

Vliv technologie na mechanické vlastnosti polymerů

Bc. Rostislav Zeman

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Rostislav ZEMAN**

Osobní číslo: **T070035**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv technologie na mechanické vlastnosti polymerů**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši na dané téma.

Provedte hodnocení fyzikálně-mechanických charakteristik plastů

Provedte obrábění vzorků různými technologiemi (frézování, broušení, laser)

Vyhodnoťte změny fyzikálně-mechanických charakteristik

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

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

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2011**

Ve Zlíně dne 15. března 2011

doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá porovnáním změn fyzikálně-mechanických charakteristik plastů, při použití různých technologií.

V teoretické části jsou vedle přehledu vlastností použitých materiálů, popsány použité technologie. Konkrétně frézování, broušení a laserové řezání.

V praktické části byl experimentálně zjištěn a vyhodnocen vliv jednotlivých technologií na fyzikálně-mechanické charakteristiky zkoušených plastů.

Klíčová slova: broušení, frézování, laser, polymery,

ABSTRACT

Presented master thesis deals with comparing of changes physi-mechanics characteristics of plastics with using of diferent technologies of machining.

In teoretical part are near by view of used materials, described used technologies. Concrete-ly milling, grinding, laser cutting.

In practical part was experimentaly identified and analysed influence of single technologies to physi-mechanical characteristics of testing plastics.

Keywords: grinding, milling, laser, polymers,

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí své diplomové práce Doc. Ing. Libuši Sýkоровé Ph.D. za odborné vedení a poskytnutí cenných rad, při řešení problémů spjatých s problematikou diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při měření.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

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

Ve Zlíně dne 13.5.2011

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POUŽITÉ KONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	12
1.1 FRÉZOVÁNÍ.....	12
1.1.1 Metody frézování	12
1.1.2 Sousedné a nesousedné frézování	14
1.1.3 Frézovací stroje	15
1.1.4 Dosahované parametry	18
1.2 BROUŠENÍ.....	18
1.2.1 Způsoby broušení	19
1.2.2 Dosahované parametry	22
2 POUŽITÁ NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - LASER	24
2.1 PRINCIP LASERU	24
2.2 KONSTRUKCE LASERU	29
2.2.1 Laserová hlavice.....	29
2.2.2 Laserové médium	29
2.2.3 Rezonátor	30
2.2.4 Budicí zařízení	30
2.2.5 Chladicí systém	31
2.3 ROZDĚLENÍ A CHARAKTERISTIKA LASERŮ	31
2.3.1 Lasery podle aktivního prostředí.....	32
2.3.2 Lasery podle vlnové délky záření.....	38
2.3.3 Lasery podle druhu a režimu paprsku	38
2.3.4 Lasery podle dosahovaného výkonu.....	38
2.3.5 Lasery podle typu buzení.....	38
2.3.6 Lasery podle použití v technologii	39
2.4 TEORIE A TECHNOLOGIE LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ	39
2.4.1 Řezání nekovových materiálů	41
2.4.2 Strukturní změny polymeru	42
2.4.3 Stroj pro laserové řezání.....	43
2.4.4 Dosahované parametry	44
3 POLYMERNÍ MATERIÁLY	45
3.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ.....	45
3.2 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH POLYMERŮ.....	46
3.2.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	46
3.2.2 Polypropylen (PP)	47
3.2.3 Polymethylmetakrylát (PMMA).....	48
3.2.4 Polyamid 6 (PA6).....	50
4 STATISTIKA	51

4.1	ETAPY STATISTICKÉ PRÁCE.....	51
4.2	CHARAKTERISTIKY STATISTICKÉHO SOUBORU.....	51
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	54
6	ZKUŠEBNÍ TĚLESA A ZAŘÍZENÍ.....	55
6.1	MATERIÁLY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	55
6.2	TVAR ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	55
6.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	56
6.3.1	Vstřikováním.....	56
6.3.2	Frézováním.....	58
6.3.3	Broušením.....	59
6.3.4	Laserovým řezáním.....	60
6.4	POUŽITÁ ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	61
6.4.1	Drsnoměr Mitutoyo SJ-301.....	61
6.4.2	Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456.....	62
7	PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....	64
7.1	MĚŘENÍ DRSNOSTI OBROBENÉ PLOCHY.....	64
7.1.1	Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	65
7.1.2	Polypropylen (PP).....	68
7.1.3	Polymethylmetakrylát (PMMA).....	73
7.1.4	Polyamid 6 (PA 6).....	78
7.1.5	Polyamid 6 + 30% skelných vláken (PA6+30%GF).....	81
7.2	ZKOUŠKA TAHEM.....	84
7.2.1	Nízkohustotní polyetylen (LDPE).....	86
7.2.2	Polypropylen (PP).....	89
7.2.3	Polymethylmetakrylát (PMMA).....	94
7.2.4	Polyamid 6 (PA6).....	99
7.2.5	Polyamid 6 + 30% skelných vláken (PA6+30%GF).....	102
7.3	VYHODNOCENÍ ZMĚN FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK MATERIÁLŮ VLIVEM TECHNOLOGIE.....	105
7.3.1	Shrnutí vlivu třískového obrábění.....	105
7.3.2	Shrnutí vlivu laserového řezání.....	105
	ZÁVĚR	107
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	109
	SEZNAM OBRÁZKŮ	113
	SEZNAM TABULEK.....	116

ÚVOD

Společensko-ekonomické změny vznikající v Evropě v závěru 20. století a vznik Evropské unie postavily výrobce před úkol, zefektivnění výroby zaváděním nových technologií, automatizace výrobního procesu a v neposlední řadě zaváděním nových systémů jakosti, tak aby byli výrobci schopni obstát v konkurenci na novém trhu.

Fenoménem této doby tak je honba za co největší užitnou hodnotou výrobků. Různé metody obrábění tak mezi sebou soutěží v tomto souboji efektivity a zákazník poté sklízí plody tohoto procesu.

Třískové obrábění je jedním z nejdůležitějších procesů ve zpracování materiálů. Hned vedle soustružení je nejvýznamnějším způsobem obrábění frézování. V dokončovacích operacích při obrábění kovových i nekovových materiálů si i dnes udržuje svoje pozice technologie broušení, která je při určitých požadavcích jakosti povrchu nezastupitelná.

Klasické metody obrábění, mnohdy nesplňující požadovaná kritéria, však často nahrazuje soustředěný laserový paprsek, jenž je schopen zpracovávat kovové i nekovové materiály s velmi vysokou kvalitou a novými technologickými postupy.

Tato diplomová práce je zaměřena na porovnání změn fyzikálně-mechanických charakteristik materiálů, při užití různých technologií. Konkrétně pak při použití frézování, broušení a laserového řezání.

TEORETICKÁ ČÁST

1 POUŽITÉ KONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Obráběcí proces se uskutečňuje různými metodami obrábění. K základním použitým metodám patří frézování a broušení.

1.1 Frézování

Frézování je operace třískového obrábění, při které je z obrobku odebírána vrstva materiálu ve formě jednotlivých drobných třísek rotačním vícezubým nástrojem - frézou. Fréza se při práci otáčí kolem své osy a svými zuby po obvodě se postupně zařezává do obrobku, který se proti nástroji současně posouvá. Každý zub frézy postupně odřezává z obráběného materiálu krátké třísky nestejně tloušťky, takže proces řezání je přerušovaný. Touto metodou, použitím různých druhů frézovacích nástrojů, je možné obrábět na obrobcích především plochy rovinné, ale také plochy tvarové, šikmé, nepravidelné, rotační, dále drážky a vybrání různých tvarů apod. Toto široké uplatnění a možnost přesné výroby zařadily frézování na významné místo ve strojírenské výrobě.[4]

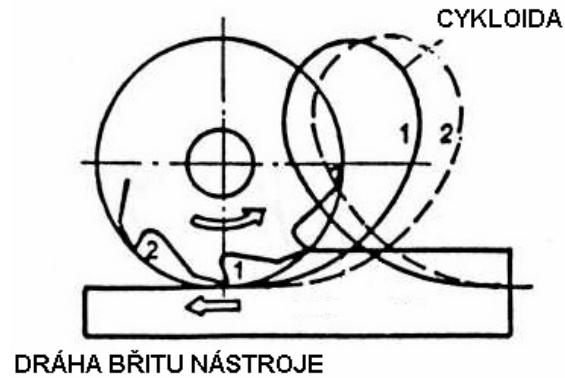
Posuv nejčastěji koná součást, převážně ve směru kolmém k ose nástroje. U moderních frézovacích strojů jsou posunové pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky).

1.1.1 Metody frézování

Z technologického hlediska se v závislosti na aplikovaném nástroji rozlišuje frézování obvodové a frézování čelní. Od těchto základních způsobů se odvozují některé další způsoby, jako frézování okružní a planetové.[3]

Obvodové frézování

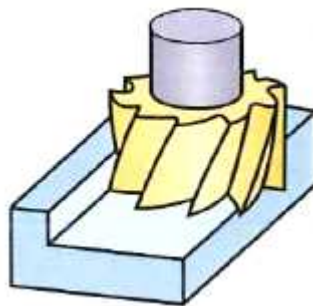
Při obvodovém frézování se odebírá z obrobku třísky břity uspořádanými po obvodě frézy. Směr posuvu je kolmý k ose frézy. Výsledný řezný pohyb, tj. dráha břitu nástroje vzhledem k obrobku je prodloužená cykloida, vytvořená otáčivým pohybem břitu nástroje a podélným, přímočarým pohybem obrobku (Obr.1). Podle směru posuvu obrobku vzhledem k směru otáčení frézy rozeznáváme frézování sousledné a nesousledné.[2]



Obr.1 Řezný pohyb obvodového frézování[4]

Čelní frézování

Při čelním frézování je osa frézy kolmá k frézované ploše, z níž se oddělují třísky břity na čele. Může však fréza (stopková) oddělovat i třísky břity na obvodu(Obr.2), případně jen na obvodu. Pak je opracovaná plocha rovnoběžná s osou frézy a podle jejího tvaru to může být buď plocha rovinná a nebo tvarová.[2]



Obr.2 Válcová čelní fréza[1]

Okružní frézování

Okružní frézování se používá při obrábění dlouhých tyčí a při výrobě závitů. Jako nástroj slouží frézovací hlava osazena několika noži. Při frézování tyčí se frézovací hlava otáčí i posouvá, při frézování závitů se jen otáčí. Zbývající pohyby nutné k obrábění vykonává obrobek.[4]

Planetové frézování

Frézování planetové se uplatňuje u číslicově řízených strojů a obráběcích center, vybavených kruhovou interpolací dráhy nástroje, jehož pohyb může být pořízen po kružnici, což umožňuje frézovat celé rotační plochy nebo jejich části.[4]

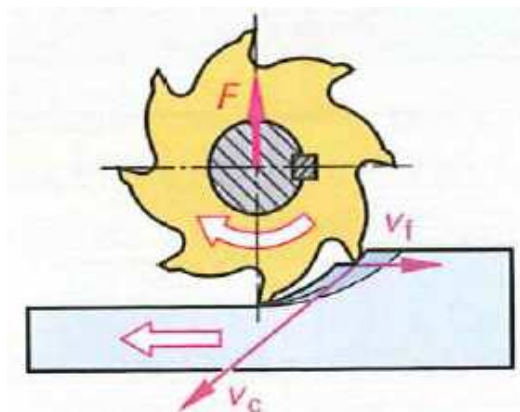
1.1.2 Sousedné a nesousedné frézování

Podle toho, zda posuv materiálu směřuje při frézování proti směru pohybu nebo ve směru pohybu břitů frézy, se hovoří o sousledném či nesousledném frézování.

Sousledné frézování

Při sousledném frézování mají posuv a řezný pohyb stejný směr a břit začíná řez nárazem do materiálu a záběrem třísky (Obr.3). Tloušťka třísky během záběru klesá, klesá i řezná síla a kvalita obrobeneho povrchu je v porovnání s frézováním nesousledným lepší. Další výhody spočívají v delší trvanlivosti nástroje, ve větších hloubkách řezu a výkonech.

Nevýhodou sousledného frézování je značný silový ráz při záběru každého zubu do materiálu. Dá se však odstranit použitím fréz se šikmými zuby. Sousedné frézování není vhodné pro obrábění odlitků a obrobků s tvrdým povrchem. Posuvový mechanismus nesmí mít vůli.[1]

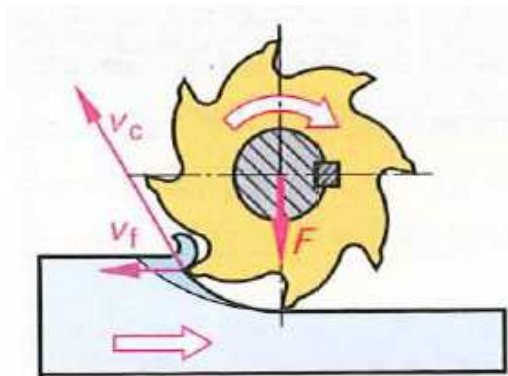


Obr.3 Sousedné frézování [1]

Nesousledné frézování

Pohybuje-li se v okamžiku záběru břít proti směru posuvu, mluvíme o nesousledném frézování (Obr.4). Před vniknutím břitu do materiálu klouže břit po povrchu a opotřebovává se jeho hřbet. Po vniknutí břitu do materiálu se postupně zvětšuje tloušťka třísky a narůstá taky řezná síla, která má snahu obrobek zvednout.

Nesousledným frézováním je možné obrábět odlitky i válcové polotovary bez nebezpečí vylamování břítů na tvrdém povrchu. Řezný výkon je poměrně malý a vertikální posuv stolu nesmí mít vůli, aby se stůl nemohl zvedat.[1]



Obr.4 Nesousledné frézování[1]

1.1.3 Frézovací stroje

Základní rozdělení frézek podle polohy osy vřetene je vertikální a horizontální. Některé stroje umožňují přestavbu na oba typy strojů. Frézky jsou dodávány ve velkém množství modelů a velikostí. Zpravidla se dají rozdělit do čtyř skupin na konzolové, rovinné, stolové a speciální.

Konzolové frézky

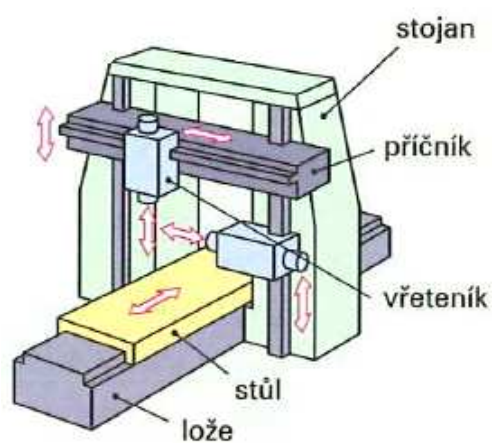
Příznačnou částí těchto strojů je výškově nastavitelná konzole pro vedení stojanu, po níž se pohybuje příčný stůl s podélným pracovním stolem(Obr.5). Kombinace těchto pohybů dává možnost přestavování obrobku upnutého na pracovním stole ve třech pravoúhlých souřadnicích vzhledem k nástroji. Konzolové frézky jsou vhodné pro frézování tvarových a rovinných ploch u středně velkých obrobků v kusové a malosériové výrobě. Vyrábějí se ve třech základních provedeních, frézky konzolové svislé, vodorovné a univerzální.[3]



Obr.5 Konzolová frézka[4]

Rovinné frézky

Rovinné frézky se využívají k opracování velkých a těžkých obrobků. Váhu obrobku i řezné síly nese tuhé lože stroje, které zaručuje přesný pohyb podélných saní. Absenci svislého posuvu konzolového stolu nahrazuje pohyb příčnicku na stojanech či pohyb vřeteníku na svislém stojanu.(Obr.6)



Obr.6 Rovinná frézka[1]

Stolové frézky

Stolové frézky se vyrábějí v provedení svislém i vodorovném, lze na nich obrábět rozměrnější a těžší obrobky. Na místo konzole mají tyto stroje zpravidla podélný a příčný stůl. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním frézovacího vřeteníku po vedení stroje.[3]

Speciální frézky

Moderní trendy ve frézování též směřují k univerzálním CNC strojům ve víceosém provedení. CNC frézky mají odměřované, řízené a regulované pohyby ve všech osách. Kromě tří posuvů bývá ještě řízeno otáčení stolu. Pohyby ve všech řízených osách mohou probíhat současně s přesnou synchronizací. Ve spojení s automatickým zařízením pro výměnu nástrojů může být opracování upnutého obrobku plně automatické. Samostatná obráběcí CNC centra (Obr. 7) umožňují rychlé programování s grafickou podporou i v případě složitých dílů. Programové vybavení zahrnuje i sledování životnosti nástrojů a také simulaci pro vyzkoušení programu s kontrolou kolizních situací.[1]



Obr. 7 CNC frézovací centrum[4]

1.1.4 Dosahované parametry

Výkon i jakost frézované plochy se zvětšuje použitím řezných kapalin. Při jejím použití se třísky na břit nenalepují, což zlepšuje jakost obrobené plochy. Drsnost frézované plochy závisí na házení břitu, na velikosti posuvu, na řezné rychlosti, na průměru frézy a jejím otupení. V Tab. 1 jsou uvedeny jakosti obrobené plochy, dosahované při různých způsobech frézování.[4]

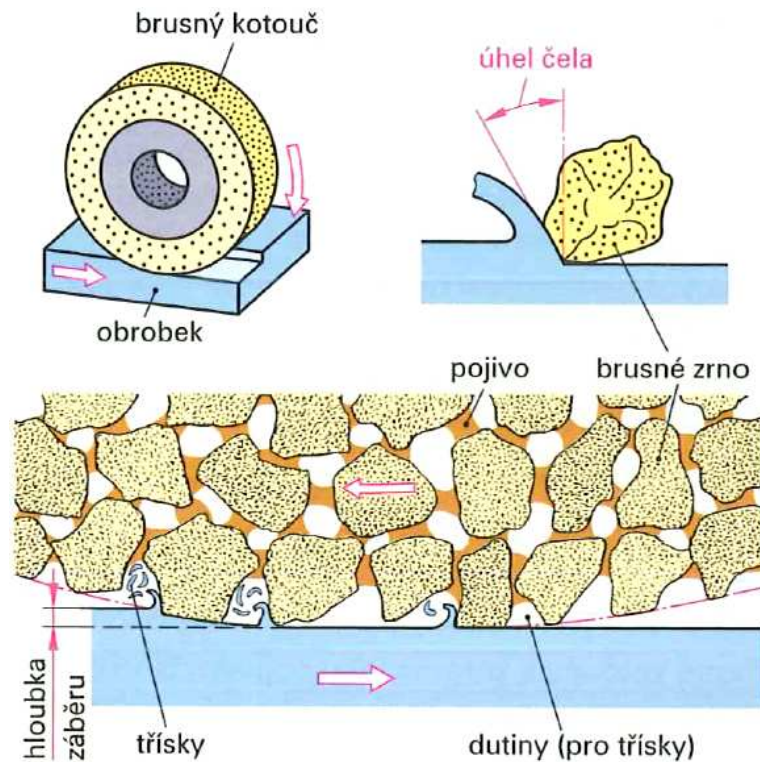
Tab. 1 Jakosti obrobené plochy při různých způsobech frézování[4]

Typ frézování	Způsob frézování	Jakost obrobené plochy Ra(μm)
Válcovou frézou	Hrubování	6,3 - 25
	Načisto	1,6 – 6,3
Jemné frézování		0,8 – 1,6

1.2 Broušení

Broušení patří mezi abrazivní metody obrábění, které jsou charakterizovány použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu a představují nejvíce využívané aplikace při obrábění strojírenských součástí, u kterých jsou požadovány vysoké parametry přesnosti obrobekových ploch. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které nelze jinými obráběcími metodami obrobřit, nebo je broušící metoda hospodárnější než jiné. S rozvojem výkonných broušících nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění.[3]

Broušením se odebrává materiál obrobku zrný brusiva ve tvaru jemných třísek(Obr. 8). Broušící kotouč vykonává rotační hlavní řezný pohyb. Posuvový pohyb vykonává obrobek nebo broušící kotouč. Broušením lze vytvářet přesné rovinné, válcové, ale i kuželové plochy a plochy obecného tvaru. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo kov shoří. Jednotlivá broušící zrna mají nepravidelný geometrický tvar, vysokou tvrdost, odolnost proti teplotě a nepravidelné poloměry zaoblení ostří.[1, 3]



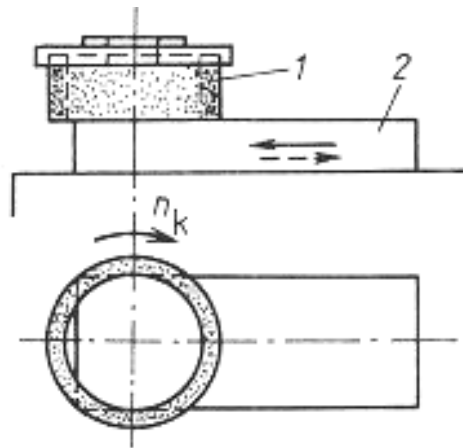
Obr. 8 Odběr třísek brusným kotoučem[1]

1.2.1 Způsoby broušení

V názvu způsobu broušení jsou obvykle zahrnuty hlavní charakteristiky broušení, jako tvar broušené plochy, aktivní plocha brusného kotouče a směr posuvu.

Rovinné broušení

Při čelním rovinném broušení se brousí rovnou čelní plochou brusného kotouče (Obr. 9). Pohyb obrobku může být podélný nebo kruhový (na otočném stole). Při čelním broušení je stále v záběru velká plocha kotouče a je proto zanesena třískami. V důsledku toho dochází k velkému tlaku kotouče na obrobek, k velkému odběru třísky, ale špatné kvalitě broušeného povrchu.

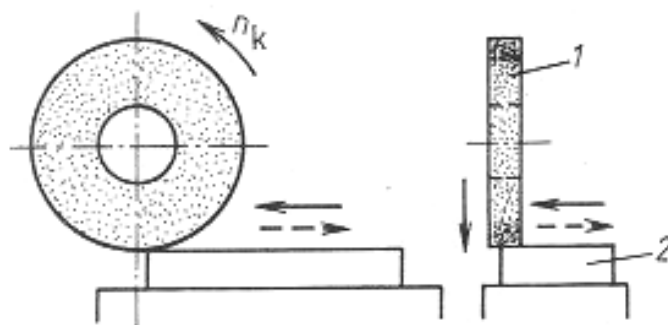


Obr. 9 Rovinné broušení čelem kotouče[5]

1 - brousící kotouč, 2 – obrobek,

 n_k – otáčky kotouče

Při obvodovém rovinném broušení koná obrobek vratný přímočarý pohyb. Brouší se válcovou obvodovou plochou brusného kotouče(Obr.10). Plocha záběru je malá a kotouč se nezanáší. Průměr a šířka kotouče by měly být co největší kvůli velkému brousícímu výkonu při větší ploše záběru. V ideálním případě je kotouč širší než broušená plocha, tím se zmírní opotřebení hran a lokální přehřívání kotouče.[1]



Obr.10 Rovinné obvodové broušení[5]

1 – brousící kotouč, 2 – obrobek, n_k – otáčky kotouče

Na rovinných bruskách lze kromě rovinných ploch brousit také tvarové plochy, např. šablony, profily apod. Podle polohy vřetena se dělí na vodorovné a svislé. Obrobky se nejčas-

těži upínají na elektromagnetickou desku umístěnou na pracovním stole. Používají se v kusové a malosériové výrobě s vyššími požadavky na přesnost broušených ploch. U vodorovných brusek je brousící vřeteník svisle přestavitelný. Na stojanu stroje je vedení pro příčné saně, na nichž se v podélném směru pohybuje stůl. Rychlost stolu je možné plynule měnit.

U svislé rovinné brusky je brousící vřeteník posuvný po stojanu. Pracovní stůl uskutečňuje pouze přímočarý vratný pohyb (Obr. 11). Jakost broušené plochy je horší než při broušení na vodorovných rovinných bruskách.[5]



Obr. 11 Rovinná bruska[5]

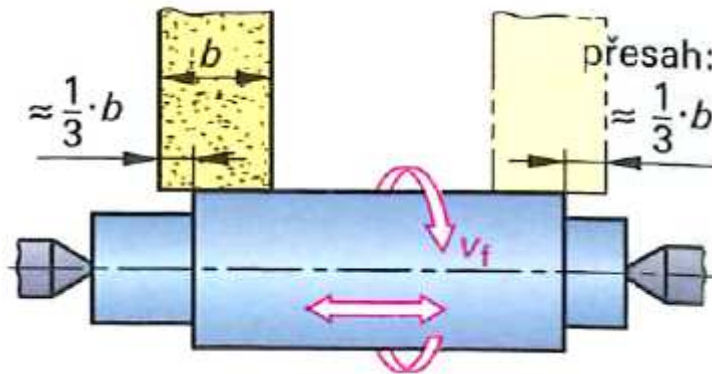
Broušení rotačních ploch

Pro broušení vnějších rotačních ploch je typická úzká plocha záběru. Tato okolnost je příznivá malému vývinu tepla, dobrému přístupu brousící kapaliny a snadnému vyplavování třísek z kotouče.

Při podélném broušení koná pracovní stůl s obrobkem přímočarý (většinou vratný) pohyb. Při broušení válcových ploch se nechává při podélném pohybu přejít okraj broušené plochy přes střed plochy kotouče, aby neměly konce větší průměr (Obr. 12).

Při zápichovém broušení je přísvuv spojitý, až do dosažení cílového rozměru broušené plochy. Kotouč je širší než broušená plocha, podélný pohyb proto není zapotřebí.

U bezhrotého broušení vnějších válcových ploch je obrobek veden volně mezi brousícím a podávacím kotoučem. Od pomalu se otáčejícího podávacího kotouče obrobek získává přibližně stejnou obvodovou rychlost.[1]



Obr. 12 Vnější podélné broušení dokulata[1]

Při vnitřním rotačním broušení je oproti vnějšímu broušení větší plocha záběru a dlouhé tenké třísky, které zanáší brusný kotouč. Průměr kotouče je omezen průměrem dutiny a opotřebením se poměrně rychle zmenšuje. Mezi vřetenem a obrobkem nesmí vznikat příliš velká příčná síla vychylující kotouč z osy, proto je třeba volit malou šířku brusného kotouče a malý přísuv. Vnitřní rotační broušení se dělí na axiální, zápichové, bezhroté a planetové.[1]

Broušení tvarové

Se provádí na bruskách speciálních konstrukcí. Tvarovými brousícími kotouči, nebo kopírovacím způsobem.[5]

1.2.2 Dosahované parametry

Technologie broušení se ve většině případů používá jako dokončovací operace, proto požadujeme, aby tomu odpovídala přesnost rozměrů a jakost obrobených ploch. Tyto parametry závisí především na tuhosti a přesnosti brusky, velikosti zrna a dalších vlastnostech brousícího kotouče, na způsobu broušení a na řezných podmínkách.

V Tab. 2 jsou uvedeny jakosti obrobené plochy, dosahované při různých způsobech broušení.[5]

Tab. 2 Jakosti obrobené plochy při různých způsobech broušení[5]

Broušená plocha	Způsob broušení	Jakost obrobené plochy Ra(μm)
Rovinná	Hrubování	0,8 – 6,3
	Načisto	0,2 – 1,6
Vnitřní válcová	Hrubování	1,6 – 3,2
	Načisto	0,4 – 1,6
Vnější válcová	Hrubování	1,6 – 3,2
	Načisto	0,4 – 1,6

2 POUŽITÁ NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ - LASER

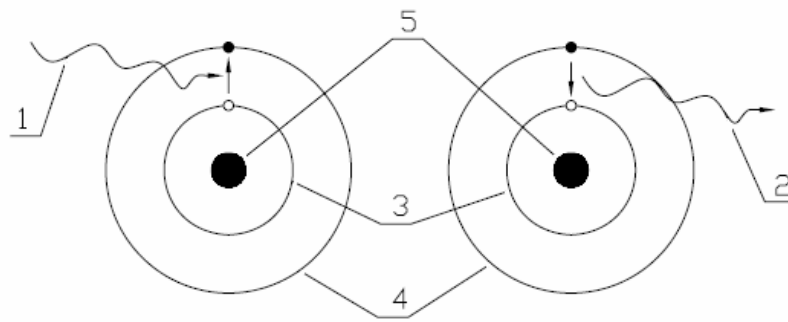
Historie vývoje laserových procesů začíná už roku 1917, kdy Albert Einstein popsal teoretické základy vynucené emise záření. První konstrukční plány laseru uveřejnili v roce 1958 vědci Charles Townes a Arthur Leonard Shawlow. O dva roky později v roce 1960 v USA předvedl první funkční laser Theodore Harold Maiman.

Neobyčejný rozvoj laserové technologie byl zaznamenán od roku 1971. Od svého vzniku se laser uplatnil v celé řadě oborů, z nichž nejznámější jsou:

- průmyslové aplikace
- zkušební metody bez porušení materiálu
- CD přehrávače
- lékařství
- výpočetní technika
- měřicí systémy [6]

2.1 Princip laseru

Zkratka LASER je složeninou z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená doslova „světlo zesílené stimulovanou (vynucenou) emisí záření“. Indukovaná emise je vyvolána dopadem záření na atom prvku, kdy záření donutí elektron obíhající kolem jádra přijmout energii a tím vystoupat na vyšší oběžnou dráhu. Další příjem energie a rovnováha sil v atomu přinutí elektron vrátit se na svoji původní oběžnou dráhu a vyzářit přijatou energii do prostoru.(Obr. 13)



Obr. 13 Model atomu [9]

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

Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Využívá tzv. stimulovanou emisi záření na produkci světelného paprsku, který má několik velmi významných vlastností:

- monochromaticnost
- vysokou koherenci
- minimální rozbíhavost (divergenci)
- vysokou výstupní intenzitu záření
- módovou strukturu [6]

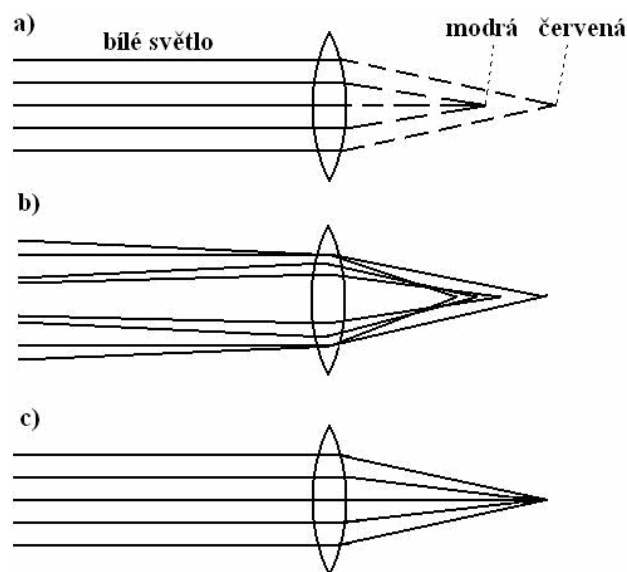
a) Monochromaticnost záření

Záření laserového paprsku má prakticky jen jednu vlnovou délku (udávanou v nanometrech), která určuje, v které části spektra se bude laserový paprsek pohybovat. Vlnová délka je navíc důležitá i pro velikost stopy laseru. 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.[12]

Díky tomu, že laserové světlo je monochromatické a rovnoběžné, lze ho soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku (Obr. 14

Obr. 14c). Na obrázku (Obr. 14) vidíme srovnání fokusovaného bílého světla a), kdy má každá barva jinou ohniskovou vzdálenost od čočky, se světlem fokusovaným neparalelním b), kde ohnisková vzdálenost závisí na úhlu dopadu původního paprsku.



Obr. 14 Porovnání bílého a laserového světla [10]

- a) fokusované bílé světlo
- b) neparalelní fokusované světlo
- c) laserové světlo

b) Vysoký stupeň koherence záření

Stupeň koherence zahrnuje koherenci časovou a prostorovou. Zlepšení koherenčních vlastností lze dosáhnout zvýšením monochromatickosti a ohraničením velikosti zářící plochy zdroje. Monochromatickosti záření ovlivňuje koherenci časovou a velikost zářící plochy zdroje ovlivňuje koherenci prostorovou. [13]

V prostorově koherentním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází, v rovině kolmé na směr šíření paprsku. V časově koherentním paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází ve směru šíření paprsku.

c) Minimální divergence (rozbíhavost) výstupního svazku

Může se šířit na velké vzdálenosti bez znatelného rozšíření. Díky této vlastnosti může být svazek přesně fokusován do velmi malého průměru. [13]

d) Vysoká intenzita výstupního záření

Není nijak limitována zákony záření absolutně černého tělesa a platí pro ni vztah:

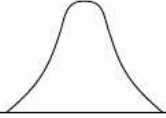
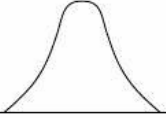
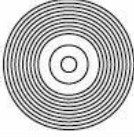
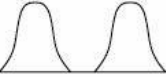
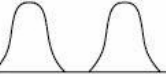
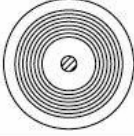
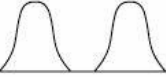
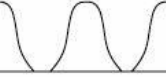
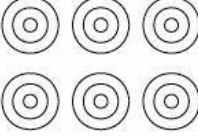
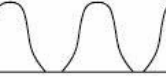
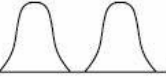
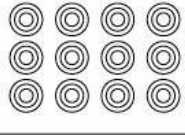


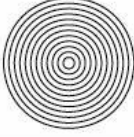
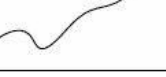
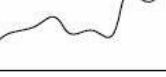
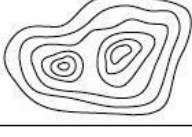
$$I = I_0 \cdot \exp(-2r^2/r_0^2) \quad (1)$$

kde I_0 je intenzita záření ve středu paprsku, r_0 je poloměr, v kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem e^2 . [6]

e) Módová struktura

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. 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 konfigurací mód, v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. [11]

Mód laseru určuje jeho vhodnost pro průmyslové použití, jako například pro řezání, svařování apod. (Obr. 15) [11]

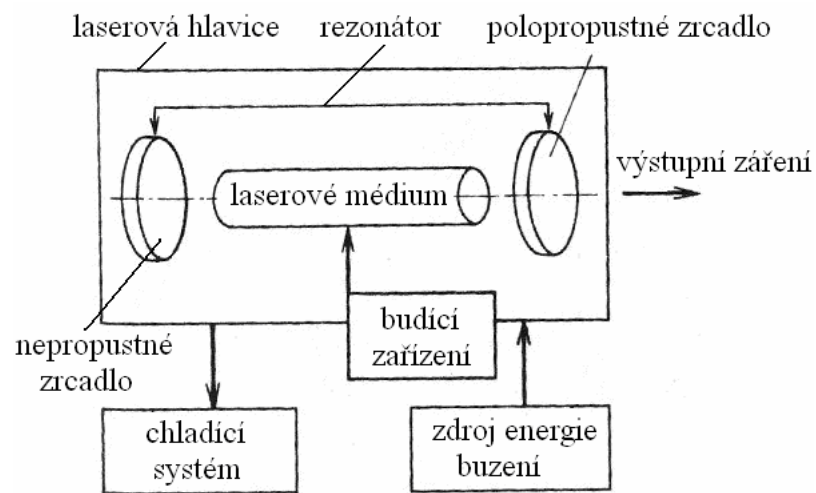
Průřez A v rovině kolmé na směr paprsku	Průřez B kolmý na A	Půdorys	Označení TEM (použití)
			TEM ₀₀ , Gauss (řezání)
			TEM ₀₁ (svařování, kalení)
			TEM ₂₁
			TEM ₃₂ (málo používané)
			multimód (řezání)
			multimód (nevhodné pro řezání)

Obr. 15 Ukázky módové struktury laserů, označení TEM a jejich použití [10]

Uvedené vlastnosti laserového paprsku umožňují při jeho fokusaci soustředit do malého bodu mimořádně vysokou hustotu energie v místě dopadu paprsku, což má za následek natavení (až odpaření) materiálu, čímž se dosáhne požadovaný efekt zpracování.[6]

2.2 Konstrukce laseru

Hlavní částí každého laseru jsou (Obr. 16):



Obr. 16 Schéma laseru [7]

2.2.1 Laserová hlavička

Laserová hlavička (Obr. 17) obsahuje laserové médium a rezonátor.



Obr. 17 Laserová hlavička [17]

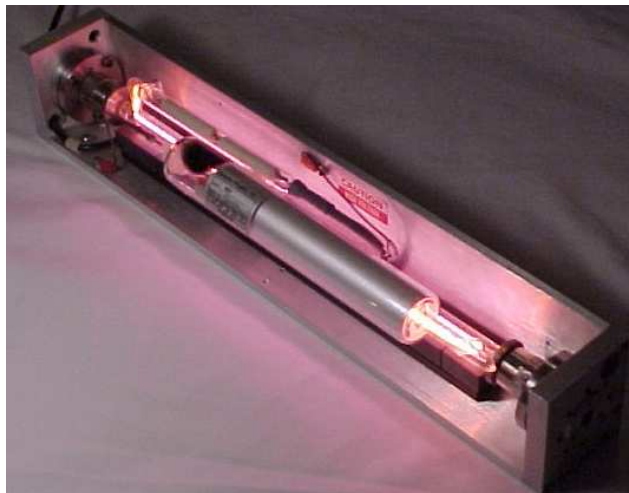
2.2.2 Laserové médium

Laserové médium je uzavřeno mezi dvěma zrcadly a určuje délku vlny záření. Je směsí několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu,

který je průhledný a má schopnost odvádět vzniklé teplo. Laserové médium může být pevné, tekuté, plynné, příp. to mohou být páry. [7]

2.2.3 Rezonátor

Rezonátor (Obr. 18) je optický systém, umožňující zformovat a zesílit záření, tj. elektromagnetickou vlnu z něj vycházející. Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Optický rezonátor tvoří nejméně dvě zrcadla. Průměr a zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, tj. divergenci paprsku, která je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří. Rozdělení intenzity záření v průřezu výstupního paprsku laseru vyjadřuje tzv. MOD (Obr. 15).[7]

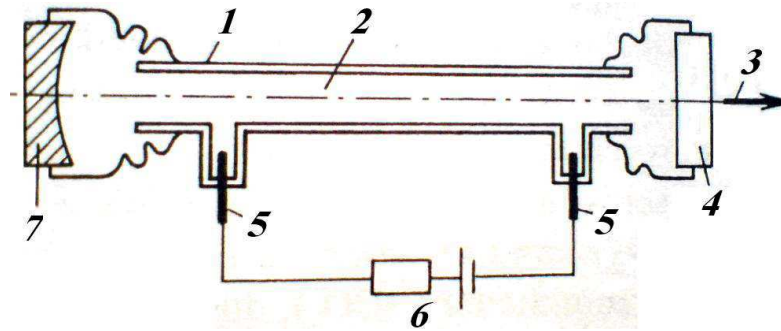


Obr. 18 Rezonátor laseru [17]

2.2.4 Budicí zařízení

Budicí zařízení ovlivňuje pracovní režim laseru. Způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem (Obr. 19), stejnosměrným nebo střídavým proudem. Lze však použít buzení chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu nebo opticky. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami, ve zvláštních případech záření jiného laseru. [8]

Zdrojem energie budicího zařízení jsou speciální druhy síťových napáječů, které mohou pracovat buď kontinuálně nebo pulsně.[7]



Obr. 19 Buzení elektrickým výbojem [7]

- 1 – laserová trubice, 2 – plynné laserové médium, 3 – výstupní záření,
 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – elektroda, 6 – budící zařízení,
 7 – nepropustné zrcadlo

2.2.5 Chladicí systém

Chladicí systém odvádí nevyužitou energii, jež se nepřemění v záření, ale v tepelnou energii. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve: vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Vysokovýkonné laserové systémy vyžadují chlazení pro svůj optimální výkon a dlouhou životnost. Nedílnými komponenty laserových systému se tak staly recirkulační chladiče, vnější chlazení, LCS a výměníky tepla.[8]

2.3 Rozdělení a charakteristika laserů

Vzhledem k rozmanitosti dostupných laserů, rozdílností jejich vlastností, dosahovaných výkonů i oblasti použití je potřeba určité systematické rozdělení druhů laserů. Lasery je tedy možné rozdělit podle:

- aktivního prostředí
- vlnové délky
- druhu a režimu paprsku
- výkonu
- typu buzení
- podle použití v technologii[6]

2.3.1 Lasery podle aktivního prostředí

Jako laserové aktivní prostředí mohou sloužit rozličné materiály v různých skupenských stavech. Vlastnosti materiálů aktivního prostředí se proto od sebe velmi výrazně liší a je výhodné sledovat odděleně lasery s aktivním prostředím z látek pevných, kapalných i plyných.[14]

a) Pevnolátkové lasery

Pro pevnolátkové lasery se jako aktivní prostředí využívají monokrystalické nebo amorfní látky, do kterých se přidávají příměsi aktivačních prvků. Kvanty energie se vyzařují a absorbují při změně energetických stavů příměsových atomů. Základní látka se těchto procesů nezúčastňuje, ale jen nepřímo ovlivňuje vlastnosti celé látky.[15]

U krystalických materiálů jsou aktivní ionty zabudovány v krystalové mřížce a mají stálou, orientovanou polohu v silovém poli mřížky.[14]

Aktivní prostředí z těchto materiálů se obvykle formuje do tvaru válce, a tím se tvarem přizpůsobuje optickému rezonátoru. Jsou-li konce válce zbrúšeny s velkou přesností kolmo k optické ose a pečlivě vyleštěny, tvoří planparalelní konce vlastní rezonátor.

K tomu je ještě třeba kolmo zabroušené konce opatřit odraznými vrstvami (buď napařením kovové, anebo selektivně odrazné dielektrické vrstvy). K omezení odrazů na stěnách válečků se jejich povrch ponechává matový, anebo se pokrývá vrstvou materiálu s menším indexem lomu, než má vlastní materiál válce. Tím se zvětšuje i účinnost buzení a zabraňuje se generaci parazitních modů po odrazu od stěn.

U pevnolátkových laserů se téměř výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje (obvykle výbojky) vyvolává změna v obsazení energetických hladin.[14]

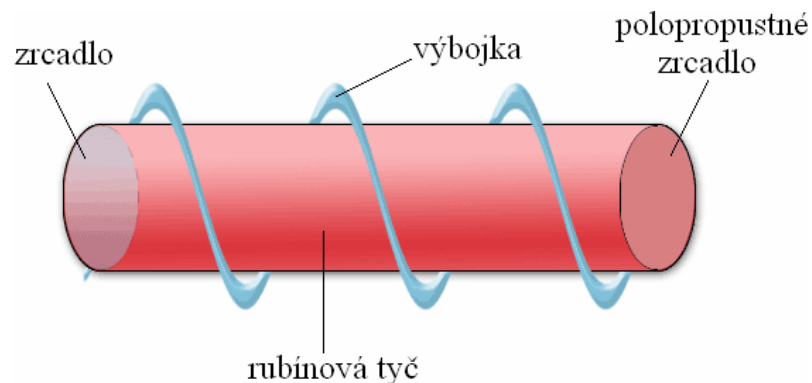
Rubínový laser

Základním reprezentantem pevnolátkových laserů je laser rubínový (Obr. 20). Rubín je monokrystal Al_2O_3 , kde je část iontů Al^{3+} v mřížce, nahrazená příměsovými trojmocnými ionty chrómu Cr^{3+} (asi 0,05% iontů). Při uvedené koncentraci příměsi jsou rubínové mono-

krystaly světle růžové až růžové. Generují záření o vlnové délce 0,6943 μm . Rubín má velkou chemickou a fotochemickou stálost, velkou mechanickou pevnost a velmi dobrou tepelnou vodivost, což umožňuje jeho využití v laserech.[15]

Rubínový laser pracuje především v pulsním režimu při buzení pulsní xenonovou výbojkou. Délka impulsu je přibližně milisekunda. Impuls není jednoduchý a sestává z řady krátkých impulsů statisticky náhodné intenzity. K buzení je zapotřebí značné energie. Přes velkou kvantovou účinnost je však celková účinnost rubínového laseru malá. Je vhodný pro vrtání tvrdých materiálů, v lékařství v dermatologii a v laserové lokaci družic.

U rubínového laseru se nepříznivě projevuje zvýšení teploty aktivního prostředí, zvyšující neúčinnou relaxaci excitovaných stavů. Teplota krystalu se zvětšuje absorpcí infračerveného záření výbojky i energie z nezářivých relaxačních procesů. Proto se doporučuje použít při konstrukci rubínového laseru účinné chladicí zařízení a filtrace záření výbojky.[14]



Obr. 20 Rubínový laser [17]

Neodymový laser

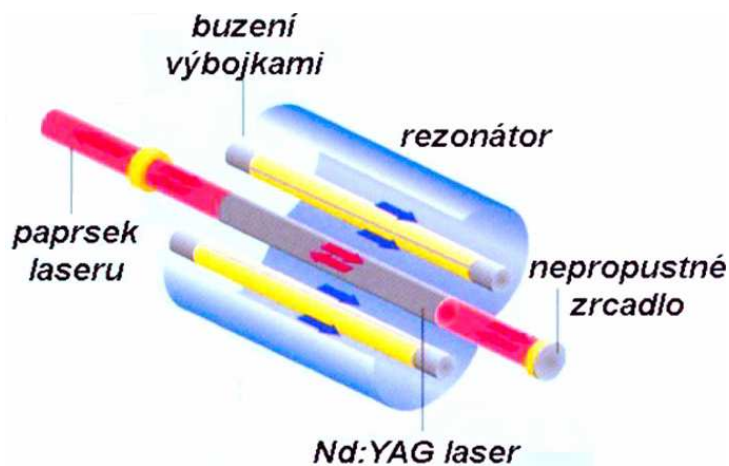
Jako aktivní látky se v laserech velmi často používají materiály, které jsou aktivovány ionty vzácných prvků. Z krystalů příměsí vzácných prvků se používá zejména YAG, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_2$, CaWO_4 . Z amorfních materiálů je to hlavně sklo. Protože tyto materiály potřebují relativně malou energii na čerpání, jsou proto vhodné i na práci v kontinuálním režimu.[15]

Aktivní prostředí v laseru Nd:sklo tvoří amorfní materiál – sklo, v němž jsou rozptýleny ionty Nd^{3+} . Předností tohoto materiálu v porovnání s krystaly je mnohem snazší výroba oproti technologii výroby monokrystalů. S ohledem na dobrou optickou homogenitu skel

bývá účinnost laserů aktivním prostředím ze skelných materiálů větší, než účinnost s krystaly. Jejich nevýhodou je však malá tepelná vodivost skel. Lasery z dopovaných skel se proto nehodí pro generaci impulsů s vysokou opakovací frekvencí nebo pro kontinuální režim.[14]

Za názvem Nd:YAG (Obr. 21) se skrývá laser s nosným prostředím z monokrystalu yttrito-hlinitého granátu s aktivními ionty Nd^{3+} , zabudovanými do krystalové mřížky. Vyznačuje se malou prahovou budicí energií a schopností pracovat efektivně v kontinuálním režimu.[14]

Tento laser však pracuje jak v pulsním, tak kontinuálním režimu. Je dnes nejvíce používaným pevnolátkovým laserem. Paprsek laserů má vlnovou délku $1,06 \mu\text{m}$. Je vhodný pro vrtání, svařování, řezání a popisování. V lékařství se používá kontinuální Nd:YAG laser jako skalpel (v chirurgii) a pulsní Nd:YAG laser v oční mikrochirurgii.[16]



Obr. 21 Nd: YAG laser[16]

b) Kapalinové lasery

Laserovým médiem kapalinových laserů jsou roztoky organických barviv nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných prvků. Buzení je realizováno Nd:YAG laserem nebo argonovým laserem. Výběrem vhodného barviva a zrcadel rezonátoru je možné

získat koherentní záření o jakékoli vlnové délce od 0,3 do 1,3 μm . Účinnost je řádově desítky procent. Použití kapalinových laserů je především ve spektroskopii, neboť umožňují přesné vlnové délky.[7]

c) Plynové lasery

Aktivní prostředí u plynových laserů je tvořeno plynem nebo směsí plynů, což způsobuje značkou rozmanitost laserů a jejich pokrytí velmi širokého spektra vlnových délek. Plyný stav je možno charakterizovat jako soubor částic s kvantovými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí. Částice jsou v neustálém pohybu, a to se projevuje na povaze emisních a absorpčních čar (šířka emisních nebo absorpčních čar je velmi malá).[14]

Buzení plynových laserů má velkou řadu variant. Nejpoužívanějšími mechanismy jsou však buzení doutnavým výbojem, elektronovým svazkem a adiabatickou expanzí.

Osobitostí plyných aktivních prostředí je jejich velká optická homogenita, což umožňuje využít na získání indukovaného záření větší objemy aktivní látky a získat tak velké intenzity záření, i když hustota aktivních částic v plyných látkách je řádově nižší než v tuhých látkách.[15]

CO₂ laser

Z technologických laserů mají největší význam CO₂ lasery (Obr. 22). Jejich aktivní prostředí tvoří směs CO₂:N₂:He (kyslíčnick uhlíčitý, dusík, helium).[8]

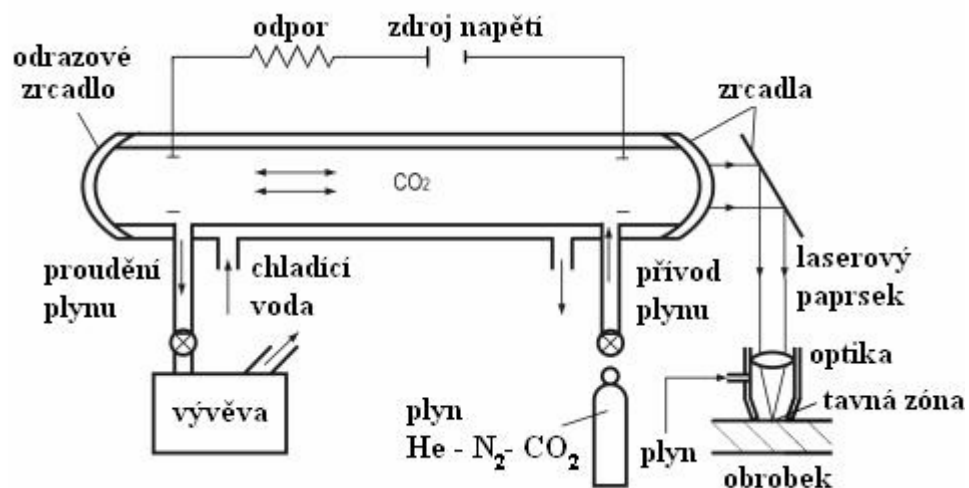
U CO₂ laseru se k zesilování využívá přechodů mezi vibračními hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra o různých vlnových délkách (nejčastěji jsou udávány 9,4 a 10,6 μm). Energie potřebná k excitaci je vytvářena ve formě výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru.[6]

Nepříjemným důsledkem buzení směsi CO₂, N₂ a He výbojem je rozklad molekul CO₂ a N₂, působící časem změnu aktivního prostředí. Protože podmínky generace CO₂ laserů závisí na složení směsi, přešlo se u výkonnějších typů laserů ke kontinuálnímu výměně náplně výbojové trubice během provozu. U těchto laserů se výbojová trubice na jedné straně čerpá, z druhé strany se kontinuálně připouští čerstvá směs. Také zvětšováním průtoku je možno zvýšit výkon laseru na více než dvojnásobek. U laserů s menšími výkony je možno

pracovat bez průtoku, s trubicí naplněnou směsí plynů a vakuově uzavřenou. Výměna plynů se provádí po stovkách až tisících hodinách provozu.[14]

Teplo je ze systému odváděno chladícím médiem (nejčastěji vodou), pomocí velmi účinného chladicího agregátu.[6]

CO₂ lasery se používají především pro řezání, svařování, vrtání, popisování součástí, nanášení povlaků a tepelné zpracování.[16]



Obr. 22 Princip CO₂ laseru [6]

Helium-neonový laser

Aktivní prostředí tohoto laseru tvoří směs helia a neonu. Buzení je prováděno přímo v trubicí se směsí, doutnavým elektrickým výbojem vysokého elektrického napětí. Vzhledem k velkému množství energetických úrovní (energetické spektrum) v atomech neonu, kde může inverze vzniknout, je helium-neonový laser schopen generovat záření řady vlnových délek.

Konstrukčně složitějšími představili plynových laserů jsou argonový laser, jehož aktivní prostředí tvoří ionty argonu a excimerový laser jehož laserové médium je tvořeno nestabilními molekulami tzv. excimery, které vznikají na přechodnou dobu v důsledku vzájemného působení vybuzeného atomu (příp.molekuly) s atomem (příp. molekulou) v základním stavu. Dosud známé excimerové lasery pracují se vzácnými plyny, např. argon, krypton, xenon apod.[7]

d) Lasery s párami kovů

Typickým představitelem této skupiny je laser s párami mědi (Cu), který má řadu výhod. Mezi které patří například velká účinnost, velký impulsní výkon a velmi velké zesílení. Problémem při realizaci laserů jsou jejich vysoké teploty. Nejrozšířenější konstrukčním řešením je roura z berylnaté keramiky. Roura výbojky má kryt z vnější strany zaplněný tepelným izolantem v práškové formě.

Měď, která je určena na vytvoření páry Cu, se umísťuje vevnitř vlastní výbojkové roury v prstencových drážkách. Při tlaku plynu se měď intenzivně usazuje na okénka laseru, proto je jejich životnost malá.[15]

Vlnová délka generovaného záření je 510 a 578 nm. Laser pracuje pouze v pulsním režimu.[7]

e) Polovodičové lasery

Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek od $\lambda = 0,3$ do 30 μm . Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu.[8]

Jako laserové médium se používá galium arsenid (GaAs), kadmium sulfid (CdS) a kadmium selen (CdSe). Buzení je realizováno fotony, svazkem elektronů a nebo elektrickým polem. Rezonátor je tvořen vybroušenými stranami polovodičového materiálu, který musí být vydatně chlazen.[7]

Polovodičové lasery se používají především pro popisování součástí, řezání a tepelné svařování.[8]

2.3.2 Lasery podle vlnové délky záření

Lasery se dělí do tříd podle skupenství materiálů, které se používají ke generaci záření. Zároveň se však tyto látky liší i vlnovou délkou světelného záření a frekvencí vysílaného záření, podle čehož rozeznáváme:

- infračervené (IR) lasery
- lasery viditelného pásma
- ultrafialové (UV) lasery
- rentgenové a gama lasery [17]

2.3.3 Lasery podle druhu a režimu paprsku

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

- kontinuální režim (continuous wave – cw)
- pulsní režim (pulsed wave – pw)
- tzv. Q – switched (Q_s) režimu – zvláštním kontinuálním režimu s vysokou energií impulsu [6]

2.3.4 Lasery podle dosahovaného výkonu

- nízkovýkonné – desítky až stovky W. Doporučené použití pro vrtání a řezání keramiky, vrtání rubínů a plastů.
- vysokovýkonné – 1kW÷30kW. Hlavní oblastí použití je svařování, tepelné zpracování klikových hřídelí, skříní převodovek apod.[6]

2.3.5 Lasery podle typu buzení

Podle typu buzení jsou lasery rozlišovány jako buzené:

- opticky (světlem); Nd:YAG, vláknové lasery
- elektrickým výbojem; CO₂, He-Ne, excimerové lasery
- injekcí nosičů náboje (elektrickým proudem); diodové lasery

- chemicky; chemické lasery používané v armádě
- elektronovým svazkem
- tepelnými změnami
- rekombinací [17]

2.3.6 Lasery podle použití v technologii

Laser se za dobu od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, technologii, astronomii, geodézii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, ve vojenské technice, v automatizaci a v dálkovém řízení.[8]

Vývoj laseru i jeho aplikace procházejí neustálou inovací. Sledují se jak nové technické možnosti, tak i příznivější ekonomie provozu. Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů.[8]

V technologii se lasery používají k úběru materiálu, kam spadá řezání, vrtání, čištění tenké povrchové vrstvy pomocí laseru a mikroobrábění (ořezávání, gravírování, značkování).

Své použití mají i ve spojování a zpevňování materiálů (svařování, pájení, povlakování), nebo v tepelném zpracování povrchu, kam se řadí kalení, žhánání a povrchové legování. Na základě požadavků průmyslu byly v nedávné době vyvinuty nové procesy, jako je barvení, dělení keramiky, skla, využívá se i kombinovaných procesů za podpory laseru (obrábění, svařování).

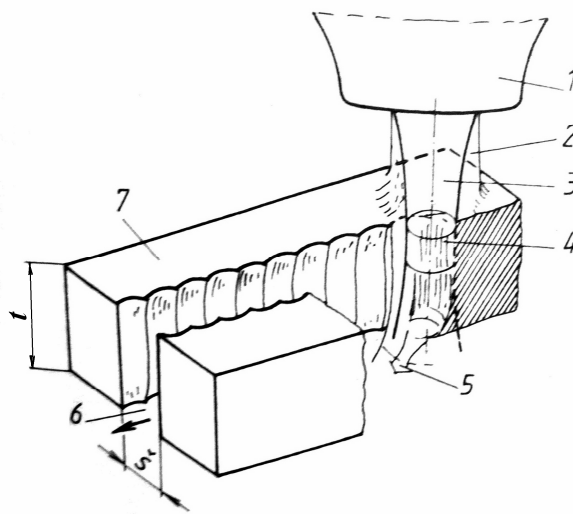
2.4 Teorie a technologie laserového řezání

Při laserovém řezání (laser cutting) je snahou, co nejrychleji lokálně odpařit materiál za pomoci energie laserového záření, při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Velmi efektivně lze laserovým svazkem řezat především materiály s malou tepelnou vodivostí. Při řezání laserovým svazkem nehraje roli tvrdost materiálu, ale rozhodující jsou jeho optické a tepelné vlastnosti. Absorpci materiálu lze zvýšit vhodnými povlaky. Na

množství absorbované energie má vliv i jakost povrchu; hrubý povrch absorbuje silněji než povrch vyleštěný.[19]

Důležitým požadavkem je dopravení záření velké hustoty na povrch materiálu, neboť čím je hustota větší, tím snáze se dosáhne roztavení a odpaření materiálu. Potřebnou velkou hustotu výkonu záření dodávají kontinuálně pracující Nd:YAG, resp. CO₂-lasery. Při řezání se pohybuje buď laserový svazek po obrobku, nebo obrobek vůči svazku.[14]

Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu (Obr. 23).[19]



Obr. 23 Schéma procesu laserového řezání [7]

- 1 – řezací tryska, 2 – asistentní plyn,
- 3 – paprsek laseru, 4 – poloha zaostření paprsku,
- 5 – odtavený materiál, 6 – řezná spára,
- 7 – obrobek, t – tloušťka obrobku, š – šířka řezu

Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou plasty, keramika a dřevo, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstranění roztaveného a odpařeného materiálu. V tomto případě je všechna energie potřebná k řezání dodávána laserem. Plyny mohou sloužit i k ochlazování okolí řezu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo.[19]

Rychlost řezu závisí na vlastnostech materiálu, jeho tloušťce a druhu přídavného plynu. Okraje řezu jsou čisté, materiál v okolí řezu není tepelně namáhán (jako při řezání plame-

nem) a přesnost řezu je v toleranci desetiny milimetru. Odpad je při laserovém řezání minimální. Tvar a hloubka řezu závisí na výkonu laseru a fokusaci svazku. Kvalita řezu je vynikající a materiál není zapotřebí dále opracovávat. Šířka řezu je od několika desetin do jednoho milimetru, tedy značně menší než při řezání mechanickém. Technologie je prakticky nehlukná, jen vznikající zplodiny je nutno odvádět.[14]

2.4.1 Řezání nekovových materiálů

Řezný proces nekovových materiálů zahrnuje tři dominantní mechanismy.

- dělení tavením a následným smykem – je velmi rychlý způsob dělení s vysokou kvalitou řezu a je typický pro termoplasty (polypropylen, polystyren, nylon, polyetylen) a pro keramické materiály
- odpařováním – natavením a následným odpařením materiálu v zóně řezu vzniká vysoce kvalitní rezná spára, plocha řezu je hladká, jakoby leštěná. Při řezání vlivem vysoké teploty (nad teplotou tavení) dochází ke změně fáze materiálu, z pevné na kapalnou a následně na páru. Mechanismus řezání je typický pro plexisklo a acryl.
- chemická degradace – vzniká vlivem vysoké teploty a různorodosti složení materiálu. Některé fáze materiálu zaznamenají chemické změny. Laserová energie láme chemické vazby a integritu materiálu. Hrany po řezání jsou rovné a povrch řezu je hladký. Tento mechanismus je typický pro řezání produktů na bázi dřeva, kompozitních materiálů, ale i některých plastů, jako polyvinylchlorid (PVC), polyuretan.[6]

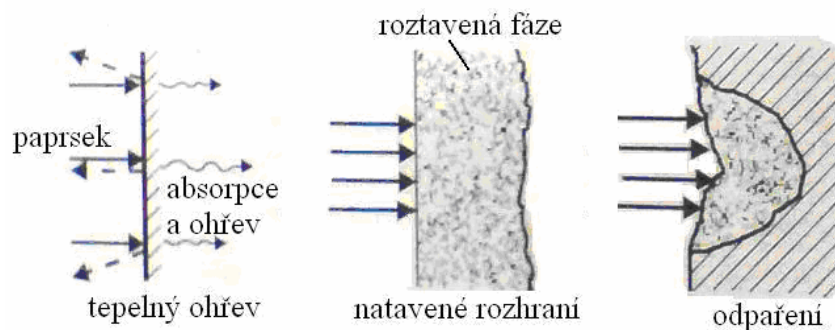
Energetický účinek laseru na materiály závisí na fyzikálních vlastnostech materiálů a na parametrech laseru. Samozřejmě, významně ho také ovlivňuje čas interakce laseru s materiálem. Laserový materiál je možné charakterizovat, jako způsobilost materiálu v interakci s výkonovým laserem za vhodných ostatních podmínek, dosáhnout požadovaný výsledek operace.[18]

Optické vlastnosti laseru se řídí zákony optiky elektromagnetického vlnění. Velký stupeň koherence a velmi malá divergence paprsku umožňují laser zkoncentrovat do velmi malého bodu, takže hustota energie laseru v místě jeho interakce s materiálem je potom větší než 10^9 W.cm^{-2} , což umožňuje dosáhnout ve velmi krátkém čase v této lokalitě mimořádně

vysoké teploty. Takové, že se ještě nestačí uplatnit pomalé procesy vedení a sálání tepla.[18]

Energie záření je navíc dokonale sterilní, tzn. nepřináší do ohřivaného místa žádné nečistoty ani příměsi. Ohřev lze velmi rychle zahájit i ukončit.[14]

Laserový svazek záření dopadající na povrch pevné látky se zčásti odrazí, zčásti pohlcuje (Obr. 24). Jestliže chceme použít laseru k ohřevu látky, požadujeme, aby část energie odražená povrchem byla co nejmenší. Pohlcená část proniká do povrchové vrstvy materiálu, přičemž hloubka průniku závisí na vodivosti materiálu a frekvenci záření. Záření je pohlceno a rychle přeměněno v teplo, které ohřívá materiál, který se nataví a následně odpaří z ohřáté oblasti.[14]



Obr. 24 Účinek laserového paprsku na povrch materiálu [6]

Povrch natavené oblasti se rychle rozšiřuje a materiál se dalším intenzivním působením paprsku začíná odpařovat. V natavené zóně při odpařování částic vznikají poměrně vysoké tlaky a tavenina je vytlačena do vznikajícího otvoru. Když záření přestane nebo když se paprsek posouvá dopředu, tavenina začíná tuhnout nebo rekrystalizovat.

2.4.2 Strukturní změny polymeru

Účinky tepelné energie vyvolávají v polymerech různé strukturální změny. Může dojít k vytvoření příčných chemických vazeb, nebo také ke štěpení základních řetězců. Tepelná odolnost polymerů závisí značně na pevnosti vazeb, které se v polymeru vyskytují. Odbourávání hlavního řetězce probíhá v podstatě dvěma způsoby:

- Statistické štěpení řetězců - je sled jednotlivých štěpných reakcí na různých místech řetězce, která jsou statisticky rozdělena, anebo jsou podmíněna chemickou konfigurací

řetězce. Přitom vznikají segmenty o různé molekulové hmotnosti, může vzniknout i monomer.

- Depolymerace vede ke vzniku monomeru, zpravidla ve vysokém procentovém výtěžku. Této chemické reakci podléhá poměrně málo polymerů.[21]

Tepelnou degradaci jednotlivých polymerních materiálů vlivem laserových paprsků lze porovnávat sledováním a zkoumáním pyrolýzy. Což je termický rozklad organických materiálů za nepřístupu médií obsahujících kyslík.[11]

2.4.3 Stroj pro laserové řezání

Pro zpracování materiálu laserovým řezáním je v dnešní době využíváno řady moderních strojů. Nejmodernější skupinou jsou především CNC stroje pro dělení materiálu laserem. Jde o řezací centra určená pro přesné dělení materiálu laserovým paprskem, přičemž tloušťka a typ řezaných materiálů, které je možné dělit je závislý na použitém laserovém zdroji. Pohon stroje zajišťují kvalitní číslicově řízené servopohony, umožňující dosáhnout vysoké dynamiky a přesnosti vedení řezací hlavy po dráze. Pracovní plocha stroje je obvykle chráněná úplným krytovaním a zabezpečuje ochranu obsluhy před účinkem i odraženého laserového záření (Obr. 25).[20]

CNC stroje pro dělení materiálu laserem jsou často hlavním výrobním prostředkem firmy. Jsou schopné pomocí laseru dělit různé materiály, s velkou přesností vyrobit požadovaný produkt i do nejdrobnějších detailů. Nezanedbatelnou výhodou laserových strojů je čistý řez, žádné opotřebení nástroje a hospodárnost i při malých výrobních sériích.



Obr. 25 Konkrétní provedení CNC stroje [20]

2.4.4 Dosahované parametry

Potřebně velkou hustotu výkonu záření dodávají převážně kontinuálně pracující Nd:YAG a CO₂ lasery.

Při řezání kovů je zapotřebí používat lasery s výkony překračující 1 kW.[14]

a) Rychlost řezání

Rychlost řezání závisí na převažujícím způsobu řezání, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, druhu přídavného média, tloušťce a vlastnostech materiálu.[7]

Tak lze například řezat ocelové desky kontinuálním CO₂ laserem s výkonem 6 kW do tloušťky 20 mm s rychlostí 1 m za minutu.[14]

b) Kvalita řezu

Kvalita řezu se hodnotí podle jakosti řezané plochy (dosahuje Ra = 3,6 až 12 μm) a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti (bývá 0,05 – 0,2 mm).[7]

c) Šířka řezné spáry

Šířka řezné spáry je dána druhem laseru, vlastnostmi a tloušťkou materiálu. Pro přesnější řezy s menší šířkou spáry se používají Nd:YAG lasery.[7]

3 POLYMERNÍ MATERIÁLY

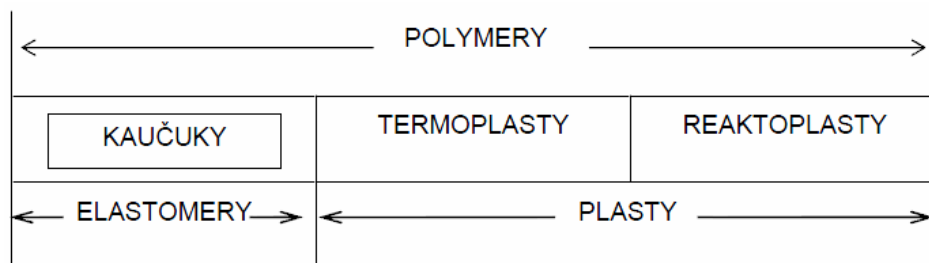
Polymery jsou chemické látky neobvyklé šíře vlastností, obsahující ve svých obrovských molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru i jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku prakticky v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování ve stavu v podstatě kapalném, dovolujícím, většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku nejrůznější tvar, podle předpokládaného použití.[24]

3.1 Základní rozdělení polymerů

Polymery lze dělit podle různých hledisek. Podle způsobu zpracování a použití u spotřebitele rozlišujeme vstřikovací, vytlačovací, lisovací hmoty, licí pryskyřice, lehčené hmoty, obalové materiály, lékařská pojiva, vlákna, lepidla a mnoho jiných.

Podle způsobu vzniku můžeme polymery dělit na přírodní (škrob, celulóza, kaučuk aj.) nebo syntetické (polyetylén, polypropylén aj.).[23]

Podle základních technických vlastností dělíme polymerní materiály na elastomery a plasty (Obr. 26).



Obr. 26 Rozdělení polymerních materiálů[24]

Elastomery

Elastomery jsou, jak název napovídá, vysoce elastické polymery, které můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení, přičemž deformace je převážně vratná. Nejpočetnější podmnožinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryž (guma). Patří sem i nevulkanizující elastomerní látky jako je polyisobutylén, termoplastické elastomery aj.[24]

Plasty

Plasty se podle toho, jak se chovají při zahřívání dělí na:

- termoplasty – tj. polymery, které působením tepla měknou a lze je opakovaně roztavit, tvářet a ochlazením převést zpět do tuhého stavu. Mezi termoplasty patří např. polypropylén, polyamid, polyetylén, polystyrén, polyvinylchlorid a mnoho dalších polymerních materiálů.
- reaktoplasty – jsou polymery, ve kterých při tváření vlivem tepla a tlaku (někdy působením katalyzátorů) dochází k zesíťování polymerů. Jakmile je zesíťování dokončeno získává plast zajímavé vlastnosti, především přechází do dále netavitelného a nerozpustného stavu. Mezi reaktoplasty patří fenolytické a epoxidové pryskyřice aj.[23]

3.2 Fyzikálně-mechanické charakteristiky použitých polymerů

Jednotlivé typy plastů mají své charakteristické funkční i zpracovatelské vlastnosti. Mohou se částečně měnit pomocí přísad.

3.2.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

Z angličtiny low density polyethylene - nízkohustotní polyetylen je nejstarší typ polyethylenu. Je vyráběn za použití vysokého tlaku. Je to měkký, pružný, houževnatý druh polyethylenu vzhledem k jeho vysoce rozvětvené struktuře. Křehne pod -60°C a odolává teplotám do 80°C . Má velmi dobrou chemickou odolnost a elektroizolační vlastnosti. Méně odolný je proti povětrnostním vlivům. Tato vlastnost se zlepší naplněním aktivními sazelemi. Je používán pro pevné, poddajné předměty jako jsou např. víka a podobné výrobky. Byl dlouho používán jako izolační materiál. V současnosti je nejvíce oblíbenou aplikací folie, mezi další příklady patří dopravní pytle, balící materiál a tenké zemědělské příkrývky.[25]

Tab. 3 Fyzikálně-mechanické charakteristiky LDPE[25]

Vlastnosti		
Hustota	[kg m ⁻³]	915-935
Krystalinita	[%]	do 64
Pevnost v tahu	[MPa]	9-25
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	800-1400
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	1200-3500
Tažnost	[%]	do 1000
Teplota tavení	[°C]	105-120
Dlouhodobá teplotní odolnost	[°C]	60-80
Teplota zpracování	[°C]	180-240

3.2.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen (PP) je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů, které patří mezi nejběžnější plasty.[23]

Polypropylen má prakticky nepolární strukturu. Vzhledem ke stupni krystalinity dosahujícímu 60 % až 75 % je však neprůhledný. Teplota tání čistého izotaktického polypropylenu je 176°C, obchodních produktů v rozmezí od 160°C do 170°C. Kromě vyšší teploty měknutí a tím i použitelnosti při vyšších teplotách se polypropylen liší např. od lineárního polyethylenu nižší hustotou, menší odolností vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti, ale na druhé straně větší pevností, tvrdostí a odolností vůči oděru. Je také méně propustný pro plyny a páry. Odolnost polypropylenu vůči chemikáliím je ve srovnání s polyethylenem rovněž větší, zvláště při zvýšených teplotách. Rozpouští se však při teplotách nad 80°C v aromatických a chlorovaných uhlovodících.[24]

Polypropylen se zpracovává vstřikováním a vyfukováním na menší a duté předměty, vytlačováním na trubky, desky, profily, výtlačným vyfukováním na fólie. Desky a bloky lze také lisovat z granulí. Vzhledem k jeho mechanickým vlastnostem se využívá na součásti strojů a přístrojů, např. v automobilovém a spotřebním průmyslu (vstřikované dílce přístrojových

desek a ventilátorů, nárazníky, součásti vysavačů, kuchyňských přístrojů) i na trubky a vodní armatury.[24]

Tab. 4 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PP[25]

Vlastnosti		
Hustota	[kg m ⁻³]	900-950
Krystalinita	[%]	do 75
Pevnost v tahu	[MPa]	21-37
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	1100-1600
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	1200
Tažnost	[%]	120-700
Teplota tavení	[°C]	~170
Dlouhodobá teplotní odolnost	[°C]	80-100
Teplota zpracování	[°C]	190-250

3.2.3 Polymetylmetakrylát (PMMA)

Nejcharakterističtější vlastností PMMA je jeho čírost a naprostá bezbarvost i v tlustých vrstvách. To umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednost, ale i vybarvování. Pro-pustnost světla ve viditelné oblasti je 92%. Pro podobnost sklu je známý pod vžitým názvem organické sklo, nebo plexisklo. Má lineární řetězce bez větvení. Jednotlivé mery jsou spojeny hlava-pata, bez prostorového pravidelného uspořádání. Hmota je amorfní a není morfologicky zajímavá.[22]

Mechanické vlastnosti PMMA závisí na teplotě. Ani při -50°C se nestává křehký, při vyšších teplotách se chová jako termoplast. Při teplotách nad 100-130°C (podle typu) měkne a je snadno tvarovatelný. Vykazuje i vynikající tvarovou paměť. Odolností proti povětrnostním podmínkám předčí i všechny běžné termoplasty. Má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, je odolný proti působení vody, zředěným alkáliím a kyselinám. Neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpouští se v aromatických a chlorovaných

uhlovodících, esterech a ketonech. Dá se dobře mechanicky obrábět. Je zdravotně naprosto nezávadný. Odolává biologickým účinkům a sám je neovlivňuje. Z hlediska bezpečnosti má při stejné tloušťce 6krát vyšší rázovou houževnatost než anorganické sklo. Speciální typy se zvýšenou houževnatostí obsahují pryž, která dále zvyšuje jeho odolnost. Jeho nedostatkem je však nízká povrchová tvrdost a poměrně velká teplotní roztažnost.[23]

Polymethylmetakrylátové desky lze zpracovávat tvarováním za tepla tlakem nebo vakuem, dobře se dají obrábět všemi obráběcími postupy a také leštit na vysoký lesk. Jeho dílce lze dobře lepit, přičemž se dosahuje dobré pevnosti spoje. Suspenzní PMMA je určen pro zpracování vstřikováním a proto se vyrábí zpravidla 3 typy materiálu, lišící se tepelnou stálostí a tekutostí.

I když je blokový PMMA relativně drahý plast, v určitých aplikacích je téměř nenahraditelný, díky přednostem, kvůli kterým vyniká nad ostatními polymery. Využívá se především při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě krytů přístrojů, kancelářských potřeb, hodinkových sklíček a u mnoha jiných nepostradatelných výrobků. Ze suspenzního polymeru se vyrábí plnicí pera, knoflíky, tlačítka, reklamy a poutače apod.[22]

Tab. 5 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PMMA[25]

Vlastnosti		
Hustota	[kg m ⁻³]	1100-1200
Pevnost v tahu	[MPa]	50-90
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	1700-3400
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	2800-3300
Tažnost	[%]	3-6
Teplota tavení	[°C]	160
Dlouhodobá teplotní odolnost	[°C]	60-80
Teplota zpracování	[°C]	170-246

3.2.4 Polyamid 6 (PA6)

Polyamidy jsou semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 až 40 %. Polyamidy patří mezi tzv. konstrukční plasty, používané k výrobě namáhaných technických součástí. Vynikají vysokou mechanickou pevností při statickém a dynamickém namáhání, nízkým tečením i při dlouhodobém zatížení a použitelností v širokém rozsahu teplot. Dnes je využívána řada základních druhů polyamidů, které se liší sice svým chemickým složením a způsobem výroby, ale podobají se základními vlastnostmi.

Charakteristickými vlastnostmi polyamidu 6 jsou vysoká hodnota polymeračního stupně (300 až 500), stupně krystalinity kolem 45 %, malá hořlavost, vysoká odolnost vůči oděru a značná houževnatost. Lze je ještě modifikovat anorganickými plnivými včetně ztužujících skleněných vláken (GF) v koncentraci 6 % až 60 %. Z alkalického polyamidu se vyrábějí především součásti strojů, přístrojů a zařízení, např. pouzdra kluzných ložisek, ozubená kola, řemenice, transportní válce, nosné kladky, kalolisové desky apod.[23]

Tab. 6 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PA6 a PA6+30%GF [25]

Vlastnosti		PA6	PA6 + 30% GF
Hustota	[kg m ⁻³]	1140	1360
Krystalinita	[%]	~ 45	~ 70
Pevnost v tahu	[MPa]	40-80	100-170
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	1100-1400	6500-9000
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	2400	8200
Tažnost	[%]	110-250	4-6
Teplota tavení	[°C]	215-220	220
Dlouhodobá teplotní odolnost	[°C]	80-90	90-120
Teplota zpracování	[°C]	230-280	240-280

4 STATISTIKA

Statistika je věda o pravidelnostech ve stavu a vývoji hromadných jevů a metodách jejich zkoumání. Soubor údajů, které jsou zjišťovány pozorováním hromadných jevů, tvoří statistický soubor. Počet pozorování vyjadřuje rozsah statistického souboru. Jednotlivé objekty pozorování se nazývají statistické jednotky.

4.1 Etapy statistické práce

Práce spojená se statistickým zkoumáním hromadných jevů prochází postupně několika fázemi, z nichž každá sleduje určité cíle.

- Statistické zjišťování – je organizovaný sběr statistických údajů o sledovaných hromadných jevech.
- Zpracování statistických údajů – je další fází statistické práce. Spočívá v roztřídění zjištěných údajů, výpočtu číselných charakteristik a grafickém znázornění dat. Třídění je základní metodou statistického zpracování, neboť teprve po roztřídění zjištěných dat je možné poznávání sledovaných jevů.
- Vyhodnocování zpracovaných údajů – je závěrečnou fází a spočívá ve zkoumání vztahů a závislostí mezi sledovanými jevy.

Uvedené fáze se často navzájem prolínají, proto je nelze od sebe přesně oddělit.[26]

4.2 Charakteristiky statistického souboru

Pro koncentrovanou informaci o statistickém souboru se používají číselné charakteristiky. V praxi se nejčastěji používají charakteristiky polohy a variability. V prvním případě jde o určení vhodné střední úrovně, kolem které se jednotlivé hodnoty pohybují, ve druhém o určení rozmezí, ve kterém se tyto hodnoty vyskytují. Nejčastěji používaným ukazatelem polohy statistického souboru je aritmetický průměr.[26]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

Kde je suma jednotlivých měření x_i ($i = 1, 2, 3...n$) dělena počtem měření n . Vyjadřuje v jistém smyslu nejtypičtější hodnotu statistického souboru.

Odchylka i -tého měření od aritmetického průměru je vyjádřena jako:

$$\Delta_i = \bar{x} - x_i \quad (3)$$

Ukazatelem variability (proměnlivosti) hodnot statistického souboru je rozptyl. Jeho základem jsou odchylky sledovaných hodnot od průměru. Jak je patrné z uvedeného vzorce, je rozptyl vlastně průměrná hodnota druhých mocnin těchto odchylek.[27]

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Praktičtější význam má odmocnina z rozptylu, čili směrodatná odchylka a značí se s . Její hodnota je mírou reprodukovatelnosti, čím je menší, tím více jsou výsledky nakupeny okolo správné hodnoty, a tím jsou přesnější.[27]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

Jestliže máme rozříděný statistický soubor, používáme pro výpočet průměru vážený aritmetický průměr, kde n_j jsou četnosti, f_j relativní četnosti a x_j hodnoty znaku.[26]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^k n_j \cdot x_j = \sum_{j=1}^k f_j \cdot x_j \quad (6)$$

Všechny zde uvedené charakteristiky rozptýlení jsou mírou přesnosti analytických výsledků. V podstatě charakterizují absolutní přesnost výsledků analýz. Chceme-li vyjádřit relativní přesnost, můžeme z nich vypočítat i relativní směrodatnou odchylku, tzv. variační koeficient.[27]

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (7)$$

Směrodatná odchylka i variační koeficient mají tu vlastnost, že jsou tím menší, čím přesnější jsou výsledky.

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V teoretické části diplomové práce byla vypracována literární studie zabývající se použitými technologiemi obrábění a byly zde zhodnoceny fyzikálně-mechanické vlastnosti použitých polymerních materiálů. Z teoretického základu se vychází při zpracování praktické části, která porovnává vliv použitých technologií na jednotlivé materiály.

V první fázi praktické části byly různými technologiemi (vstřikování, broušení, frézování, laser) zhotoveny zkušební vzorky. V další fázi je práce zaměřena na měření drsnosti obroběného povrchu a na stanovení tahových vlastností obroběných materiálů. V závěrečné fázi se práce zaměřuje podle zadání, na vyhodnocení změn fyzikálně-mechanických charakteristik zkoušených materiálů vzhledem k použité technologii.

PRAKTICKÁ ČÁST

6 ZKUŠEBNÍ TĚLESA A ZAŘÍZENÍ

6.1 Materiály zkušebních těles

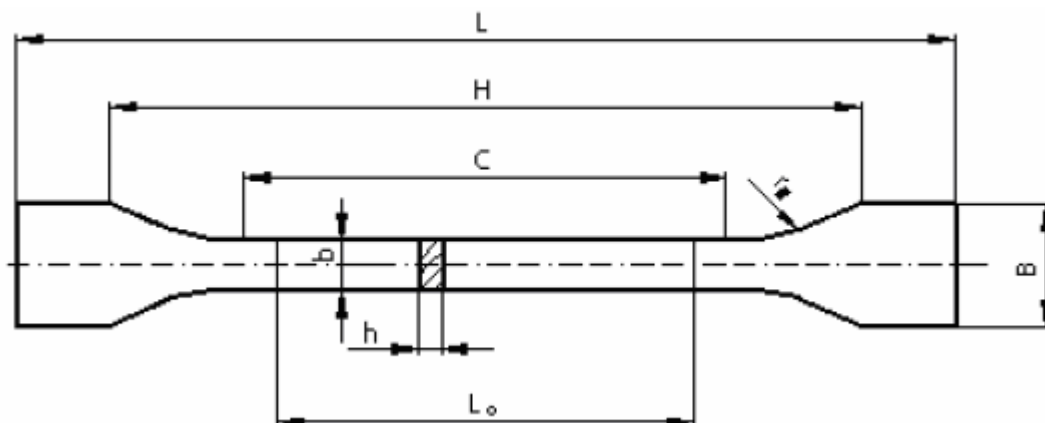
Pro experimenty byly použity materiály: nízkohustotní polyetylen (LDPE), polypropylen (PP), polymethylmetakrylát (PMMA), polyamid 6 (PA6) a polyamid 6 s 30% skelných vláken (PA6+30%GF). Podrobnější informace o použitých materiálech uvádí teoretická část této diplomové práce v kapitole 3.2.

6.2 Tvar zkušebních těles

Zkušební vzorek použitý v experimentální části práce je tvaru oboustranné lopatky typu 1A (Obr. 27), dle normy ČSN EN ISO 527-1 pro stanovení tahových vlastností plastů. Zkušební vzorky pro všechny zkoušky jsou vyráběny ze zakoupených materiálů uvedených v kapitole 6.1. Zkušební tělesa nesmí být zkroucená a musí mít vzájemně kolmé, respektive rovnoběžné dvojice povrchů. Povrchy a konce nesmí mít škrábance, důlky, vyštípnuté části, a zbytky po opracování. Splnění těchto požadavků na zkušební vzorky bylo vizuálně zkontrolováno před zahájením dalších měření.

Tab. 7 Rozměry zkušebních tělísek

Rozměr v mm	Typ 1A
Celková délka L	150
Počáteční vzdálenost čelistí H	110±5
Šířka upínací hlavy B	20±0,5
Délka pracovní části C	80±0,5
Šířka pracovní části b	10±0,5
Počáteční měřená délka L_0	50±0,5
Poloměr zakřivení r_1	20-25
Tloušťka h	≥2



Obr. 27 Tvar zkušební tělíska

6.3 Příprava zkušebních těles

Výsledky zkoušek jsou závislé na tvaru zkušebních těles a technologii jejich přípravy, opracování a úpravě.

Zkušební tělesa pro měření drsnosti a zkoušky tahem pro materiály LDPE, PP, PMMA, PA6 a PA6+30%GF byla vyrobena vstříkáním. První skupina 10ks vzorků od každého použitého materiálu byla ponechána bez dalších úprav, pracovní plochy druhé skupiny vzorků následně byly broušeny, další skupina těles byla frézována. Pro materiály PP, PA6 a PMMA byly vzorky zhotoveny i laserovým řezáním z připravených litých desek tloušťky 4mm.

6.3.1 Vstříkáním

Technologie vstříkání musí být pro každý polymer vypracována jak z hlediska nejvýhodnějších vlastností, tak i z hlediska ekonomického. Pro každý polymerní materiál, z něhož se připravují zkušební tělesa vstříkáním, jsou tak výhodné jiné vstříkací parametry, které zahrnují např.: teplotu taveniny, teplotu formy, nastavení teplot v plastikační jednotce, dobu chlazení aj.

Výroba zkušebních těles byla provedena dle normy ČSN EN ISO 294-1 Plasty - Vstříkání zkušebních těles z termoplastů. Tato norma specifikuje obecné zásady pro vstříkání zkušebních těles z termoplastů a uvádí podrobnosti pro konstrukci forem pro přípravu zkušebních těles. Je také základem pro stanovení reprodukovatelných podmínek vstříkání.

Kondicionování před zpracováním bylo provedeno pouze u polyamidu 6 (20hod, 90°C), díky jeho poměrně velké navlhavosti.

Pro výrobu zkušebních těles vstřikováním byl použit vstřikovací stroj Demag ERGOtech 50-200 System NC4 (Obr. 28) s parametry uvedenými v Tab. 8.



Obr. 28 Vstřikovací stroj Demag ERGOtech 50-200

Tab. 8 Parametry vstřikovacího stroje Demag ERGOtech 50-200

Parametry	
Uzavírací síla	500 kN
Vstřikovací objem	106cm ³
Vzdálenost mezi vodícími sloupky	355 x 355 mm
Rozměr upínacích desek	520 x 520 mm
Průměr šneku	35 mm
Délka šneku	600 mm

Technologické parametry stroje při výrobě zkušebních těles z jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Parametry vstřikování pro výrobu zkušebních těles

Parametry	LDPE	PP	PMMA	PA6	PA6+30GF
Teplota formy T_c (°C)	40	40	60	70	70
Vstřikovací tlak (MPa)	60	80	80	70	80
Dotlak p_{dot} (MPa)	7	8	8	7	8
Čas dotlaku t_{dot} (s)	14	18	12	14	14
Teplota pod násypkou (°C)	40	50	50	50	50
Teplota vstupního pásma (°C)	160	180	190	220	230
Teplota přechodového p. (°C)	180	200	210	240	250
Teplota výstupního pásma (°C)	210	225	230	260	270
Čas chlazení (s)	30	30	40	22	22

6.3.2 Frézováním

Na univerzální frézce FHV-50PD (Obr. 29) byla postupně frézována pracovní plocha 10ks vstřikovaných zkušebních vzorků z materiálů LDPE, PP, PMMA, PA6 a PA6+30%GF. Při frézování všech vzorků bylo použito stejných technologických parametrů – otáčky 875 ot.min⁻¹, posuv 100 m.min⁻¹, čelní fréza o průměru 20mm, frézování sousledné, hloubka řezu 0,3 mm.

Tab. 10 Univerzální frézka FHV-50PD – technické parametry

Otáčky vertikálního vřetene	115-1750 ot/min
Pracovní zdvih v ose Z	380 mm
Rozsah rychlosti posuvu	18-300 mm/min
Kužel vřetene	Mk IV



Obr. 29 Univerzální frézka FHV-50PD

6.3.3 Broušením

Na rovinné brusce BRH 20.03F byla postupně obroušena pracovní plocha 10ks vstříkovaných zkušebních vzorků z materiálů LDPE, PP, PMMA, PA6 a PA6+30% GF. Při broušení všech vzorků bylo použito stejných technologických parametrů – otáčky vřeten 2550 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$, rychlost posuvu 14 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, průměr kotouče 250 mm, hloubka řezu 0,05 mm. Použito bylo brousícího kotouče s označením AG 92/99 80I 12 o rozměrech 250x25x76.

Bruska BRH 20.03F (Obr. 30) je rovinná bruska s horizontálně umístěným vřetenem a pravoúhlým stolem. Je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch materiálů, u kterých je požadována vysoká přesnost a vysoká kvalita opracování. Broušení se provádí zejména obvodem brusného kotouče. Součástky se dle rozměrů upínají na elektromagnetickou desku, či přímo na stůl, který vykonává podélný posuv po vedení předního lože. Brusné vřeteno je připevněno k svislým saním, které jsou umístěny ve vedení vytvořeném ve stojanu. Hydraulický agregát i elektrické vybavení stroje jsou umístěny mimo vlastní stroj.



Obr. 30 Bruska BRH 20.03F

Tab. 11 Rovinná bruska BRH 20.03F - technické parametry

Pracovní plocha stolu	200x630 mm
Rozměry brousícího kotouče	250x20-50x76 mm
Rychlost stolu plynule regulovatelná	1 – 30 m.min ⁻¹
Otáčky brousícího vřetena	2550 min ⁻¹

6.3.4 Laserovým řezáním

Výroba zkušebních vzorků se uskutečnila na CO₂ laseru TruFlow 500. Podle normy ČSN EN ISO 527-1 Plasty – Stanovení tahových vlastností, byla v programu AutoCAD 2004 nakreslena výkresová dokumentace zkušebních těles a jejich rozmístění, podle níž byla vygenerována dráha řezné hlavy. Z materiálů PP, PMMA a PA6 ve formě odlévaných desek o tloušťce 4mm, bylo vyřezáno vždy 10ks zkušebních vzorků pro různé řezné rychlosti 0,5; 0,9 a 1,4 m.min⁻¹. Pro všechny řezné rychlosti bylo použito stejného výkonu laseru 80% (400W).

Tab. 12 Laser TruFlow 500 – technické parametry

Parametry	
Jmenovitý výkon	500 W
Stabilita jmenovitého výkonu	± 2 %
Rozsah nastavení výkonu	5 – 100% jmen. výkonu
Zaručené parametry	2000 h
Vlnová délka záření	10,6 μ m
Mód záření	TEM ₀₀
Frekvence pulzů	100Hz – 100kHz
Šířka pulzů	10 μ s - cw

6.4 Použitá zkušební zařízení

6.4.1 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

Pro měření drsnosti povrchu pracovních ploch zkušebních vzorků bylo použito digitálního drsnoměru Mitutoyo SJ-301 (Obr. 31). Tento přístroj se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanickou část tvoří stůl pro uložení měřené součásti a stojan se zařízením, v němž je uchyceno rameno se snímačem. Základním prvkem přístroje je snímač s diamantovým hrotem, který se motoricky posunuje po kontrolovaném povrchu a snímá jeho nejmenější nepravidelnosti. Během posuvu se zaznamenávají svislé posunutí snímacího hrotu a vypočítané charakteristické hodnoty se zobrazí na digitálním, dotykovém displeji přístroje. Přístroj má vestavěnou tiskárnu.

Tab. 13 Drsnoměr Mitutoyo SJ 301 – technické parametry

Parametry	
Měřicí rozsah	300 μm
Délka pojezdu hrotu	0,25; 0,8; 2,5; 8 mm
Rychlost posuvu	0,25; 0,5 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Přesnost	0,01 μm



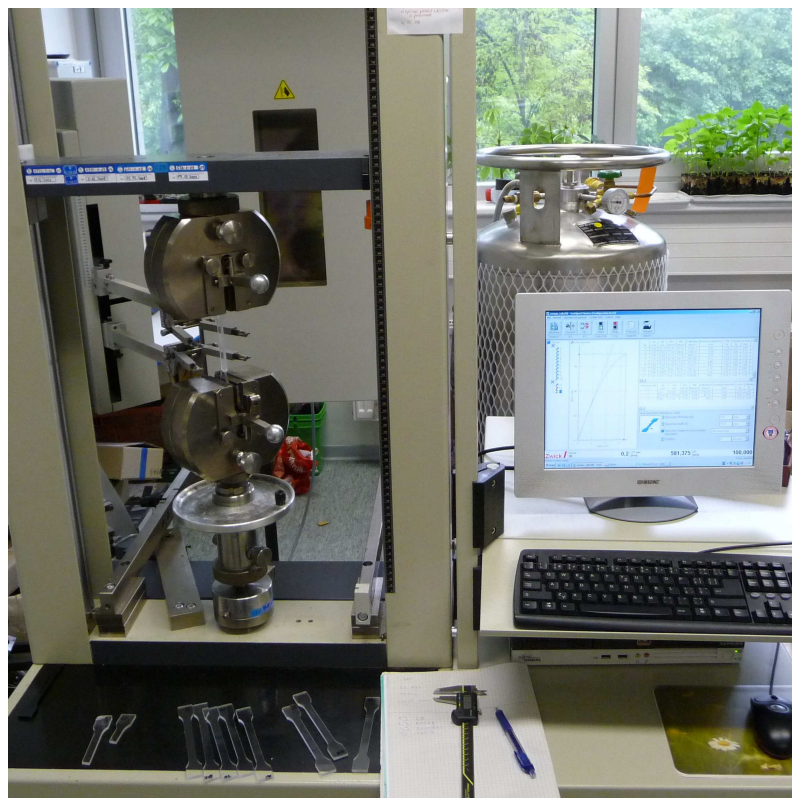
Obr. 31 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301

6.4.2 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

Pro vyhodnocení mechanického chování všech vyrobených zkušebních těles bylo použito univerzálního zkušebního stroje ZWICK 1456 (Obr. 32). Zařízení umožňuje provedení zkoušky tahem, tlakem a ohybem. V průběhu zkoušky je prostřednictvím PC zajišťováno zpracování snímaného přírůstku prodloužení a síly. Výsledky jsou statisticky zpracovány.

Tab. 14 Zkušební stroj ZWICK 1456 – technické parametry

Parametry	
Rozsah měřicí síly	0,02 N – 10 kN
Rychlost posuvu příčnicku	0,001 – 1500 mm.min ⁻¹
Maximální posuv příčnicku	800 mm.min ⁻¹
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora	-80 / +250 °C
Test expert software	Tah/Tlak/Ohyb



Obr. 32 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456

Pro měření rozměrů zkušebních těles bylo použito posuvného měřidla s přesností měření 0,01 mm.

7 PROVEDENÍ A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

7.1 Měření drsnosti obrobene plochy

Vlastní měření je zahájeno kalibrací měřicího přístroje Mitutoyo SJ-301 pomocí přiloženého etalonu. Kalibrace se může několikrát opakovat, dokud není dosaženo správné hodnoty. Poté je možno nastavit požadovanou měřicí dráhu přístroje, s ohledem na dostatečně dlouhou dráhu pro výpočet parametrů drsnosti. Velmi důležité je zajištění správné polohy snímače vůči obrobku. Posuv při měření musí být rovnoběžný s jeho povrchem. K vyhodnocení parametrů drsnosti dochází po projetí snímače měřicí dráhou. Vyhodnocené parametry lze poté odečíst z displeje přístroje nebo vytisknout.

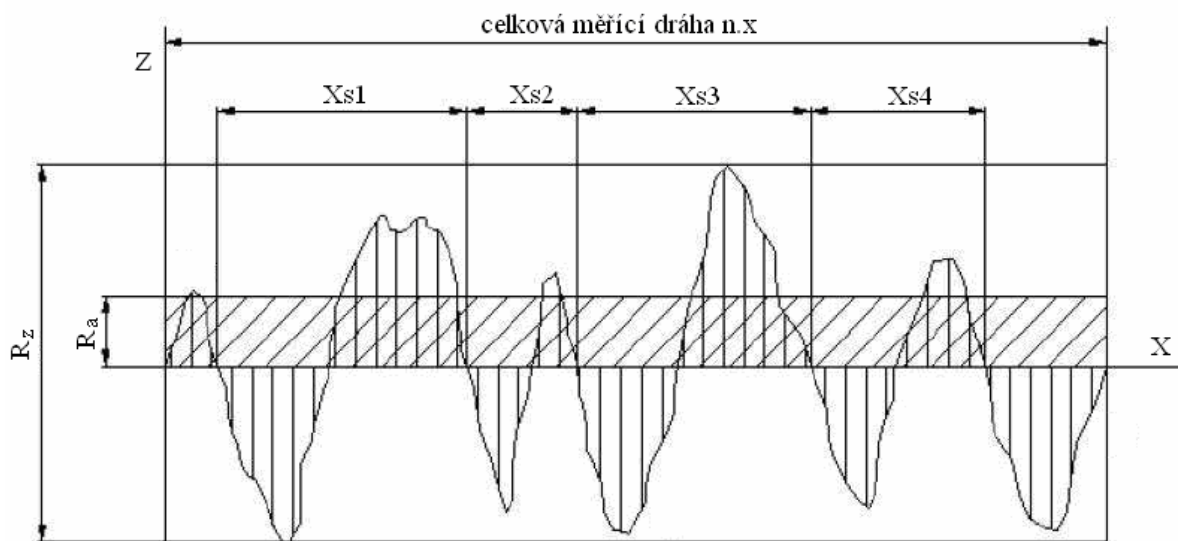
Při měření drsnosti byly vyhodnocovány tyto základní parametry (Obr. 33):

- Střední aritmetická úchylka profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek profilu (Z_i) uvnitř vztažené dráhy.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (8)$$

- Maximální výška profilu R_z – je součet výšky nejvyššího vrcholu od střední čáry a hloubky od nejnižšího bodu od střední čáry.

$$R_z = Z_p + Z_v \quad (9)$$



Obr. 33 Základní měřené parametry R_a a R_z

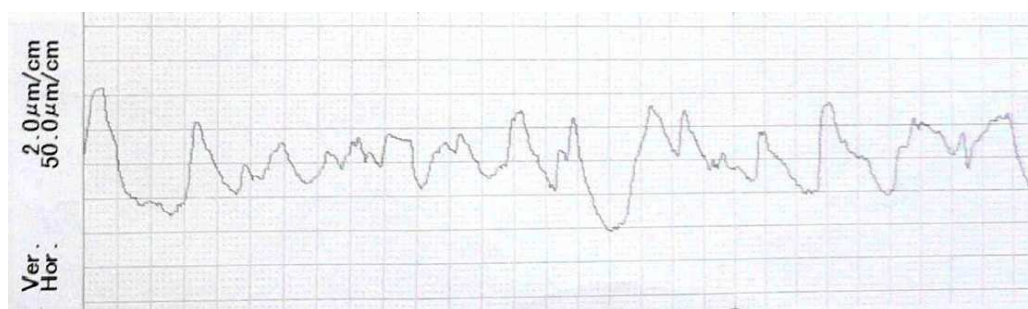
Při výpočtu parametrů drsnosti přístroj používá filtry, které odfiltrují např. vlnitost povrchu. Střední čára se vypočítá metodou nejmenších čtverců.

Při měření hodnot příčné drsnosti byla vzhledem ke korektnosti měření, pracovní plocha každého vzorku změřena 5x a následně vypočítaný aritmetický průměr zapsán do tabulky.

7.1.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

Tab. 15 Drsnost vstřikovaných vzorků z LDPE

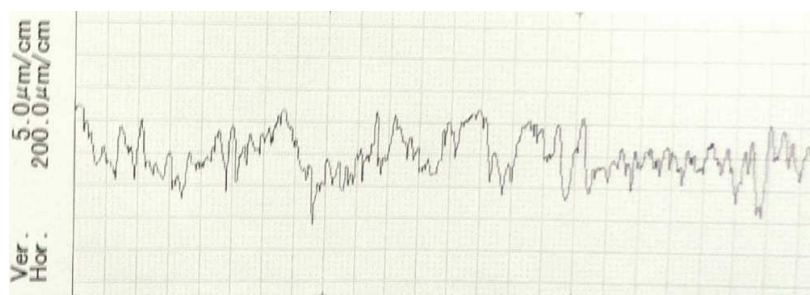
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0,51	1,77
2	0,62	2,02
3	0,57	1,84
4	0,53	1,80
5	0,60	1,99
6	0,52	1,89
7	0,52	1,81
8	0,64	1,98
9	0,55	1,79
10	0,61	1,96
X	0,57	1,89
s	0,05	0,11



Obr. 34 Průběh drsnosti povrchu vstřikovaného vzorku z LDPE

Tab. 16 Drsnost broušeného vzorku z LDPE

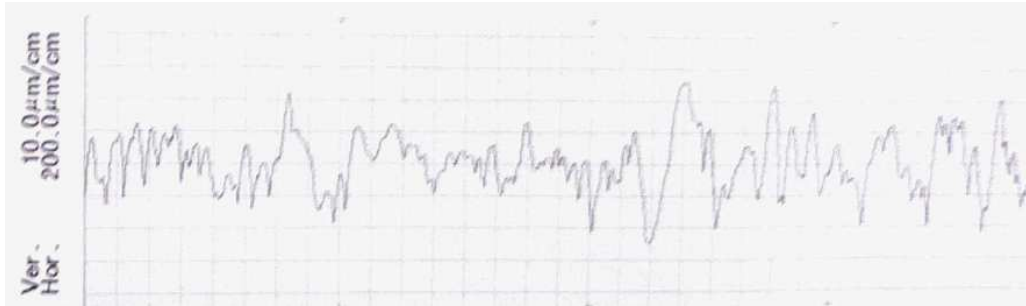
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,38	4,97
2	1,51	5,43
3	1,46	5,12
4	1,35	4,64
5	1,55	5,78
6	1,45	5,01
7	1,39	4,86
8	1,40	5,21
9	1,31	4,52
10	1,37	4,73
X	1,42	5,03
s	0,07	0,38



Obr. 35 Průběh drsnosti povrchu broušeného vzorku z LDPE

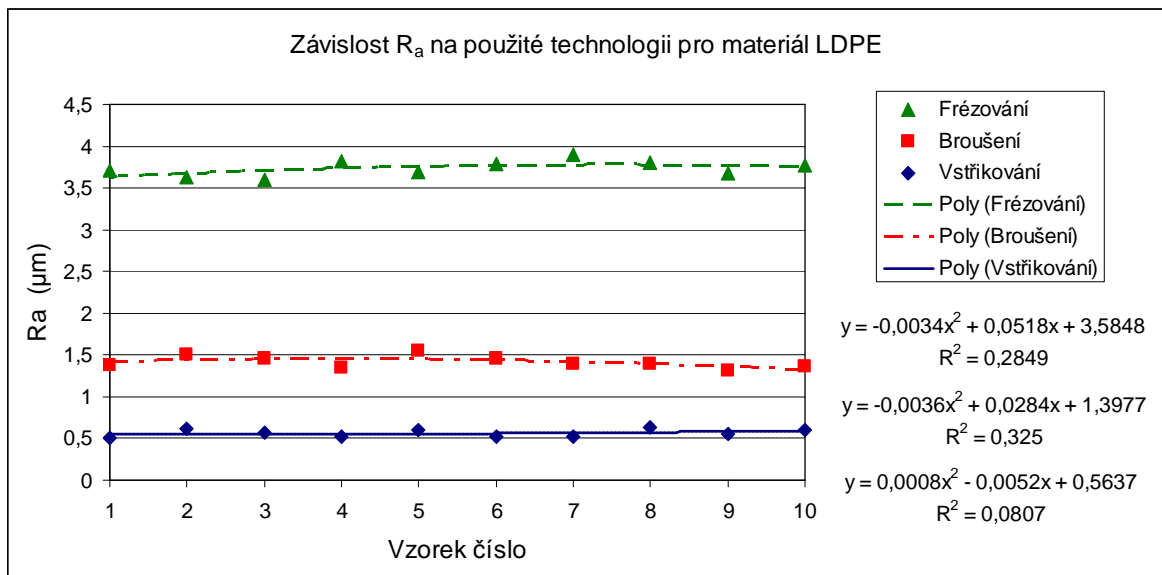
Tab. 17 Drsnost frézovaného vzorku z LDPE

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,71	12,72
2	3,63	13,13
3	3,59	12,00
4	3,82	13,41
5	3,69	12,34
6	3,78	15,87
7	3,89	14,02
8	3,81	12,38
9	3,68	11,76
10	3,77	12,55
X	3,74	13,02
s	0,09	1,21

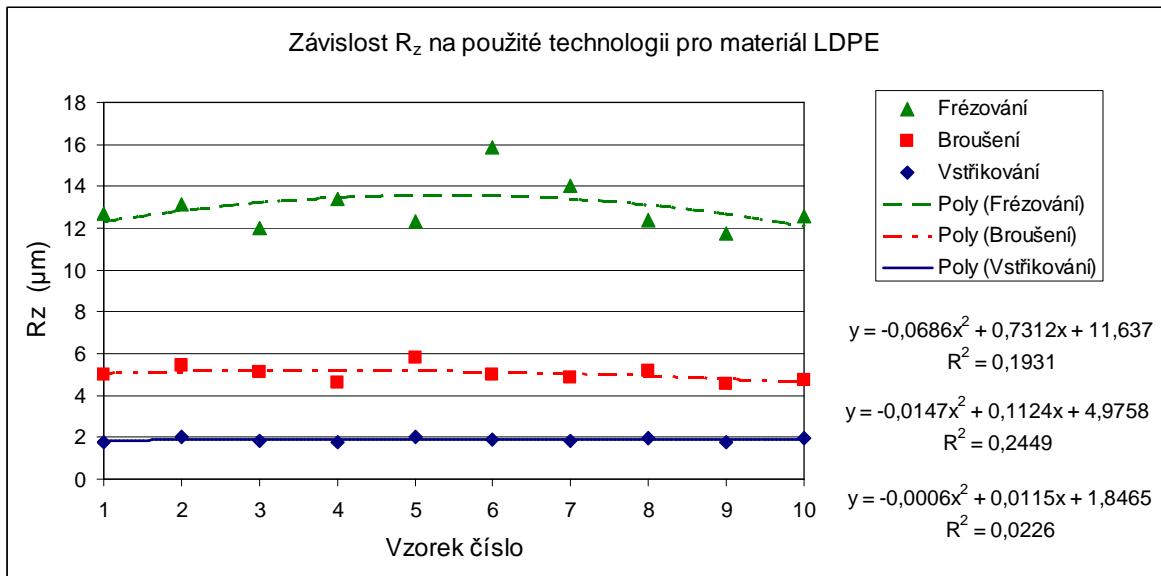


Obr. 36 Průběh drsnosti povrchu frézovaného vzorku z LDPE

Následující grafy zobrazují závislost drsnosti povrchu, vždy deseti měřených vzorků z materiálu LDPE, na použitých technologiích.



Obr. 37 Závislost R_a na použité technologii pro materiál LDPE

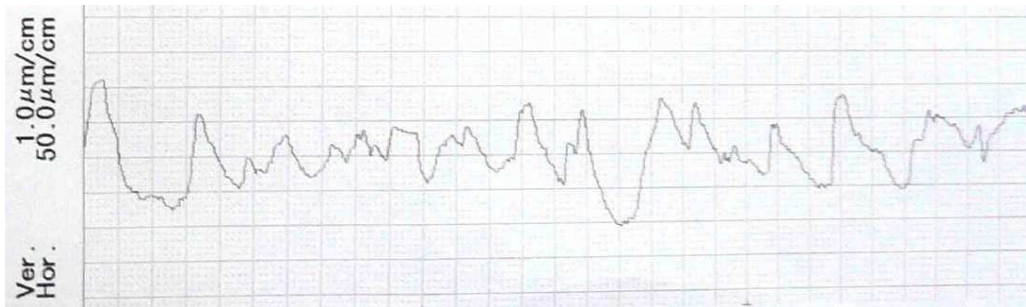

 Obr. 38 Závislost R_z na použité technologii pro materiál LDPE

Jak je patrné z porovnání výsledků měření drsností pro materiál LDPE, tak nejnižších hodnot drsnosti tento materiál dosahuje při vstřikování. Největší drsnosti naopak dosahuje po frézování.

7.1.2 Polypropylen (PP)

Tab. 18 Drsnost vstřikovaného vzorku z PP

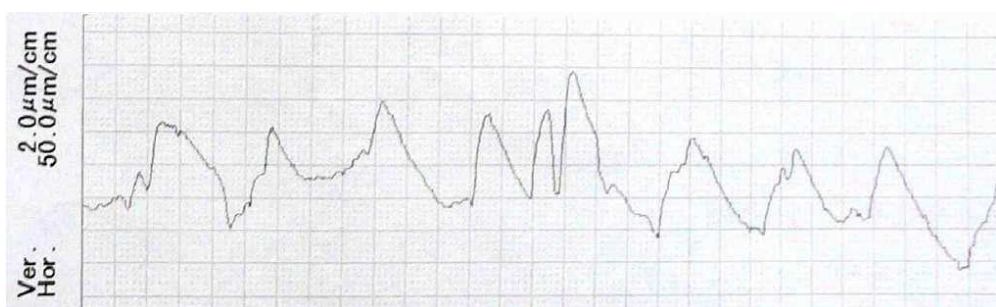
Vzorek číslo	R_a (µm)	R_z (µm)
1	0,12	0,45
2	0,13	0,47
3	0,11	0,42
4	0,15	0,61
5	0,12	0,44
6	0,17	0,53
7	0,19	0,77
8	0,13	0,52
9	0,15	0,59
10	0,20	0,83
X	0,15	0,56
s	0,03	0,14



Obr. 39 Průběh drsnosti povrchu vstřikovaného vzorku z PP

Tab. 19 Drsnost broušeného vzorku z PP

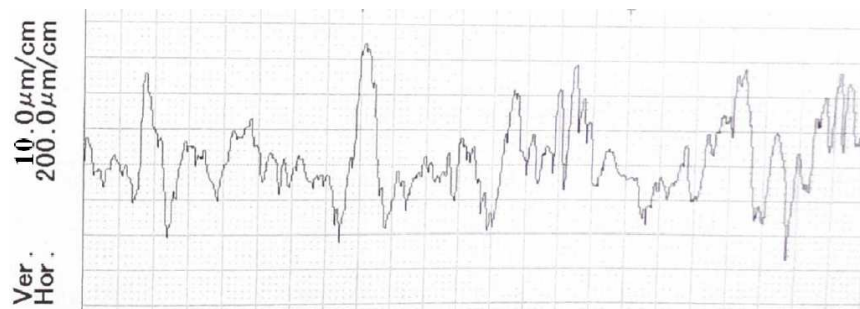
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0,93	3,34
2	1,05	3,75
3	0,99	3,48
4	1,11	4,16
5	0,84	3,17
6	0,92	3,53
7	1,04	3,89
8	1,07	3,71
9	1,10	3,48
10	0,94	3,20
X	1,00	3,57
s	0,09	0,31



Obr. 40 Průběh drsnosti povrchu broušeného vzorku z PP

Tab. 20 Drsnost frézovaného vzorku z PP

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	2,44	7,02
2	3,19	10,35
3	3,22	10,92
4	2,69	8,85
5	2,88	9,17
6	2,97	10,21
7	2,76	7,99
8	2,56	8,44
9	2,93	10,32
10	2,85	9,75
X	2,85	9,30
s	0,25	1,23



Obr. 41 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PP

Tab. 21 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v = 0,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	13,24	72,14
2	12,47	73,05
3	10,51	65,31
4	14,25	73,12
5	13,17	69,68
6	14,02	72,42
7	13,63	70,41
8	12,56	68,21
9	12,89	67,36
10	11,78	66,14
X	12,85	69,79
s	1,11	2,91

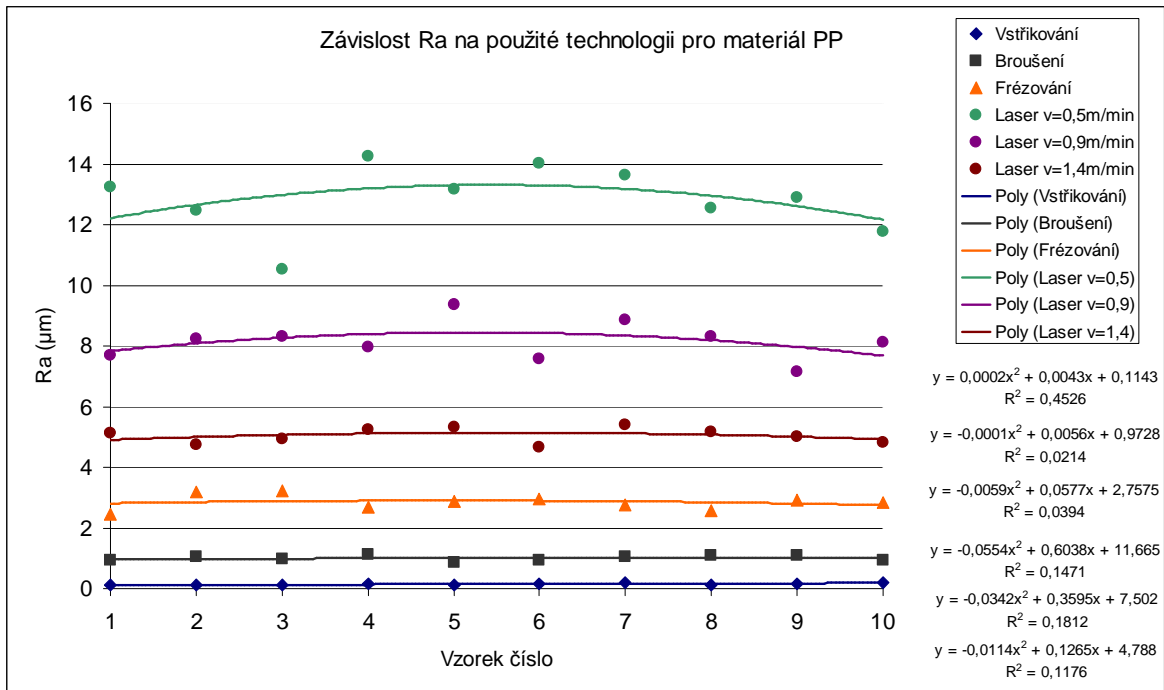
Tab. 22 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v = 0,9 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	7,70	47,52
2	8,24	44,37
3	8,31	43,15
4	7,98	43,78
5	9,35	43,67
6	7,57	43,01
7	8,86	46,11
8	8,31	41,97
9	7,16	43,52
10	8,13	41,62
X	8,16	43,87
s	0,63	1,79

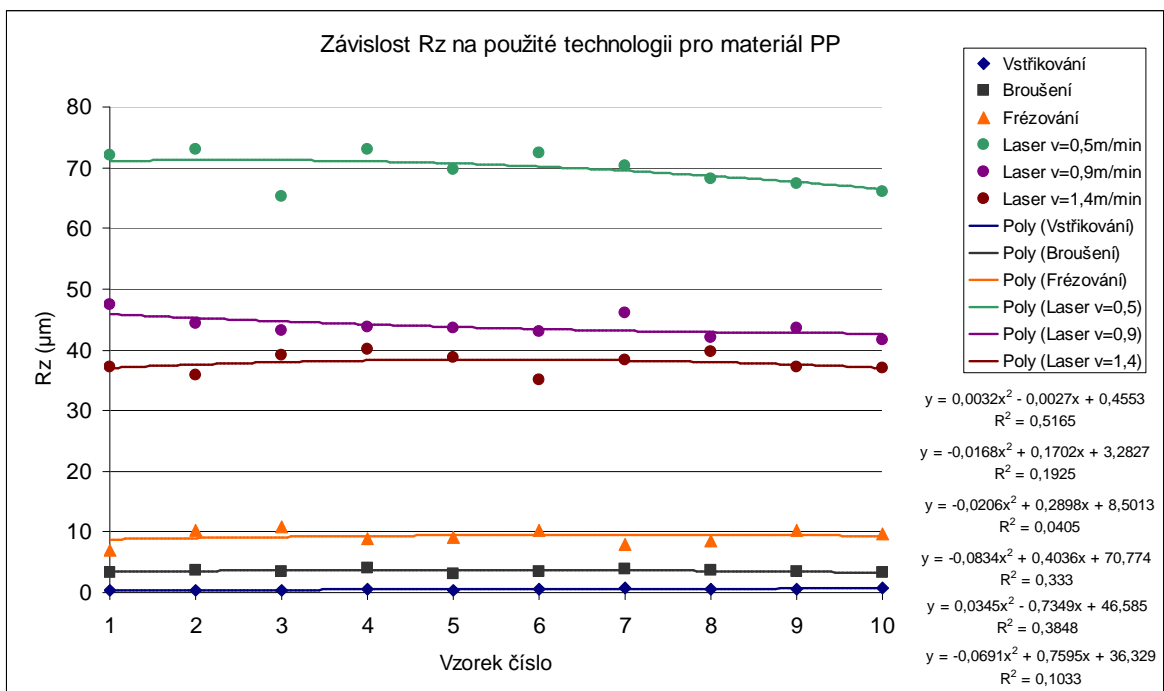
Tab. 23 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v = 1,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	5,12	37,27
2	4,73	35,88
3	4,95	39,13
4	5,24	40,17
5	5,33	38,75
6	4,67	35,12
7	5,41	38,34
8	5,18	39,69
9	5,02	37,14
10	4,81	36,99
X	5,05	37,85
s	0,25	1,65

Následující grafy zobrazují závislost drsnosti povrchu, vždy deseti měřených vzorků z materiálu PP, na použitých technologiích.



Obr. 42 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PP



Obr. 43 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PP

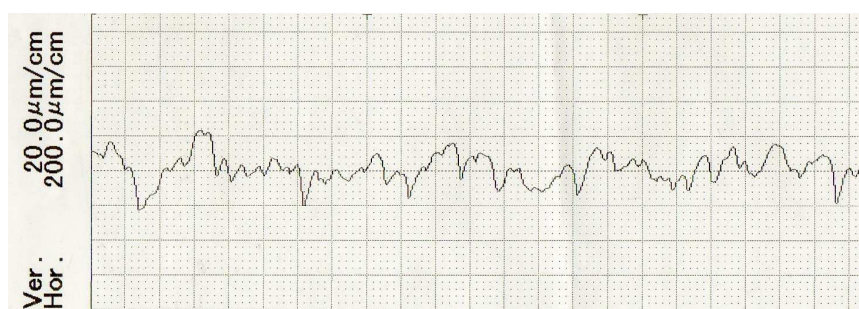
Na základě porovnání výše uvedených výsledků pro materiál PP je zřejmé, že nejlepších hodnot drsnosti dosahuje vstříkovaný vzorek. Z konvenčních technologií nejhorších hodnot dosahuje materiál po frézování.

Při laserovém řezání vlivem degradace materiálu drsnost roste s klesající řeznou rychlostí, jak je patrné z Obr. 42 a Obr. 43.

7.1.3 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Tab. 24 Drsnost vstříkovaného vzorku z PMMA

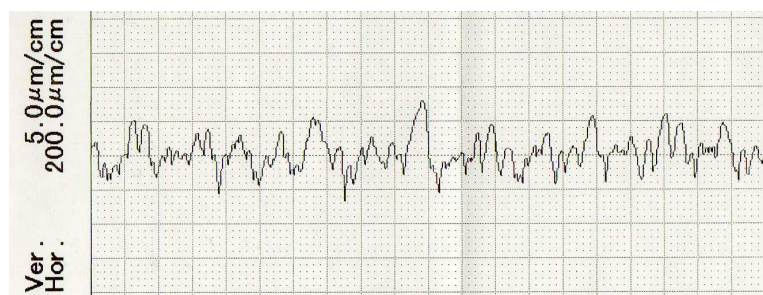
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0,32	2,27
2	0,44	2,55
3	0,47	2,94
4	0,51	3,22
5	0,49	2,78
6	0,57	3,44
7	0,38	2,29
8	0,45	2,23
9	0,52	3,09
10	0,39	2,69
X	0,45	2,75
s	0,08	0,42



Obr. 44 Průběh drsnosti vstříkovaného vzorku z PMMA

Tab. 25 Drsnost broušeného vzorku z PMMA

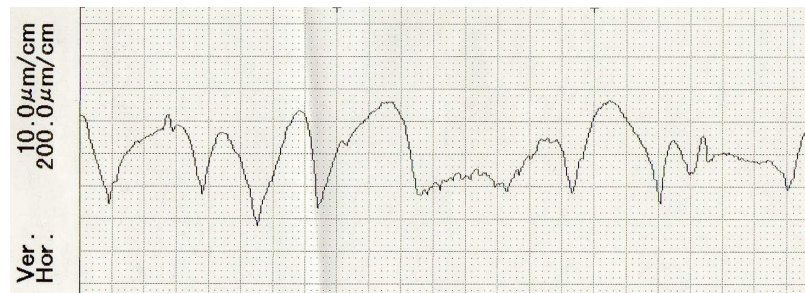
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,09	5,41
2	1,15	5,87
3	1,02	6,03
4	1,25	6,12
5	1,23	5,98
6	1,31	6,93
7	1,10	6,01
8	1,42	7,35
9	1,18	5,20
10	1,09	5,46
X	1,18	6,04
s	0,12	0,67



Obr. 45 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PMMA

Tab. 26 Drsnost frézovaného vzorku z PMMA

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	2,98	11,76
2	3,01	12,06
3	3,38	13,89
4	2,84	13,73
5	2,49	12,35
6	3,25	15,17
7	2,96	11,41
8	3,08	13,00
9	3,11	12,12
10	2,90	12,66
X	3,01	12,81
s	0,24	1,15



Obr. 46 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PMMA

Tab. 27 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	7,89	40,62
2	8,07	41,79
3	8,25	42,15
4	7,93	39,88
5	9,01	43,67
6	8,57	43,01
7	7,86	39,54
8	8,68	41,97
9	9,16	42,12
10	8,13	40,71
X	8,36	41,55
s	0,47	1,33

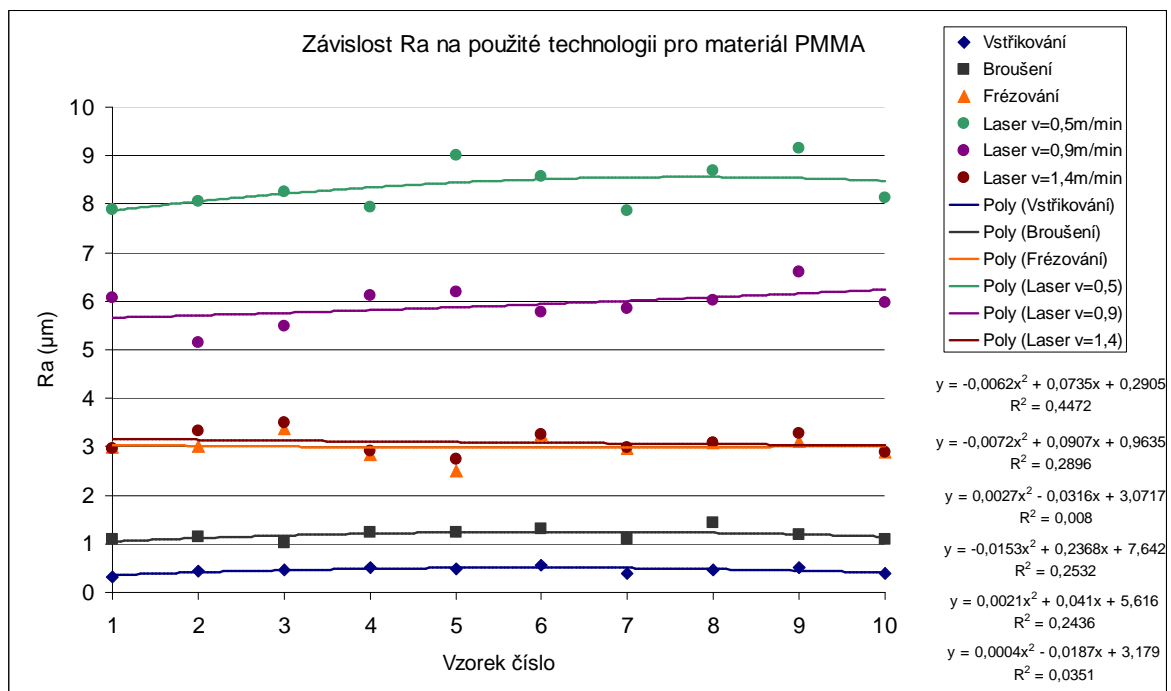
Tab. 28 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	6,08	35,05
2	5,15	30,01
3	5,48	31,24
4	6,12	32,87
5	6,19	34,77
6	5,78	33,56
7	5,85	35,18
8	6,01	32,86
9	6,59	35,21
10	5,98	31,79
X	5,92	33,25
s	0,41	1,84

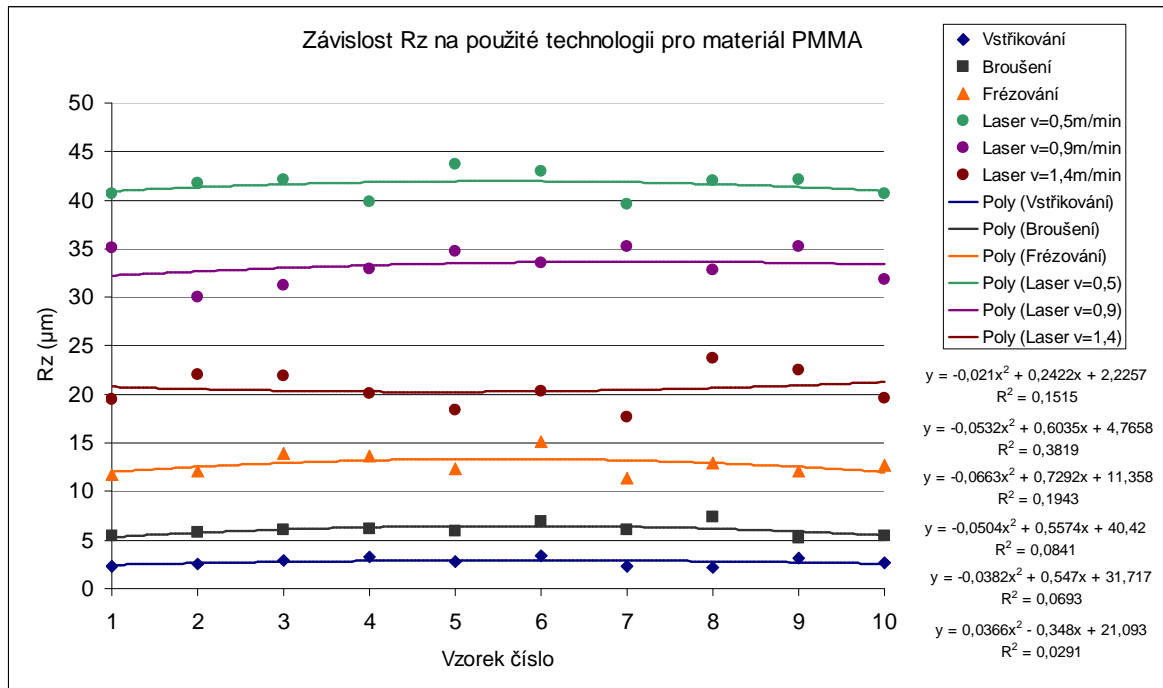
Tab. 29 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=1,4m.min^{-1}$

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	2,97	19,44
2	3,32	22,06
3	3,49	21,89
4	2,91	20,13
5	2,74	18,42
6	3,26	20,34
7	2,98	17,71
8	3,08	23,69
9	3,27	22,54
10	2,89	19,66
X	3,09	20,59
s	0,24	1,91

Na následujících grafech je zobrazena závislost drsnosti povrchu, vždy deseti měřených vzorků z materiálu PMMA, na použitých technologiích.



Obr. 47 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PMMA



Obr. 48 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PMMA

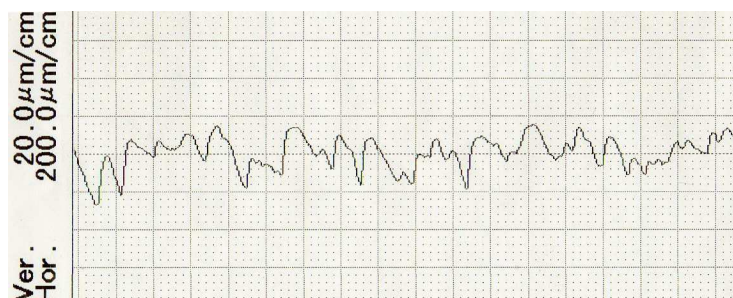
Z Obr. 47 a Obr. 48 je patrné, že nejnižších hodnot parametrů Ra a Rz je u materiálu PMMA dosaženo vstřikováním. Z konvenčních technologií nejvyšších hodnot Ra i Rz dosahuje frézovaný vzorek.

Při laserovém řezání je při porovnání zřejmá závislost drsnosti povrchu na rychlosti řezání. Nejvyšší hodnoty vykazuje vzorek řezaný při rychlosti $0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, naopak vzorek řezaný rychlostí $1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ má již srovnatelnou drsnost se vzorky frézovanými.

7.1.4 Polyamid 6 (PA 6)

Tab. 30 Drsnost vstřikovaného vzorku z PA6

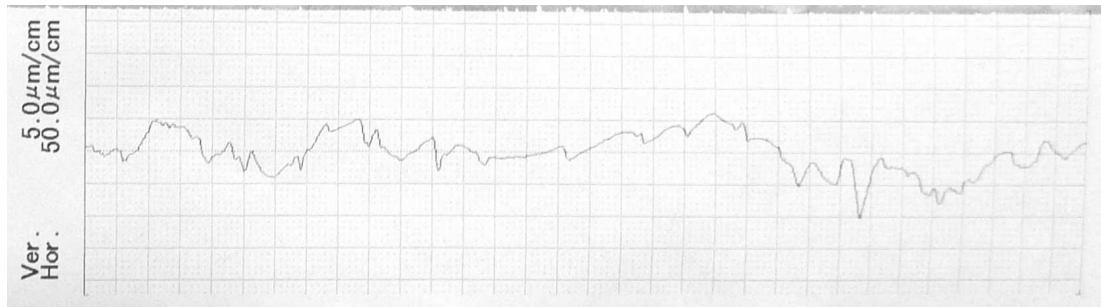
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0,57	1,79
2	0,73	2,99
3	0,68	2,68
4	0,86	3,17
5	0,53	2,67
6	0,71	3,02
7	0,56	1,95
8	0,52	1,90
9	0,58	2,28
10	0,69	3,09
X	0,64	2,55
s	0,12	0,54



Obr. 49 Průběh drsnosti vstřikovaného vzorku z PA6

Tab. 31 Drsnost broušeného vzorku z PA6

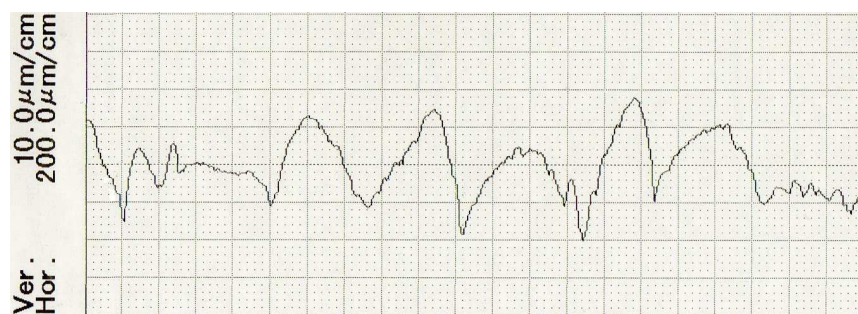
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,88	6,11
2	1,41	5,45
3	1,65	6,00
4	1,44	5,10
5	1,43	4,22
6	1,57	7,83
7	1,48	5,33
8	1,51	5,48
9	1,57	5,48
10	1,42	5,96
X	1,54	5,69
s	0,15	0,93



Obr. 50 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PA6

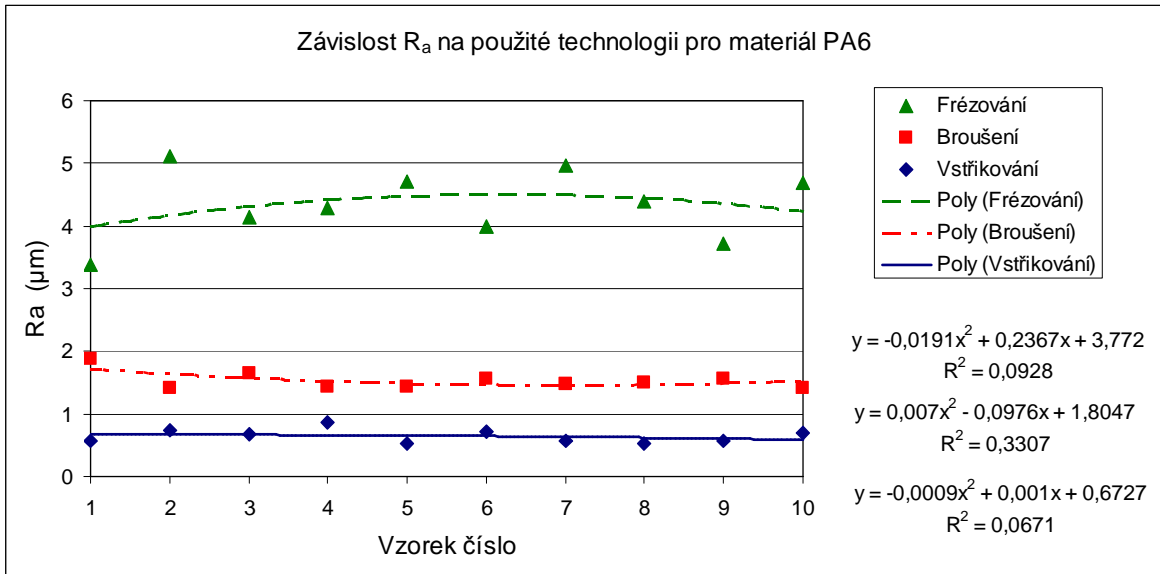
Tab. 32 Drsnost frézovaného vzorku z PA6

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	3,39	14,68
2	5,11	18,97
3	4,15	16,25
4	4,28	17,18
5	4,71	16,36
6	3,99	15,84
7	4,97	19,47
8	4,40	16,55
9	3,71	13,73
10	4,68	17,11
X	4,33	16,61
s	0,55	1,74

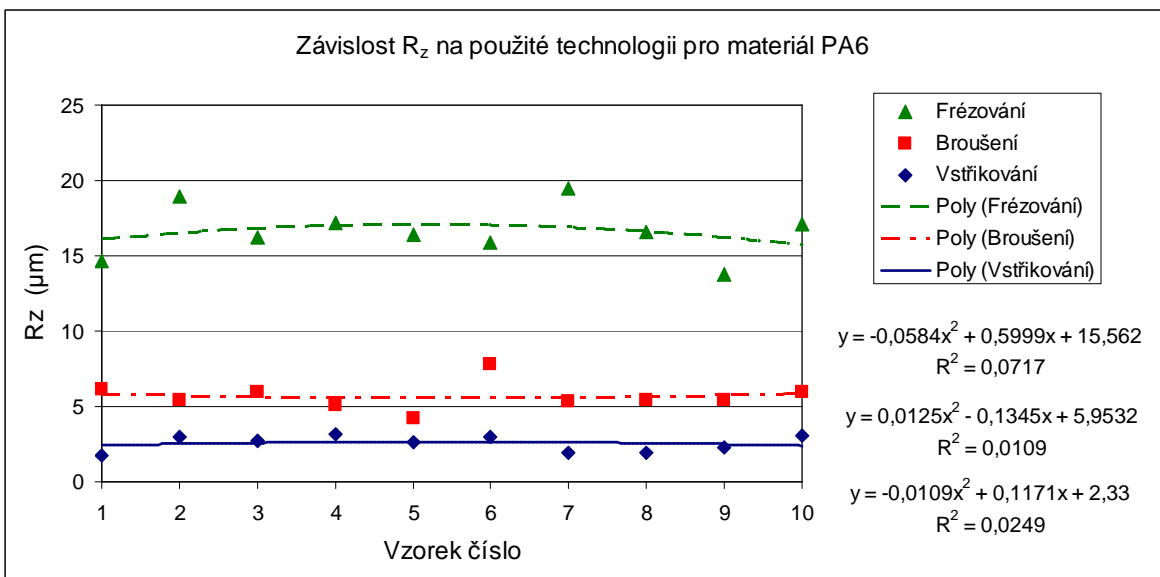


Obr. 51 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PA6

Drsnost vzorku z materiálu PA6 vyřezávaného laserem nebyla měřena z důvodu nedokolení výroby zkušebních tělísek.



Obr. 52 Závislost R_a na použité technologii pro materiál PA6

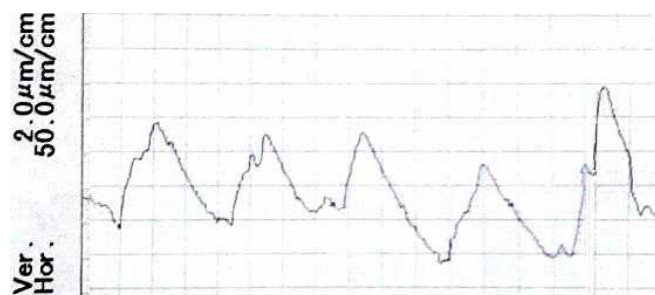


Obr. 53 Závislost R_z na použité technologii pro materiál PA6

7.1.5 Polyamid 6 + 30% skelných vláken (PA6+30%GF)

Tab. 33 Drsnost vstříkovaného vzorku z PA6+30%GF

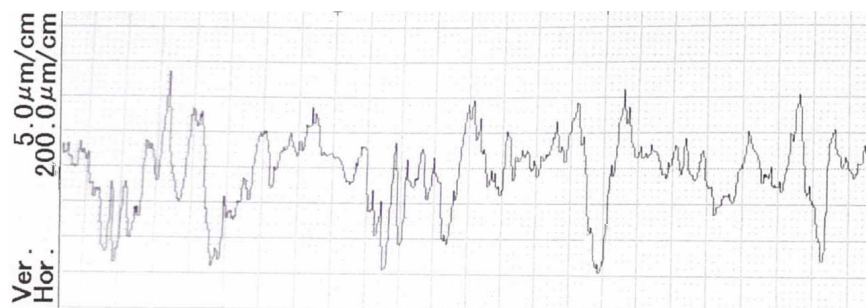
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	0,76	2,37
2	0,83	3,13
3	0,82	2,91
4	0,71	2,69
5	0,68	2,20
6	0,84	2,98
7	0,77	3,02
8	0,80	2,89
9	0,76	2,65
10	0,72	2,51
X	0,77	2,74
s	0,05	0,31



Obr. 54 Průběh drsnosti vstříkovaného vzorku z PA6+30%GF

Tab. 34 Drsnost broušeného vzorku z PA6+30%GF

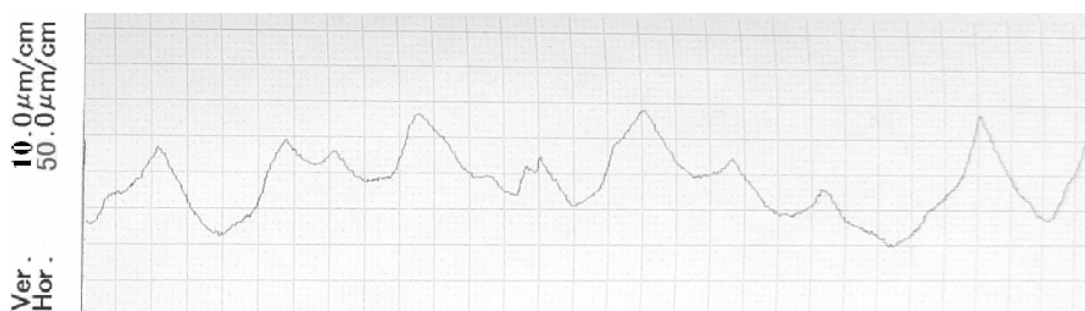
Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1,66	6,04
2	1,78	6,38
3	1,59	5,27
4	1,58	5,33
5	1,76	6,43
6	1,64	5,98
7	1,61	6,44
8	1,68	5,61
9	1,70	5,54
10	1,88	6,78
X	1,69	5,98
s	0,10	0,52



Obr. 55 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PA6+30%GF

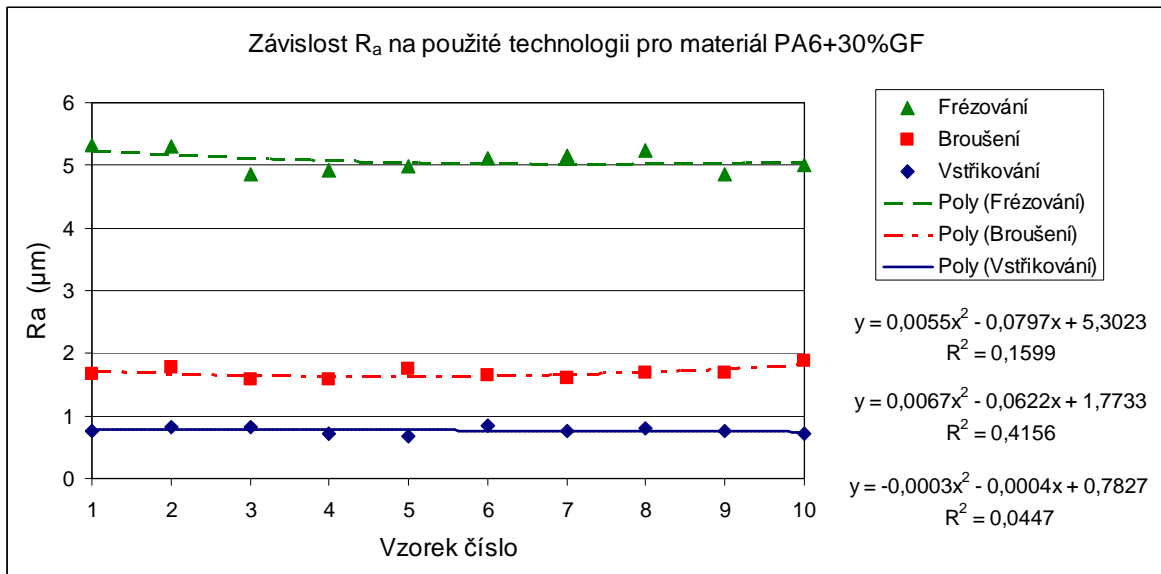
Tab. 35 Drsnost frézovaného vzorku z PA6+30%GF

Vzorek číslo	Ra (μm)	Rz (μm)
1	5,32	20,17
2	5,30	19,62
3	4,85	17,55
4	4,92	19,01
5	4,99	21,03
6	5,12	22,57
7	5,16	21,10
8	5,25	22,48
9	4,86	18,90
10	5,00	20,63
X	5,08	20,31
s	0,18	1,59

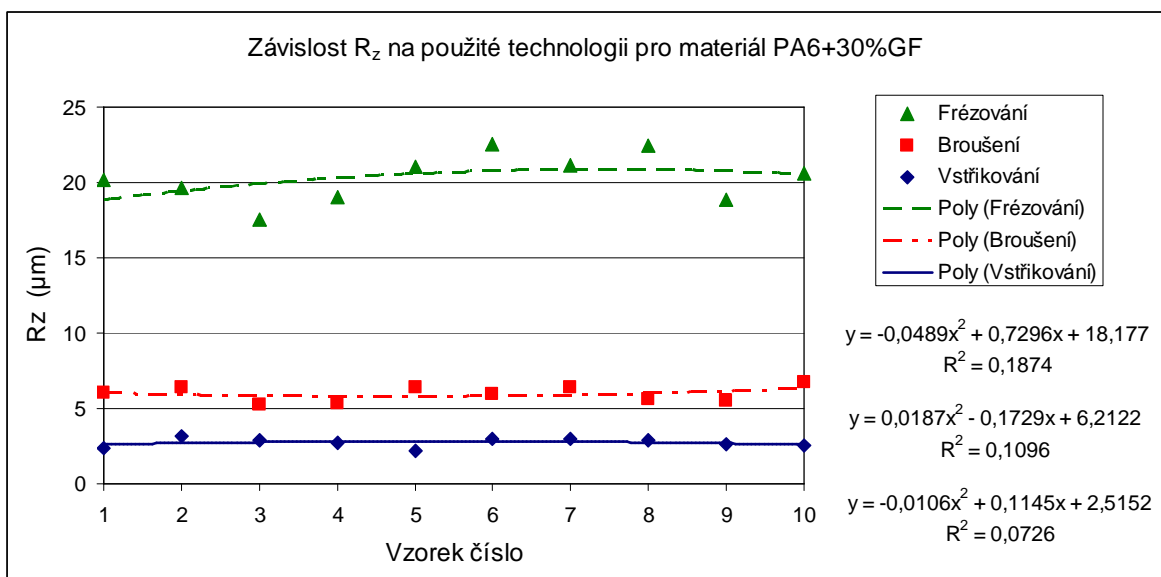


Obr. 56 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PA6+30%GF

Následující grafy zobrazují závislost drsnosti povrchu, vždy deseti měřených vzorků z materiálu PA6+30%GF, na použitých technologiích.



Obr. 57 Závislost R_a na použité technologii pro materiál PA6+30%GF



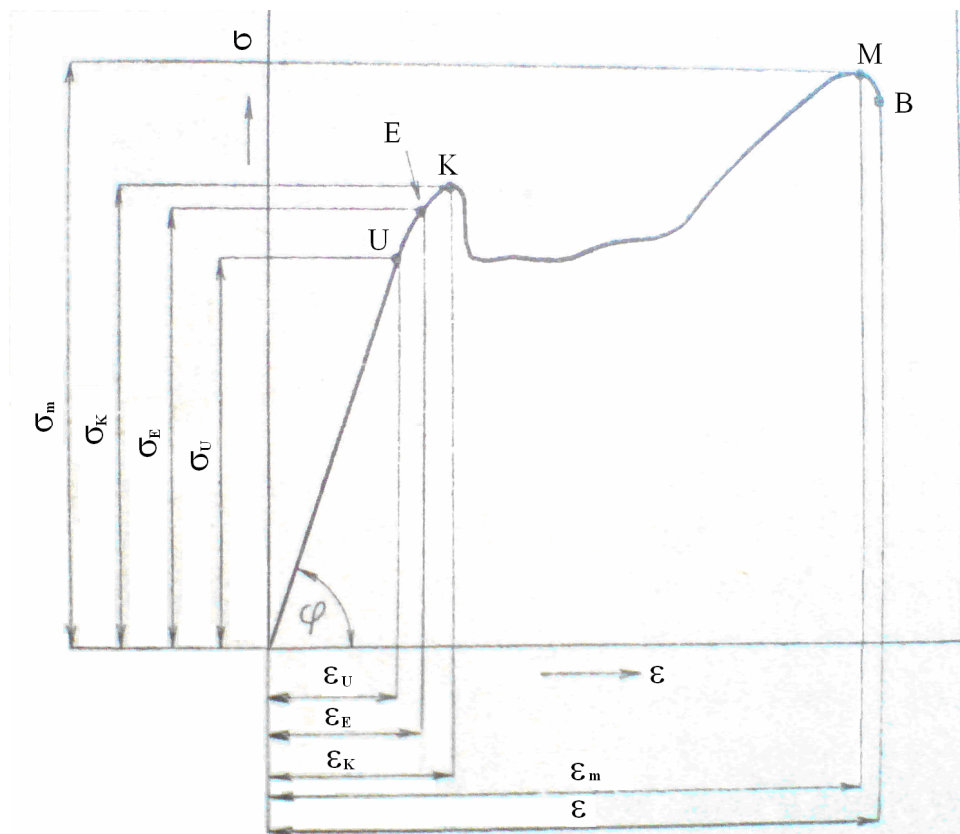
Obr. 58 Závislost R_z na použité technologii pro materiál PA6+30%GF

Na základě porovnání výše uvedených výsledků, nejnižších hodnot drsnosti dosahuje neplněný polyamid 6 při vstřikování, nejvyšších naopak při frézování. Jen mírně vyšší hodnoty R_a i R_z u každé technologie vykazuje plněný PA6. Tento mírný rozdíl je způsoben skelnými vlákny v plněném polyamidu.

7.2 Zkouška tahem

Je nejrozšířenější statická zkouška, provádí se téměř u všech technických materiálů. Byla provedena dle normy ČSN EN ISO 527-1 Plasty-Stanovení tahových vlastností. Uvedená norma udává všeobecné zásady pro stanovení tahových vlastností plastů a kompozitů za definovaných podmínek. Přitom klade požadavky na použité zařízení, tvar zkušebních těles, parametry provedení zkoušky a kondicionování těles aj.

Tahová zkouška spočívá v namáhání zkušebního tělesa tahem při stanovené rychlosti deformace za účelem určení charakteristik mechanických vlastností. Vyhodnocení základních mechanických vlastností se provádí z grafického záznamu zkoušky. Charakteristický tvar tahové křivky a statisticky zpracované smluvní hodnoty představují výsledky tahové zkoušky. Běžně používané hodnoty smluvních napětí se používají, protože se neuvažuje změna průřezu tyče a zatížení se vztahuje na původní průřez S_0 .



Obr. 59 Pracovní diagram tahové zkoušky

U-mez úměrnosti, E-mez pružnosti, K- mez kluzu, M – mez pevnosti,

B – přetržení, ϵ – poměrné prodloužení

Vyhodnocování výsledků tahové zkoušky:

Mez pevnosti v tahu

$$\sigma_m = \frac{F_{MAX}}{S_0} \quad (MPa) \quad (10)$$

Poměrné prodloužení na mezi pevnosti

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

Modul pružnosti v tahu

$$E = \frac{\sigma_m}{\varepsilon} \quad (MPa) \quad (12)$$

Symboly:

σ_mnapětí na mezi pevnosti (MPa)

F_{MAX}maximální síla (N)

S_0počáteční průřez vzorku (mm^2)

εpoměrné prodloužení při F_{MAX} (%)

l_0počáteční délka vzorku (mm)

ldélka vzorku při F_{MAX} (N)

Emodul pružnosti v tahu (MPa)

Zkoušky byly prováděny při rychlosti oddalování čelistí zkušebního stroje $50 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, při pokojové teplotě 22°C . Šířka a tloušťka vzorku byla změřena posuvným měřidlem 5x a aritmetické průměry těchto hodnot byly zadány jako vstupní parametry. V průběhu měření byla trvale měřena síla a prodloužení zkušebního tělesa. Při výpočtu poměrného prodloužení zkušebního vzorku bylo vycházeno z měření vzdálenosti mezi čelistmi. Pro změřená zkušební tělesa byly pořízeny grafy tahových křivek a pro každý soubor statistické hodnocení.

Tvar a parametry zkušebních těles jsou uvedeny v kapitole 6.2.

7.2.1 Nízkohustotní polyetylen (LDPE)

Tab. 36 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikované LDPE

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,99	9,93	850	22,81	134,52
2	3,98	9,94	883	24,27	141,31
3	3,97	9,95	876	22,66	145,77
4	4,00	9,93	842	21,13	137,35
5	3,98	9,97	836	22,41	131,91
6	3,99	9,94	845	22,79	148,14
7	3,98	9,96	871	22,48	136,47
8	3,98	9,96	822	22,29	147,91
9	4,00	9,95	839	22,85	139,25
10	3,97	9,95	852	23,04	138,32
X	3,98	9,95	851,6	22,67	140,11
s	0,01	0,01	19,36	0,78	5,59

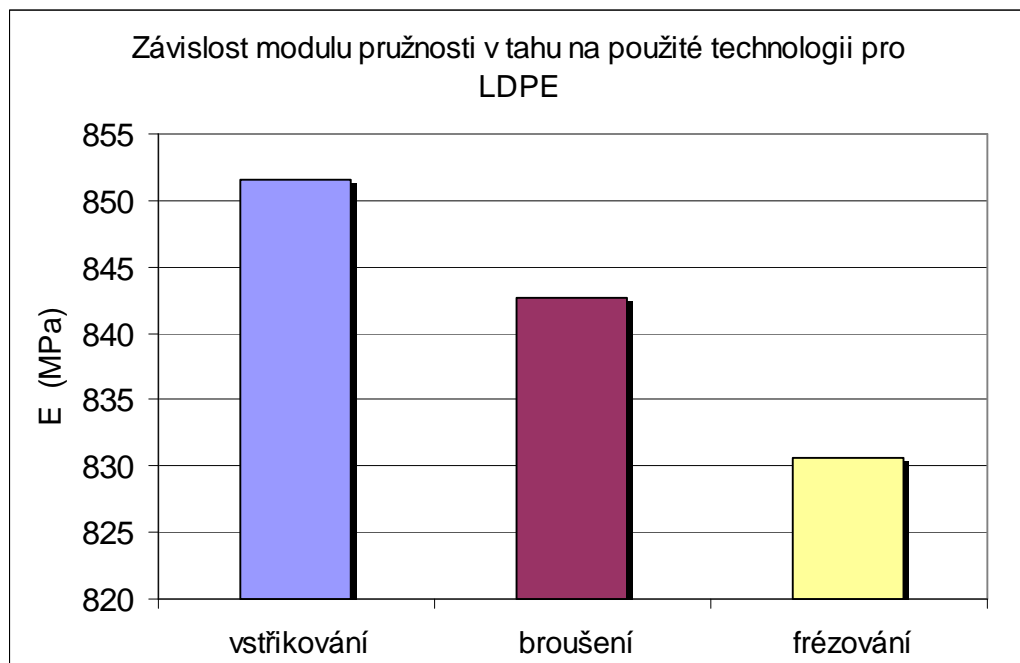
Tab. 37 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené LDPE

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,90	841	21,62	135,41
2	3,97	9,89	865	23,57	144,55
3	3,98	9,88	871	24,26	143,89
4	3,99	9,89	836	21,23	132,53
5	3,99	9,90	836	22,81	133,74
6	4,00	9,90	847	22,11	145,15
7	3,99	9,87	817	22,19	139,68
8	3,98	9,88	859	22,34	147,41
9	3,97	9,90	826	23,27	142,14
10	3,98	9,89	828	22,04	136,12
X	3,98	9,89	842,6	22,54	140,06
s	0,01	0,01	17,74	0,94	5,31

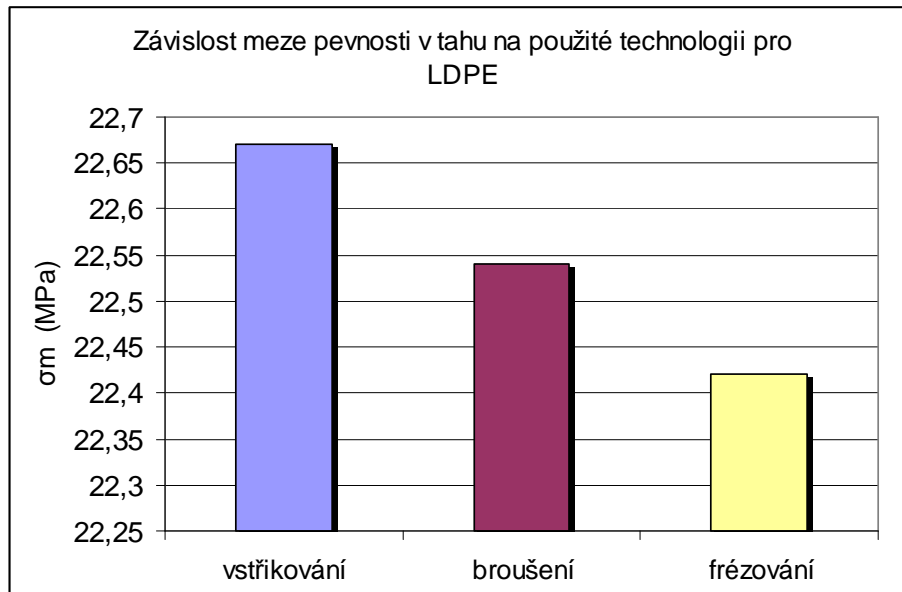
Tab. 38 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované LDPE

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,97	9,45	809	22,07	142,87
2	3,98	9,40	845	24,74	140,13
3	3,99	9,41	817	21,09	144,66
4	3,99	9,42	833	22,22	135,32
5	4,00	9,46	839	23,75	132,69
6	4,00	9,39	847	22,39	141,18
7	3,98	9,38	801	21,48	137,38
8	3,97	9,43	863	22,43	144,19
9	3,98	9,45	827	21,26	140,62
10	3,97	9,47	825	22,78	143,63
X	3,98	9,43	830,6	22,42	140,27
s	0,01	0,03	18,78	1,13	4,01

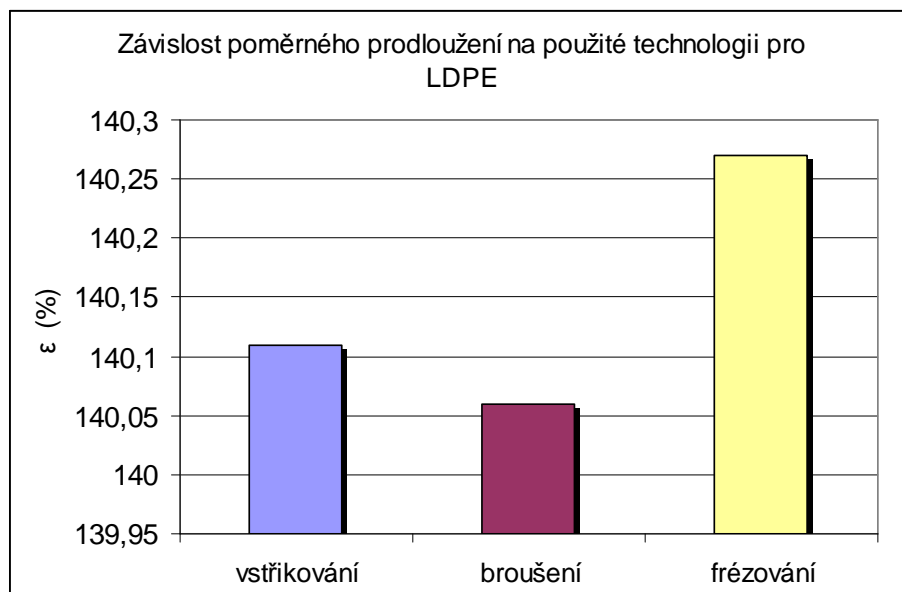
Následující grafy zobrazují závislost mechanických charakteristik získaných z tahových zkoušek na použitých technologiích. Porovnávají jsou aritmetické průměry každé charakteristiky.



Obr. 60 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro LDPE



Obr. 61 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro LDPE



Obr. 62 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro LDPE

Z výše uvedených tabulek a grafů je patrné, že nejvyšších hodnot modulu pružnosti i meze pevnosti v tahu dosahuje vstřikovaný vzorek. Relativně nejnižších hodnot naopak dosahuje frézovaný vzorek. Vzniklý malý pokles modulu pružnosti i meze pevnosti v tahu u obrobků lze přisoudit vzniklé vyšší drsnosti obráběného povrchu, či s ohledem na špatnou tepelnou vodivost materiálu, mírnému natavení povrchu vzorku.

7.2.2 Polypropylen (PP)

Tab. 39 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstříkovaný PP

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,92	9,97	1471	36,35	9,91
2	3,94	9,96	1578	36,14	9,89
3	3,91	10,00	1489	35,89	9,75
4	3,93	9,98	1493	36,04	9,83
5	3,93	9,97	1564	35,74	9,78
6	3,94	9,98	1507	36,65	10,45
7	3,91	9,98	1614	36,49	10,61
8	3,94	9,96	1419	35,99	9,25
9	3,93	10,00	1640	35,82	10,35
10	3,92	9,98	1481	36,23	10,48
X	3,93	9,98	1525,60	36,13	10,03
s	0,01	0,01	70,08	0,30	0,43

Tab. 40 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušený PP

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,92	9,87	1425	35,34	10,11
2	3,93	9,86	1554	35,17	9,78
3	3,94	9,89	1480	35,89	9,52
4	3,93	9,87	1562	35,92	9,33
5	3,92	9,88	1389	35,74	10,78
6	3,94	9,86	1407	36,15	9,65
7	3,94	9,84	1454	35,59	10,65
8	3,91	9,86	1451	35,99	10,25
9	3,93	9,84	1482	35,32	9,72
10	3,93	9,87	1497	36,16	9,40
X	3,93	9,86	1470,60	35,72	9,92
s	0,01	0,02	57,04	0,35	0,51

Tab. 41 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézovaný PP

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,94	9,38	1410	35,04	10,09
2	3,94	9,36	1429	35,19	9,62
3	3,93	9,41	1531	34,78	10,41
4	3,93	9,38	1416	34,64	10,13
5	3,93	9,42	1512	35,74	9,98
6	3,95	9,41	1395	35,97	9,12
7	3,92	9,37	1379	35,15	10,06
8	3,93	9,38	1401	34,68	9,52
9	3,93	9,38	1519	35,24	9,69
10	3,94	9,36	1463	35,86	9,94
X	3,93	9,39	1445,5	35,22	9,85
s	0,01	0,02	57,11	0,49	0,38

Tab. 42 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

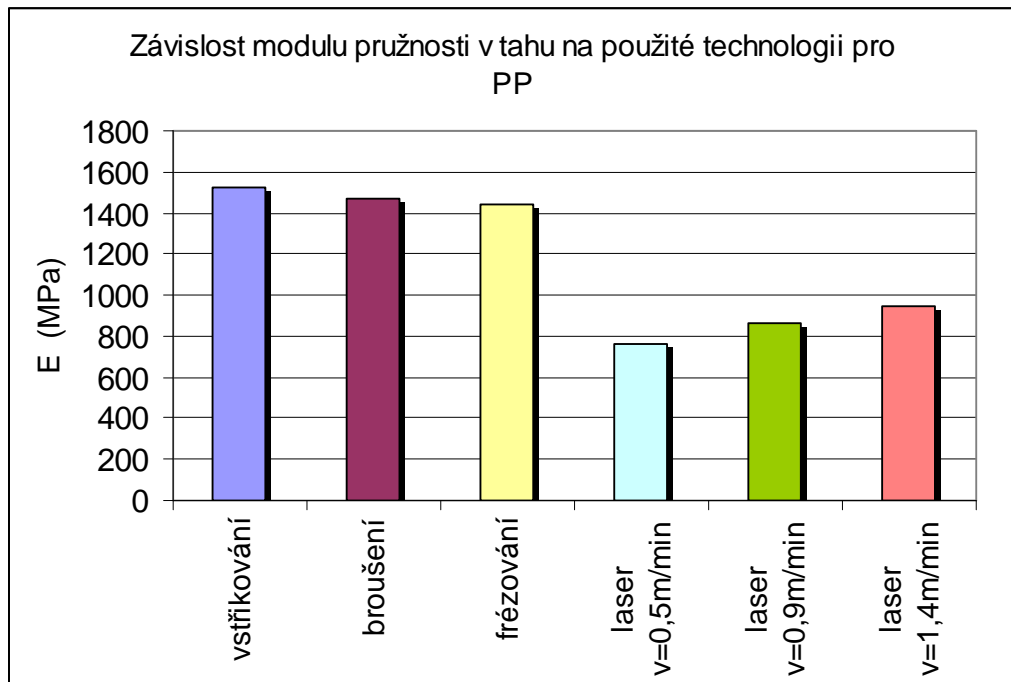
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,94	9,65	704	18,79	7,61
2	3,96	9,67	718	18,51	8,04
3	3,96	9,63	799	19,14	7,84
4	3,95	9,68	724	18,74	8,17
5	3,95	9,61	831	17,87	8,09
6	3,95	9,64	817	17,89	8,10
7	3,95	9,62	795	18,35	7,93
8	3,94	9,66	734	19,35	7,86
9	3,94	9,66	748	17,76	8,28
10	3,96	9,67	711	18,46	7,71
X	3,95	9,65	758,1	18,49	7,96
s	0,01	0,02	47,63	0,54	0,21

Tab. 43 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

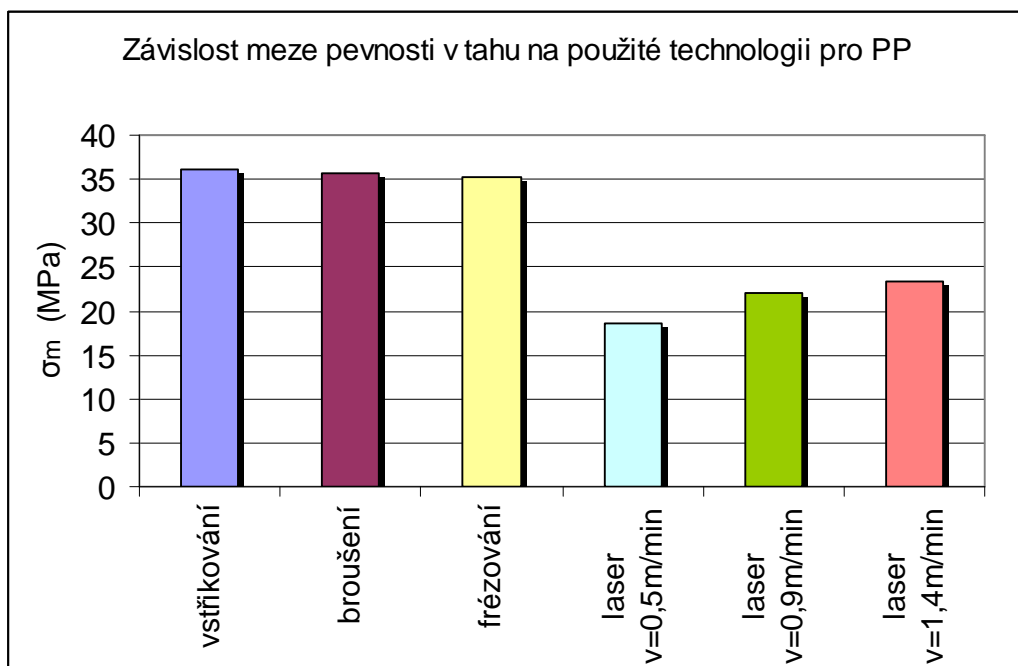
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,94	9,69	879	21,14	7,87
2	3,96	9,72	831	22,57	8,12
3	3,94	9,70	814	23,28	8,19
4	3,94	9,71	926	21,69	7,82
5	3,95	9,69	874	21,14	7,94
6	3,93	9,68	889	22,36	7,91
7	3,97	9,73	847	22,81	8,08
8	3,96	9,70	809	22,55	7,78
9	3,95	9,69	842	22,18	8,53
10	3,95	9,68	910	21,44	8,42
X	3,95	9,70	862,1	22,11	8,06
s	0,02	0,02	39,14	0,73	0,22

Tab. 44 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

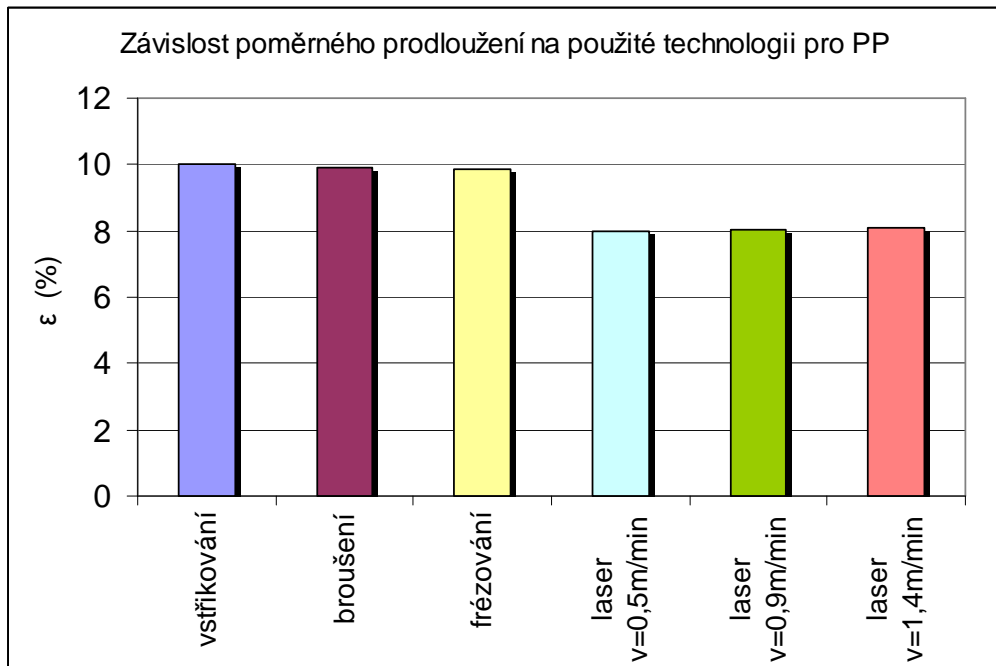
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,95	9,75	912	23,35	7,94
2	3,96	9,75	960	24,02	8,12
3	3,94	9,74	1015	22,45	8,24
4	3,97	9,78	842	23,78	7,82
5	3,95	9,79	897	23,47	8,05
6	3,96	9,75	948	23,69	7,91
7	3,95	9,78	957	24,15	8,10
8	3,94	9,78	971	22,74	8,36
9	3,97	9,74	1034	23,54	8,47
10	3,96	9,75	937	22,89	7,86
X	3,96	9,76	947,3	23,41	8,11
s	0,01	0,02	55,67	0,56	0,22



Obr. 63 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PP



Obr. 64 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PP



Obr. 65 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PP

Z naměřených dat je patrné, že nejvýhodnější hodnoty pevnosti v tahu prokazuje vstříkovaný vzorek z PP. Mírný pokles modulu pružnosti i pevnosti v tahu u konvenčně obráběných vzorků je způsoben zhoršením drsnosti povrchu obrobku, dalším aspektem může být natevení povrchové vrstvy vlivem špatné tepelné vodivosti materiálu.

Při řezání PP laserem je patrné negativní ovlivnění mechanických vlastností způsobené výrazným teplotním ovlivněním povrchu vzorku. V důsledku tepelné degradace dochází u polypropylenu k trhání řetězců v povrchové vrstvě a tím ke snižování pevnosti. Z naměřených hodnot lze odečíst, že pokles pevnosti je tím výraznější, čím delší je doba interakce laserového paprsku s materiálem.

7.2.3 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Tab. 45 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstříkovaný PMMA

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	4,00	9,98	2057	54,42	3,58
2	3,98	9,98	2341	53,78	3,74
3	3,99	10,00	2078	55,12	4,01
4	4,00	9,99	2247	55,48	3,15
5	3,99	9,98	2410	52,95	3,48
6	3,99	9,99	2167	53,66	3,05
7	4,00	9,98	2198	54,14	4,24
8	3,98	9,99	2301	55,01	5,49
9	3,99	10,00	2118	54,87	4,78
10	3,98	9,98	2242	51,11	4,55
X	3,99	9,99	2215,90	54,05	4,01
s	0,01	0,01	114,88	1,29	0,77

Tab. 46 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušený PMMA

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,90	2114	53,13	4,01
2	3,97	9,88	2321	51,78	2,89
3	3,98	9,89	2420	55,50	3,87
4	3,97	9,87	2083	52,24	3,75
5	3,99	9,88	2245	52,87	3,84
6	4,00	9,86	2089	52,44	3,50
7	3,97	9,89	2055	51,78	3,99
8	3,98	9,89	2163	54,18	4,59
9	3,99	9,88	2096	53,79	4,87
10	3,99	9,90	2122	53,07	3,11
X	3,98	9,88	2170,80	53,08	3,84
s	0,01	0,01	119,83	1,16	0,69

Tab. 47 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézovaný PMMA

n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,38	2342	52,73	3,76
2	3,98	9,40	2007	50,80	2,77
3	4,01	9,39	2039	51,59	3,46
4	3,99	9,39	2278	52,45	3,70
5	3,99	9,38	2096	51,55	2,99
6	3,98	9,40	1998	50,78	3,15
7	4,00	9,41	2030	52,96	3,64
8	3,97	9,40	2139	53,64	2,11
9	3,99	9,38	2289	52,25	3,42
10	4,00	9,36	2168	52,67	3,34
X	3,99	9,39	2138,60	52,14	3,23
s	0,01	0,02	119,83	0,95	0,51

Tab.48 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

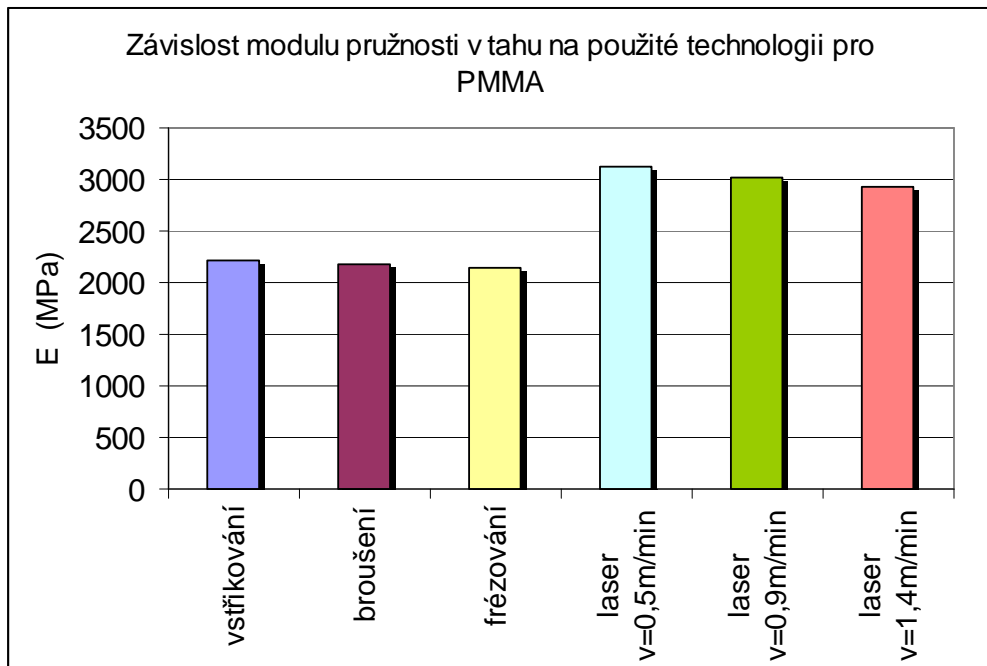
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,91	9,85	2975	63,47	2,48
2	3,93	9,87	3314	67,21	1,88
3	3,92	9,86	3143	64,75	1,95
4	3,90	9,87	3087	65,19	2,15
5	3,92	9,86	2986	63,84	2,36
6	3,93	9,88	3411	69,56	1,83
7	3,94	9,86	3156	67,88	1,98
8	3,91	9,85	3249	68,01	1,94
9	3,92	9,84	3094	66,81	2,26
10	3,93	9,86	2892	62,23	2,11
X	3,92	9,86	3130,70	65,90	2,09
s	0,01	0,01	160,68	2,35	0,22

Tab.49 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

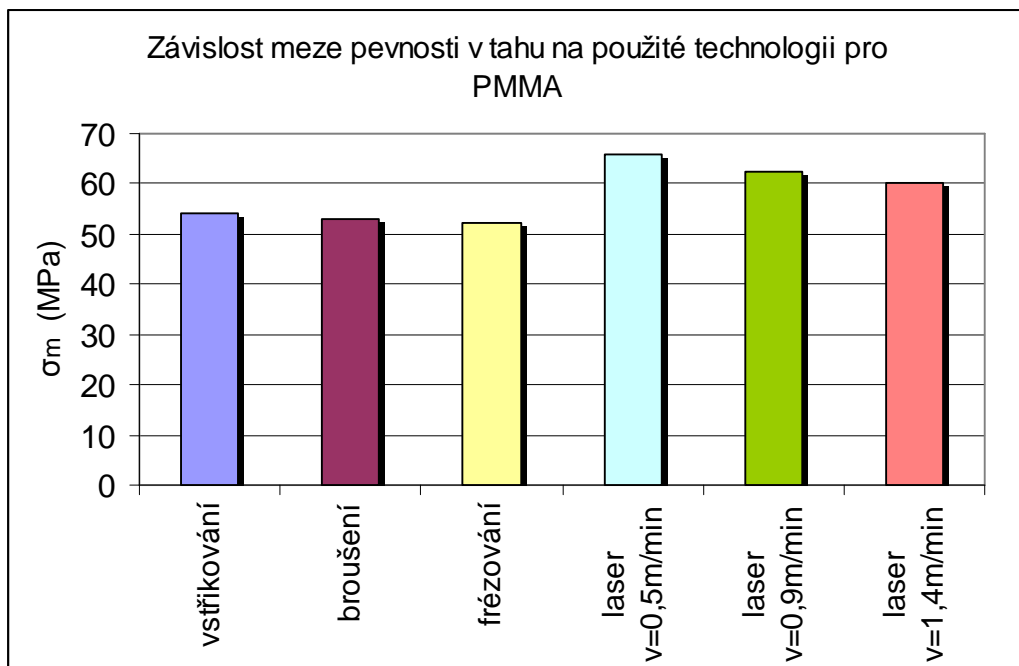
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,92	9,88	3089	58,87	2,23
2	3,94	9,89	2793	64,26	2,34
3	3,90	9,87	3096	62,57	1,96
4	3,90	9,86	2902	60,19	2,17
5	3,91	9,89	2867	62,45	2,15
6	3,94	9,85	3265	59,33	1,94
7	3,93	9,88	3091	62,58	2,36
8	3,92	9,90	3173	65,01	2,52
9	3,91	9,87	3091	64,86	2,47
10	3,93	9,88	2776	62,43	2,13
X	3,92	9,88	3014,30	62,25	2,23
s	0,02	0,02	167,37	2,18	0,21

Tab.50 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$

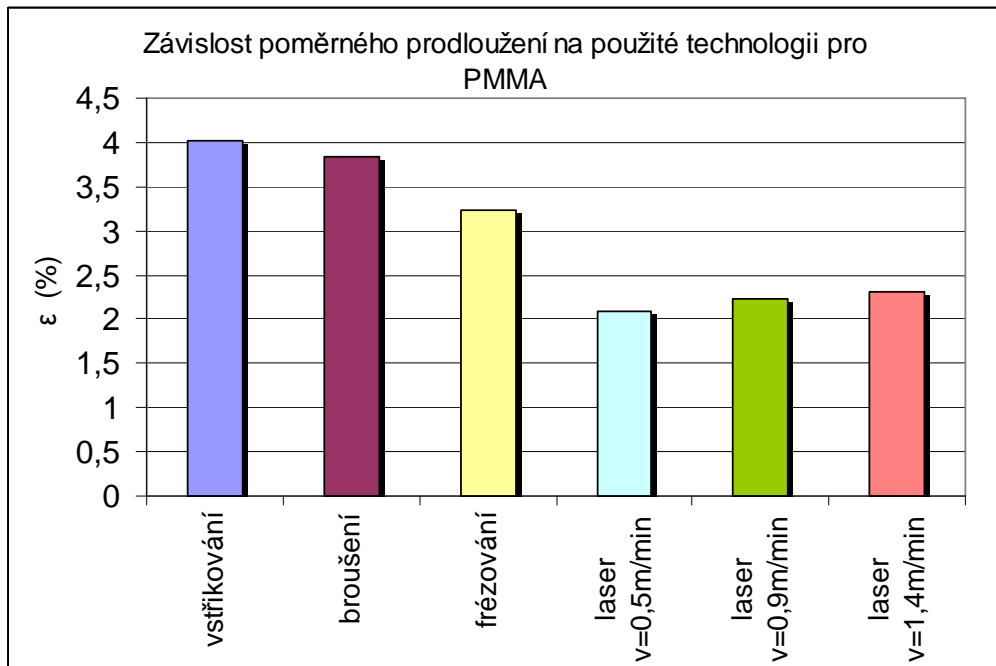
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,93	9,90	2823	57,24	2,10
2	3,93	9,90	2941	62,09	2,57
3	3,94	9,91	3068	60,47	2,51
4	3,92	9,89	2749	59,13	2,48
5	3,93	9,90	3019	58,62	1,98
6	3,94	9,92	2741	61,40	2,34
7	3,92	9,88	3044	60,36	2,36
8	3,92	9,90	2935	63,11	2,15
9	3,91	9,89	3086	58,97	2,52
10	3,94	9,88	2808	59,77	2,16
X	3,93	9,90	2921,4	60,11	2,32
s	0,01	0,01	132,72	1,75	0,22



Obr. 66 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PMMA



Obr. 67 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PMMA



Obr. 68 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PMMA

Polymethylmetakrylát jako jediný testovaný materiál dosahuje nejvyšších hodnot pevnosti v tahu při řezání laserem. Podle zhodnocení naměřených hodnot je zřejmé, že nárůst pevnosti je tím výraznější, čím delší je doba ovlivnění materiálu. Jedná se tak o přesně opačný efekt, než jaký má doba interakce vliv na drsnost povrchu. Ukazuje se tak opačný trend než u třískového obrábění PMMA, kdy s rostoucí hodnotou drsnosti mírně klesá pevnost materiálu v tahu.

7.2.4 Polyamid 6 (PA6)

Tab. 51 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstříkované PA6

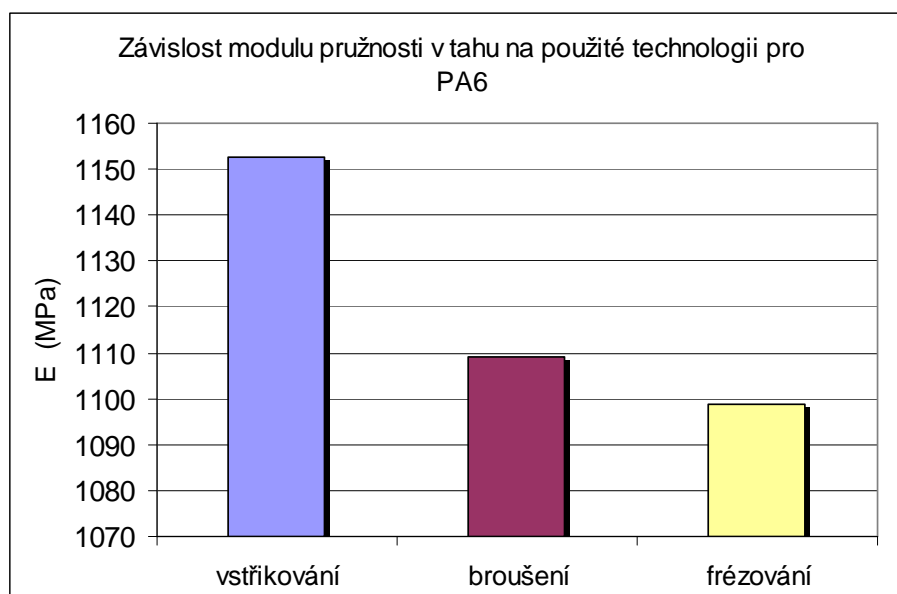
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,93	1102	45,83	111,42
2	3,98	9,92	1231	44,97	110,34
3	3,97	9,92	1154	43,78	111,58
4	3,97	9,93	1171	43,69	109,74
5	3,99	9,94	1205	46,61	107,68
6	3,96	9,93	1064	44,59	113,94
7	3,98	9,94	1098	45,16	108,86
8	3,98	9,92	1110	44,97	109,23
9	3,97	9,93	1224	43,17	111,10
10	3,98	9,94	1168	45,95	110,45
X	3,98	9,93	1152,7	44,87	110,43
s	0,01	0,01	57,52	1,11	1,73

Tab. 52 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené PA6

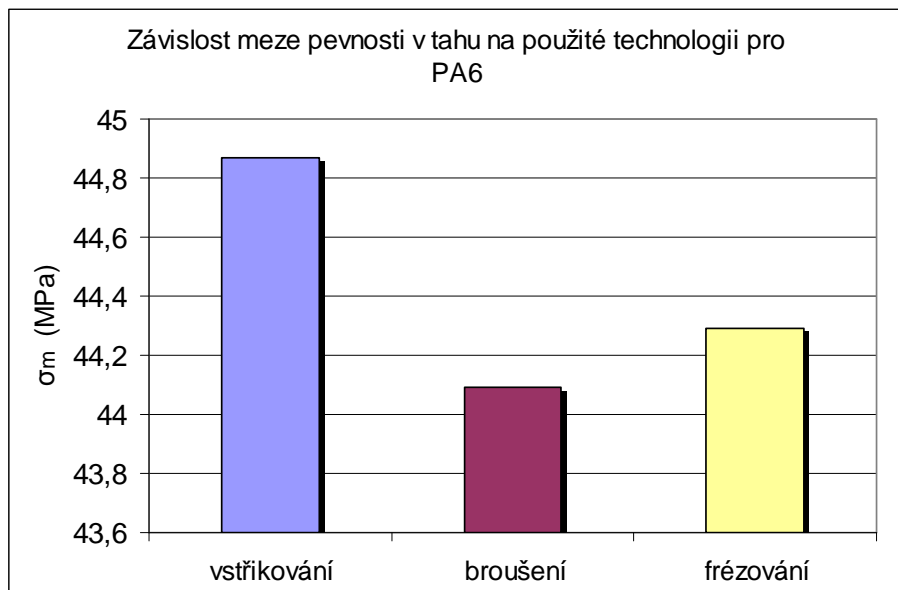
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,96	9,87	1046	42,39	108,25
2	3,97	9,86	1237	43,65	109,30
3	3,98	9,87	1086	43,96	110,57
4	3,98	9,86	1170	45,49	109,41
5	3,97	9,86	1117	44,16	108,69
6	3,97	9,85	1085	45,57	110,74
7	3,96	9,88	1131	43,68	112,06
8	3,98	9,87	1074	44,06	108,23
9	3,97	9,85	1112	43,84	110,38
10	3,97	9,86	1033	44,15	109,47
X	3,97	9,86	1109,10	44,09	109,71
s	0,01	0,01	60,31	0,92	1,22

Tab. 53 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované PA6

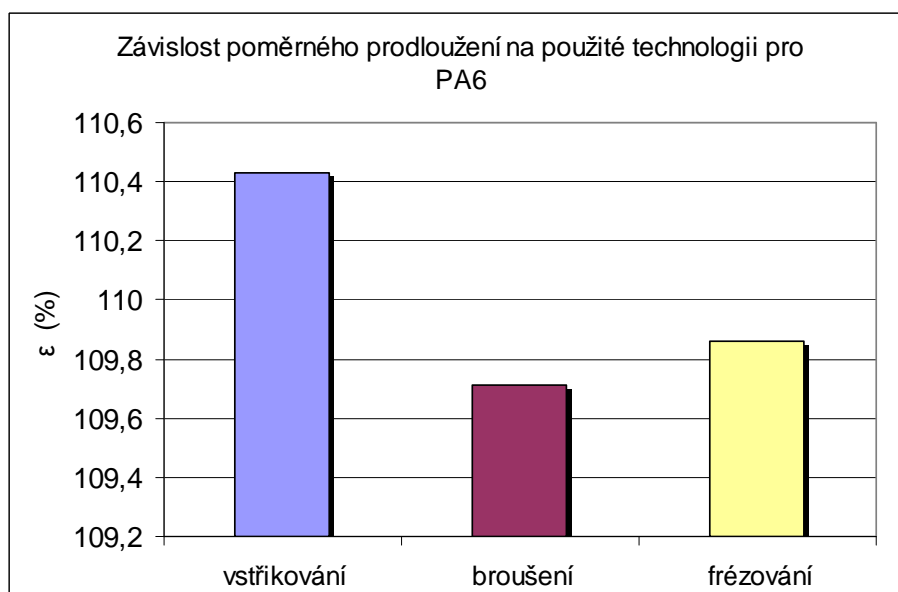
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,37	1017	45,91	109,01
2	3,97	9,39	1046	42,75	111,98
3	3,98	9,40	1094	44,86	110,74
4	3,98	9,40	1169	44,17	108,01
5	3,96	9,38	1189	45,68	107,67
6	3,97	9,37	1214	43,27	110,72
7	3,95	9,38	1076	44,88	112,06
8	3,97	9,40	1005	43,76	110,37
9	3,99	9,38	1042	42,99	109,35
10	3,98	9,39	1135	44,65	108,68
X	3,97	9,39	1098,7	44,29	109,86
s	0,01	0,01	74,31	1,09	1,74



Obr. 69 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PA6



Obr. 70 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PA6



Obr. 71 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PA6

7.2.5 Polyamid 6 + 30% skelných vláken (PA6+30%GF)

Tab. 54 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstříkované PA6+30%GF

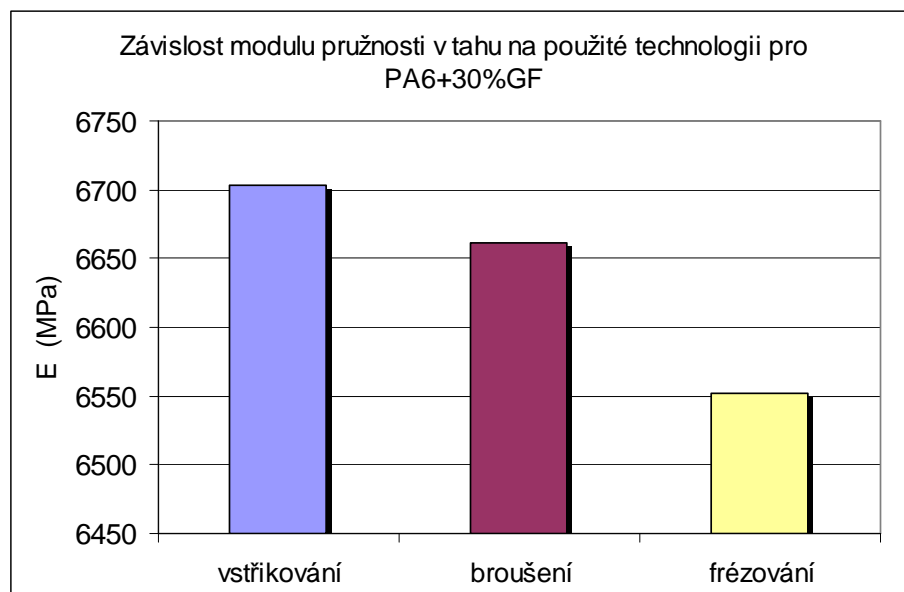
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,91	6750	122,81	5,47
2	3,96	9,94	6840	119,74	5,65
3	3,98	9,93	7178	122,54	6,51
4	3,97	9,92	6590	121,88	6,34
5	3,99	9,94	6847	120,50	5,62
6	3,96	9,94	7054	129,32	5,90
7	3,97	9,95	6312	114,96	6,24
8	3,97	9,91	6478	119,21	5,48
9	3,99	9,92	6637	117,74	6,52
10	3,97	9,92	6341	122,46	5,37
X	3,97	9,93	6702,7	121,12	5,91
s	0,01	0,01	287,17	3,81	0,53

Tab. 55 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené PA6+30%GF

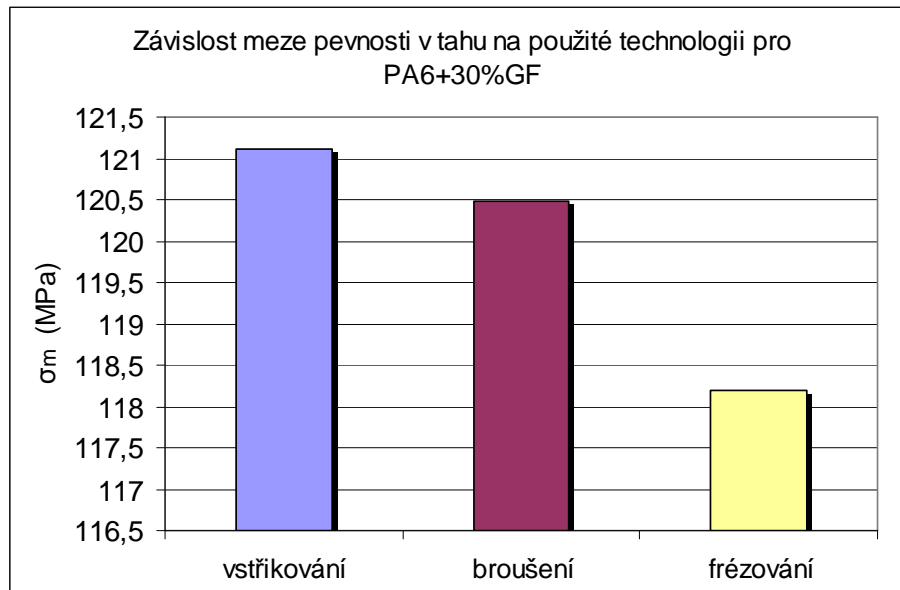
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,97	9,88	6580	121,10	6,15
2	3,96	9,87	6790	119,22	5,87
3	3,96	9,91	7210	121,17	5,22
4	3,97	9,89	6341	121,08	6,97
5	3,99	9,87	6576	120,00	6,06
6	3,99	9,88	6658	130,13	5,94
7	3,98	9,90	6319	113,69	4,97
8	3,97	9,91	6483	116,65	5,68
9	3,98	9,87	7090	120,24	5,91
10	3,97	9,88	6571	121,55	5,84
X	3,97	9,89	6661,8	120,48	5,86
s	0,01	0,02	293,45	4,20	0,54

Tab. 56 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované PA6+30%GF

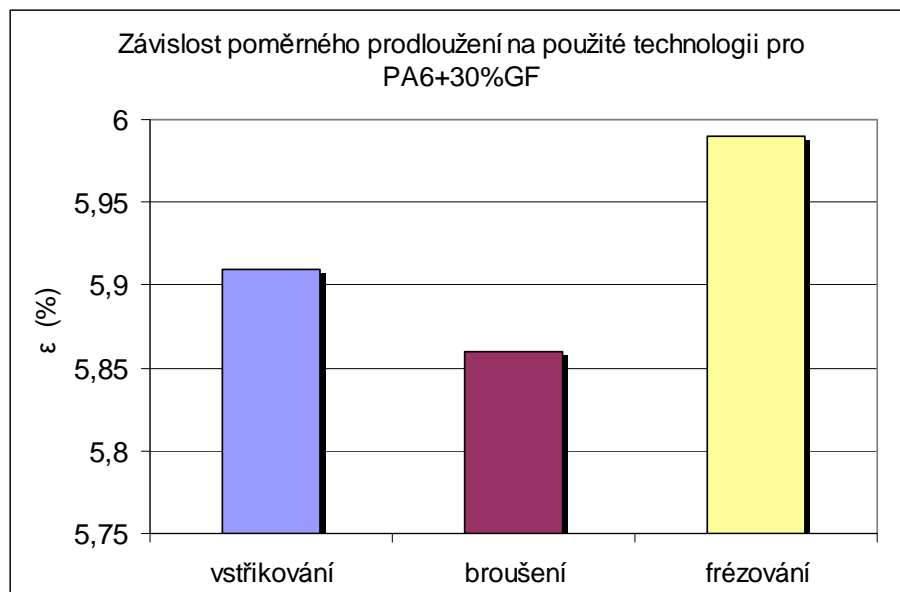
n	a (mm)	b (mm)	E (MPa)	σ_m (MPa)	ε (%)
1	3,98	9,41	6420	111,83	6,22
2	3,96	9,39	6356	117,46	5,98
3	3,97	9,43	6897	120,34	5,11
4	3,97	9,41	6465	120,88	6,04
5	3,98	9,42	6479	112,27	6,17
6	3,96	9,40	6643	118,65	5,64
7	3,97	9,40	6392	118,74	5,25
8	3,96	9,39	6540	116,15	5,69
9	3,98	9,41	6871	123,41	7,17
10	3,97	9,43	6459	122,17	6,65
X	3,97	9,41	6552,2	118,19	5,99
s	0,01	0,02	192,22	3,88	0,62



Obr. 72 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PA6+30%GF



Obr. 73 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PA6+30%GF



Obr. 74 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PA6+30%GF

Z výše uvedených tabulek a grafů pro polyamid 6 je patrné, že nejvyšších hodnot modulu pružnosti i meze pevnosti v tahu dosahuje vstřikovaný vzorek z plněného polyamidu 6 + 30% skelných vláken, kdy modul pružnosti v tahu činí 6600MPa, oproti 1100 MPa u PA6. Polyamid 6 plněním skelnými vlákny však výrazně ztratil na tažnosti, která klesla ze 110% neplněného PA6 na 5,9% plněného. Svých nejvyšších hodnot modulu pružnosti i meze

pevnosti v tahu oba typy dosahují při výrobě vstřikováním. Při třískovém obrábění obě charakteristiky vykazují klesající tendenci, což lze přisoudit vzniklé vyšší drsnosti u obráběného povrchu, či s ohledem na špatnou tepelnou vodivost materiálu, mírnému natavení povrchu.

7.3 Vyhodnocení změn fyzikálně-mechanických charakteristik materiálů vlivem technologie

7.3.1 Shrnutí vlivu třískového obrábění

Z naměřených hodnot drsností materiálů pro jednotlivé technologie zpracování je viditelné, že všechny zkoušené materiály shodně vykazují nejnižší hodnoty střední aritmetické úchylky profilu R_a i maximální výšky profilu R_z u technologie vstřikování. Nejvýhodnějším zkoušeným způsobem třískového obrábění je z hlediska drsnosti povrchu broušení, které u všech materiálů vykazuje hodnoty R_a od $1\mu\text{m}$ (PP) po $5,08\mu\text{m}$ (PA6+30%GF) a R_z od $3,57$ do $6,04\mu\text{m}$. Nejvyšší hodnoty drsnosti byly naměřeny shodně u frézování.

U třískového obrábění je oproti vstřikovaným vzorkům patrný u všech materiálů i pokles charakteristik zjišťovaných tahovou zkouškou v kapitole 7.2. Modul pružnosti i pevnost v tahu v porovnání se vstřikovanými tělesy mírně klesá. Což je způsobeno právě zhoršením drsnosti obroběných ploch, či s ohledem na špatnou tepelnou vodivost materiálu, mírným natavením povrchu obráběného materiálu. Vyhodnocení zkoušek tak ukázalo, že při obrábění plastů je nutno respektovat některé odlišnosti vlastností polymerů např. oproti kovům. K tomu je potřeba přizpůsobit parametry technologických procesů. S ohledem na špatnou tepelnou vodivost a relativně nízký bod tání termoplastů je potřeba zajistit, aby při obrábění vznikalo, co nejméně tepla, které by kumulovalo do obrobku. Řešením jsou ostré řezné nástroje, optimálně zvolené řezné parametry, nebo chlazení.

7.3.2 Shrnutí vlivu laserového řezání

Při řezání materiálu PA6 byla zvolena řezná rychlost $0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při které se však materiál velmi silně odpařoval, vznikal velmi vrásčitý, načernalý zdegradovaný povrch. Na pokyn obsluhy laseru, tak byla výroba zkušebních těles pro materiál PA6 zastavena z důvodu obavy o zanesení a poškození optiky laseru. Dokončeny tak pro různé řezné rychlosti $0,5$; $0,9$ a $1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ byly zkušební vzorky z materiálů PMMA a PP.

Při řezání polypropylenu dochází k protavení a vyfukování roztaveného materiálu z řezu tlakovým vzduchem. Na řezu tak vzniká oblast mikroskopických kapek vytlačených tlakem plynu. Tyto otoky zůstávají na spodní části řezu a jsou vytvarovány proudícím vzduchem. Řez má kolmé hrany na spodní části řezu zůstávají zbytky taveniny. Tyto nerovnosti vznikají hlavně při použití nižších řezných rychlostí, při kterých dochází k dlouhodobějšímu působení koncentrované energie laserového paprsku.

Z naměřených dat v kapitole 7.2 je zřejmé negativní ovlivnění mechanických vlastností způsobené výrazným teplotním ovlivněním povrchu vzorku. V důsledku tepelné degradace dochází u polypropylenu k trhání řetězců v povrchové vrstvě a tím ke snižování pevnosti. Z naměřených hodnot lze odečíst, že pokles pevnosti je tím výraznější, čím delší je doba interakce laserového paprsku s materiálem. Se zvyšující se řeznou rychlostí klesají i hodnoty drsnosti řezaného povrchu. Experimentálně zjištěná maximální řezná rychlost pro 4mm vzorek PP, kdy dojde k prořezání je $2\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Při řezání polymetylmetakrylátu vzniká v povrchové vrstvě materiálu jiný mechanismus změny struktury než u většiny polymerů. Materiál se z řezu převážně odpařuje. Při řezání PMMA tak vznikne hladký, rovný řez, který má mírně kónický tvar. Koncentrovaná energie laserového paprsku působí na povrchovou vrstvu, v níž dochází k depolymerizaci, radikály na koncích řetězce, stejně tak i odštěpný monomer reagují za vzniku sítě, čímž se výrazně zvýší pevnost obrobku. Podle zhodnocení naměřených hodnot je zřejmé, že nárůst pevnosti je tím výraznější, čím delší je doba ovlivnění materiálu. Jedná se tak o přesně opačný efekt, než jaký má doba interakce vliv na drsnost povrchu. Efekt změny struktury u PMMA je však natolik silný, že zde i přes nárůst parametrů drsnosti povrchu při nižší řezné rychlosti dochází, oproti třískovému obrábění, k nárůstu pevnosti v tahu. I přes ovlivnění povrchu laserem si však PMMA stále zachovává svůj křehký charakter, jak je patrné z naměřených hodnot při tahové zkoušce. Konkrétních požadavků na vlastnosti obrobku lze dosáhnout optimalizací řezného procesu.

ZÁVĚR

Vznik Evropské unie postavil výrobce před úkol, zefektivnění výroby zaváděním nových technologií a v neposlední řadě zaváděním nových systémů jakosti, tak aby byli výrobci schopni obstát v konkurenci na novém trhu. I přesto však třískové obrábění plastů zůstává i v současnosti velmi často využívanou zpracovatelskou technologií. Přichází v úvahu především v kusové a malosériové výrobě, kde by výroba forem pro klasické plastikářské technologie nebyla ekonomicky výhodná.

Cílem diplomové práce tak bylo porovnat a vyhodnotit vliv třískového obrábění, laserového řezání a vstřikování na fyzikálně-mechanické charakteristiky vybraných plastů.

Na základě vyhodnocení mechanických zkoušek u materiálů LDPE, PP, PMMA, PA6 a PA6+30GF, lze usoudit, že výsledky zkoušek jsou vedle tvaru zkušebních těles závislé na technologii jejich přípravy, či jejich opracování.

Výroba vstřikovaných těles musí být pro každý polymer propracována jak z hlediska nejvýhodnějších vlastností, tak i z hlediska ekonomického. Pro každý použitý materiál v této práci tak byly zvoleny specifické vstřikovací podmínky, které zahrnovaly např. teplotu formy, vstřikovací tlak, teplotu taveniny aj.

Z vyhodnocení vstřikovaných těles vyplývá, že zkušební vzorky ze všech použitých materiálů shodně vykazovaly nejnižší hodnoty střední aritmetické úchylnosti R_a i maximální výšky profilu R_z ze všech porovnávaných technologií.

U třískového obrábění je oproti vstřikovaným vzorkům patrný u všech materiálů i pokles charakteristik zjišťovaných tahovou zkouškou. Modul pružnosti i pevnost v tahu v porovnání se vstřikovanými tělesy mírně klesá. Což je způsobeno právě zhoršením drsnosti obráběných ploch, či s ohledem na špatnou tepelnou vodivost materiálu, mírným natavením povrchu obráběného materiálu. Vyhodnocení zkoušek tak ukázalo, že při obrábění plastů je nutno dbát na některé odlišnosti vlastností konkrétních polymerů. K tomu je potřeba přizpůsobit parametry technologických procesů, což může být volba úběru malé třísky, při vysokých řezných rychlostech, tak aby nedocházelo k zahřátí materiálu. Řešením je i správný odvod třísky, nebo neustále ostré řezné nástroje, které mají takový tvar, aby se dotýkaly obráběného materiálu jen řeznou plochou. Při operacích kdy vzniká nadměrné teplo je vhodné použít chladící medium.

Pro laserové řezání byly původně připraveny desky z materiálu PMMA, PP a PA6 o tloušťce 4mm. Pro materiál PA6 byla zvolena řezná rychlost $0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ při které se však materiál velmi silně odpařoval, vznikal velmi vrásčitý zdegradovaný povrch. Na pokyn obsluhy laseru, tak byla výroba zkušebních těles pro materiál PA6 zastavena z důvodu obavy o zanesení a poškození optiky laseru. Dokončeny tak pro různé řezné rychlosti 0,5; 0,9 a $1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ byly zkušební vzorky z materiálů PMMA a PP.

Jak je patrné z provedených zkoušek i z nedokončené výroby vzorků, tak při laserovém řezání dochází k výraznému tepelnému ovlivnění řezaného plastu. Charakter ovlivnění závisí na konkrétním polymeru a technologických parametrech laserového zařízení. Tepelné ovlivnění materiálu pak způsobuje změny mechanických vlastností buďto negativně (PA6, PP) nebo pozitivně (PMMA). Tuto zásadní rozdílnost změn vlastností způsobuje rozdílný mechanismus změn v povrchové vrstvě polymerů. U většiny dochází v důsledku tepelné degradace k rozbití primárních a sekundárních vazeb řetězců, dochází k jejich zkracování a tím ke snižování pevnosti. Obrácené je však působení koncentrované energie laserového paprsku na PMMA. V důsledku vysoké teploty zde dochází k depolymeraci, odštěpný monomer i radikály na koncích řetězce reagují za vzniku sítě, čímž se výrazně zvyšuje pevnost řezaných těles. Podle zhodnocení práce je zřejmé, že nárůst pevnosti je tím výraznější, čím delší je doba ovlivnění materiálu. Jedná se tak o přesně opačný efekt, než jaký má doba interakce vliv na drsnost povrchu. Pro oba laserem zkoušené materiály (PP i PMMA), zde platí v rozdílném měřítku totéž. Se vzrůstající řeznou rychlostí se drsnost snižuje. Efekt změny struktury u PMMA je tak natolik silný, že zde i přes nárůst parametrů drsnosti povrchu při nižší řezné rychlosti dochází, oproti třískovému obrábění, k nárůstu pevnosti v tahu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DILLINGER, J.: *Moderní strojírenství pro školu i praxi*, Europa-Sobotáles, Praha, 2007. 612s. ISBN 978-80-86706-19-1
- [2] LUKOVICS, I.: *Konstrukční materiály a technologie*, VUT, Brno, 1986.
- [3] KOČMAN, K.: Prokop, J.: *Technologie obrábění*, CERM, s.r.o. Brno, 2005
- [4] *Technologie frézování* [online]. [cit. 2010 011-26]. Dostupný z WWW:
<http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC_fr.pdf>
- [5] *Dokončovací metody obrábění* [online]. [cit. 2010 011-23]. Dostupný z WWW:
<<http://www.strojari.cz/maturita/tep/tep10.pdf>>
- [6] MAŇKOVÁ, I.: *Progresivní technologie*, Vienaľa, Košice, 2000, ISBN 80-7099-430-4.
- [7] ŘASA, J., POKORNÝ, P., GABRIEL, V.: *Strojírenská technologie 3 – 2.díl: Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění*, Scientia, Praha, 2005, ISBN 80-7183-336-3.
- [8] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z.: *Nekonvenční metody obrábění – 4.díl: MM Průmyslové spektrum*, 2008, č.3, s. 80-82. ISSN 1212-2572.
- [9] SADOWSKI, A., KREHLIK, R.: *Lasery v obrábění a metrologii*, SNTL, Praha, 1977.
- [10] POWELL J.: *CO₂ laser cutting*, Springer, Berlin, 1998.
- [11] BRIMUS, J.: *Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály: diplomová práce*. UTB, Zlín, 2007. 197s.
- [12] KREČMEROVÁ Z.: *LBM Technologie laserového záření: seminární práce*, UTB, Zlín, 2008, 25s.
- [13] *Optika* [online]. [cit. 2011 01-12]. Dostupný z WWW:
<<http://147.229.133.6/~pavelek/optika/0206.htm>>
- [14] ENGST, P., HORÁK, M.: *Aplikace laserů*, SNTL, Praha, 1989. 204 s.

- [15] HÁBOVČÍK, P.: *Lasery a fotodetektory*, Alfa, Bratislava, 1990. 320 s., ISBN 80-05-00526-1.
- [16] ŘASA, J., JINDROVÁ, R.: *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem: MM Průmyslové spektrum*, 2006, č.7, s. 34-36.
- [17] Rozdělení laserů [online]. [cit. 2011 01-21]. Dostupný z WWW:
<<http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>>
- [18] *Laserové zpracování materiálů* [online]. [cit. 2011 01-10]. Dostupný z WWW:
<<http://dp.bajaja.net/05.html>>
- [19] ŠULC, J.: *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. [cit. 2011 01-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>>
- [20] *Systémy dělení materiálu* [online]. [cit. 2011 01-24]. Dostupný z WWW:
<<http://www.awac.cz/>>
- [21] HAGEN, V.: *Únava a stárnutí materiálů*, VUT, Brno, 1981. 2.vyd.
- [22] ZÁMORSKÝ, Z.: *Nauka o polymerech II.*, VUT, Brno, 1980. 1.vyd.
- [23] MLEZIVA, J.: *Polymery-struktura, vlastnosti, použití*, Sobotáles, Praha, 1993. ISBN 80-901570-4-1.
- [24] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, VŠCHT, Praha, 2006. 280s. ISBN 80-7080-617-6
- [25] BOBČÍK, L.: *Formy pro zpracování plastů – vstřikování termoplastů, 1.díl*, Uniplast, Brno, 1999.
- [26] BEDNAŘÍK, F.: *Metody statistické analýzy*, VUT, Brno, 1990. ISBN 80-2140240-7
- [27] PAVELKA, F.: *Metody statistické analýzy*, FaME VUT, Zlín, 1999. 118 s. ISBN 80-2141503-7.

Seznam použitých symbolů a zkratk

a	Tloušťka pracovní části zkušebního tělesa
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
b	Šířka pracovní části zkušebního tělesa
CdS	Kadmium sulfid
CdSe	Kadmium selen
Cr ³⁺	Trojmocný iont chromu
E	Modul pružnosti v tahu
E ₀	Energie absorbovaná
E ₁	Energie emitovaná
F _{MAX}	Síla při přetržení
GaAs	Galium arsenid
GF	Skleněné vlákno
h	Tloušťka
IR	Infračervené
K	Mez kluzu
l	Délka vzorku
l ₀	Počáteční délka vzorku
LDPE	Nízkohustotní polyetylen
n	Počet měření
n _K	Otáčky kotouče
Nd:YAG	Neodymový laser
p _{DOT}	Dotlak
PA6	Polyamid
PP	Polypropylen

PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmetakrylát
r	Poloměr zakřivení
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	Maximální výška profilu
s	Směrodatná odchylka
S ₀	Původní průřez
t	Tloušťka
t _{dot}	Čas dotlaku
UV	Ultrafialové
v	rychlost
x	Aritmetický průměr
ε	Poměrné prodloužení
λ	Vlnová délka
σ _m	Mez pevnosti v tahu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1 Řezný pohyb obvodového frézování[4].....	13
Obr.2 Válcová čelní fréza[1].....	13
Obr.3 Sousedné frézování [1]	14
Obr.4 Nesousedné frézování[1]	15
Obr.5 Konzolová frézka[4]	16
Obr.6 Rovinná frézka[1]	16
Obr. 7 CNC frézovací centrum[4]	17
Obr. 8 Odběr třísek brusným kotoučem[1]	19
Obr. 9 Rovinné broušení čelem kotouče[5]	20
Obr.10 Rovinné obvodové broušení[5]	20
Obr. 11 Rovinná bruska[5]	21
Obr. 12 Vnější podélné broušení dokulata[1]	22
Obr. 13 Model atomu [9]	25
Obr. 14 Porovnání bílého a laserového světla [10].....	26
Obr. 15 Ukázky módové struktury laserů, označení TEM a jejich použití [10]	28
Obr. 16 Schéma laseru [7]	29
Obr. 17 Laserová hlavice [17]	29
Obr. 18 Rezonátor laseru [17].....	30
Obr. 19 Buzení elektrickým výbojem [7]	31
Obr. 20 Rubínový laser [17]	33
Obr. 21 Nd: YAG laser[16]	34
Obr. 22 Princip CO ₂ laseru [6].....	36
Obr. 23 Schéma procesu laserového řezání [7]	40
Obr. 24 Účinek laserového paprsku na povrch materiálu [6]	42
Obr. 25 Konkrétní provedení CNC stroje [20]	44
Obr. 26 Rozdělení polymerních materiálů[24]	45
Obr. 27 Tvar zkušebního tělíska	56
Obr. 28 Vstřikovací stroj Demag ERGOtech 50-200	57
Obr. 29 Univerzální frézka FHV-50PD	59
Obr. 30 Bruska BRH 20.03F.....	60
Obr. 31 Drsnoměr Mitutoyo SJ-301	62

Obr. 32 Univerzální zkušební stroj ZWICK 1456.....	63
Obr. 33 Základní měřené parametry Ra a Rz.....	64
Obr. 34 Průběh drsnosti povrchu vstřikovaného vzorku z LDPE.....	65
Obr. 35 Průběh drsnosti povrchu broušeného vzorku z LDPE.....	66
Obr. 36 Průběh drsnosti povrchu frézovaného vzorku z LDPE.....	67
Obr. 37 Závislost Ra na použité technologii pro materiál LDPE	67
Obr. 38 Závislost Rz na použité technologii pro materiál LDPE	68
Obr. 39 Průběh drsnosti povrchu vstřikovaného vzorku z PP	69
Obr. 40 Průběh drsnosti povrchu broušeného vzorku z PP	69
Obr. 41 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PP	70
Obr. 42 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PP	72
Obr. 43 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PP.....	72
Obr. 44 Průběh drsnosti vstřikovaného vzorku z PMMA	73
Obr. 45 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PMMA.....	74
Obr. 46 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PMMA	75
Obr. 47 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PMMA.....	76
Obr. 48 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PMMA.....	77
Obr. 49 Průběh drsnosti vstřikovaného vzorku z PA6.....	78
Obr. 50 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PA6.....	79
Obr. 51 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PA6	79
Obr. 52 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PA6	80
Obr. 53 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PA6	80
Obr. 54 Průběh drsnosti vstřikovaného vzorku z PA6+30%GF.....	81
Obr. 55 Průběh drsnosti broušeného vzorku z PA6+30%GF	82
Obr. 56 Průběh drsnosti frézovaného vzorku z PA6+30%GF.....	82
Obr. 57 Závislost Ra na použité technologii pro materiál PA6+30%GF	83
Obr. 58 Závislost Rz na použité technologii pro materiál PA6+30%GF	83
Obr. 59 Pracovní diagram tahové zkoušky	84
Obr. 60 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro LDPE.....	87
Obr. 61 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro LDPE.....	88
Obr. 62 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro LDPE.....	88
Obr. 63 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PP	92
Obr. 64 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PP	92

Obr. 65 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PP	93
Obr. 66 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PMMA	97
Obr. 67 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PMMA.....	97
Obr. 68 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PMMA	98
Obr. 69 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PA6.....	100
Obr. 70 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PA6.....	101
Obr. 71 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PA6.....	101
Obr. 72 Závislost modulu pružnosti v tahu na použité technologii pro PA6+30%GF.....	103
Obr. 73 Závislost meze pevnosti v tahu na použité technologii pro PA6+30%GF	104
Obr. 74 Závislost poměrného prodloužení na použité technologii pro PA6+30%GF.....	104

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Jakosti obrobené plochy při různých způsobech frézování[4].....	18
Tab. 2 Jakosti obrobené plochy při různých způsobech broušení[5]	23
Tab. 3 Fyzikálně-mechanické charakteristiky LDPE[25]	47
Tab. 4 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PP[25]	48
Tab. 5 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PMMA[25].....	49
Tab. 6 Fyzikálně-mechanické charakteristiky PA6 a PA6+30%GF [25]	50
Tab. 7 Rozměry zkušebních tělísek	55
Tab. 8 Parametry vstřikovacího stroje Demag ERGOtech 50-200	57
Tab. 9 Parametry vstřikování pro výrobu zkušebních těles	58
Tab. 10 Univerzální frézka FHV-50PD – technické parametry.....	58
Tab. 11 Rovinná bruska BRH 20.03F - technické parametry	60
Tab. 12 Laser TruFlow 500 – technické parametry	61
Tab. 13 Drsnoměr Mitutoyo SJ 301 – technické parametry	62
Tab. 14 Zkušební stroj ZWICK 1456 – technické parametry	63
Tab. 15 Drsnost vstřikovaných vzorků z LDPE	65
Tab. 16 Drsnost broušeného vzorku z LDPE.....	66
Tab. 17 Drsnost frézovaného vzorku z LDPE	66
Tab. 18 Drsnost vstřikovaného vzorku z PP	68
Tab. 19 Drsnost broušeného vzorku z PP	69
Tab. 20 Drsnost frézovaného vzorku z PP.....	70
Tab. 21 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	70
Tab. 22 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	71
Tab. 23 Drsnost laserem vyřezaného vzorku z PP při $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	71
Tab. 24 Drsnost vstřikovaného vzorku z PMMA	73
Tab. 25 Drsnost broušeného vzorku z PMMA	74
Tab. 26 Drsnost frézovaného vzorku z PMMA.....	74
Tab. 27 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	75
Tab. 28 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	75
Tab. 29 Drsnost laserem vyřezávaného vzorku z PMMA při $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	76
Tab. 30 Drsnost vstřikovaného vzorku z PA6	78
Tab. 31 Drsnost broušeného vzorku z PA6	78

Tab. 32 Drsnost frézovaného vzorku z PA6	79
Tab. 33 Drsnost vstřikovaného vzorku z PA6+30%GF	81
Tab. 34 Drsnost broušeného vzorku z PA6+30%GF	81
Tab. 35 Drsnost frézovaného vzorku z PA6+30%GF	82
Tab. 36 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikované LDPE	86
Tab. 37 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené LDPE	86
Tab. 38 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované LDPE	87
Tab. 39 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikovaný PP	89
Tab. 40 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušený PP	89
Tab. 41 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézovaný PP	90
Tab. 42 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	90
Tab. 43 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	91
Tab. 44 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PP $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	91
Tab. 45 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikovaný PMMA	94
Tab. 46 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušený PMMA	94
Tab. 47 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézovaný PMMA	95
Tab.48 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=0,5\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	95
Tab.49 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=0,9\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	96
Tab.50 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro laserem vyřezaný PMMA $v=1,4\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	96
Tab. 51 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikované PA6	99
Tab. 52 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené PA6	99
Tab. 53 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované PA6	100
Tab. 54 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro vstřikované PA6+30%GF	102
Tab. 55 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro broušené PA6+30%GF	102
Tab. 56 Naměřené hodnoty tahové zkoušky pro frézované PA6+30%GF	103