33. Materiálové vlastnosti PA 6 použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		305 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1130 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C =1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 220°C=2900 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 305°C=2900 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,28 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 50°C =0,32 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 60°C =0,28 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 95°C =0,28 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 130°C =0,22 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



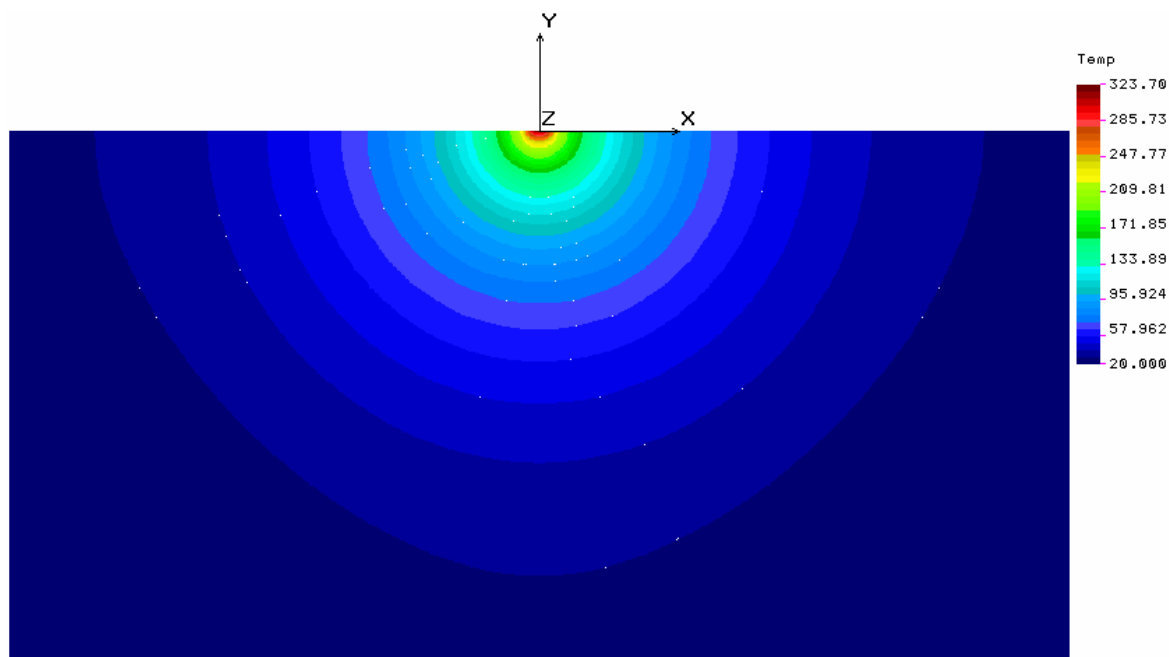
Obr. 61. Model teplotního pole u PA 6 s proměnnými materiálovými parametry

11.4.6 PA 66 (Polyamid 66)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 34. Materiálové vlastnosti PA 66 použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		325 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1140 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,27 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]

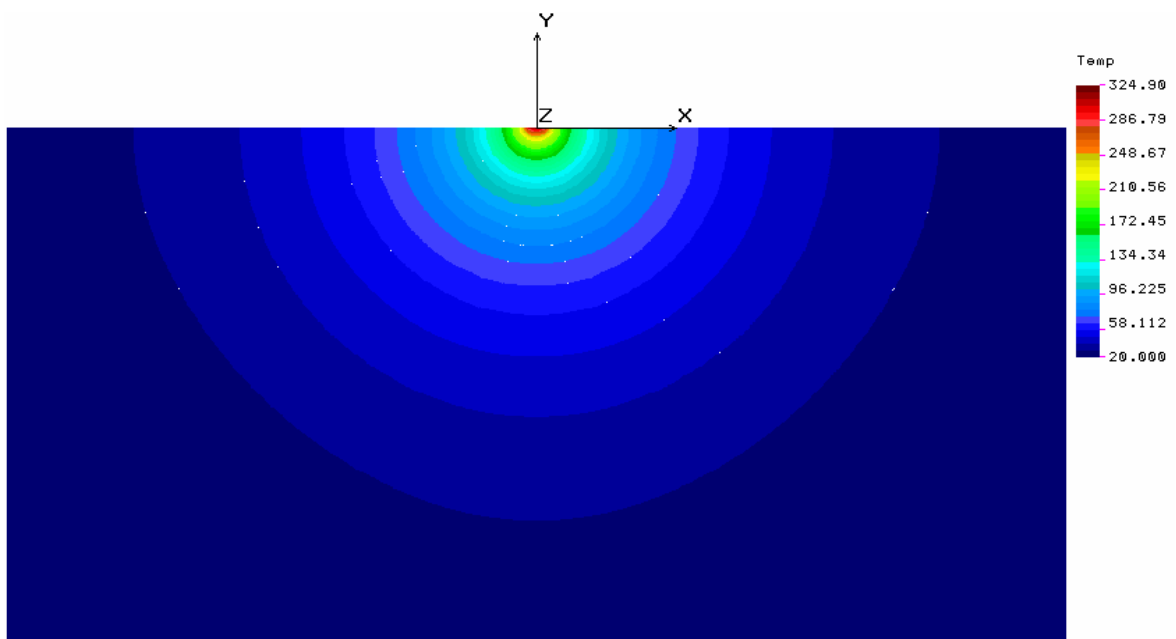


Obr. 62. Model teplotního pole u PA 66 s konstantními materiálovými parametry

2. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou materiálu, hodnoty tepelné vodivosti a měrného tepla byly zadávány jako proměnné s teplotou pomocí teplotních křivek:

Tab. 35. Materiálové vlastnosti PA 66 použité při simulaci s proměnnými hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		325 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1140 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	Ve 20°C =1700 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 270°C=3000 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹] Ve 325°C=3000 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	Ve 20°C = 0,27 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 50°C =0,31 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 60°C =0,27 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] V 95°C =0,27 [W.m ⁻¹ K ⁻¹] Ve 130°C =0,22 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



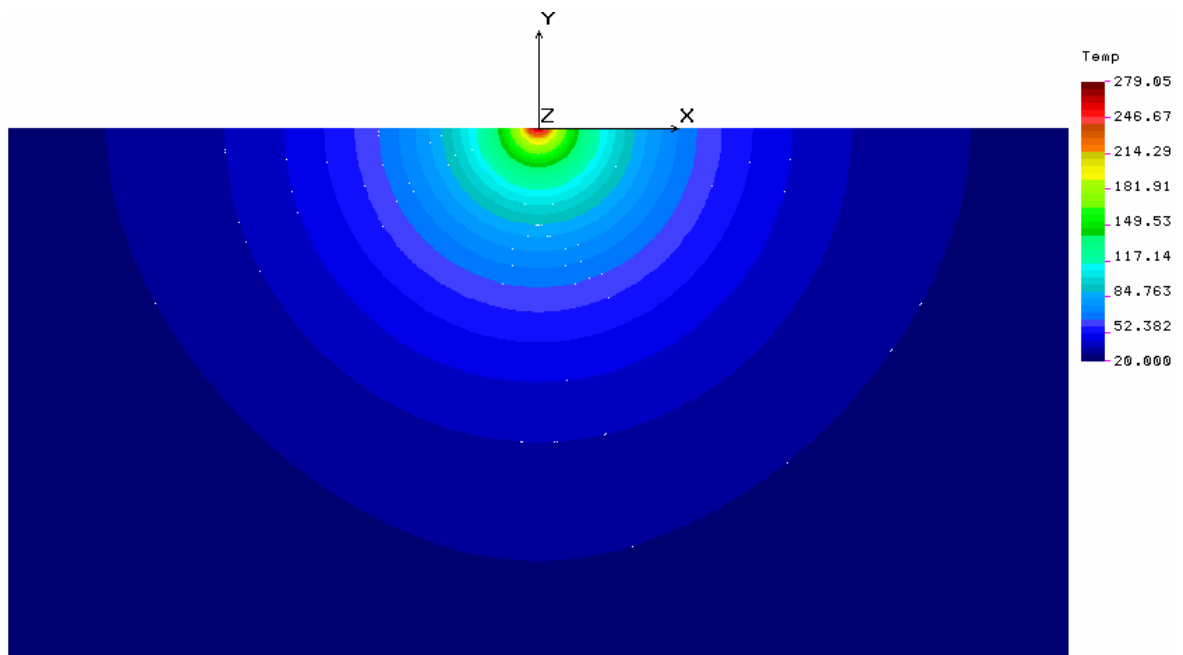
Obr. 63. Model teplotního pole u PA 66 s proměnnými materiálovými parametry

11.4.7 ABS (akrylonitrýl-butadien-styren)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 36. Materiálové vlastnosti ABS použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		280 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1415 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1300 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,18 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



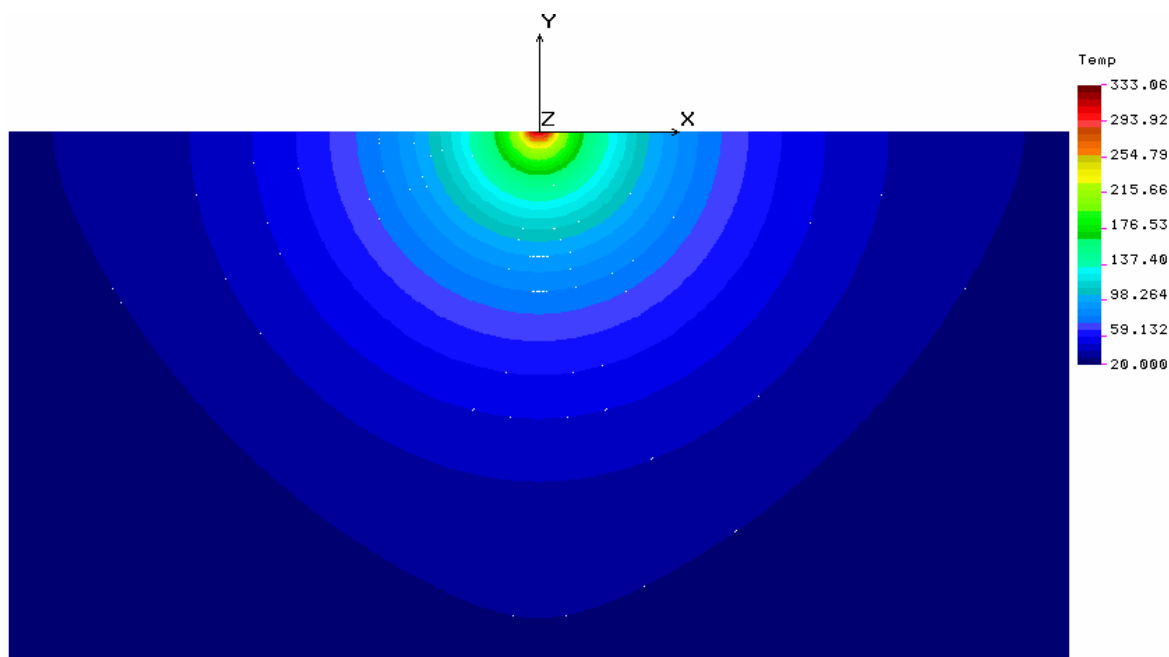
Obr. 64. Model teplotního pole u ABS s konstantními materiálovými parametry

11.4.8 POM (Polyoxymethylen)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 37. Materiálové vlastnosti POM použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		335 [°C]
Hustota	ρ	DENS	1050 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1460 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,27 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



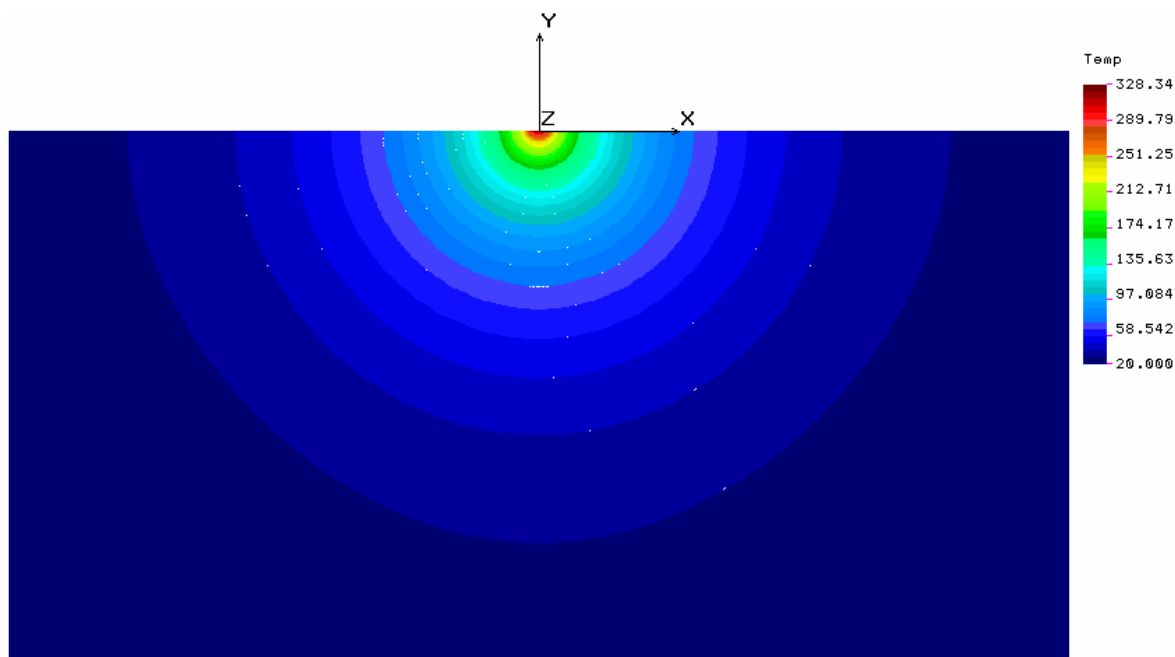
Obr. 65. Model teplotního pole u POM s konstantními materiálovými parametry

11.4.9 PP (Polypropylen)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 38. Materiálové vlastnosti PP použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		330 [°C]
Hustota	ρ	DENS	910 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	2000 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,2 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



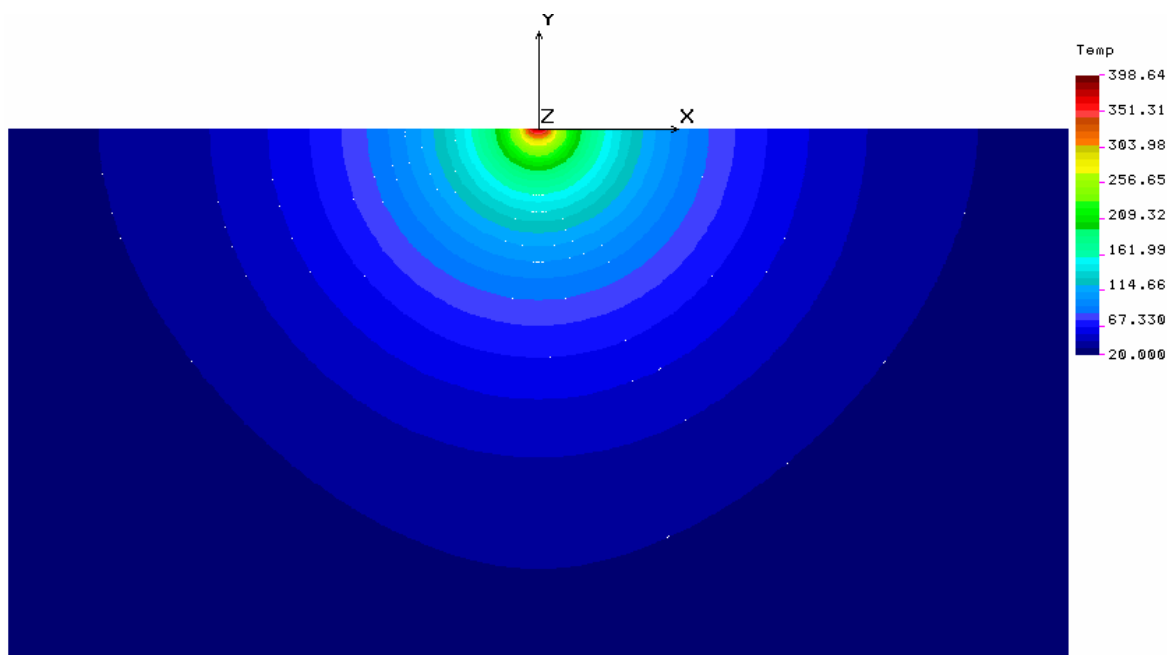
Obr. 66. Model teplotního pole u PP s konstantními materiálovými parametry

11.4.10 PTFE (Polytetrafluorethylen)

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem-měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 39. Materiálové vlastnosti PTFE použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		400 [°C]
Hustota	ρ	DENS	2150 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	1000 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	0,25 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



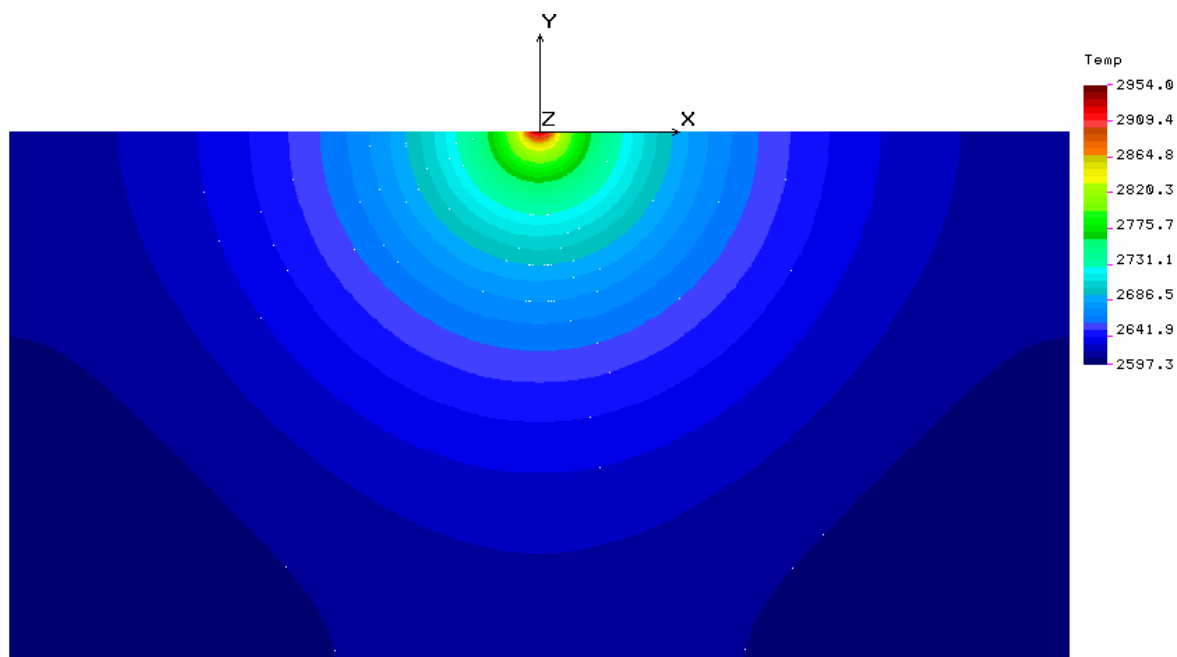
Obr. 67. Model teplotního pole u PTFE s konstantními materiálovými parametry

11.4.11 Ocel s obsahem uhlíku okolo 0,2%

1. Výsledky analýzy s konstantně zadávanou hustotou, tepelnou vodivostí a měrným teplem měrnou tepelnou kapacitou):

Tab. 40. Materiálové vlastnosti Oceli použité při simulaci s konstantními hodnotami

Název zadávané veličiny	Obecně užívaný symbol	Symbol veličiny v COSMOS/M	Hodnota a jednotky zadávané veličiny v COSMOS/M
Teplota rozkladu	T_p		3000 [°C]
Hustota	ρ	DENS	7850 [kg.m ⁻³]
Měrná tepelná kapacita	c_p	C	460 [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Tepelná vodivost	λ	KX	50 [W.m ⁻¹ K ⁻¹]



Obr. 68. Model teplotního pole pro Ocel s konstantními materiálovými parametry

11.5 Zhodnocení výsledků teplotních analýz

Před samotným hodnocením výsledků teplotních analýz si uvedeme v následujících kapitolách základní obecné informace o chování polymerních materiálů, které je třeba si ve vztahu se samotným hodnocením simulací připomenout.

11.5.1 Fázové stavy polymerních materiálů

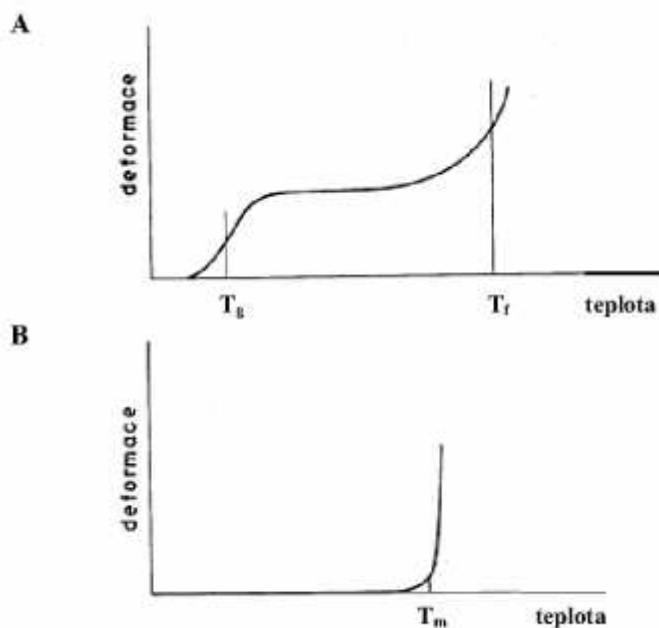
Fázi můžeme definovat jak z hlediska strukturního, tak z hlediska termodynamického. Z termodynamického hlediska se pod pojmem fáze rozumí část systému, oddělená od jiné části rozhraním a zřetelně se liší svými termodynamickými vlastnostmi. Ze strukturního hlediska se jednotlivé fáze liší zejména uspořádáním molekul.

Vysoká molekulová hmotnost polymerů způsobuje, že jejich bod varu je neobyčejně vysoký a nachází se ve všech případech nad teplotou jejich rozkladu. Z tohoto důvodu u polymerů neexistuje plynný stav. Polymery se tedy mohou nacházet pouze ve stavu kapalném nebo tuhém.

Podle pravidelnosti geometrického uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhé fázi rozlišujeme stav krystalický a amorfní (sklovitý). Látku označujeme jako krystalickou, jestliže její elementární strukturní jednotky opakují v pravidelných vzdálenostech ve třech prostorových směrech, jež leží v jedné rovině a jedná se tedy o jakýsi uspořádaný stav. Prakticky neuspořádaný stav, kdy lineární molekuly jsou staticky neuspořádané, aniž by byly jejich vzájemné vzdálenosti nějak pravidelně rozděleny, pak lze hovořit o amorfním stavu.

Polymery mohou existovat ve čtyřech fázových stavech, krystalickém a 3 amorfních (sklovitém, kaučukovitém a plastickém). O tom, ve kterém z těchto stavů se polymer nachází, rozhoduje především jeho chemické složení, molekulová hmotnost, struktura a hlavně teplota.

Z hlediska teplotního chování polymeru jej lze charakterizovat teplotou zesklenní T_g (teplota skelného přechodu) a teplotou tečení T_f . Krystalický polymer je charakterizován teplotou tání T_m . Zvolíme-li si za charakterický projev polymeru hodnotu deformace (resp. napětí) vznikající působením určité síly po určitou dobu za dané teploty a provedeme-li potřebná měření, získáme tzv. termomechanickou křivku charakteristickou pro každý polymer. Schematicky ji můžeme vidět znázorněnou na obr. 70.



Obr. 69. Termomechanická křivka amorfního (A) a vysoce krystalického (B) polymeru

Teplota T_m ohraničuje oblast krystalického stavu, teplota T_g oblast sklovitého stavu (amorfního), rozmezí teplot T_g a T_f odpovídá kaučukovité oblasti, která je charakteristická tím, že se deformace s teplotou mění velmi málo a je převážně vratná. Teprve v oblasti teploty tečení T_f vede zahřívání k velkému růstu deformace, která je nevratná.

11.5.2 Procesy probíhající při zahřívání polymeru

Při nízkých teplotách jsou polymerní látky křehké, neprojevuje se u nich tok a při namáhání praskají. Se vzrůstající teplotou se látka stává křehká pouze při rychlém zatížení a při pomalém působení síly se deformuje plasticky. Teplota, při níž se z látky křehké stává kožovitě tvrdá, se nazývá bod křehnutí. Při dalším zahřívání viskozita velmi rychle klesá a segmenty molekulárních řetězců mezi jednotlivými uzlovými body nabývají stále větší pohyblivosti a polymer se tak pomalu dostává do oblasti kaučukovité elasticity. S pokračujícím růstem teploty překonává tepelný pohyb vazebné síly, zejména vodíkové můstky a molekuly se stávají pohyblivými jako celek a začínají se projevovat procesy, při nichž dochází ke skluzu molekul a tedy trvalé deformaci. Současně nastává také tání krystalů a tepelný pohyb se stává natolik intenzivní, že se začínají trhat i hlavní vazby. Nastává odbourávání molekul a rozklad.

11.5.3 Přejchod taveniny zpět na tuhó fázi

Tavenina polymeru se strukturou kapaliny se po ochlazení může dostat do tuhého stavu následujícími dvěma způsoby:

- Polymer krystalizuje za vzniku nové krystalické fáze. Dochází tedy ke vzniku nové fáze jak termodynamického hlediska tak i ze strukturního hlediska.
- Amorfni polymer postupně tuhne bez změny strukturní fáze. Jeho viskozita se postupně zvyšuje, až dostoupí hodnoty typické pro pevné skupenství.

11.5.4 Tepelná degradace polymerů

Účinek zvýšené teploty se u polymerních materiálu může projevit zejména následujícími dvěma způsoby:

- Polymer začíná měknout a popř. se zvýší kinetická energie makromolekulárního řetězce do takové míry, že překoná mezimolekulární přitažlivé síly a polymer se začne projevovat jako kapalina, tedy pod účinkem vnějších sil mění svůj tvar.
- Dochází až ke změně struktury polymeru. Některé vysokomolekulární látky se začnou štěpit na nízkomolekulární produkty, v některých případech až na monomer a to všechno beze změny jejich chemického složení – depolymerují, dochází u nich tedy k procesu, který můžeme nazvat depolymerací. Jiné polymery můžou odštěpovat nízkomolekulární zplodiny a při tomto jevu současně dochází ke změně chemického složení – destruuji. V obou zmíněných případech se jedná tzv. degradaci.

K depolymeraci dochází zejména u polymerů, jejichž makromolekuly neobsahují skupiny schopné chemicky reagovat při teplotách depolymerace, nebo je-li jejich vazebná energie značně vysoká.

Polymery, které obsahují snadno odštěpitelné reaktivní skupiny, uvolňují některé nízkomolekulární produkty (např. vodu, chlorovodík, alkohol), destruuji tedy dříve, než by mohlo dojít k jejich depolymeraci. Destrukce polymerů je doprovázena změnou barvy, nejčastěji žloutnutím.

Na průběh tepelné degradace má tedy největší vliv složení polymeru.

11.5.5 Průběh tepelné degradace u některých typů polymerů

Sklon k depolymeraci, tedy štěpení na nízkomolekulární produkty, v některých případech až na monomer a to bez změny chemické složení mají např. polymethylmethakrylát, polystyren, polytetrafluorethylen. Naopak mezi polymery, které nedepolymerují a štěpí se na nízkomolekulární produkty, patří např. polypropylen, polyvinylchlorid.

K depolymeraci polymethylmethakrylátu dochází řetězovou reakcí, při níž se začne uvolňovat monomer od konců makromolekulárních řetězců.

Polytetrafluorethylen obsahuje obecně velmi reaktivní atomy fluoru, který je však velmi tepelně stálý, jelikož jeho makromolekuly neobsahují žádné atomy vodíku a odštěpení fluoru z vazby s uhlíkem je energeticky velmi náročné, o čemž vypovídá i to, že k degradaci polytetrafluorethylenu dochází až okolo 360 °C.

PVC patří mezi polymery, které při styku s vysokou teplotou chemicky destruuje. V průběhu štěpení vzniká převážně chlorovodík a v menším množství také benzen, propen či toluen.

11.6 Samotné zhodnocení výsledků teplotních analýz

Z grafického vyjádření jednotlivých výsledků teplotních analýz, které jsou uvedeny v kapitole 11. 4 a jak už bylo řečeno v téže kapitole, u zmíněných 6 typů polymerních materiálů (PA 6, PA 66, PC, PMMA, PVC a PS), u kterých byla provedena analýza v obou modifikacích se neprojevil téměř žádný rozdíl ve výsledcích (tedy rozdíl v charakteru, rozložení a průběhu teploty v teplotním poli). Možnými příčinami neprojevení se téměř žádné rozdílnosti ve výsledcích obou modifikací teplotních analýz u jednotlivých typů polymerních materiálů může být jednak nevelký rozdíl mezi hodnotami tepelné vodivosti zadávanými konstantně nebo proměnně v závislosti na teplotě a také ve složitosti jevu, kterým bezpochyby nestacionární sdílení tepla vedením (teplota jednotlivých bodů teplotního pole je funkcí času) je.

Z výsledků analýz jednotlivých typů polymerních materiálů vyplývá, že se potvrdil náš předpoklad, že při obrábění polymerních materiálů dochází k významným efektům, tedy výraznému tepelnému ovlivnění materiálu pouze v blízkosti interakce laserového paprsku s materiálem, jelikož ani u jednoho typu materiálu nedošlo k ovlivnění celého průřezu modelu, který měl rozměry 10x5 mm.

Z uvedených výsledků také vyplývá, že k výraznému tepelnému ovlivnění materiálů - kdy hodnoty v teplotním poli dosahují teplot, při kterých by mohlo docházet k fázovým změnám v materiálu, došlo u všech typů amorfních materiálu maximálně v 1/5 modelu, tedy ve vzdálenosti větší než 1 mm od místa kde byl zadáván tepelný tok simulující šíření zbylého tepla z laserového paprsku do materiálu, nebyla teplota v materiálu vyšší než hodnota při níž by mohly nastat fázové změny. U krystalických typů polymerů byla zmiňovaná vzdálenost zhruba poloviční, odpovídala tak 1/10 modelu, tedy 0,5 mm. Teploty skelného přechodu T_g , teploty tečení T_f u amorfních polymerů a teploty tání T_m u krystalických polymerů jsou pro přehlednost a jejich důležitost vzhledem k tomu, že tvoří rozhraní mezi jednotlivými fázovými stavy polymerů uvedeny v následující tabulce. Možné fázové změny, které můžou probíhat v polymerních materiálech, jsou uvedeny v kapitole 11. 5. 1. Možný přechod z taveniny zpět na tuhou fázi je popsán v kapitole 11. 5. 3.

Tab. 41. Teploty skelného přechodu T_g , teploty tečení T_f a teploty tání T_m daných typů polymerů

Typ polymeru	Fázový stav	T_g [°C]	T_f [°C]	T_m [°C]
PVC	Amorfní	80	180	
PMMA	Amorfní	100	170	
ABS	Amorfní	105	195	
PS	Amorfní	100	180	
PC	Amorfní	145	220	
PA 66	Krystalický			265
POM	Krystalický			160
PTFE	Krystalický			290
PP	Krystalický			165
PA 6	Krystalický			215

Z výsledků simulací můžeme také vypočítat, že u většiny materiálů došlo k vyrovnání teplotního pole, tedy okamžiku, kdy hodnota teploty v teplotním poli dosáhla opět hodnoty 20 °C, která byla při simulaci nadefinována jako počáteční teplota modelu, zhruba ve 4/6 výšky modelu, což odpovídá přibližně vzdálenosti 3,5 mm od místa, kde byl zadáván tepelný tok. Pouze u PVC došlo k vyrovnání teplotního pole o něco dříve a naopak u PS a POM o něco později.

Ze simulací je také patrné, že oblast, ve které by mohlo docházet u jednotlivých materiálů k depolymeraci či destrukci (o depolymeraci a destrukci je pojednáno v kapitolách 11.5.4 a 11.5.5), je velmi malá a dosahuje maximálně hloubky 0,07 mm (= 70 μm). Na našich modelech je tato oblast charakterizována červenou barvou přecházející v oranžovou. Teplotní rozsah této oblasti se u jednotlivých typů polymerů pohybuje od teploty termického rozkladu T_m (která je pro dané typy polymerů uvedena vždy v tabulce s materiálovými vlastnostmi užitými při simulaci), až po teplotu která je zhruba o 80 °C.

Z uvedených zhodnocení vyplývá určitá podobnost mezi výsledky analýz jednotlivých typů polymerních materiálů, která je patrná i na obrázcích výsledků simulací – konkrétně již ve zmíněné velikosti oblasti, ve které by mohlo docházet u jednotlivých materiálů k depolymeraci či destrukci, dále ve zmiňované vzdálenosti kdy došlo k vyrovnání teplotního pole a také dříve uvedené velikosti oblasti ovlivnění materiálu, ve kterém může docházet k fázovým změnám. Patrná je ale také podobnost v charakteru, konkrétně ve tvaru, velikosti a rozložení a šíření teplotního pole u zadaných typů polymerních materiálů. Takle podobnost může být zapříčiněna nevelkým rozptylem v hodnotách tepelné vodivosti u různých typů polymerních materiálů. Největší rozdíl ve výsledcích jednotlivých analýz je tedy hlavně ve velikostech teplot charakterizující dané rozložení teplotního pole jednotlivých materiálů. Tento rozdíl je zapříčiněn rozdílností velikosti teploty rozkladu T_p polymeru, ze které se jak bylo uvedeno dříve vycházelo při jednotlivých simulacích, a která je samozřejmě pro jednotlivé materiály různě veliká.

Jak už bylo uvedeno před samotnými simulacemi, byla pro zajímavost a hlavně pro ověření správnosti námi vytvořených modelů pro polymerní materiály provedena teplotní analýza pro kovový materiál, konkrétně u oceli. Při analýze byly zachovány veškeré vlastnosti a parametry modelu použitého u polymerů, změněny byly pouze materiálové vlastnosti odpovídající oceli s obsahem uhlíku okolo 0,2%. Z výsledku této analýzy a jejího

porovnání lze přepokládat správnost našich modelů, jelikož se potvrdil předpoklad, že oproti polymerům dojde u oceli k výraznému tepelnému ovlivnění celého průřezu modelu díky rozdílným materiálovým vlastnostem oceli.

ZÁVĚR

V této diplomové práci byla jednak zkoumána možnost laserového mikroobrábění různých typů polymerních materiálů při různě daných parametrech laserového obrábění, ale také se práce zabývala vlivem koncentrované energie laserového paprsku na dané typy polymerů, konkrétně se jednalo o simulaci teplotního pole šířícího se ve zkušebních polymerních materiálech při laserovém mikroobrábění. V obou případech zkoumání se jednalo o následující materiály: PMMA (Polymethylmethakrylát), PS (Polystyren), POM (Polyoxymethylen), ABS (akrylonitril-butadien-styren), PA 6 (Polyamid 6), PA 66 (Polyamid 66), PC (Polykarbonát), PTFE (Polytetrafluorethylen), PP (Polypropylen), PVC (Polyvinylchlorid). Experimenty byly provedeny na CO₂ laseru, který umožňuje nastavení různých kombinací výstupních parametrů (výkonu laserové paprsku a rychlosti posuvu) a ve firmě, kde byly experimenty prováděny je používán zejména ke komerčnímu glavírování reklamních předmětů.

Teoretická část práce se zabývala: rozdělením polymerů a základními charakteristikami zadaných typů polymerních materiálů, základními informacemi a klasifikací progresivních technologií, historií a fyzikálním principem funkce laseru, vlastnostmi laserového paprsku a konstrukčním složením laseru, dělením základních druhů laserů a popisem jednotlivých typů laserů, přehledem obecného použití laserů, vlivem koncentrované energie laserového na materiál.

V úvodu praktické části byly nejdříve shrnuty poznatky o vzájemné interakci laserového paprsku s polymerními materiály, následoval souhrn a popis použitých experimentálních zařízení a postup při obrábění zkušebních vzorků na CO₂ laseru. Dále jsou experimentální části pro jednotlivé typy polymerů uvedeny výsledky měření hloubek obrobených drážek vytvořených při různých parametrech obrábění spolu jejich grafickým znázorněním a porovnáním. V práci je také možno vidět vizuální ukázky a hodnocení obrobených drážek pro vybraných 5 typů polymerů (PA 66, PC, PP, PTFE, PVC). Závěr práce se věnoval již zmínovanému modelování teplotního u zadaných typů polymerních materiálů. V úvodu této části práce bylo pojednáno obecně o modelování teplotního pole ale i o modelování (teplotní analýze) pomocí softwaru COSMOS/M včetně možných metod modelace, úvah a předpokladů použitých při naší simulaci. Ještě před zobrazením výsledků samotných simulací a jejich hodnocením byl popsán podrobný postup při tvorbě modelů v programu COSMOS/M.

Výsledky jednotlivých částí práce byly vždy diskutovány a zhodnoceny v závěrech jednotlivých kapitol, proto zde budou dále jen uvedeny ve stručnosti a bude se jednat pouze o závěrečná shrnutí, která jsou následující:

Z výsledků naměřených hloubek drážek vyplívá, že hloubka drážky se zvyšuje spolu se zvyšujícím se výkonem laseru u každé konkrétní hodnoty nastaveného posuvu. Tento poznatek byl stejný u všech typů obráběných materiálů. Nejlepší obrobitelnosti (tedy největší hloubky drážky) bylo tak dosaženo u jednotlivých materiálů při těchto nastavených parametrech laseru: za posuvu $f = 50 \%$ (tedy $f = 533 \text{ mms}^{-1}$) a výkonu laseru $P = 80 \%$ (tedy $P = 24 \text{ W}$). Naopak nejhorší obrobitelnost polymerů byla při parametrech obrábění, kdy byl posuv $f = 100 \%$ (tedy $f = 1066 \text{ mms}^{-1}$) a výkon laseru $P = 40 \%$ (tedy $P = 12 \text{ W}$). Z uvedených výsledků a parametrů laseru, při kterých byly dosaženy, vyplívá, že obrobitelnost polymerů je tím lepší (větší), čím je delší jednak doba vzájemné interakce laserového paprsku s materiálem a také větší intenzita (výkon) laserového paprsku. Nejlepší obrobitelnosti bylo dosahováno u PMMA, PS a POM. Naopak nejmenší obrobitelnost ze zadaných typů materiálů projevila u PC, PTFE a PP.

Z výsledků provedených analýz vyplívá, že za předpokladů a možností softwaru COSMOS/M, uvedených v kapitole 10. 3. 2, lze rozumně modelovat interakci laserové záření s polymerními materiály, konkrétně simulovat šíření zbylého tepla z laserového paprsku do materiálu. Po provedení simulací se potvrdil předpoklad, že při laserovém obrábění polymerních materiálů dochází k významným efektům, tedy výraznému tepelnému ovlivnění materiálu pouze v blízkosti interakce laserového paprsku s materiálem, lze tedy říci, že k šíření tepla materiálem dochází pouze v takové míře, kdy nedojde k výraznému ovlivnění struktury a vlastností celého materiálů a ovlivněna bude tak jen jeho nepatrná část. Podrobnější hodnocení výsledků teplotních analýz je uvedeno v kapitole 10. 6, proto zde jen ve stručnosti zopakujeme, že:

K tepelnému ovlivnění materiálů, kdy by u nich mohlo docházet k fázovým změnám, došlo u všech typů amorfních materiálů maximálně v 1/5 výšky modelu, tedy maximálně ve vzdálenosti 1 mm od místa kde byl zadáván tepelný tok simulující šíření zbylého tepla z laserového paprsku do materiálu. U krystalických typů polymerů byla zmiňovaná vzdálenost zhruba poloviční, odpovídala tak 1/10 modelu, tedy 0,5 mm.

U většiny materiálů došlo k vyrovnání teplotního pole, tedy okamžiku kdy hodnota teploty v teplotním poli dosáhla opět hodnoty 20 °C zhruba ve 4/6 výšky modelu odpovídající vzdálenosti 3,5 mm.

Oblast, ve které by mohlo docházet u jednotlivých materiálů k depolymeraci či destrukci je velmi malá a dosahuje maximálně hloubky 0,07 mm (= 70 μm).

Je patrná podobnost v charakteru, konkrétně ve tvaru, velikosti a rozložení a šíření teplotního pole u zadaných typů polymerních materiálů. Podobnost může být zapříčiněna nevelkým rozptylem v hodnotách tepelné vodivosti u různých typů polymerních materiálů. Největší rozdíl ve výsledcích jednotlivých analýz je tedy hlavně ve velikostech teplot charakterizující dané rozložení teplotního pole jednotlivých materiálů. Tento rozdíl je zapříčiněn rozdílností velikosti teploty rozkladu T_p u jednotlivých typů polymerních materiálů, ze kterých se vycházelo při simulacích.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MLEZIVA, J.: Polymery, Sobotáles, Praha 1993
- [2] <http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358>
- [3] JAKŠÍK, M.: Verifikace neuronového modelu na CO₂ laseru – Diplomová práce, FT UTB, Zlín 2006
- [4] ZÁMORSKÝ, Z.: Nauka o polymerech, VUT, Brno 1980
- [5] MAŇKOVÁ, I.: Progresivné technologie, Vienala, Košice 2000
- [6] <http://www.lasery.org>
- [7] SEDLÁČEK, K.: Laser v mnoha podobách, Naše vojsko, Praha 1982
- [8] <http://www.cez.cz/presentation/static/lasery/k12.htm>
- [9] http://www.printing.cz/art/ctp/ctp_principy_laseru.html
- [10] <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [11] http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser#Typy_laser.C5.AF
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Transverse_mode#Types_of_modes
- [13] HENDRYCHOVÁ, B.: Výzkum mikroobrábění polymerních materiálů laserem – Diplomová práce, FT UTB, Zlín 2003
- [14] <http://www.mendelova.cz/pages/didac/f/laser.htm#zakladni>
- [15] SUKUP, M.: Mikroobrábění polymerních materiálů na CO₂ laseru – Diplomová práce FT UTB, Zlín 2006
- [16] DOSEDĚLOVÁ, P.: Výzkum procesu laserového popisování polymerních materiálů – Diplomová práce, FT UTB, Zlín 2005
- [17] <http://jenda1.mysteria.cz/informace.htm>
- [18] VRBOVÁ, M. a kol.: Lasery a moderní optika – oborová encyklopedie, Prometheus, Praha 1994
- [19] KOLOMAZNÍK, K.: Analýza dynamických systémů, VUT, Brno 1988
- [20] HOLZMULER, W.: Fyzika polymerů, Verlag, Berlín 1961

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PMMA	Polymethylmethakrylát
PS	Polystyren
POM	Polyoxymethylen
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PA 6	Polyamid 6
PA 66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
PTFE	Polytetrafluorethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation = zesilování světla pomocí stimulované emise záření
CH ₂ O	Formaldehyd
AN	Akrylonitril
B	Butadien
S	Styren
Ti	Titan
AL	Hliník
NaOH	Hydroxid sodný
USM	obrábění ultrazvukem
ECM	elektrochemické obrábění
EDM	elektrojiskrové obrábění
AJM, AFM	procesy opracování proudem brusiva
WJM	obrábění vodním paprskem

AWJM	obrábění vodním paprskem s abrazivem
CM	chemické frézování
PCM	fotochemické obrábění
ECG	elektrochemické broušení
LBM	opracování laserem
PAM	obrábění paprskem plazmy
EBM	obrábění paprskem elektronů
IBM	obrábění paprskem iontů
E_1	vyšší energetická hladina
E_0	základní energetická hladina
h	Planckova konstanta = $6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s]
IR	infrared = infračervená
I_0	intenzita záření ve středu paprsku
r_0	poloměr redukce intenzity
TEM	Transverse electromagnetic mode = módová struktura
CO ₂	oxid uhličitý
CW	continuous wave = kontinuální režim
PW	pulsed wave = pulsní režim
Os	switched režim
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
Nd-YAG	yttrioalumíniový granát s ionty Nd ³⁺
Nd	Neodym
Nd-LF	lithium-yttrium-fluorid
Ho/CTH-YAG	holmium yttrium aluminium granát
Er	Erbium

Tm	Thulium
Er-YAG	erbium-yttrium aluminium granát
CO	Oxid uhelnatý
He	Helium
Ne	Neon
Ga-As	galium-arsenid
Cd-Se	kadmium-selenid
Cd-S	kadmium-sulfid
N ₂	Dusík
TEA	Transversal Excitation at Atmospheric Pressure = příčná excitace při atmosférickém tlaku
O ₂	Kyslík
Ge	Germánium
NaCl	Chlorid sodný
Si	Křemík
Cu	Měď
LM	Laser Machining = laserové obrábění
LAM	Laser Assisted Machining = laserem podporované obrábění
τ	čas [s]
t	teplota [°C] či [K].
(x, y, z)	souřadnice v prostoru
L	bod el
L'	souměrný bod el
\vec{r}	polohový vektor
$d\vec{r}$	vektor elementárního posunutí

∇	nabla
$\vec{d r}_o$	diferenciální posunutí
grad	gradient
\vec{E}	vektor napětí
Q	teplo [J]
q	hustota tepelného toku [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]
λ	tepelná vodivost, součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} K^{-1}$]
cp	měrné teplo, měrná tepelná kapacita [$J kg^{-1} K^{-1}$]
ρ	hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
v	měrný objem [$m^3 \cdot kg^{-1}$]
α	součinitel přestupu tepla [$W m^{-2} K^{-1}$]
t_s	teplota povrchu tělesa [K]
t_o	teplota prostředí [K]
n	normála k povrchu tělesa
E_A	je energie absorbovaná materiálem [J]
H_r	energie vzniklá chemickými reakcemi [J]
ΔH_m	energie potřebná pro změnu na taveninu [J]
$E_{l \rightarrow v}$	energie potřebná pro zahřátí taveniny na teplotu varu [J]
ΔH_v	energie potřebná pro vypaření veškeré taveniny [J]
E_c	tepelné ztráty kondukcí (vedením) [J]
E_{rad}	tepelné ztráty radiací (sáláním do okolí) [J]
$E_{s \rightarrow m}$	energie potřebná k ohřátí na teplotu tavení [J]
C	uhlík
H	vodík

α_1	absorpční koeficient [m^{-1}]
s	tloušťka materiálu [m]
R	hloubka proniknutí záření [μm]
λ_1	vlnová délka záření laseru [μm]
μ_r	relativní permeabilita materiálu [NA^{-2}]
γ	elektrická konduktivita materiálu [Sm^{-1}]
S	plocha [m^2]
d	průměr paprsku laseru [μm]
q_1	hustota energetického toku laseru [Wm^{-2}]
DPI	krok posuvu laserového paprsku
SRAC	Structural Research and Analysis Corporation
MKP	metoda konečných prvků
PC	osobních počítač
FEM	The Finite Element Method
P	výkon laseru [W]
f	posuv laseru [mms^{-1}]
h	hloubka drážky [μm]
T_p	teplota rozkladu [$^{\circ}\text{C}$]
DENS	hustota zadávaná v programu COCMOS/M
C	tepelná kapacita zadávaná v programu COCMOS/M
KX	tepelná vodivost zadávaná v programu COCMOS/M
T_g	teplota zesklnění [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	teplota tečení [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Přehled a rozdělení konstrukčních materiálů s důrazem na těžkoobrobitelné materiály z pohledu obrábění (5).....	32
Obr. 2. Porovnání výkonových charakteristik a úběru materiálu daných technologií (5)	34
Obr. 3. Základní rozdělení progresivních technologií (5).....	35
Obr. 4. Obrázek a schéma prvního (rubínového) laseru zkonstruovaného T. H. Maimanem (8)	39
Obr. 5. Skokové změny hodnot energie mezi hladinami	40
Obr. 6. Model atomu (absorpce, emitace).....	40
Obr. 7. Absorpce, spontánní a stimulovaná emise.....	41
Obr. 8. Vlnové délky pro různé typy laserů (9)	43
Obr. 9. Srovnání laserového světla (a) a fokusovaného neparalerního světla (b).....	43
Obr. 10. Srovnání světla vyzařovaného laserem se světlem žárovky (3).....	44
Obr. 11. Vybrané módy s jejich označením a vhodností použití	45
Obr. 12. Příklady osově symetrických módů - válcovité módy (12)	45
Obr. 13. Příklady středově symetrických módů - obdélníkových módů (12)	46
Obr. 14. Tvary paprsku laseru (3)	46
Obr. 15. Rezonátor (10)	48
Obr. 16. Schéma struktury laseru.....	48
Obr. 17. Druhy režimu laserového paprsku (5)	53
Obr. 18. Základní typy konstrukčního řešení vzájemného pohybu paprsku a obrobku (5)	54
Obr. 19. Rubínový laser (13)	58
Obr. 20. He-Ne (Helium – neonový) laser (11)	61
Obr. 21. Laserová dioda (11)	66
Obr. 22. Princip CO ₂ laseru (5).....	67
Obr. 23. Typy oscilátorů pro CO ₂ lasery (a-axiální, b-ortogonální dvoj osový, c-ortogonální troj osový) (5).....	70
Obr. 24. Základní uspořádání hlavy u CO ₂ laserů (5).....	71
Obr. 25. Okrajová podmínka čtvrtého druhu	88
Obr. 26. Chování materiálu při působení laserového paprsku (5)	92

Obr. 27. Procesy probíhající při řezání materiálu laserem.....	92
Obr. 28. CO ₂ laser MERCURY L-30	99
Obr. 29. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PA 6 (Polyamid 6)	109
Obr. 30. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PMMA (Polymethylmethakrylát)	110
Obr. 31. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu).....	110
Obr. 32. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PS (Polystyren)	111
Obr. 33. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál POM (Polyoxymethylen)	111
Obr. 34. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PA 66 (Polyamid 66)	112
Obr. 35. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PC (Polykarbonát)	112
Obr. 36. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PTFE (Polytetrafluorethylen).....	113
Obr. 37. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PP (Polypropylen)	113
Obr. 38. Grafické znázornění hloubek obrobených drážek (h) v μm v závislosti na nastavených parametrech obrábění (posuvu (f) a výkonu (P)). Materiál PVC (Polyvinylchlorid).....	114

Obr. 39. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.1, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění.....	115
Obr. 40. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.2, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění.....	116
Obr. 41. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.3, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění.....	117
Obr. 42. Grafické znázornění hloubek (h) v μm obrobených drážek č.4, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění.....	118
Obr. 43. Ukázka gaussovské distribuce tvaru drážky. Materiál ABS (13).....	120
Obr. 44. Ukázka gaussovské distribuce tvaru drážky. Materiál POM (13).....	121
Obr. 45. Snímky drážek u PA 66, vytvořené při následujících parametrech obrábění: f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80	122
Obr. 46. Snímky drážek u PC, vytvořené při následujících parametrech obrábění: f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80	123
Obr. 47. Snímky drážek u PTFE, vytvořené při následujících parametrech obrábění: f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80	124
Obr. 48. Snímky drážek u PP, vytvořené při následujících parametrech obrábění: f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80	125
Obr. 49. Snímky drážek u PVC, vytvořené při následujících parametrech obrábění: f [%]/ P [%] = 50/ 40; 100/ 40; 50/ 80; 100/ 80	126
Obr. 50. Vytvořená a zesíťovaná plocha modelů.....	135
Obr. 51. Část vytvořeného modelu s detailem na nody, do kterých byl zadáván tepelný tok	138
Obr. 52. Model teplotního pole u PVC s konstantně zadávanými materiálovými parametry.....	140
Obr. 53. Model teplotního pole u PVC s proměnnými materiálovými parametry.....	142
Obr. 54. Model teplotního pole u PS s konstantně zadávanými materiálovými parametry.....	143
Obr. 55. Model teplotního pole u PS s proměnnými materiálovými parametry.....	144
Obr. 56. Model teplotního pole u PMMA s konstantními materiálovými parametry.....	145
Obr. 57. Model teplotního pole u PMMA s proměnnými materiálovými parametry	146
Obr. 58. Model teplotního pole u PC s konstantními materiálovými parametry	147
Obr. 59. Model teplotního pole u PC s proměnnými materiálovými parametry.....	148

Obr. 60. Model teplotního pole u PA 6 s konstantními materiálovými parametry.....	149
Obr. 61. Model teplotního pole u PA 6 s proměnnými materiálovými parametry	150
Obr. 62. Model teplotního pole u PA 66 s konstantními materiálovými parametry.....	151
Obr. 63. Model teplotního pole u PA 66 s proměnnými materiálovými parametry	152
Obr. 64. Model teplotního pole u ABS s konstantními materiálovými parametry	153
Obr. 65. Model teplotního pole u POM s konstantními materiálovými parametry	154
Obr. 66. Model teplotního pole u PP s konstantními materiálovými parametry	155
Obr. 67. Model teplotního pole u PTFE s konstantními materiálovými parametry.....	156
Obr. 68. Model teplotního pole pro Ocel s konstantními materiálovými parametry	157
Obr. 69. Termomechanická křivka amorfního (A) a vysoce krystalického (B) polymeru.....	159

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Vybrané typy laserů (základní informace).....	51
Tab. 2. Klasifikace laserových technologických operací dle normy DIN (5).....	56
Tab. 3. Charakteristiky materiálu (3).....	71
Tab. 4. Konfigurace zrcadel rezonátoru (3).....	72
Tab. 5. Pracovní parametry komerčních CO ₂ laserů (3).....	73
Tab. 6. Bilanční tabulka.....	84
Tab. 7. Základní technické parametry CO ₂ laseru MERCURY L-30.....	99
Tab. 8. Nastavené parametry pro obrábění drážek v [%].....	103
Tab. 9. Nastavené hodnoty pro obrábění drážek v používaných jednotkách pro posuv a výkon.....	104
Tab. 10. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PA 6 (Polyamid 6).....	106
Tab. 11. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PMMA (Polymethylmethakrylát).....	106
Tab. 12. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál ABS (kombinace monomerů akrylonitril-butadien-styrenu)....	106
Tab. 13. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PS (Polystyren).....	107
Tab. 14. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál POM (Polyoxymethylen).....	107
Tab. 15. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PA 66 (Polyamid 66).....	107
Tab. 16. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PC (Polykarbonát).....	108
Tab. 17. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PTFE (Polytetrafluorethylen).....	108
Tab. 18. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PP (Polypropylen).....	108
Tab. 19. Hloubky obrobených drážek (h) v μm v závislosti na výkonu (P) a posuvu (f) laseru. Materiál PVC (Polyvinylchlorid).....	109

Tab. 20. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.1, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))	115
Tab. 21. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.2, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))	116
Tab. 22. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.3, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))	117
Tab. 23. Hloubky (h) v μm obrobených drážek č.4, pro zadané typy materiálů, vytvořených při stejných parametrech obrábění (tedy stejném výkonu (P) a posuvu (f))	118
Tab. 24. Materiálové vlastnosti PVC použité při simulaci s konstantními hodnotami	140
Tab. 25. Materiálové vlastnosti PVC použité při simulaci s proměnnými hodnotami	141
Tab. 26. Materiálové vlastnosti PS použité při simulaci s konstantními hodnotami	142
Tab. 27. Materiálové vlastnosti PS použité při simulaci s proměnnými hodnotami	144
Tab. 28. Materiálové vlastnosti PMMA použité při simulaci s konstantními hodnotami	145
Tab. 29. Materiálové vlastnosti PMMA použité při simulaci s proměnnými hodnotami	146
Tab. 30. Materiálové vlastnosti PC použité při simulaci s konstantními hodnotami	147
Tab. 31. Materiálové vlastnosti PC použité při simulaci s proměnnými hodnotami	148
Tab. 32. Materiálové vlastnosti PA 6 použité při simulaci s konstantními hodnotami	149
Tab. 33. Materiálové vlastnosti PA 6 použité při simulaci s proměnnými hodnotami	150
Tab. 34. Materiálové vlastnosti PA 66 použité při simulaci s konstantními hodnotami	151
Tab. 35. Materiálové vlastnosti PA 66 použité při simulaci s proměnnými hodnotami	152
Tab. 36. Materiálové vlastnosti ABS použité při simulaci s konstantními hodnotami	153
Tab. 37. Materiálové vlastnosti POM použité při simulaci s konstantními hodnotami	154
Tab. 38. Materiálové vlastnosti PP použité při simulaci s konstantními hodnotami	155
Tab. 39. Materiálové vlastnosti PTFE použité při simulaci s konstantními hodnotami	156
Tab. 40. Materiálové vlastnosti Oceli použité při simulaci s konstantními hodnotami	157
Tab. 41. Teploty skelného přechodu T_g , teploty tečení T_f a teploty tání T_m daných typů polymerů	162

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Příkazy z programu COSMOS/M, ABS – konstantní materiálové parametry

Příloha P II: Příkazy z programu COSMOS/M, PA 6 – konstantní materiálové parametry

Příloha P III: Příkazy z programu COSMOS/M, PA 6 – proměnné materiálové parametry

Příloha P IV: Příkazy z programu COSMOS/M, PA 66 – konstantní materiálové parametry

Příloha P V: Příkazy z programu COSMOS/M, PA 66 – proměnné materiálové parametry

Příloha P VI: Příkazy z programu COSMOS/M, PC – konstantní materiálové parametry

Příloha P VII: Příkazy z programu COSMOS/M, PC – proměnné materiálové parametry

Příloha P VIII: Příkazy z programu COSMOS/M, PMMA – konstantní materiálové parametry

Příloha P IX: Příkazy z programu COSMOS/M, PMMA – proměnné materiálové parametry

Příloha P X: Příkazy z programu COSMOS/M, POM – konstantní materiálové parametry

Příloha P XI: Příkazy z programu COSMOS/M, PP – konstantní materiálové parametry

Příloha P XII: Příkazy z programu COSMOS/M, PS – konstantní materiálové parametry

Příloha P XIII: Příkazy z programu COSMOS/M, PS – proměnné materiálové parametry

Příloha P XIV: Příkazy z programu COSMOS/M, PTFE – konstantní materiálové parametry

Příloha P XV: Příkazy z programu COSMOS/M, PVC – konstantní materiálové parametry

Příloha P XVI: Příkazy z programu COSMOS/M, PVC – proměnné materiálové parametry

Příloha P XVII: Příkazy z programu COSMOS/M, ocel – konstantní materiálové parametry

PŘÍLOHA P I: ABS – KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1415,C,1300,KX,0.18
C* R_THERM
```

PŘÍLOHA P II: PA 6 – KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
C* COSMOS/M Geostar V2.50
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1130,KX,0.28,C,1700
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P III: PA 6 – PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1130
CURDEF,TEMP,1,1,20,1700,220,2900,305,2900,1000,2900
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.28,50,0.32,60,0.28,95,0.28,130,0.22,1000,0.22
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERM
```

PŘÍLOHA P IV: PA 66–KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1140,KX,0.27,C,1700
C* R_THERMAL
```


PŘÍLOHA P V: PA 66 – PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1140
CURDEF,TEMP,1,1,20,1700,270,3000,325,3000,1000,3000
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.27,50,0.31,60,0.27,95,0.27,130,0.22,1000,0.22
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERM
```

PŘÍLOHA P VI: PC – KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1210,KX,0.19,C,1170
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P VII: PC – PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1210
CURDEF,TEMP,1,1,20,1170,250,2400,360,2400,1500,2400
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.18,100,0.18,130,0.19,250,0.19,300,0.19,1500,0.19
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P VIII: PMMA – KONST. MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P IX: PMMA–PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1200
CURDEF,TEMP,1,1,20,1500,200,2400,300,2400,1000,2400
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.2,80,0.22,110,0.2,140,0.16,300,0.16,1000,0.16
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERM
```

PŘÍLOHA P X: POM –KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1050,KX,0.27,C,1460
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P XI: PP – KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,910,KX,0.2,C,2000
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P XII: PS – KONSTANTNÍ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,KX,0.16,DENS,1030,C,1300
C* R_THERMAL
```


PŘÍLOHA P XIII: PS – PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1030
CURDEF,TEMP,1,1,20,1300,200,2500,290,2500,1000,2500
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.15,50,0.16,70,0.16,80,0.17,100,0.17,110,0.16,290,0.16,1000,0.16
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P XIV: PTFE – KONST. MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,2150,KX,0.25,C,1000
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P XV: PVC – KONST. MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,KX,0.15,DENS,1480,C,900
C* R_THERMAL
```

PŘÍLOHA P XVI: PVC –PROMĚNNÉ MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,1480
CURDEF,TEMP,1,1,20,900,80,1100,90,1700,210,1700,220,1700,1000,1700
MPROP,1,C,1
ACTSET,TP,0
CURDEF,TEMP,2,1,20,0.15,80,0.16,90,0.15,110,0.15,120,0.14,220,0.14,1000,0.14
MPROP,1,KX,1
ACTSET,TP,0
C* R_THERM
```

PŘÍLOHA P XVII: OCEL – KONST. MATERIÁLOVÉ PARAMETRY

List of commands

```
PLANE,Z,0,1
PT,1,0.005,0,0
PT,2,0,0,0
CRLINE,1,1,2
SFEXTR,1,1,1,Y,-0.005
M_SF,1,1,1,4,100,100,1/5,5
ACTDMESH,SF,1
SFSYM,1,1,1,X,1,0
EGROUP,1,PLANE2D,0,1,0,0,0,0,0
RCONST,1,1,1,2,1,0
MPROP,1,KX,0.2,DENS,1200,C,1500
CURDEFTIME,TIME,1,1,0,0,100,1
INITIAL,TEMP,1,20402,1,20
TIMES,0,100,1
A_THERMAL,T,0.001,1,1,20,0,1,1E+008,0,0
NMERGE,1,20402,1,0.0000001,0,0,0
NCOMPRES,1,20401
PT,7,0.0001,0,0
PTDEL,7,7,1
ACTSET,SEL,2
SELPIC,ND,10392,10394,10396,10398,10400,101,100,99,98,97,96,0
QND,1,5,50000,1
C* R_THERMAL
QND,1,15,50000,1
MPDEL,1,1,1
MPROP,1,DENS,7850,KX,50,C,460
QND,1,1500,50000,1
C* R_THERMAL
```