

Studium integrity povrchu polymerních materiálů při obrábění laserem

Ing. Jana Knedlová, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Teze disertační práce

**Studium integrity povrchu polymerních materiálů
při obrábění laserem**

**Study of Surface Integrity of Polymer Materials
at Laser Machining**

Autor: Ing. Jana Knedlová, Ph.D.
Studijní program: Procesní inženýrství P3909
Studijní obor: Nástroje a procesy 3909V013
Školitel: doc. Libuše Sýkorová, Ph.D, Ing
Oponenti: prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.
prof. Ing. Ildikó Maňková, CSc.
Doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

Zlín, září 2018

© Jana Knedlová

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2018.

Klíčová slova: *laserový paprsek 1, polymery 2, integrita povrchu 3, obrobiteľnosť 4, drsnost 5, mikro- tvrdost 6*

Keywords: *Laser Beam 1, Polymers 2, Surface Integrity 3, Machinability 4, Roughness 5, Micro-hardness 6*

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-786-7

Poděkování

Mé poděkování patří mojí školitelce doc. Libuši Sýkorové za odborné vedení práce a cenné připomínky, které mi pomohly tuto práci zkompletovat, a také všem mým kolegům, kteří mi poskytli odborné konzultace.

Moto

„Jen ta práce je plodná, která je radostná. Jen ta práce je radostná, která je dobrovolná.“

T. G. Masaryk

ABSTRAKT

V současné době si výrobci i odběratelé součástí, tvořených z polymerních materiálů, kladou stále vyšší nároky na jakost povrchů zhotovených dílů. Významnou roli zde hraje využívání moderních technologií, jako je například laser. Tato disertační práce spadá svou náplní do oblasti nekonvenčních technologií a je zaměřena především na laserové obrábění polymerních materiálů. Hlavním cílem práce je studium integrity povrchu vybraných polymerních materiálů získaných laserovým obráběním. Hlavní pozornost je věnována stanovení „laserové obrobitelnosti“ polymerních materiálů, drsnosti obráběných ploch při změně technologických parametrů, šířce tepelného ovlivnění a v neposlední řadě vzniku možných strukturálních změn v důsledku koncentrované energie záření.

ABSTRACT

At present, both manufacturers and customers of components made of polymeric materials are increasingly demanding on the quality of the finished parts. A significant role is played by, the use of modern technologies, such as a laser. This dissertation belongs into the field of unconventional technology and is primarily focused on laser machining of polymeric materials. The key aim of the thesis is the study of surface integrity of selected polymer materials obtained by laser machining. The main attention is solution to the determination of the "laser machinability" of polymer materials, the roughness of machined surfaces in the change of technological parameters, the width of the heat influence and, last but not least, the possible structural changes due to concentrated energy of radiation.

OBSAH

ÚVOD	7
1. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	9
2. KLASIFIKACE TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PRO STANOVENÍ INTEGRITY POVRCHU	10
3. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU V OBLASTI NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ	12
3.1 Hlavní znaky nekonvenčních technologií	13
3.2 Rozdělení nekonvenčních metod	14
4. DETAILNÍ ROZBOR PROBLEMATIKY LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ	16
4.1 Princip laseru	16
4.2 Rozdělení laserů	20
4.3 CO ₂ Laser	21
4.4 Interakce materiálu s laserovým paprskem	22
4.5 Kritéria hodnocení kvality povrchu	25
5. POLYMERNÍ MATERIÁLY	28
5.1 Struktura polymerů	28
5.2 Rozdělení polymerů	29
5.2.1 Termoplasty	29
5.2.2 Reaktoplasty	29
6. CÍLE PRÁCE	30
7. PŘÍPRAVA VZORKŮ	31
8. STANOVENÍ LASEROVÉ OBROBITELNOSTI POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	32
8.1 Měření hloubky řezu	33
8.2 Statistické vyhodnocení laserové obrobitelnosti	35
9. MĚŘENÍ DRSNOSTI OBRÁBĚNÝCH PLOCH	38
9.1 Vizuální posouzení řezu	38

9.2	Měření drsnosti	41
10.	MĚŘENÍ TVRDOSTI	46
10.1	Měření mikro-tvrdomosti a modulu pružnosti	47
10.2	Statistické vyhodnocení mikro-tvrdomosti	51
11.	TEPLOTNÍ POLE TEPEM OVLIVNĚNÉ OBLASTI MATERIÁLU.....	56
12.	POROVNÁNÍ KVANTITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM	59
12.1	Infračervená vibrační spektroskopie	59
12.2	Rentgenová difrakční analýza	62
13.	VYHODNOCENÍ.....	67
14.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	72
	ZÁVĚR.....	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	85
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA.....	87

ÚVOD

Laserové technologie postupně nahrazují konečné způsoby opracování materiálů v nejrůznějších oblastech průmyslu. Důvodem je jejich přesnost, nízké provozní náklady bez spotřebního materiálu, snadná údržba a vysoká životnost, což konvenční způsoby obrábění většinou nabídnout nemohou.

Laserové obrábění materiálů je ovlivněno celou řadou různých činitelů. A právě výsledkem procesu optimalizace je zhodnotit vliv jednotlivých činitelů, zdůraznit ty hlavní, zanedbat méně důležité a obecně být schopen nastavit parametry laseru tak, aby užité hodnoty výrobku byly maximalizovány.

Pro vysvětlení povahy a vlastnosti povrchu vytvořeného LBM technologií je potřebný tedy rozbor mechanismu obrábění laserovým svazkem, všech jeho specifik a vlivů. Obecně lze změny v povrchové vrstvě součásti shodně posuzovat jako změny jakosti.

Kvalita obrobku je pak především závislá na vlastnostech tohoto povrchu, na jeho tvarové a rozměrové přesnosti a na vlastnostech určovaných materiálem a jeho zpracováním. Zároveň lze tyto změny vztahovat k budoucí funkci dokončené plochy a využít je pro hodnocení jakosti její integrity.

Pojem integrita povrchu (technologická dědičnost) je velmi komplexní, zjednodušeně lze říci, že se jedná o určitý soubor charakteristik, jenž souhrnně popisuje funkční vlastnosti povrchu.

Mezi nejdůležitější patří:

- topografie povrchu
- strukturální, fyzikální a chemické změny v povrchu
- stupeň, hloubka a charakter zpevnění
- smysl, velikost a průběh reziduálních pnutí

Tato disertační práce popisuje část výzkumu, jenž je realizován na UTB ve Zlíně, Ústavu výrobního inženýrství. Jeho hlavní náplní je problematika studia progresivních technologií obrábění, konkrétně je zaměřena na problematiku laserového obrábění polymerních materiálů což je v souladu s profilem absolventů našeho ústavu, kteří již nenacházejí své uplatnění jen v oblastech automobilového, leteckého průmyslu apod., kde jsou ve velké míře zpracovávány polymerní

materiály, ale také ve stále se rozšiřující paletě nových a nových oblastí a aplikací.

Tato skutečnost vyvolala snahu o experimentální ověření možnosti laserové technologie fotonového řezání různých polymerních materiálů v souvislosti se stále se zvyšujícími se požadavky na jakost finálních produktů. Vzhledem k výše popsaným charakteristikám, byla tato práce zaměřena na zkoumání vztahu řezných podmínek a materiálových charakteristik na výsledek řezného procesu, tj. na jeho integritu. Následně se tímto nabízí možnost zefektivnění LBM řezného procesu, eliminaci negativních jevů a tím možnosti zhotovení kvalitnějších obrobeneých ploch.

1. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem disertační práce je studium integrity povrchu vybraných polymerních materiálů při obrábění laserem. Za tímto účelem byly stanoveny následující dílčí práce:

- I. Teoretická část
 - 1) Klasifikace technologických parametrů a definování parametrů pro stanovení integrity povrchu
 - 2) Rozbor současného stavu v oblasti nekonvenčních technologií
 - 3) Detailní rozbor problematiky laserového obrábění

- II. Experimentální ověření závislosti LBM technologických parametrů a integrity povrchu
 - 1) Stanovení laserové obrobitelnosti v závislosti na technologických parametrech laseru
 - 2) Měření drsnosti obráběných ploch laserem
 - 3) Měření tvrdosti
 - 4) Modelování teplotního pole po průchodu koncentrované energie záření
 - 5) Posouzení možných strukturálních změn

2. KLASIFIKACE TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ PRO STANOVENÍ INTEGRITY POVRCHU

S povrchem obrobené plochy jsou úzce spjaty funkční plochy obráběné součástky. Při obrábění mohou vznikat v povrchové vrstvě změny. Jejich rozsah a množství se musí podrobně zkoumat, aby účelnost povrchu mohla být popsána jednou celkovou charakteristikou – jakostí, a v pojmech by odpovídala funkčním požadavkům a byla tedy hodnocena s ohledem na integritu této vzniklé plochy.

„Integrita povrchu je odrazem podmínek, za kterých funkční plocha vzniká, bere v úvahu důsledky působení technologických metod na jakost obrobené plochy a dává je do vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek.“[1]

Zkoumání integrity povrchu a provádění funkčních zkoušek je velmi významné. V současné době jsou kladeny vysoké požadavky na jakost a to především z požadavku záruky vyšší spolehlivosti a životnosti.

Doposud neexistuje komplexní způsob pro celkové zhodnocení nově vytvořené plochy pomocí nekonvenčních metod z hlediska její integrity. V praxi se sice běžně určuje řada parametrů vztažených k obrobené ploše, ale pro mnohé charakteristiky jsou postupy a potřebná zařízení ve fázi návrhu. Proto je stále nejvíce využívanou a nejspolehlivější zkouškou integrity povrchu vlastní provoz. [1][2][3]

Integritu povrchu lze obecně hodnotit pomocí

Základních údajů o integritě:

- údaje o textuře povrchu
- poruchy na povrchu
- mikro-tvrдость
- mikro a makro trhliny
- mikro-struktura
- fázové transformace
- zbytková napětí

Komplexních údajů o integritě, tj. všechny údaje uvedené v předchozím a dalších parametrech:

- mez únavy,
- odolnost proti korozi,
- kluzné vlastnosti,
- třecí vlastnosti,
- velikost stykových ploch apod.

Na integritu povrchu, tedy požadovanou jakost funkčních ploch, musí být brán zřetel již při konstrukci obrobku a volbě technologie výroby, což se následně promítá do měření a kontroly.

Požadavky na integritu povrchu je důležité určit také v oblasti nekonvenčních technologií, s ohledem na budoucí funkce obráběných ploch a zejména z pohledu jejich namáhání a zatížení (např. opotřebení, tření).

Kritéria doporučená pro hodnocení integrity povrchu vzniklých opracování jednotlivými konvenčními metodami nelze aplikovat v plném rozsahu pro povrchy vytvořené nekonvenčním způsobem, z důvodu přítomnosti specifických jevů, které jednotlivé nekonvenční metody doprovázejí. [1]

3. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU V OBLASTI NE-KONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Pro tvarování povrchu materiálu se nevyužívá přímého kontaktu nástroje a obrobku, ale elektrického, tepelného, nebo chemického účinku fyzikálních jevů. Principem úběru materiálu je erozivní a tepelné působení vysokoenergetických paprsků na povrch. Podle rozdělení těchto technologií k dalším způsobům odebrání materiálů patří chemické a elektrochemické odpařování materiálů a také účinek brusiva při ultrazvukovém obrábění a abraziva při obrábění proudem brusiva. [4]

Pro možnost vysvětlení povahy a vlastnosti povrchu vytvořeného laserovou technologií je potřebný rozbor všech jevů obrábění paprskem laseru, všech jeho specifik a vlivů. Obecně lze všechny změny, které nastávají v povrchové vrstvě součásti, shodně posuzovat jako změny jakosti. Kvalita obrobku pak závisí především na vlastnostech vzniklého povrchu, tvarové a rozměrové přesnosti a na vlastnostech určených materiálem a jeho zpracováním. Zároveň lze tyto změny vztahovat k budoucí funkci dokončené plochy, využít je pro hodnocení její integrity. Pojem integrita povrchu je velmi komplexní. Jedná se o určitý soubor charakteristik, který souhrnně popisuje funkční vlastnosti povrchu.

Všechny tyto charakteristiky je možno sledovat při známých podmínkách a parametrech. Patří mezi ně především: topografie povrchu, strukturní, fyzikální a chemické změny v povrchu, stupeň, hloubka a charakter zpevnění.

Studium teoretických a praktických vztahů mezi pracovními parametry laserového zařízení a vlastnostmi zkoušených materiálů umožní stanovit vliv materiálových charakteristik na obrobitelnost materiálu laserovou technologií. Následně tak vzniká možnost zefektivnění řezného procesu, eliminace negativních jevů a tím i vytvoření kvalitnějších obrobků.[4]

3.1 Hlavní znaky nekonvenčních technologií

Nejčastěji se používají tam, kde nelze použít žádné z klasických metod obrábění, nebo by byl klasický způsob technologicky nebo finančně náročný. Mezi hlavní výhody nekonvenčních technologií patří:

- obrobiteľnosť materiálu
- možnosť obrábiť tvarovo složitější dílce
- jednoduchá automatizace výroby
- integrita povrchu a vysoká přesnost
- miniaturizace součástí

Obrobiteľnosť materiálu

Tento pojem je charakteristický pro řezání a broušení materiálu, založený na mechanických vlastnostech materiálu jako je tvrdost, pevnost a houževnatost v případě použití progresivních metod obrábění do jisté míry ztrácí svůj význam. Důležitou roli, zde totiž mají i další vlastnosti jako je tepelná vodivost, teplota tavení, elektrická vodivost, atomové číslo, lomové vlastnosti apod.

Tvarová komplexnost součástek

Zvyšující se požadavky na tvarovou složitost vyráběných dílců směřují k používání nových metod. Např. je snadné vyvrtat kruhový otvor klasickým konvenčním způsobem, ale není tomu tak pro otvor čtvercový nebo jiný nerotační tvar. Právě zde je výhodné uplatnit nekonvenční elektrojiskrové, elektrochemické nebo AWJ obrábění.

Automatizace výroby

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

Integrita povrchu a vysoká přesnost

Povrchy opracované řezáním nebo broušením vykazují stopy silného mechanického působení (zpevnění, povrchové napětí, mikro-nerovnosti, atd.), které mohou mít nepříznivé účinky na užité vlastnosti obrobených povrchů. Také řezání a broušení některých materiálů, jako je např. keramika nebo vláknové kompozity, přináší řadu těžce řešitelných problémů. U těchto materiálů představují progresivní metody jedinou možnost opracování a dosažení požadovaného povrchu. Navíc požadované přesnosti úběru v oblasti atomových a molekulárních vrstev dokáží zabezpečit nekonvenční metody, jako jsou např. iontové a elektronové procesy.

Miniaturizace součástí

Trendy zmenšování rozměrů součástí zvyšují potřebu používání nových procesů, které umožňují úběr materiálu nejen v oblasti mikro-rozměru a dokonce úběr několika molekulárních a atomových vrstev. Velmi malé rozměry (10÷100 μ m) otvoru není možné vrtat běžnými technologiemi, jsou to právě technologie mikrochemického obrábění, obrábění svazkem elektronu a iontu, které řeší i tyto problémy. [4]

3.2 Rozdělení nekonvenčních metod

Princip a charakteristika procesu úběru materiálu se dělí:

a) Úběr materiálu tepelným účinkem

Pro řízené odtavování materiálů se využívá tepla a dělí se:

- Obrábění paprskem laseru
- Obrábění paprskem plasmy
- Elektroerozivní metody

b) Úběr chemickým nebo elektrochemickým účinkem

Podstatou chemického obrábění jsou chemické reakce působící na materiál. Elektrochemické obrábění funguje na principu intenzivní elektrolýzy. Dělí se tedy:

- Chemické obrábění

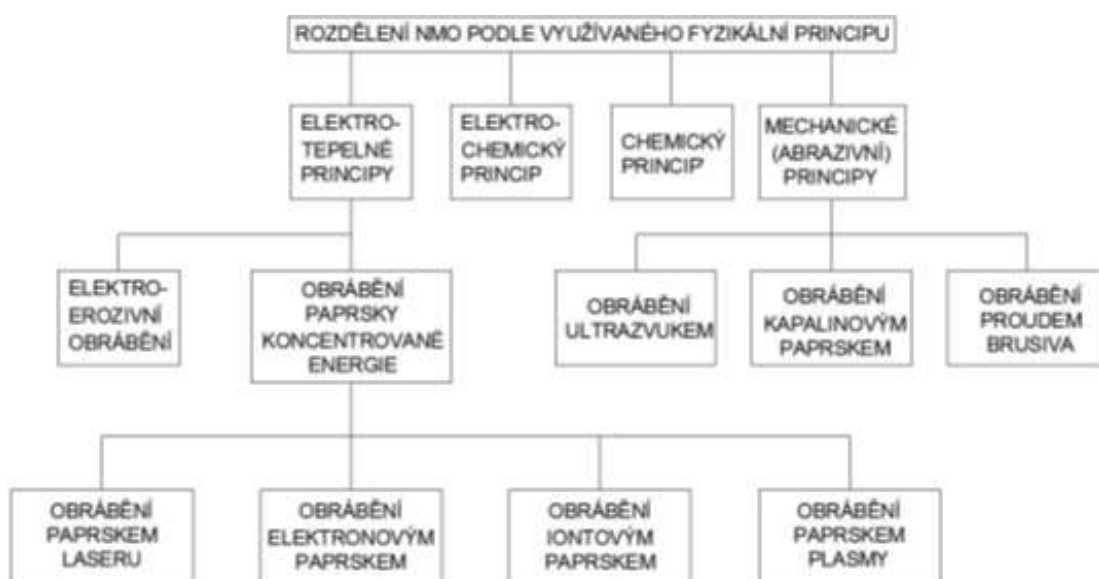
- Elektrochemické obrábění

c) Úběr mechanickým účinkem

Podstatou těchto metod je využití mechanické energie, jako primárního zdroje.

- Obrábění ultrazvukem
- Obrábění proudem brusiva
- Obrábění ultrazvukem

[4]



Obr. 3.1: Rozdělení NMO dle využívaného fyzikálního principu [4]

Podstatu funkce laseru lze vysvětlit na základu kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Slovo Laser znamená zesílení světla pomocí vybuzečné emise záření, zesílení poskytuje v úzkém svazku lavinu fotonů (kvanta elektromagnetického záření). Zesílení světla je způsobeno opakovanými průchody fotonů médii se specifickými vlastnostmi. Vzniká zvláštní druh světla, jež se v přírodě nevyskytuje. Světlo je monochromatické (jednobarevné) a je vyzářené ve formě úzkého směrového paprsku s malou rozbíhavostí. Tyto vlastnosti způsobují, že jej lze zaostřit na velmi malý průměr. [4][5][6]

4. DETAILNÍ ROZBOR PROBLEMATIKY LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ

4.1 Princip laseru

Princip laseru je možné vysvětlit na základě pojmů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Laser je akronym anglického názvu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což v překladu znamená zesílení světla pomocí vybuzení emise záření – zesílení poskytuje v úzkém svazku lavinu fotonů (kvanta elektromagnetického záření).

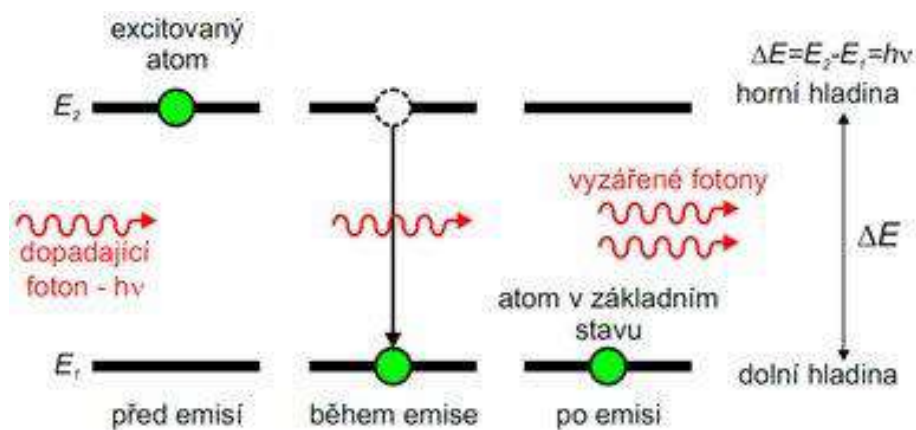
Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a přitom emitují kvantum světelného záření s frekvencí ν , která se určí z rovnice:

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (5.1) [4]$$

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

Vlivem vnějšího podnětu se vybuzený atom vrací do základního stavu, přičemž emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jakou měl předcházející kvant. Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření. V závislosti na rozdílu těchto hladin vzniká infračervené, ultrafialové nebo viditelné světelné záření.

Za běžných podmínek se atom nachází v základním stavu. Přechod elektronů ze základní hladiny na vyšší energetickou hladinu doprovází absorpce a přechod z vyšší hladiny na základní je emise, přičemž vzniká energie ve formě záření. [4]

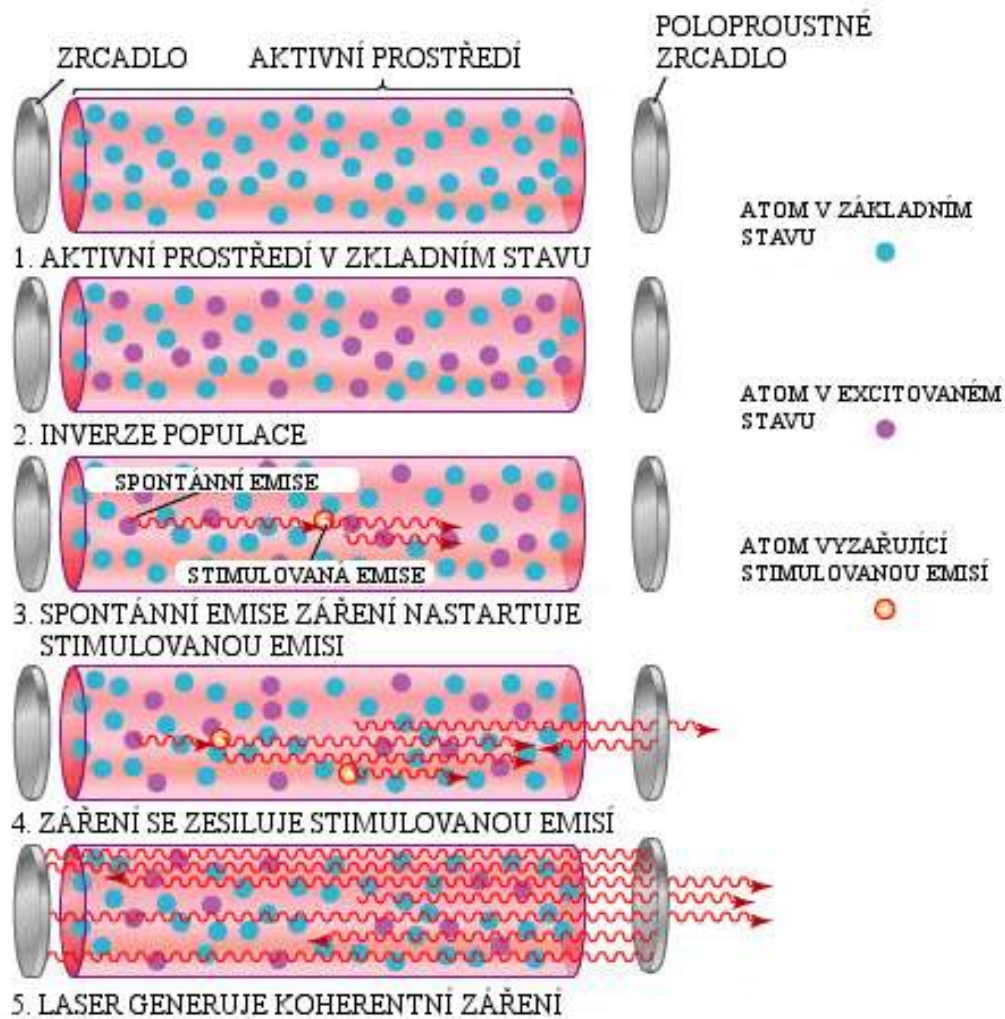


Obr. 4.1: Stimulovaná emise [5]

Prvky tvořící součásti laseru lze rozdělit na budící zařízení, aktivní prostředí, rezonátor a příslušenství. [1] Budící zařízení dodává energii aktivnímu prostředí, tzn., že je buzeno (opticky, elektricky, radiofrekvenčně) a zajišťuje přebytek částic ve vyšším energetickém stavu (vybuzení atomů aktivního prostředí ze základní energetické hladiny E_1 do vyšší energetické hladiny E_2). [4][5][6]

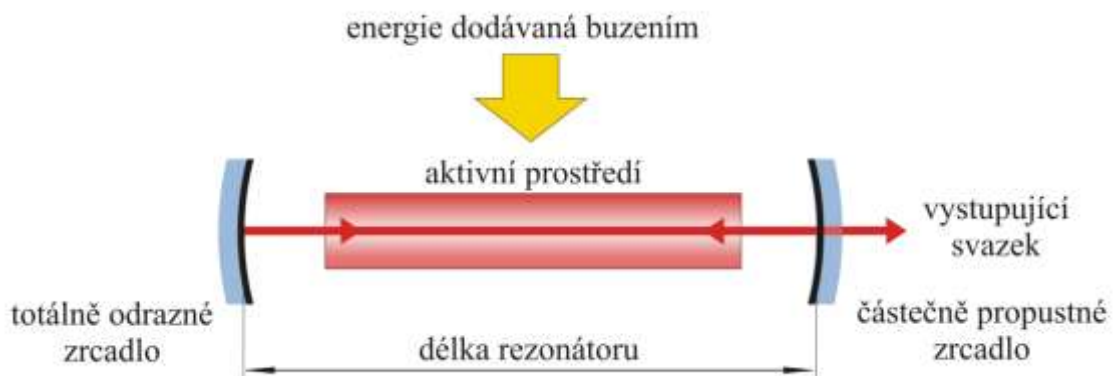
Aktivní prostředí se nachází v rezonátoru. Látkou, ve které se částice dají vybudit na požadovanou pracovní hladinu, může být plyn, pevná látka, polovodič nebo kapalina. Záření, které vychází z aktivního prostředí, se odráží od zrcadla zpátky do aktivního prostředí, což dále podporuje stimulovanou emisi. Tím se laserové záření zesiluje a po dosažení žádané intenzity paprsek světla opouští rezonátor polopropustným zrcadlem. [4][5][6]

Rezonátor je prvek, který je tvořen dvěma zrcadly. Jedno z nich je odrazné a druhé polopropustné. Fotony putují od jednoho zrcadla k druhému, jejich počet výrazně roste a dochází k uvolnění energie v podobě svazku (proud fotonů). [4][5]



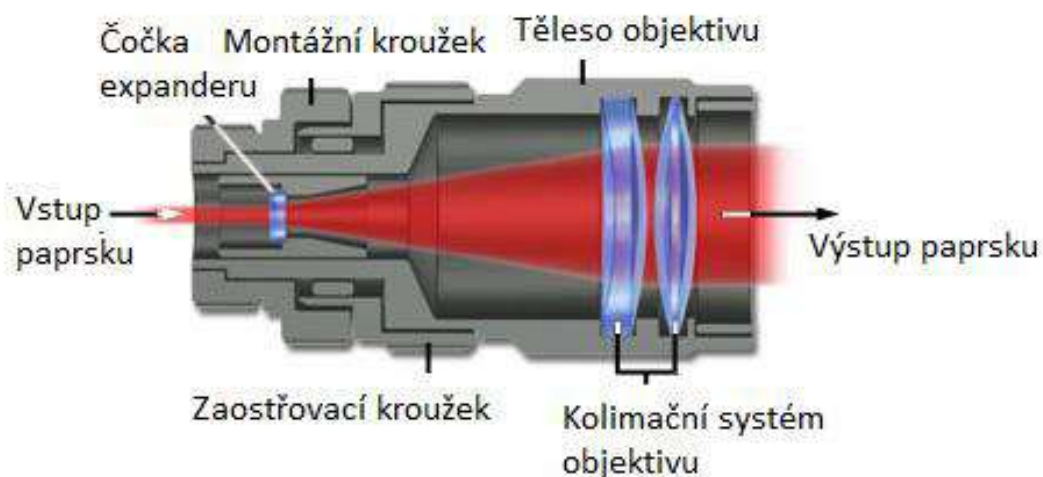
Obr. 4.2: Princip laseru [5]

Mezi příslušenství se řadí chladicí zařízení, řídicí počítač, kalibrace zařízení.[5]



Obr. 4.3: Základní sestava laseru [5]

Expandérem, který je tvořen systémem čoček a clon, se upravuje u průmyslových laserů vystupující svazek z rezonátorů. Takto zvýšená kvalita výstupního svazku a upravení jeho průměru představuje velké energetické ztráty, představující snížení účinnosti laserového zařízení. V mnoha aplikacích je však kvalita svazku upřednostňována oproti jeho výkonu. [5]



Obr. 4.4: Laserová hlava [8]

Tento svazek je dále veden soustavou čoček a zrcadel do laserové hlavy, ze které svazek dopadá na požadované místo. [8]

4.2 Rozdělení laserů

Lasery lze dělit z hlediska typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, výkonu a dalších parametrů dle tab. 4.1.

Tabulka 4.1 Rozdělení laserů [4]

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblasti aplikace
PEVNÝ	Rubín	Cr ³⁺	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd-YAG	Nd ³⁺	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200 W	Strojní průmysl
	Nd-sklo	Nd ³⁺	1,064	pulzní	2 mW	
	alexandrit		0,7-0,818		10 W	
POLO-VODIČOVÝ	GaAs		0,80-0,90	pulzní	2 až 10 mW	Informační technologie, optoelektronika
PLYNOVÝ	CO ₂ (N ₂ + He)	CO ₂	10,6	kontinuální pulzní	500 až 15000W	Strojní průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3.39	kontinuální	20 mW	Metrologie, geodézie, holografie
	Ar	Ar ⁺	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální pulzní	1 až 5000W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl) (XeCl) (XeFl) (KrF)		0,170 0,308 0,351 0,248	Pulzní	20 až 250 W	Fotolitografie, laserová chirurgie, strojírenství
KAPALINOVÝ	Barvivo Rhodamine 6	Eta-nol, meta-nol	0,34-1,175	Pulzní	100 W	Fotochemie, spektroskopie

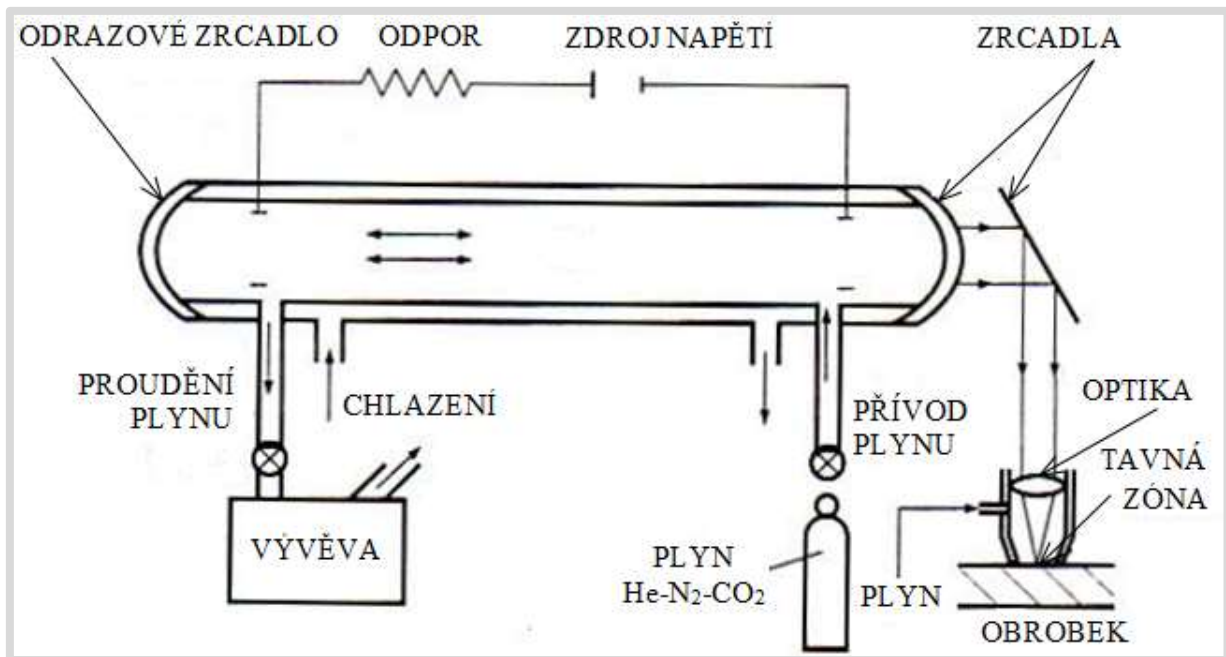
4.3 CO₂ Laser

Hlavní částí CO₂ laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a He. Energie potřebná k excitaci je vytvářena formou doutnavého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí.

V doutnavém výboji se molekuly N₂ srážkami s elektrony vybuzené ze základního energetického stavu E_0 do prvního vibračního stavu na určité energetické hladině E_1 , která se blíží k energii asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého E_2 . Proto se může nepružnými srážkami excitovaných molekul N₂ s molekulami CO₂ velmi rychle a účelně měnit vibrační energie molekul. Molekuly CO₂ přecházejí ze svých asymetrických vibrací na symetrické vibrace energetickým přeskočením z vyšší energetické hladiny E_2 na nižší hladinu, což je provázeno vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm . [4]

Aby byla v CO₂ laseru trvale zajištěna inverze populace na horní hladině E_2 , je potřeba ji neustále doplňovat (čerpat do systému energii ve formě doutnavého výboje) a také účinně depopulovat dolní laserovou úroveň, což je zajišťováno srážkami s molekulami He, které přijatou energii odvádějí do systému ve formě tepla. Hélium je pro tento účel velmi vhodné z důvodu relativně velkého koeficientu tepelné vodivosti.

Teplo je ze systému odváděno chladícím médiem. Chlazení musí být účinné tak aby teplota v dutině nepřekročila 400 K. Nízký tlak doutnavého výboje v laserové trubici je udržovaný pomocí vývěvy. [4]

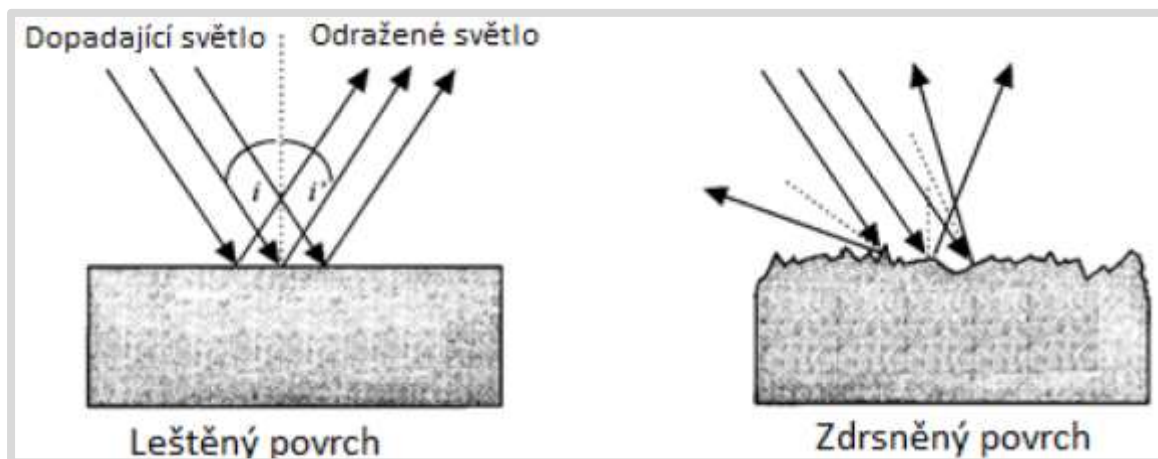


Obr. 4.6: Princip CO_2 laseru [4]

4.4 Interakce materiálu s laserovým paprskem

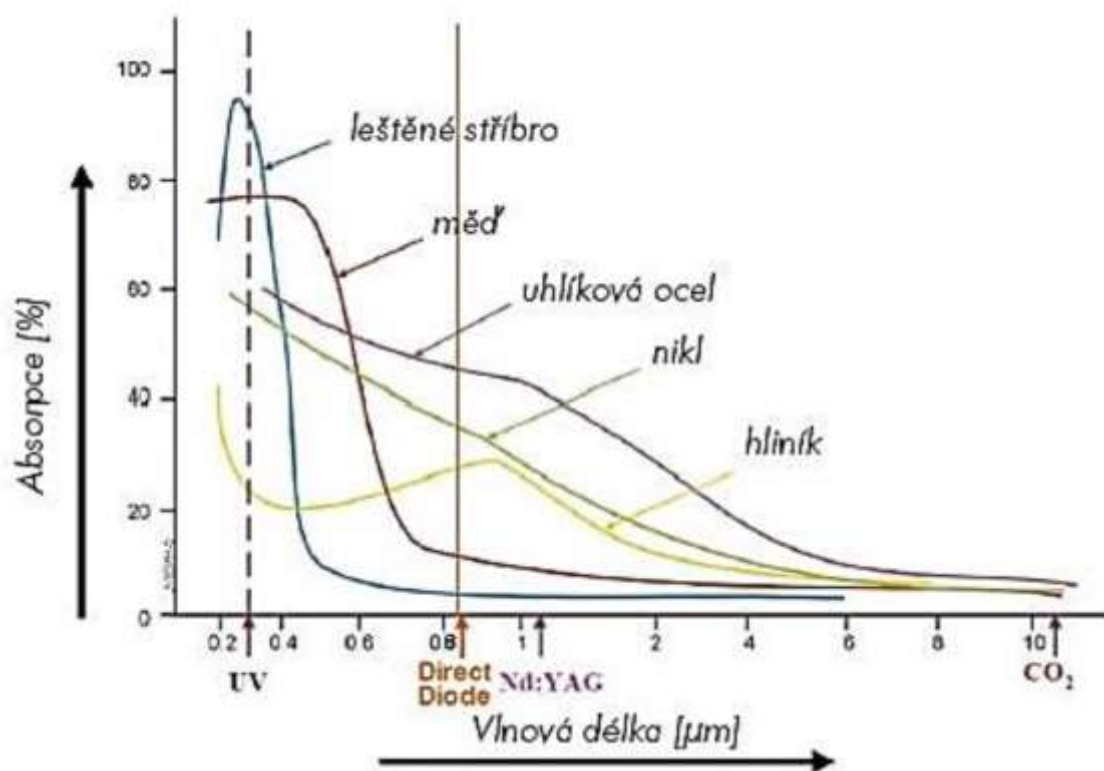
Volba laseru závisí na obráběném materiálu. Vzájemné působení materiálu s laserem ovlivňují:

- koeficient odrazu pro danou vlnovou délku
- koeficient absorpce pro danou vlnovou délku
- drsnost povrchu (drsňější povrch u stejného materiálu absorbuje více energie – větší plocha a různé interakce v důsledku odrazů od povrchu)
- tepelnou vodivost
- tepelnou kapacitu [6] [12]



Obr. 4.7: Vliv jakosti na odrazivost [10]

Všeobecně se dá říct, že odrazivost kovů se zvyšující se vlnovou délkou roste. Při interakci povrchu kovu CO₂ laserem je odrazivost při pokojové teplotě velmi vysoká. Se zvyšováním teploty povrchu ale klesá a dosahuje minimální hodnotu při teplotě tavení kovu. Graf absorpce často obráběných materiálů je na následujícím obrázku. [6] [11]



Obr. 4.8: Graf absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [12]

Pro řezání dřeva, plastů, skla, papíru se používá CO₂ laser. U těchto materiálu není vlnová délka okolo 1μm téměř pohlcována. [6]

KOVOVÉ MATERIÁLY	PLASTY	PŘÍRODNÍ A UMĚLÉ MATERIÁLY
Železné kovy (1, 2)	PA (1, 3)	Krystal (1)
Nástrojové oceli (1, 2)	PMMA (1, 3)	Keramika (1, 2, 3)
Legované oceli (1, 2)	PE (1, 3)	Dřevo (1)
Korozivzdorné oceli (1, 2)	PVC (1, 3)	Grafit (1)
Čisté železo (1, 2)	PS (1, 3)	Textil (1)
Zinek (1, 2)	PU (1, 3)	Kompozitní materiály (2, 3)
Kadmium (1, 2)	Sklotextil (1)	Překližka (1, 2)
Hliník (1, 2)	Silikon (1, 3)	Dřevotříska (1)
Měď (2)		
Mosaz (1, 2)		
Bronz (1, 2)		
Spékané karbidy (2)		

Obr. 4.9: Doporučený výběr laseru pro určitý materiál [6]

Pro technologii mikro-obrábění laserem jsou nejčastěji používány UV lasery a některé pevnolátkové lasery. Proces odstraňování materiálu je složitá kombinace fotochemického a fototermického procesu. Porušením vazeb termicky (zvýšením teplot) a porušení chemických vazeb absorpcí kvantové energie dochází při dopadu záření. UV laser způsobuje zejména fotochemickou ablaci. Laser CO₂ o vlnové délce 10 600 nm způsobuje zejména fototermickou ablaci. Na optice, mechanice laserového zařízení a vlastnostech obráběného polymeru závisí rozměr a tvar laserem obrobenej struktury. [6]

4.5 Kritéria hodnocení kvality povrchu

Řezné podmínky, materiál a kvalita řezu jsou kritéria, které mají významný vliv na výslednou kvalitu povrchu.

Vliv řezných podmínek:

- výkon paprsku
- rychlost posuvu
- šířka řezu
- druh paprsku a jeho mód
- ohnisková vzdálenost
- průměr fokusovaného paprsku
- úhel vychýlení paprsku
- přídatný plyn (druh plynu, tlak plynu)

Vliv materiálu:

- fyzikálně-chemické vlastnosti materiálu
- druh materiálu (plech, sklo, keramika, kompozit)
- termo-fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, viskozita taveniny, povrchové napětí, absorpce, odrazivost)
- geometrie obrobku

Vliv kvality řezu:

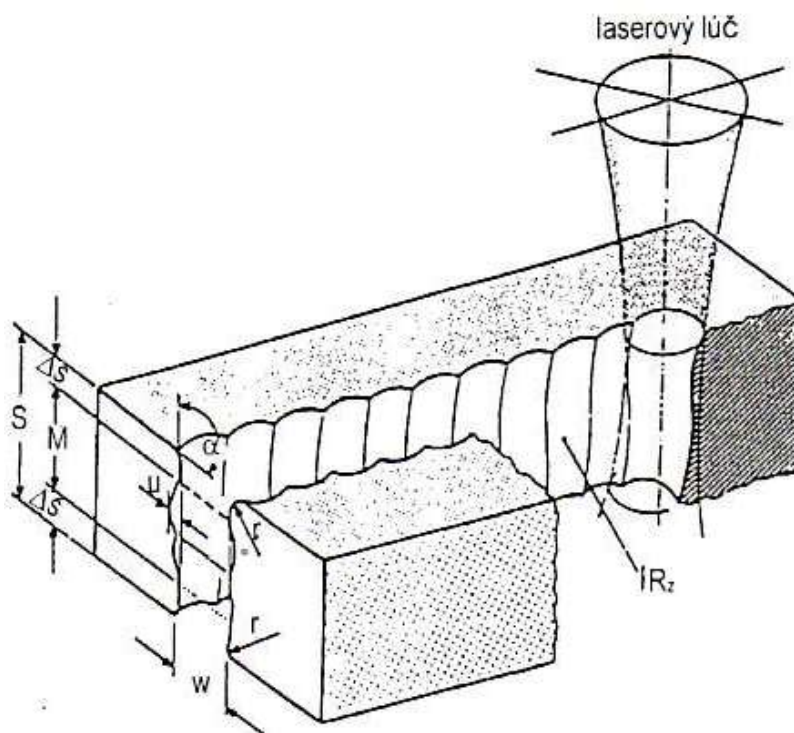
- šířka řezu
- zaoblení hrany vlivem řezání
- nepravidelnost hrany
- šířka teplem ovlivněné vrstvy (poškozené vrstvy)
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupem paprsku)
- tvoření trhlin
- úbytek materiálu
- šířka kráteru
- vychýlení paprsku
- změny struktury povrchu materiálu
- zpevnění

- zbytkové napětí

Redukovaný počet parametrů a kvalitu řezu určuje:

1. Charakteristika materiálu, tloušťka HAZ (tepelně postižené zóny) a tvořením mikrotrhlin
2. Geometrické vlastnosti, (drsnoty povrchu, frekvence a amplituda rýhování povrchu, zaoblení horní a dolní hrany řezu, přítomnost kapek stlačené vrstvy)

Následující obrázek (obr. 4.10) představuje oblast po řezání laserem a doporučené veličiny pro kvantitativní hodnocení kvality řezu. [4]



Obr. 4.10: Kritéria hodnocení povrchu po řezání laserem [4]

u - nepravidelnost spáry

α – úhel vychýlení paprsku

r - zaoblení vlivem řezání

w – šířka řezu

S – tloušťka materiálu

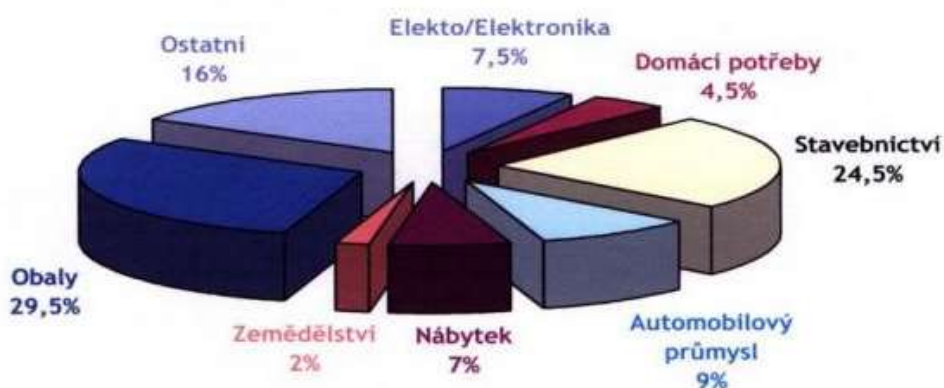
Δs – oblast náběhu a výběhu při řezání (0,1 – 0,2 mm dle tloušťky materiálu)

M – oblast měření pro určení hodnot Rz, u, α

Oblast řezání laserem je charakterizována tvořením rýhované stopy řezu, která vzniká jako výsledek cyklické povahy energetického paprsku při interakci s materiálem v důsledku oscilace proudění taveniny. [4]

5. POLYMERNÍ MATERIÁLY

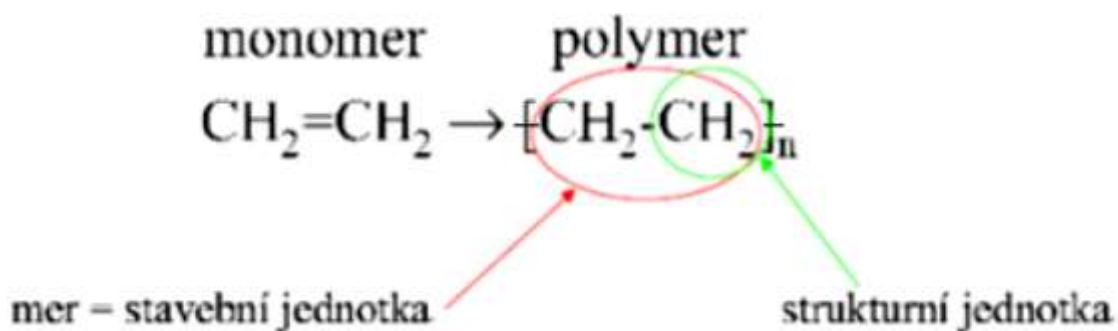
Prudký nárůst spotřeby a výroby polymerních materiálů odstartoval zhruba na přelomu padesátých a šedesátých let. V současnosti však probíhá velmi zajímavý vývoj v této oblasti. Přichází se stále na nové a nečekané využití těchto materiálů a netušené možnosti modifikací jejich vlastností. Zejména v lékařství se tyto materiály dostávají do popředí. [13]



Obr. 5.1: Světová spotřeba plastu ve vybraných odvětvích za rok 2003 [14]

5.1 Struktura polymerů

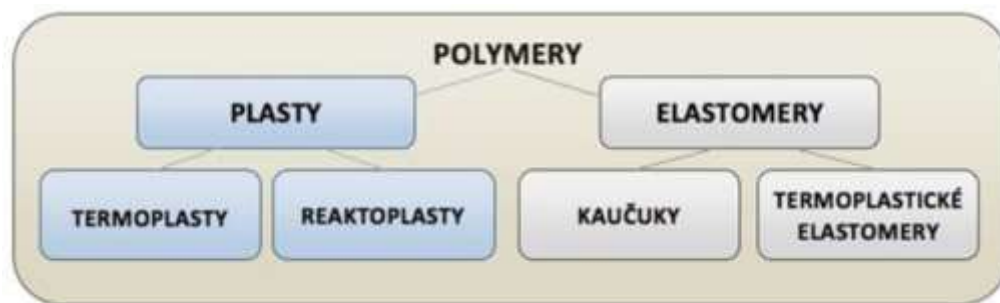
Polymer je makromolekulární látka, kterou tvoří řetězce makromolekul. Ty vznikají spojením stavební jednotky primárními kovalentními vazbami, a obsahují velké množství atomů. Základní stavební částí jsou nízkomolekulární látky, tzv. mery, které se v řetězci stále opakují. Základní část řetězce tvoří atom uhlíku, který je schopný se vzájemně vázat a vytvářet tak dlouhé řetězce. [17][18]



Obr. 5.2: Struktura polymeru

5.2 Rozdělení polymerů

Polymery se dělí do dvou základních skupin na plasty a polymery.



Obr. 5.3: Rozdělení polymerů [19]

5.2.1 Termoplasty

Polymery, které se při zvýšené teplotě stávají plastickými a tvarovatelnými, za předpokladu, že je změna z plastického do tuhého stavu opakovatelná a vratná. Jsou složeny z lineárních makromolekul s dlouhým řetězcem. Tyto řetězce jsou mezi sebou drženy pouze mezimolekulárními interakcemi (van der Waalsovými silami, vodíkových můstků). Pokud se termoplast zahřeje, vzájemné mezimolekulární interakce slábnou a dochází ke změknutí polymeru. Termoplasty jsou dobře zpracovatelnými materiály, lze je snadno odlévat či lisovat. [19]

5.2.2 Reaktoplasty

Reaktoplast je polymer, který nevratnou chemickou reakcí, jako je například zahřívání nebo přidání vytvrzovacího prostředku, přechází z lineárního viskózního stavu do stavu síťovaného. Zesíťováním vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť, která nastává až při tváření plastu vlivem teploty a tlaku. Jakmile dojde k zesíťování, není možné jeho další tváření, protože dodáváním dalšího tepla již nelze hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování se nazývá vytvrzování. [19]

6. CÍLE PRÁCE

Experimentální závislosti LBM technologických parametrů a integrity povrchu byly stanoveny tyto dílčí cíle:

- Stanovení laserové obrobitelnosti polymerních materiálů
- Měření drsnosti obráběných ploch
- Měření tvrdosti
- Teplotní pole tepelně ovlivněné oblasti materiálu
- Porovnání kvantitativních změn po průchodu laserového svazku materiálem

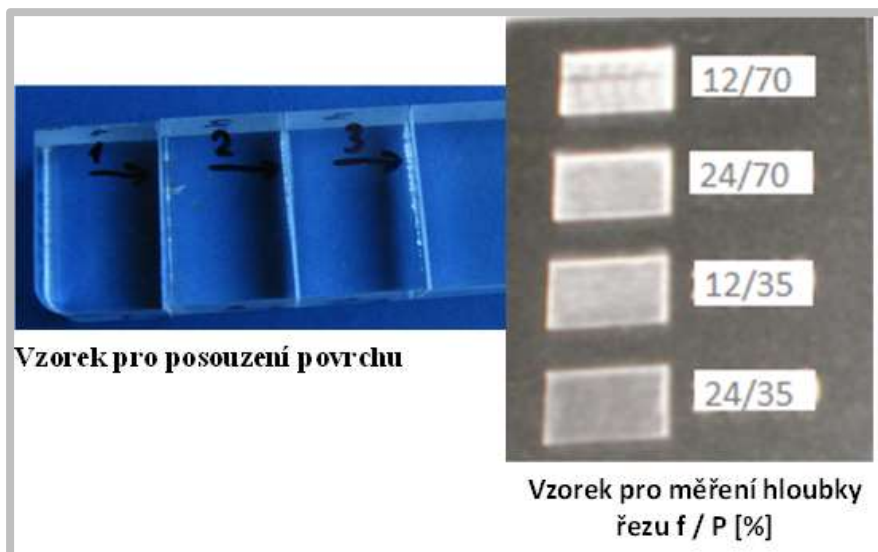
7. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vzorky (obr 7.2) k provedení experimentů byly vyrobeny pomocí laserového zařízení ILS3 NM. Tato laserová tiskárna komunikuje se software Corel Draw. Je určena především pro obrábění PMMA, ale lze na ní opracovávat také jiné polymerní materiály.



Obr. 7.1: Laserové zařízení ILS 3 NM

Proměnlivými hodnotami byly parametry řezné rychlosti pracovního posuvu a výkonu laserového zařízení. Pracovní podmínky laserového zařízení se nastavují v procentech maximálního výkonu (100 W) a maximální řezné rychlosti ($1524\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).



Obr. 7.2: Vzorky pro experimenty

8. STANOVENÍ LASEROVÉ OBROBITELNOSTI POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Obrobitelností se označuje souhrnný vliv fyzikálních vlastností a chemického složení materiálů na průběh a na ekonomické, popř. kvalitativní výsledky procesu řezání. Lze ji obecně posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na proces řezání a také jejich vlivu na vytváření nového povrchu na obrobku.

Z hlediska technologie obrábění je obrobitelnost jednou z nejdůležitějších vlastností materiálu a lze ji také definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracováván některou z metod obrábění.

Množství technických materiálů je velmi vysoké a každým dnem narůstá. Současně stoupají nároky na jejich opracování. Držet krok s těmito požadavky dokáže stále více se uplatňující metoda laserového obrábění. Jedním z hlavních faktorů dobré obrobitelnosti je jakost povrchu, jež je součtem různých faktorů ať už ze strany způsobu obrábění nebo materiálu obrobku.

Obrobitelnost závisí na několika faktorech:

způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu

mikrostruktura obráběného materiálu

chemické složení obráběného materiálu

fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu

Přestože je laserové obrábění dostatečně dlouho aplikovaná metoda úběru materiálu, nebyly doposud stanoveny konkrétní závislosti schopnosti materiálu nechat se laserovým paprskem obrábět.

Jedním z hlavních faktorů dobré obrobitelnosti je jakost povrchu, jež je součtem různých faktorů, a to jakého způsobu laserového obrábění bude použito nebo volbou materiálu obrobku. Po vystavení účinku laserového paprsku, jsme chtěli určit, který z materiálů a při kterých pracovních podmínkách dosahuje jakosti vhodné mikro-obrábění.

Doposud nebyly stanoveny konkrétní závislosti schopnosti materiálu nechat se laserovým paprskem obrábět. Komplikovanost této metody značně omezuje vytvoření takovéto veličiny.

Naší snahou je definovat tzv. „laserovou obrobiteľnosť“ mērením hĺbky řezu pomocí dostupného CO₂ laseru.

Laserovému účinku byly vystaveny termoplastické polymerní vzorky za účelem vytvoření drážky. Podle množství odebraného materiálu, tedy vzniklé hĺbky ablací materiálu, se určilo, který ze zkoumaných vzorků má nejlepší „laserovou obrobiteľnosť“. U vzorků pro mērení hĺbky řezu byly použity různé pracovní podmínky (tab. 8.1, str. 34).

8.1 Mērení hĺbky řezu

Mērení hĺbky řezu bylo provedeno pomocí přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500 (obr. 8.1). Jedná se o přístroj k provádění rychlého prostorového mērení a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením, umožňuje mērení dotykové nebo bezdotykové ve třech osách. Mikrometr, který je součástí zařízení, nám umožní zjistit mēřenou veličinu.



Obr. 8.1: Taylor Hobson Talysurf CLI 500 [21]

Proměnlivými hodnotami byly parametry rychlosti pracovního posuvu a výkonu laserového zařízení. Pro vyhotovení vzorků, pro mērení hĺbky řezu, jsou uvedeny pracovní podmínky v tabulce 8.1.

Tabulka 8.1 Nastavení pracovních podmínek laserového zařízení

VZOREK	1	2	3	4
P [%] / f [%]	12/35	12/70	24/35	24/70
P [W] / f [mm. s ⁻¹]	12/533	12/1066	24/533	24/1066

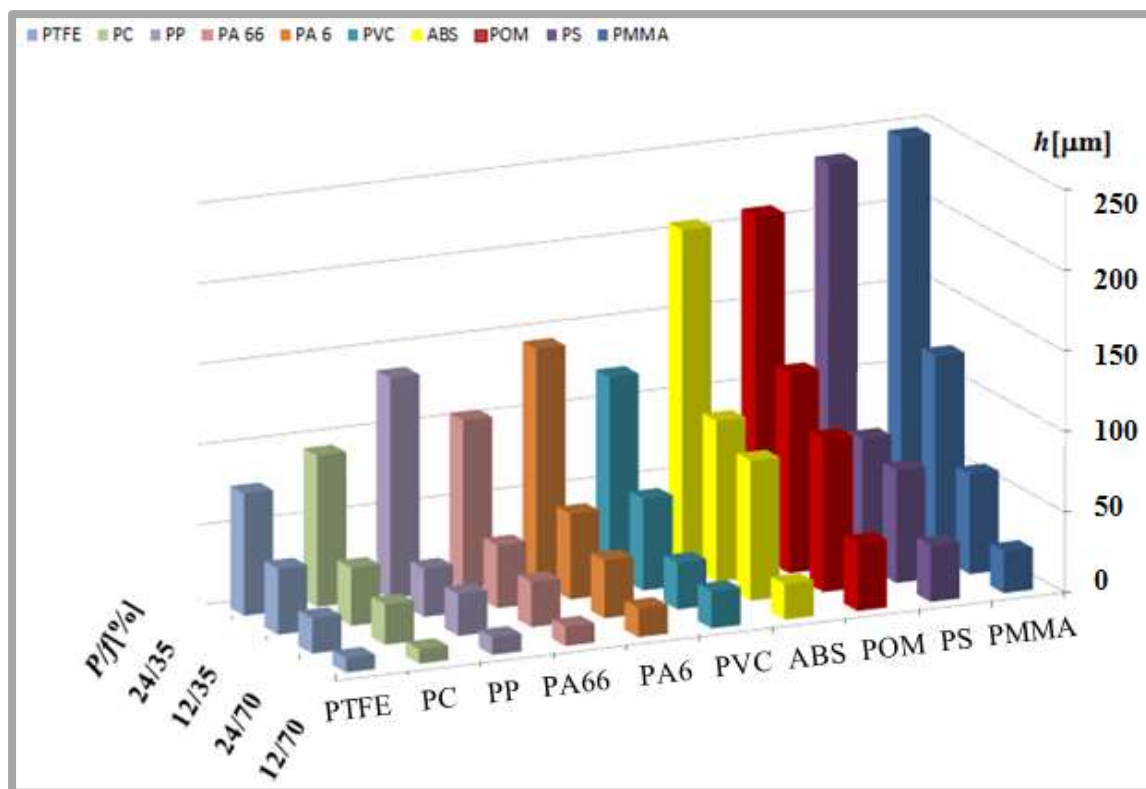
V tabulce 8.2 je uveden aritmetický průměr z jednotlivých měření naměřené hloubky opracování.

Tabulka 8.2 Naměřené hloubky opracování

MATERIÁL	P / f [%]			
	12/35	12/70	24/35	24/70
	P / f [W/ m.s ⁻¹]			
	12 / 533	12 / 1066	24 / 533	24 / 1066
	h [μm]			
ABS	100	22	207	87
PA 6	53	18	144	36
PA 66	39	12	105	28
PC	36	9	94	25
PMMA	124	26	248	62
POM	124	42	210	95
PP	30	11	137	26
PS	78	35	237	70
PTFE	41	9	76	22
PVC	57	23	121	29

Jestliže by představitelem "laserové obrobiteľnosti" mohla být, za použití výkonu 24 W a řezné rychlosti 533 mm. s⁻¹, hloubka řezu $h = 248$ μm, pak by tímto nejvhodnějším materiálem byl PMMA = *nejobrobiteľnějším*, u kterého

Pokud by tedy ekvivalentem "laserové obrobiteľnosti" byla hloubka řezu, pak by při pracovních podmínkách rychlosti posuvu $533 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a 24W výkonu laseru se jako *nejobrobiteľnější* jevil materiál PMMA s hloubkou řezu $250 \mu\text{m}$. Je to největší hloubka, které bylo dosaženo v rámci celého měření.



Obr. 8.2: Závislost hloubky řezu na řezných podmínkách

8.2 Statistické vyhodnocení laserové obrobiteľnosti

Laserová obrobiteľnost byla vyhodnocena různými technologickými parametry. Pro důkaz laserové obrobiteľnosti bylo použito dvou-faktorové ANALÝZY s interakcí TUKEY mezi výkonem a řeznou rychlostí pro materiál PMMA, což je nezbytné pro potvrzení výsledků (tab. 8.3, str. 36)

Tabulka 8.3 Výpočty

Zdroj rozptylu	Stupně volnosti	Součet čtverců	Průměrný čtverec	Testovací kritérium	Závěr H_0 je	Spočtená hladina významnosti P - VALUE
Mezi úrovněmi A	$n - 1 = 5$	7,4128 E+05	1,4826 E+05	25,079	Zamítnuta	0,000
Mezi úrovněmi B	$m - 1 = 5$	4,6460 E+05	9,2919 E+04	15,718	Zamítnuta	0,000
Interakce	1	4,2907 E+04	4,2907 E+0,4	7,258	Zamítnuta	0,013
Rezidua	$mn - m - n = 24$	1,4188 E+05	5,9115 E+0,3			
Celkový	$mn - 1 = 35$	1,3478 E+06	3,8507 E+04			

a) Hypotéza pro faktor A ($f\%$)

H_0 = efekt faktoru **A** = **0** tj. f na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky nemá statistický významný vliv

H_a = efekt faktoru **A** \neq **0** tj. f na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky má statistický významný vliv

Zvolená konfidenční úroveň $1 - \alpha = 0,95$

b) Hypotéza pro faktor B ($P\%$)

H_0 = efekt faktoru **B** = **P**, tj. P na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky nemá statistický významný vliv

H_a = efekt faktoru **B** \neq **0** tj. P na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky má statistický významný vliv

Zvolená konfidenční úroveň $1 - \alpha = 0,95$

c) Interakce faktoru A ($f\%$) a faktoru B ($P\%$)

H_0 = interakce faktoru A s faktorem B neexistuje, tj. interakce f s P na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky nemá statistický významný vliv

H_a = interakce faktoru A s faktorem B existuje, tj. interakce f s P na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky má statisticky významný vliv

Zvolená konfidenční úroveň $1 - \alpha = 0$

Odhad mocninné transformace nabývá hodnoty 0,30541. Tento odhad leží uvnitř vypočteného intervalu o velikosti $0,052808 \div 0,55802$. Prakticky to tedy znamená důkaz, že definované závěry odpovídají a nemusí být podrobeny rekalculaci s využitím mocninné transformace.

Úroveň důvěryhodnosti byla zvolena na úrovni 0,95, která odpovídá požadavkům normy ISO 3534-2.

Dle hladiny významnosti P - *VALUE* lze konstatovat, že změna výkonu P a změna řezné rychlosti f má vliv na hloubku drážky.

9. MĚŘENÍ DRSNOSTI OBRÁBĚNÝCH PLOCH

9.1 Vizuální posouzení řezu

Posouzení řezů bylo provedeno za použití ručního mikroskopu Pro Scope HR (obr. 9.1) se specifikací uvedenou v tabulce 9.1, s čočkou umožňující zvětšení 30x.

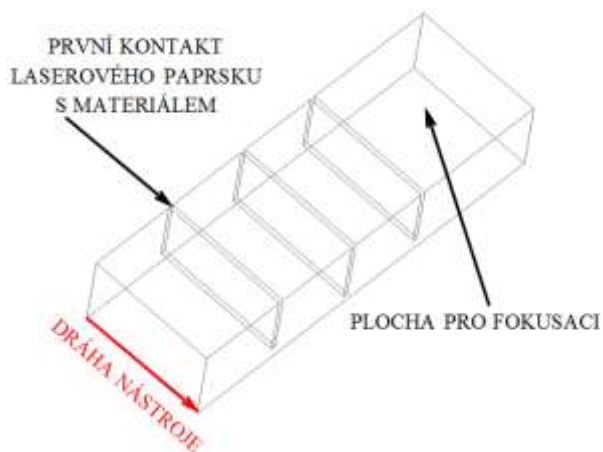


Obr. 9.1: Ruční mikroskop Pro Scope HR [22]

Tabulka 9.1 Specifikace zařízení Pro Scope HR

Video parametry	30 fps / 320x240; 15 fps / 640x480; 3,75 / fps 1280x1024
Napájení	400mA
ZOOM čočky	10x; 30x ; 50x; 100x; 200x; 400x; 500x; 1000x
Možnost nasvícení povrchu	Ano, pomocí LED diod
Vnější rozměry zařízení	152 x 45 x 45 [mm]
Hmotnost zařízení	0,185 kg

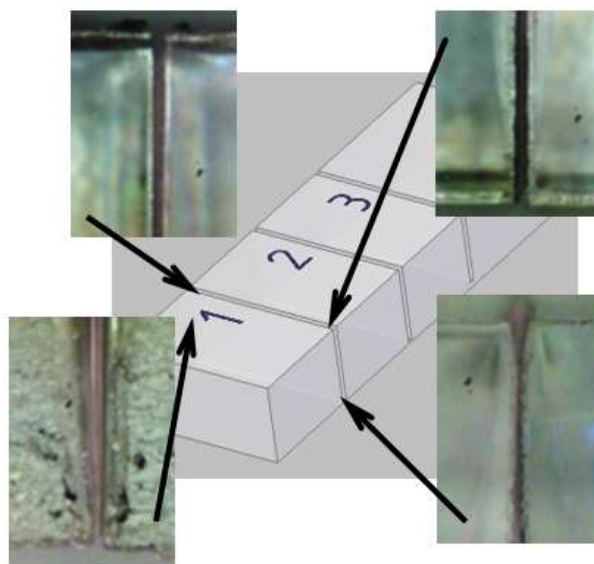
K posouzení řezů byly vybrány materiály, vhodné k obrábění laserovým paprskem: PE 1000, PMMA, POM C, POM H. Typicky nevhodným materiálem, jako ukázka, je zde uveden materiál PET. Z důvodu jednoznačného čtení všech vzorků a jejich následujících popisů je v obrázku 10.2 vyobrazeno postupné vnikání laserového paprsku do materiálu.



Obr. 9.2: Vnikání laserového paprsku do materiálu

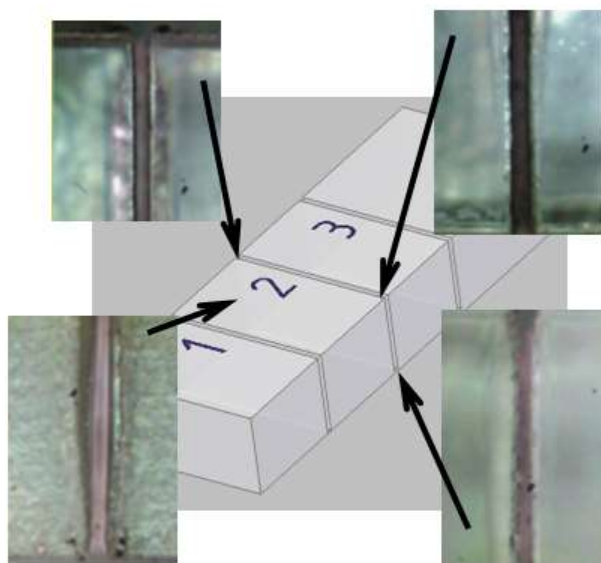
PMMA

Na snímcích první drážky (obr. 9.3) tohoto materiálu lze pozorovat na vstupu laserového paprsku zčernalé plochy v souvislosti s výkonem, který byl pro všechny drážky zvolen 100 W. U drážky 1, vytvořené rychlostí $15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, lze pozorovat na okraji řezu výstupky na spodní straně vzorku.



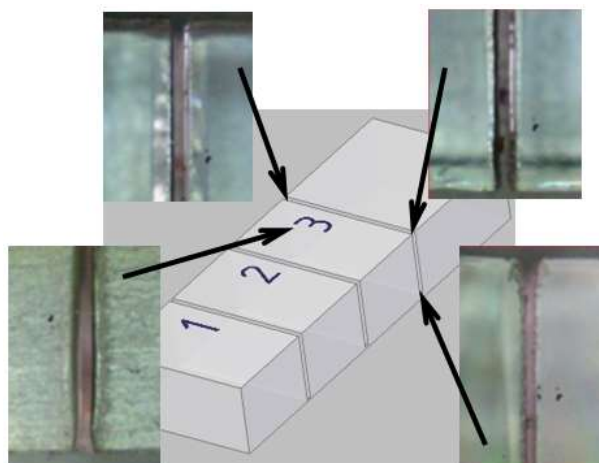
Obr. 9.3: Řez na vzorku z PMMA - drážka 1
($P = 100 \text{ W}$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Stejně jako u předchozího materiálu bylo při nastavení, pro druhou drážku (obr. 9.4), vyšší rychlosti ($f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$) menší zahoření plochy.



Obr. 9.4: Řez na vzorku z PMMA - drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$)

Na snímcích PMMA, třetí drážky (obr. 9.4) vytvořenou řeznou rychlostí $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$, můžeme vidět podobné vyobrazení jako u druhé drážky, s nižší rychlostí $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$. Výkon 100 W je pro tento materiál zbytečně vysoký.



Obr. 9.5: Řez na vzorku z PMMA – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

9.2 Měření drsnosti

Měřením drsnosti povrchu plochy, po jejím vystavení účinku laserového paprsku, jsem chtěla určit, který z materiálů a při kterých pracovních podmínkách dosahuje jakosti vhodné mikro-obrábění.

Vyhodnocení zkoušky probíhalo na přístroji Talysurf CLI 500 (obr. 9.6) využívající konfokální sondy pro bezkontaktní snímání povrchu. V rámci měření byly sledovány a vyhodnocovány parametry drsnosti povrchu R_a , R_z . Pro měření drsnosti na vzorcích materiálu byla vybrána pouze drážka 1 ($P = 100\text{W}$, $f = 15,24\text{ mm. s}^{-1}$) a drážka 3 ($P = 100\text{W}$, $f = 40,72\text{ mm. s}^{-1}$) z důvodu porovnání větších rozdílů hodnot drsností.

Dvojice nasnímaných povrchů (2D) představuje vlnitost povrchu (vlevo) – skutečný povrch a vyrovnání vlnitosti (vpravo) – korekce. Pro každý povrch obrobene plochy je pak uveden konkrétní řez ve 3D s průběhem povrchu první a třetí drážky u jednotlivých zkoumaných materiálů, v prostředí programu Talysurf.

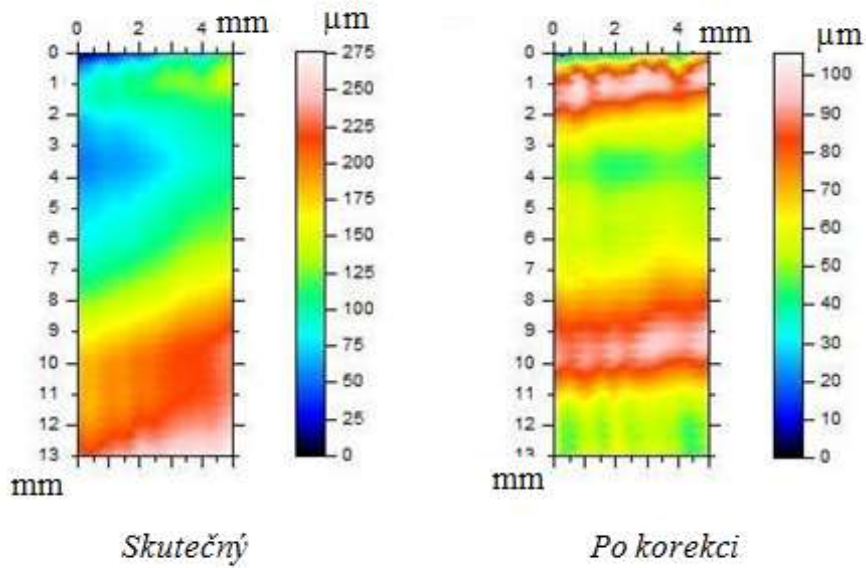


Obr. 9.6: Talysurf CLI 500 [21]

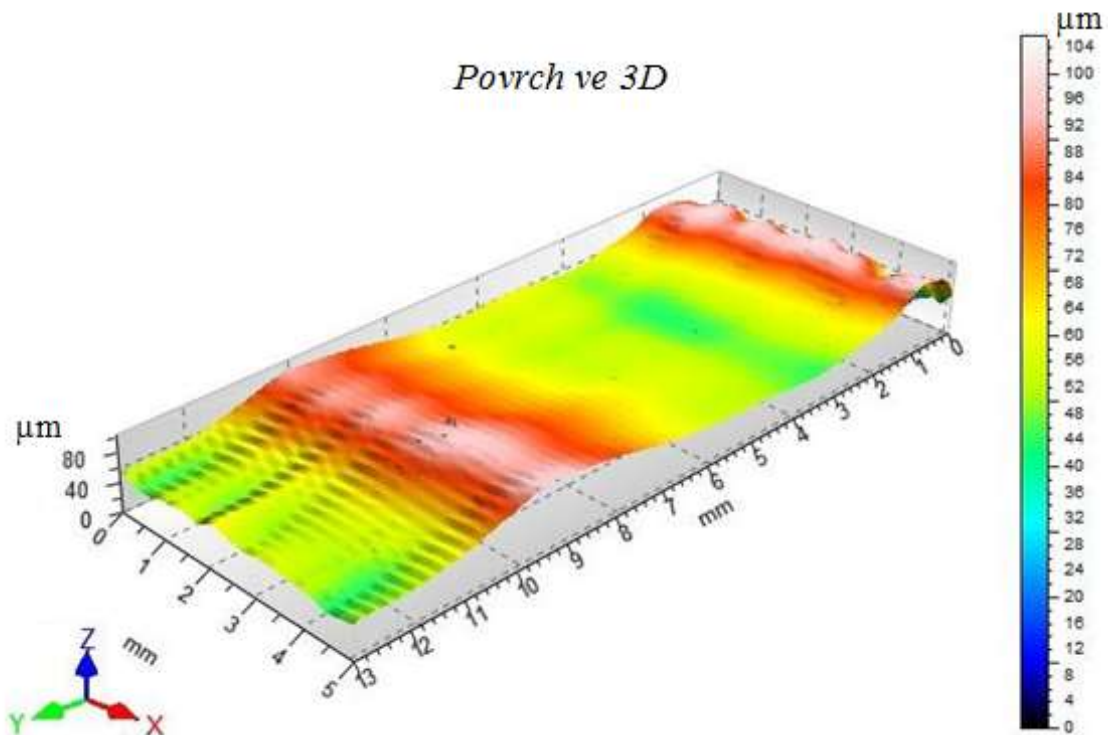
PMMA

První drážka

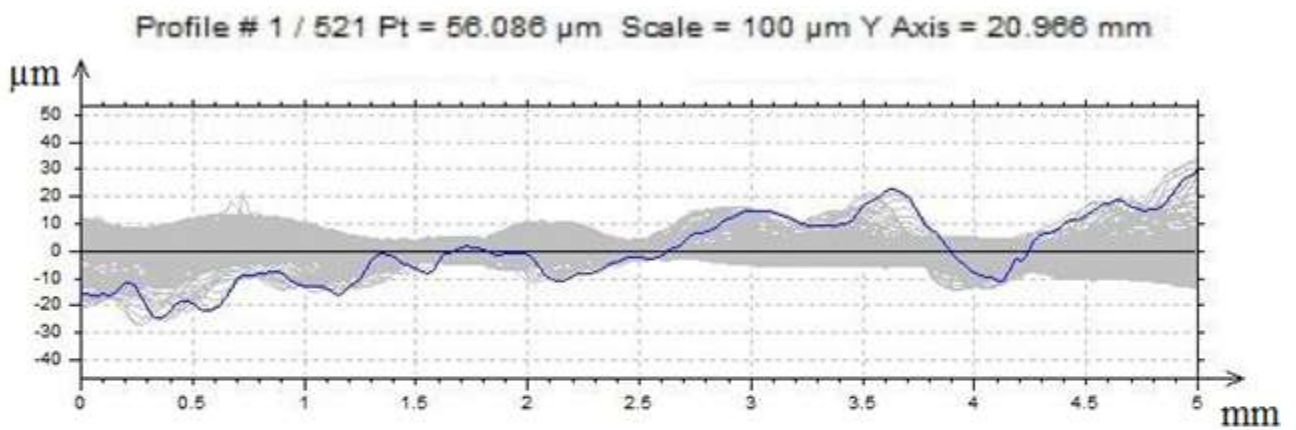
Povrch ve 2D



Povrch ve 3D



Obr. 9.7: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 1
($P = 100\text{W}$; $f = 15,24\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

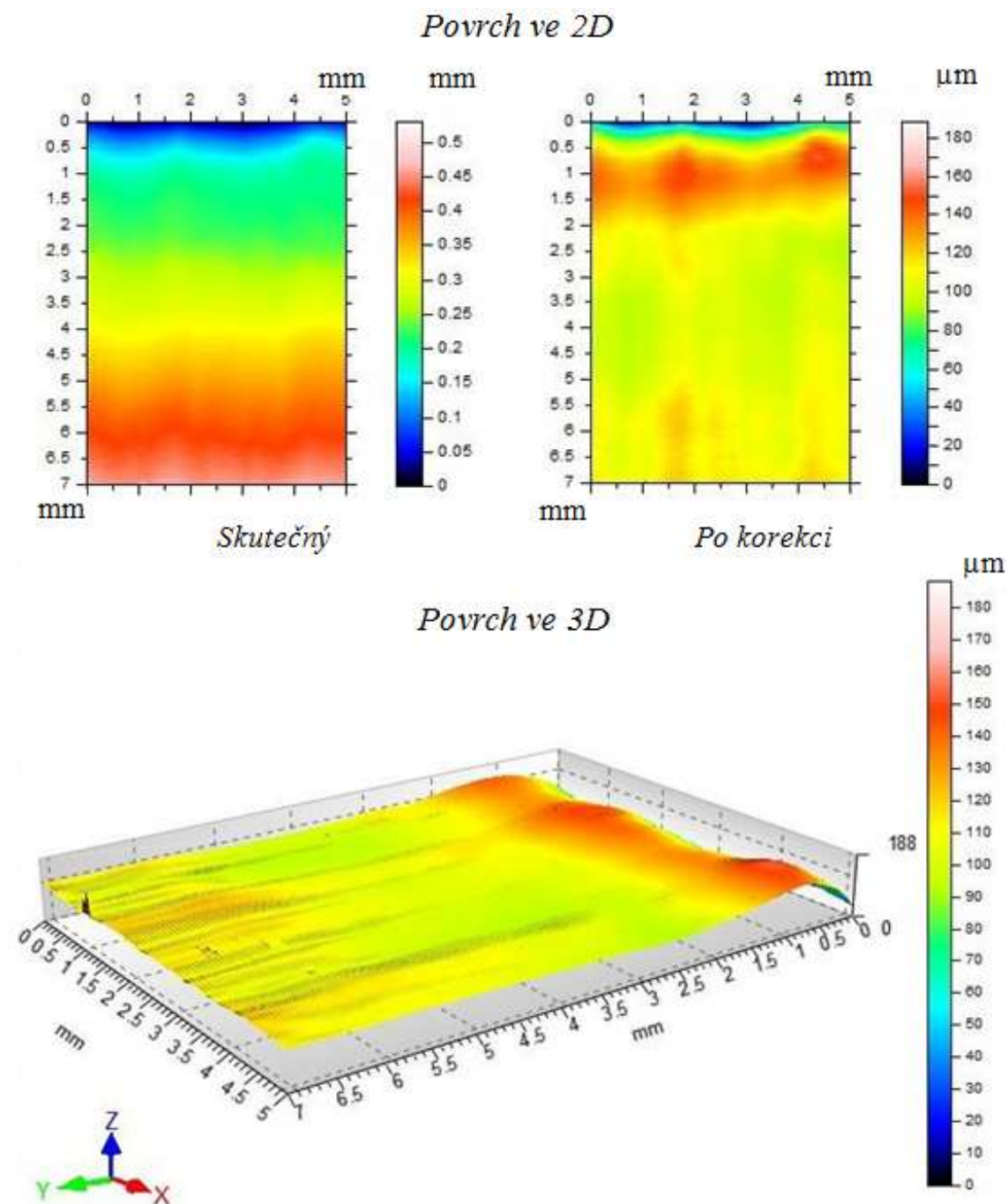


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	1.61	1.53	0.497	9.865
Ra	μm	0.414	0.398	0.122	2.38

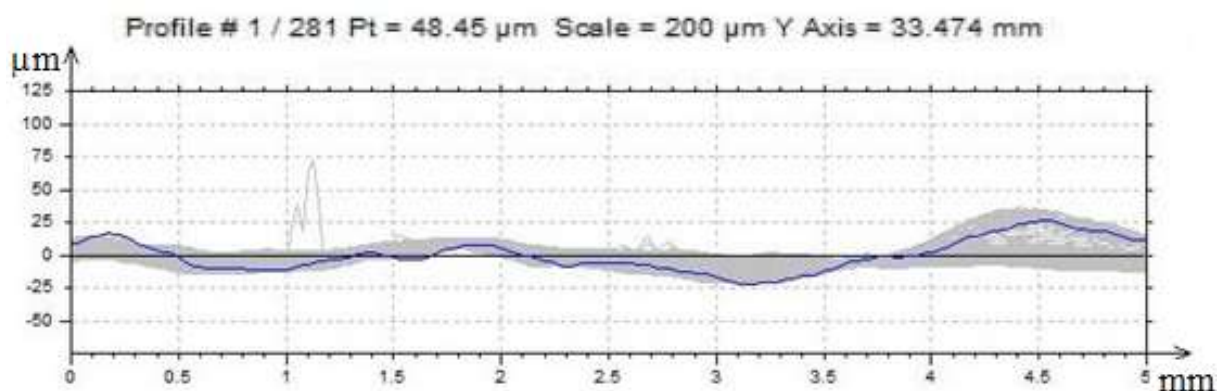
Obr. 9.8: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 1
 ($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Pro první drážku u vzorku z materiálu PMMA bylo vykresleno 520 snímků. Dle grafického vyjádření ve 3D se dá usuzovat na vlnitý povrch, avšak naměřené hodnoty drsností **Ra 0,414** a **Rz 1,61** v mikrometrech, vypovídají o velmi nízkých hodnotách, tedy o velmi kvalitním řezu.

Třetí drážka



Obr. 9.9: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	2.907	1.487	1.201	19.941
Ra	μm	0.777	0.301	0.379	3.086

Obr. 9.10: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

U třetí drážky na vzorku z materiálu PMMA bylo vyhotoveno 280 snímků. Zvýšení řezné rychlosti z $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$ na $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ způsobilo snížení jakosti povrchu (z Ra 0,414 a Rz 1,61) této drážky na **Ra 0,777** a **Rz 2,907** z Mean hodnot. Z tohoto jevu vyplývá přímá úměra, s větší rychlostí budou hodnoty drsností stoupat. Přesto vychází, z hlediska kvality povrchu dle drsnosti pro oba případy, drážka 1 i drážka 3 u zkoumaného materiálu PMMA, velmi kvalitní povrch.

10. MĚŘENÍ TVRDOSTI

Pro měření mikro-tvrdomosti byl použit tvrdoměr, Micro Combi Tester CSM (obr. 10.1), kterým lze měřit mikro-tvrdomosti různých materiálů. Zkoumanou a vyhodnocovanou veličinou je vtiskový modul pružnosti E_{IT} a tvrdost podle Vickerse, zkušební zatížení bylo zvoleno 1 N s dobou výdrže 10 s. Indentorem pro posouzení vtiskové mikro-tvrdomosti dle Vickerse H_{VIT} byl čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° , vyrobený z diamantu a používá se pro měření kovových i polymerních materiálů. Zkušební tělísko s úhlem 136° má svým třením nejméně ovlivňovat výsledek měření. Zkušební zatížení, které se používá při posuzování mikro-tvrdomostí, se pohybuje ve velmi malých hodnotách. [23]



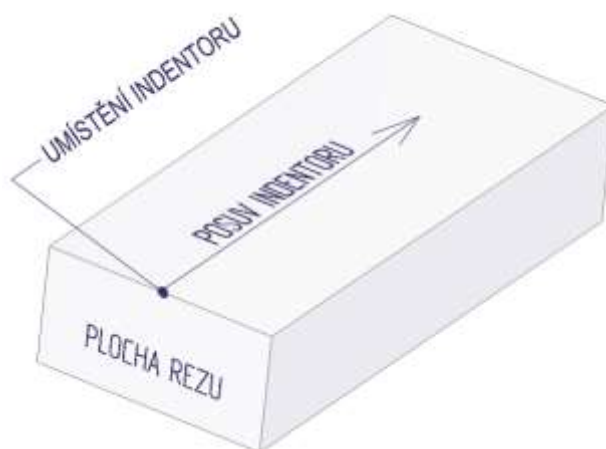
Obr. 10.1: CSM Micro Combi Tester [24]

Tabulka 10. 1 Specifikace zařízení CSM Micro Combi Tester

Rozsah aplikovaného zatížení	0,5 N; 1 N; 5 N
Zvolené zatížení:	1 N
Max. výdrž na max. zatížení	90 s
Zvolená výdrž na zatížení	10 s
Poissonovo číslo	0,3

10.1 Měření mikro-tvrdomosti a modulu pružnosti

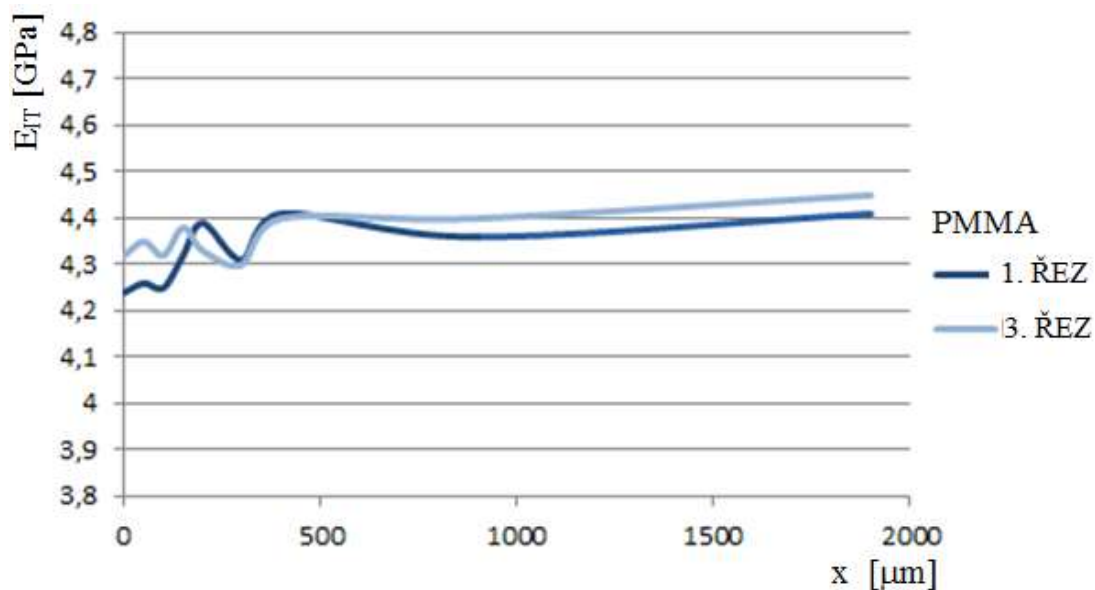
Laboratorní zkoušky byly provedeny na vzorcích z materiálu, PE 1000, PMMA, POM H, PP a zkoumaly se opět drážky prvního a třetího řezu. Důraz u tohoto měření byl kladen na oblast co nejbližší řezu, tj. oblast největšího ozáření laserem tak, aby bylo možno posoudit vliv tohoto ozáření na měřené veličiny. Měření mikro-tvrdomosti proběhlo se zatížením 1N s dobou výdrže 10s. Pro posouzení vlivu laserového paprsku na mikro-tvrdomost byla indentace provedena na zkušební vzorku postupně od místa řezu (obr. 10.2) ve vzdálenostech 0; 50; 100; 150; 200; 300; 400; 900; 1900 μm . U některých materiálů bylo dosaženo největší vzdálenosti 900 μm k posouzení neozářeného materiálu.



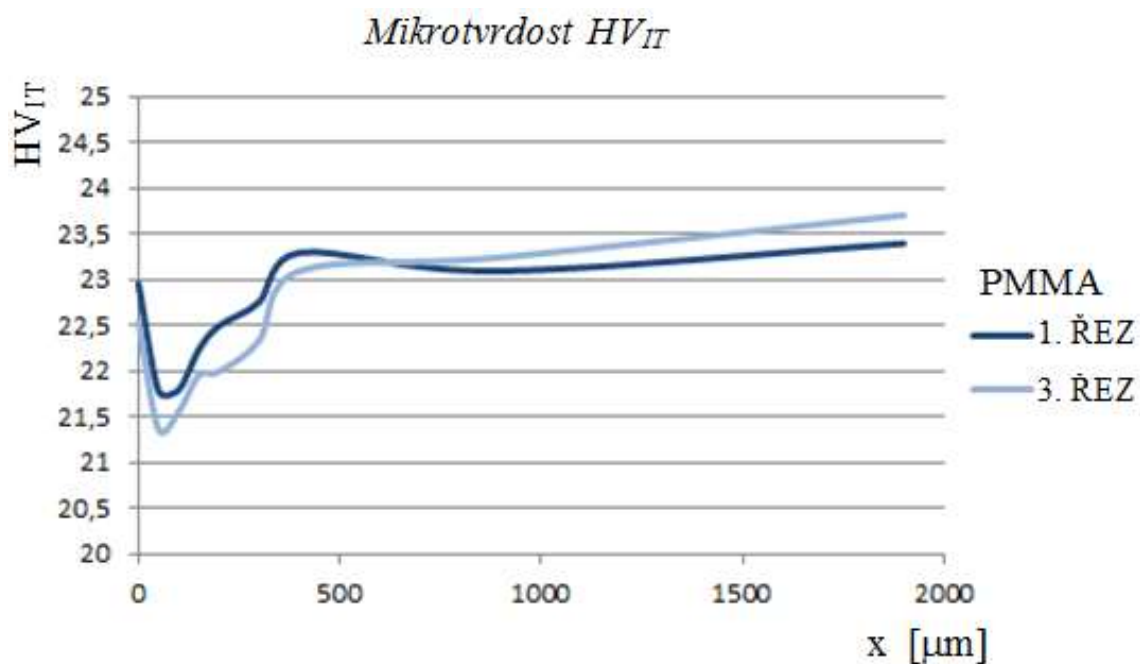
Obr. 10.2: Vzorek pro měření mikro-tvrdomosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT}

Naměřené hodnoty mikro-tvrdomosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT} pro vybrané materiály jsou zpracovány v grafech pomocí Excelu v následujících vyobrazeních.

PMMA



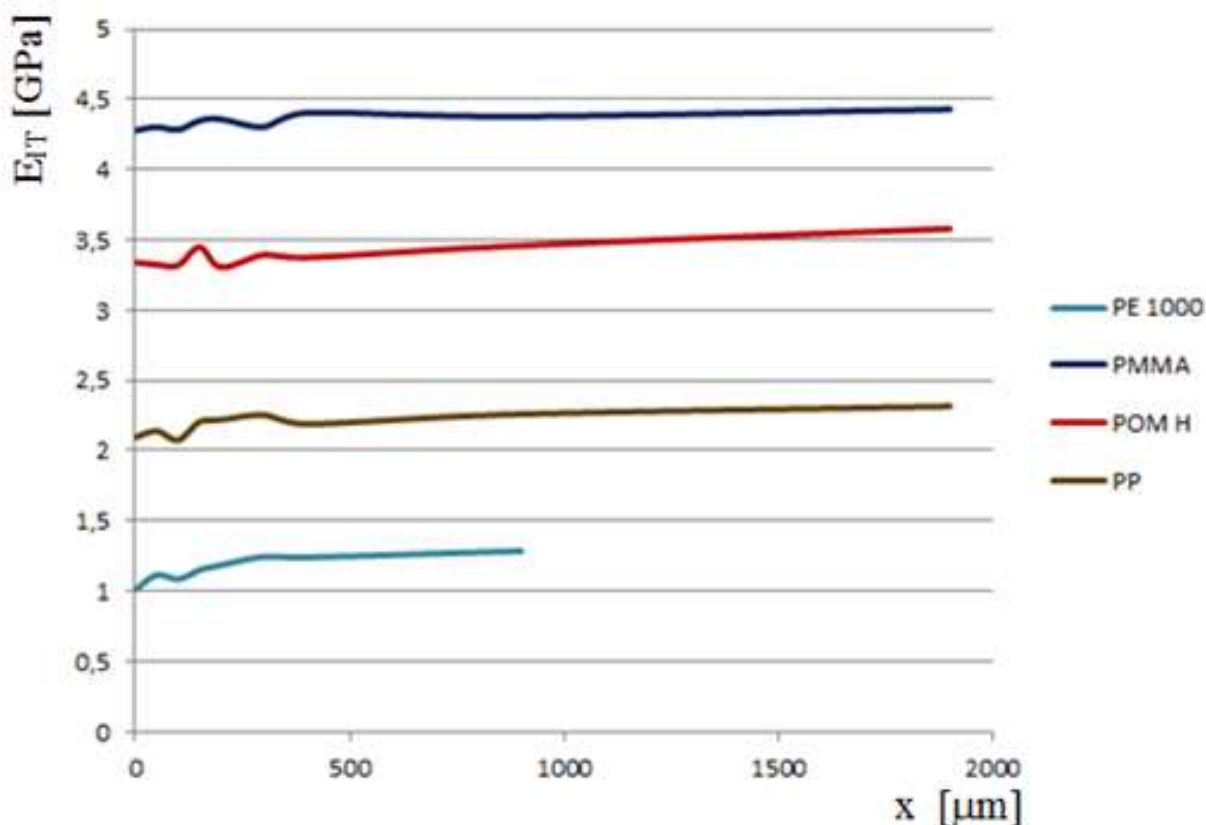
Obr. 10.3: Závislost vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na posuvu indentoru x



Obr. 10.4: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x

Porovnání modulů pružnosti E_{IT}

Pro materiály, PE 1000, PMMA, POM H, PP, které byly pro experiment vybrány, je v následujícím grafu (obr. 10.5) provedeno porovnání naměřených hodnot vtiskového modulu pružnosti E_{IT} v závislosti na posuvu indentoru x . Jednotlivá vyobrazení zástupců materiálu představují aritmetický průměr z měření na 1. a 3. řezu.



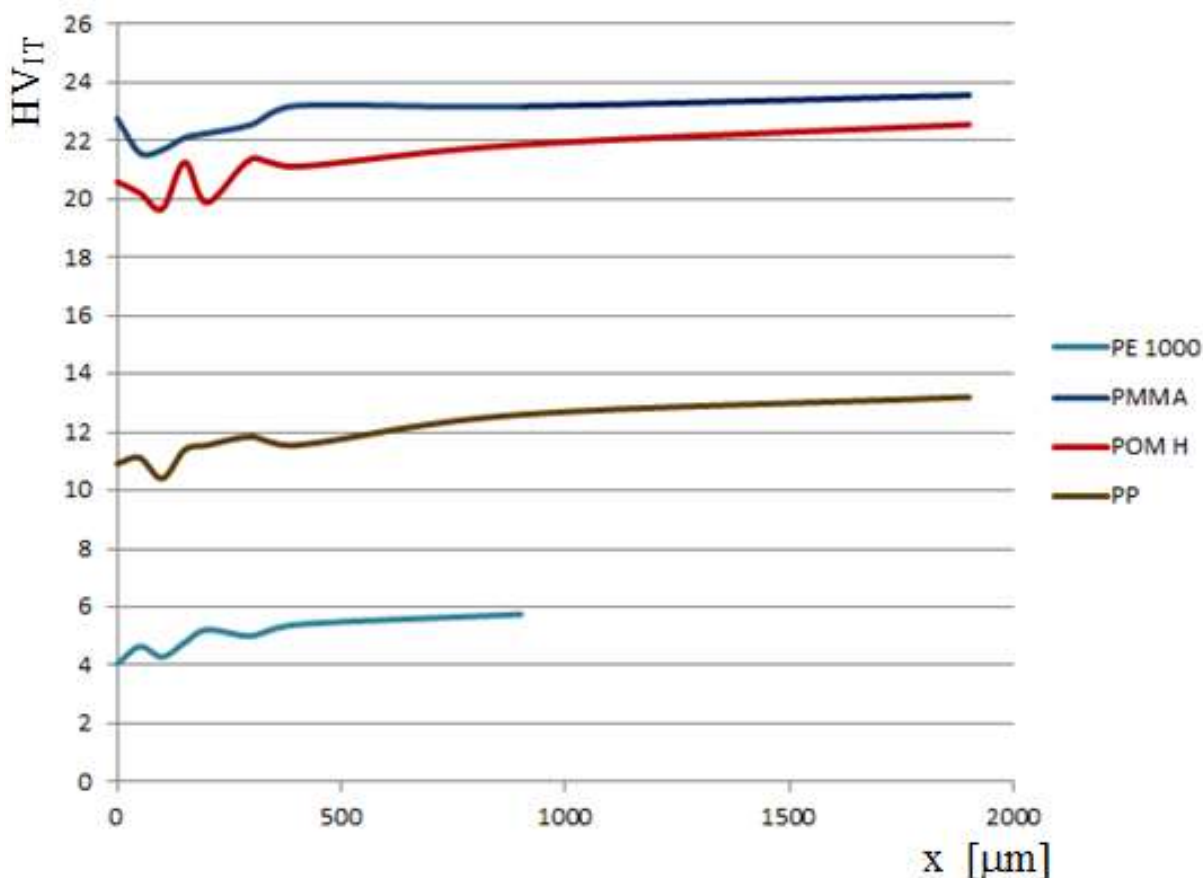
Obr. 10.5: Porovnání vtiskových modulů pružnosti E_{IT} zkoumaných materiálů

U každého materiálu můžeme pozorovat ovlivnění materiálu laserovým paprskem. V oblasti řezu se modul pružnosti snížil v porovnání s výchozím neovlivněným materiálem. S větší vzdáleností od místa řezu se s posuvem indentoru do vzdálenosti x vtiskový modul pružnosti E_{IT} zvýšil, následně pak zůstal nezměněn. Oblast ve vzdálenosti x , kde již nedocházelo ke změně E_{IT} , lze považovat za základní výchozí materiál.

Z vyobrazení lze číst, že nejvyšší E_{IT} bylo naměřeno u materiálu PMMA.

Porovnání mikro-tvrdotí HVIT

Pro porovnání mikro-tvrdoti HV_{IT} jsou v grafu (obr. 10.6) opět vyobrazena měření aritmetických průměrů z 1. a 3. řezu.



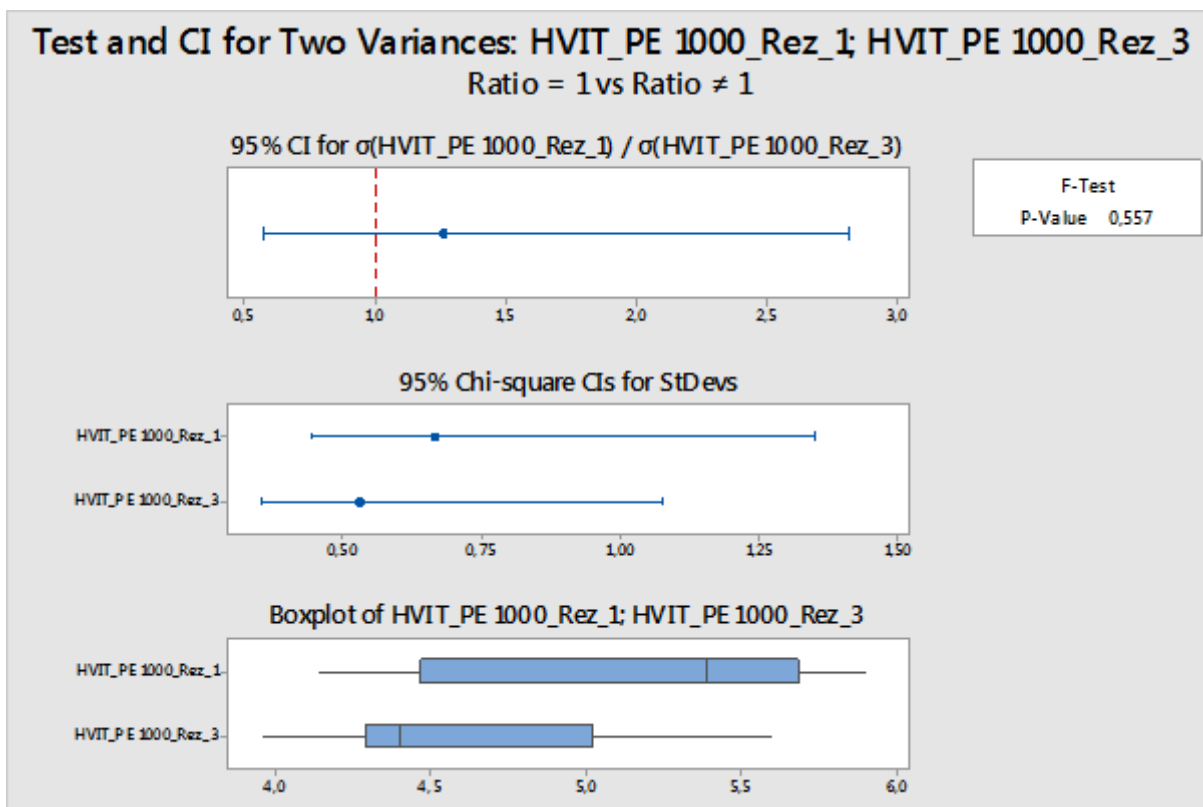
Obr. 10.6: Porovnání mikro-tvrdotí HV_{IT} zkoumaných materiálů

V oblasti ovlivněné laserovým paprskem, blíže k místu řezu, byly zjištěny veličiny mikro-tvrdoti HV_{IT} nižší, než u základního laserovým paprskem neovlivněného materiálu. S větší vzdáleností od místa řezu, se s posuvem indentoru do vzdálenosti x , mikro-tvrdoti HV_{IT} zvyšovaly až do oblasti výchozího materiálu, kde zůstávaly stejné.

10.2 Statistické vyhodnocení mikro-tvrdomosti

Pravdivost naměřených mikro-tvrdomostí HV_{IT} byla ověřena aplikací jednofactorové ANOVY (teorie hypotéz) pro dvě varianty s použitím software Minitab. V první variantě byl posuzován řez 1 versus řez 2 pro materiály PE 1000, PMMA, POM H, PP. Ve druhé variantě byly navzájem posuzovány tyto jmenované materiály.

F – TEST pro HV_{IT} PE 1000 řez 1 vs HV_{IT} PE 1000 řez 3



Obr. 10.7: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000

$$H_0: \sigma^2_{\text{HVIT} - \text{řez1}} = \sigma^2_{\text{HVIT} - \text{řez3}}$$

$$H_a: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

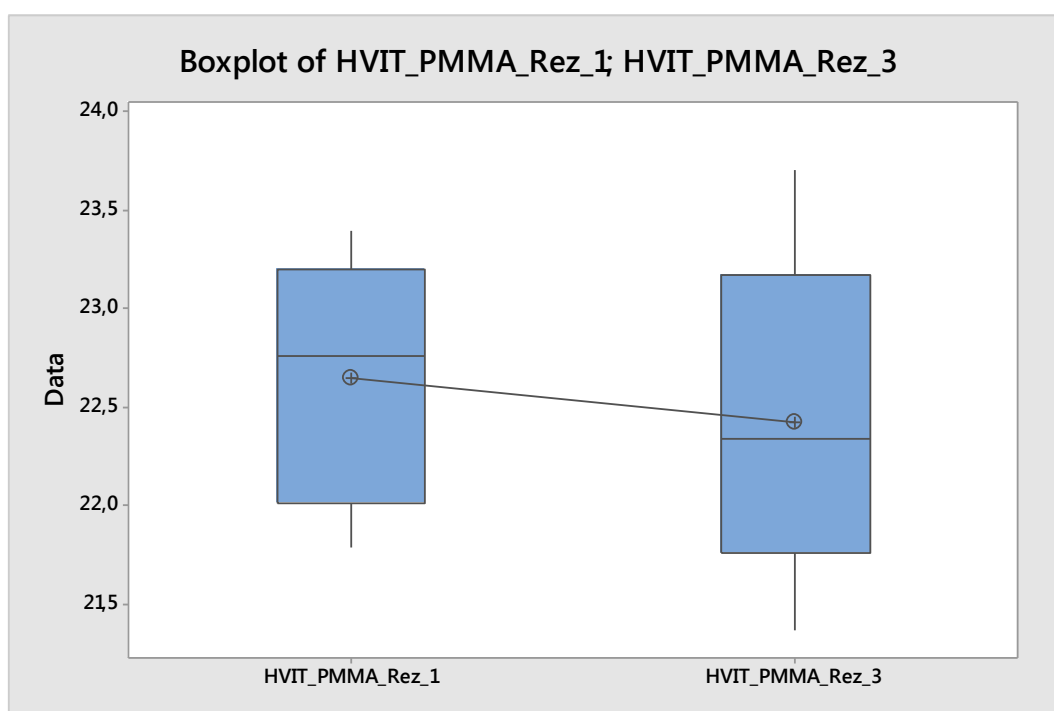
$$p = 0,557 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

Rozptyl mezi 1. řezem a 3. řezem materiálu PE 1000 z hlediska HV_{IT} není statisticky významný.

Oboustranný t – TEST pro HV_{IT} PMMA řez 1 vs HV_{IT} PMMA řez 3

Tabulka 10.2 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA

PMMA	N	Odhad aritmetického průměru	Odhad směrodatné odchylky	Odhad chyby aritmetického průměru
HV_{IT} - řez 1	9	22,650	0,607	0,20
HV_{IT} - řez 3	9	22,426	0,796	0,27
Rozdíl = μ (HV_{IT} - řez 1) - μ (HV_{IT} - řez 3)				
Odhad pro rozdíl			0,224	
95 % interval spolehlivosti pro rozdíl			-0,483; 0,932	
t - test rozdílu $\mu = 0$ (vs \neq)		$t = 0,67$	$P - Value = 0,511$	$DF = 16$
Odhad směrodatné odchylky			0,7077	



Obr. 10.8: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA

$$H_0: \mu_{HVIT - \text{řez}1} = \mu_{HVIT - \text{řez}3}$$

$$H_a: \mu_{HVIT - \text{řez}1} \neq \mu_{HVIT - \text{řez}3}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,511 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

μ parametru HV_{IT} v 1. řezu a μ parametru HV_{IT} v 3. řezu je statisticky nevýznamný.

Pro porovnání mikro-tvrdotí zkoumaných materiálů, PE 1000, PMMA, POM H, PP, v prvním a třetím řezu, metodou nulové hypotézy H_0 s alternativní hypotézou H_a pro index spolehlivosti $\alpha = 0,05$, bylo použito software Minitab ver. 14.0.

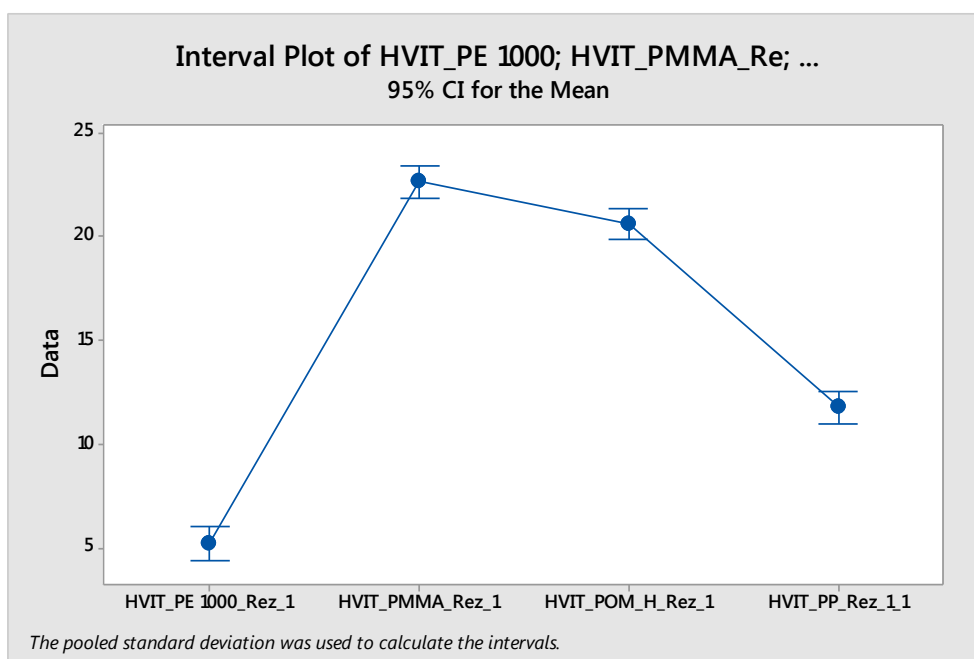
Pomocí jednocestné ANOVY bylo provedeno srovnání různých materiálů z hlediska parametru HV_{IT} :

- a) řezu 1
- b) řezu 3

a) Jednosměrná ANOVA HV_{IT} řezu 1

Tabulka 10.3 Výpočet odchylek HV_{IT} řezu 1

HV_{IT} – řez 1	Stupeň volnosti <i>DF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F - Value</i>	<i>P - Value</i>
Faktor	3	1695,78	565,258	432,31	0,000
Chyba	32	41,84	1,308		
Celkem	35	1737,62			



Obr. 10.9: Porovnání materiálů řezu 1

$$H_0: \mu_{HVIT - \text{řez1-PE 1000}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-PMMA}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-POM H}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-PP}}$$

$$H_a: \text{NON}$$

$$1 - \alpha = 0,95$$

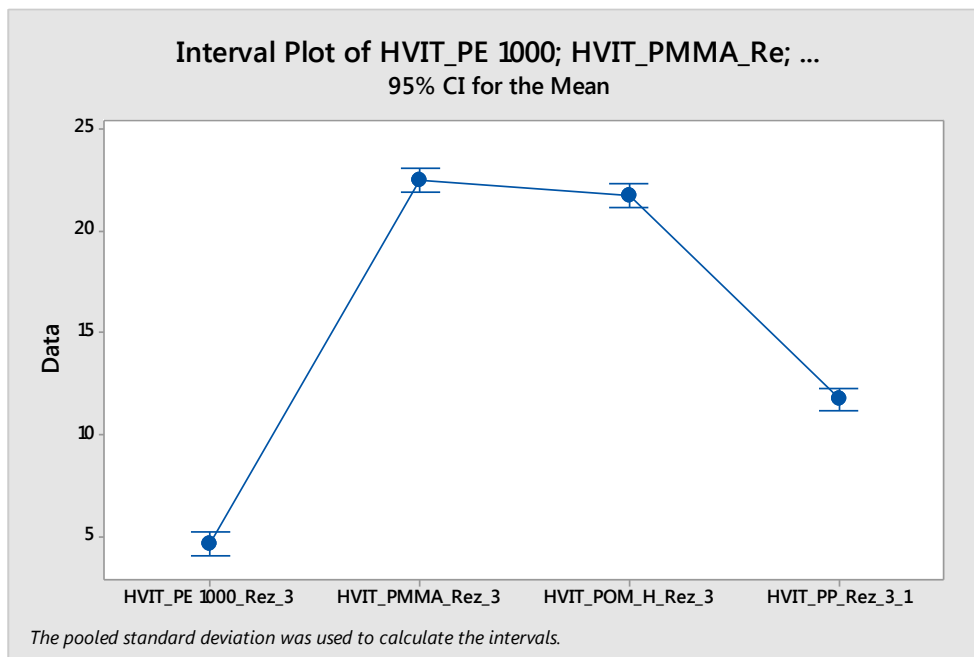
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{zamítám } H_0$$

Průměrná hodnota μ_{HVIT} pro materiál PE 1000, PMMA, POM H, PP se statisticky významně liší v 1. řezu.

b) Jednosměrná ANOVA HV_{IT} řezu 3

Tabulka 10.4 Výpočet odchylek HV_{IT} řezu 3

$HV_{IT} - \text{řez 3}$	Stupeň volnosti <i>DF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F - Value</i>	<i>P - Value</i>
Faktor	3	1865,78	621,972	856,76	0,000
Chyba	32	23,23	0,726		
Celkem	35	1889,01			



Obr. 10.10: Porovnání HV_{IT} materiálů 3. řezu

$$H_0: \mu_{HVIT - \text{řez1-PE 1000}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-PMMA}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-POM H}} = \mu_{HVIT - \text{řez1-PP}}$$

H_a : NON

$$1 - \alpha = 0,95$$

$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{zamítám } H_0$$

Z hlediska **řezů** nedochází k průměrně k statisticky významným rozdílům z hlediska HV_{IT} .

Z hlediska **materiálů** dochází průměrně k statisticky významným rozdílům z hlediska HV_{IT} .

11. TEPLOTNÍ POLE TEPEM OVLIVNĚNÉ OBLASTI MATERIÁLU

Simulace teploty, po průchodu laserového paprsku, uvnitř materiálu a průběhu teplot na povrchu materiálu je řešeno modelováním teplotních polí na principu konečných prvků za použití software COSMOS/M.

Při řešení problému jsme uvážili fakt, že určitá část energie laserového paprsku se realizuje jako jistá hodnota tepelného toku, vstupujícího povrchem zbylé - tuhé části polymeru v místě řezu. Tuhá část je ohraničena teplotou rozkladu (cracking temperature). Opakovanou změnou zadávané hodnoty tepelného toku a následnou analýzou teplotního pole byla maximální teplota v ploše řezu seřízena na již zmíněnou teplotu rozkladu.

Konstanty: hustota materiálu ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], tepelná vodivost materiálu λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], měrná tepelná kapacita materiálu c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] a teplota rozkladu materiálu T_p [$^{\circ}\text{C}$], vstupující do experimentu byly zadávány v závislosti na teplotě se nemění a jsou uvedeny v tabulce 11.1 pro všechny zkoumané materiály.

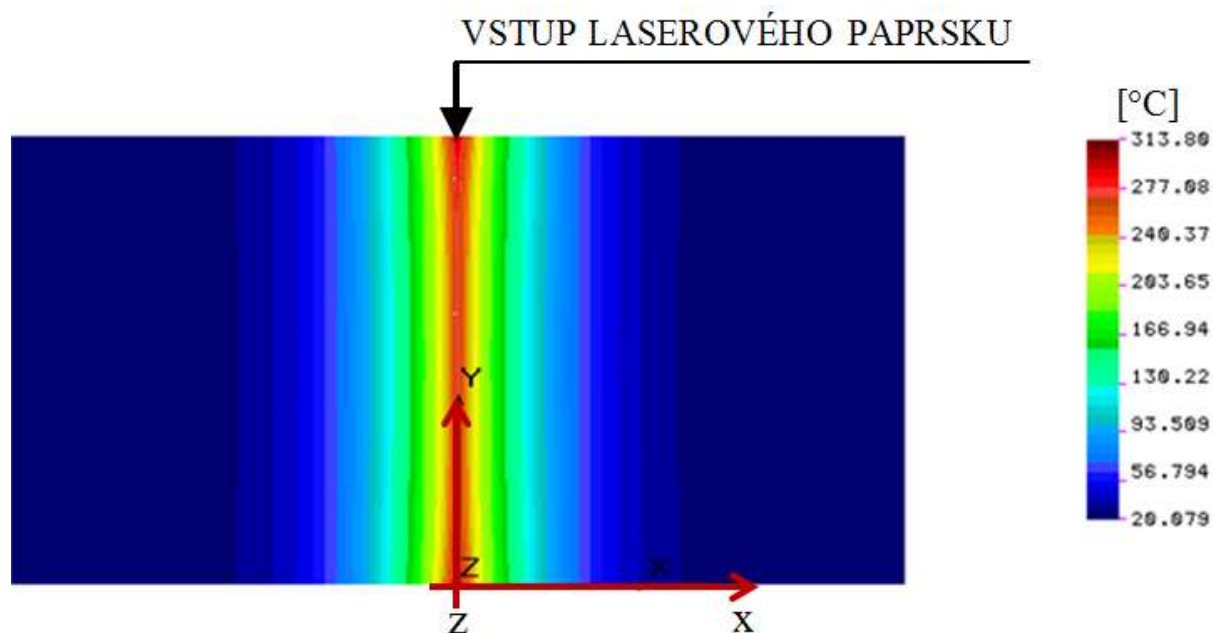
Tabulka 11.1 Fyzikální vlastnosti materiálů

Materiál	POM C	POM H	PP	PMMA	PE 1000
Teplota rozkladu T_p [$^{\circ}\text{C}$]	> 230	> 230	> 260	> 300	> 300
Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1410	1430	940	1180	930
Měrná tepelná kapacita c_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	1370	1465	1500	1465	1750
Tepelná vodivost λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	0,31	0,31	0,4	0,2	0,4
Hloubka drážky / tloušťka mat. [mm]	16 / 16	14,3 / 17	10,3/ 15	15 / 15	6,3/ 15

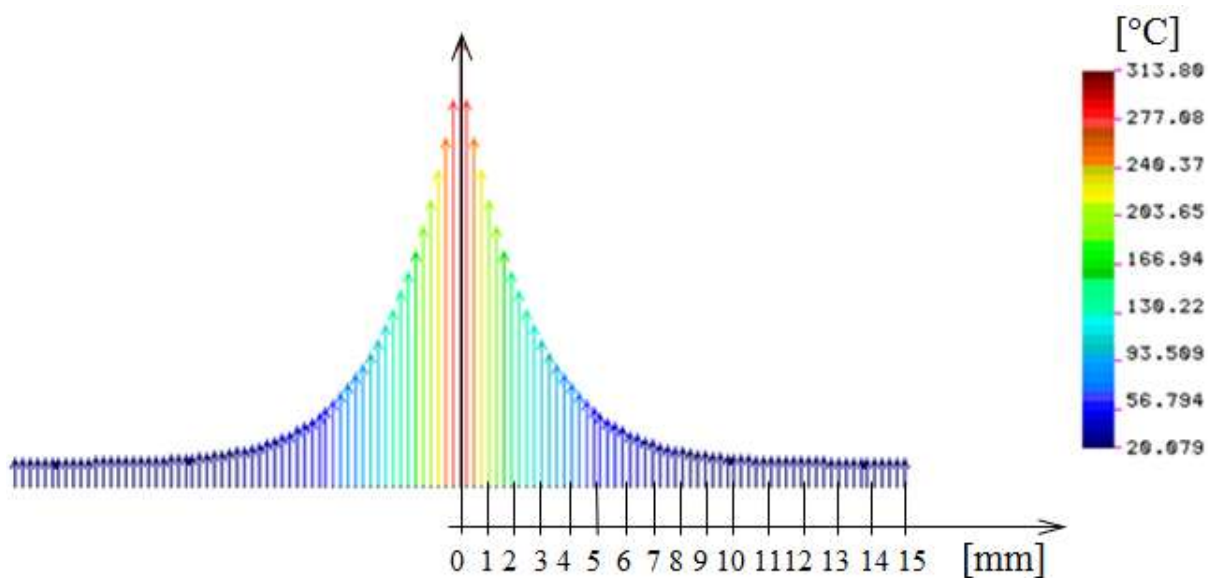
Simulace teplotních polí byla pořízena pouze pro drážku **1** ($P = 100$ W; $f = 15,24$ mm. s^{-1}) u vzorků z materiálu PE 1000, PMMA, POM C, a PP, protože se zde předpokládalo výraznějších změn z důvodu nejpomalejší rezné rychlosti. V příložené výsledné simulaci (obr. 11. 1) je vyobrazeno teplotní pásmo uvnitř

materiálu po průchodu paprsku, kde je šipkou vyznačeno působení laserového paprsku.

PMMA



Obr. 11.1: Teplotní pole materiálu PMMA



Obr. 11.2: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PMMA

Z vykresleného teplotního pole lze pozorovat plochy řezu zasažené laserovým paprskem, z čehož lze usuzovat ovlivnění oblastí laserovým zářením a s tím spojené možné změny související s degradací materiálu a oblast, která již nebyla laserem ovlivněna.

Pomocí simulací teplotních polí můžeme pozorovat průběhy teplot, které se mění se vzdáleností od místa řezu. Dle průběhů teplot, závislých na vzdálenosti od plochy řezu vyobrazených v grafech, lze říci, že ve vzdálenosti 2 mm je teplota již poměrně nízká, z čehož vyplývá, že zde již nedochází k degradaci materiálu. Simulace slouží k vytvoření potenciálních jevů, nejedná se o metodu, ze které by bylo možné zjistit přesné výsledky. Podobně jako z výsledků měření mikro-tvrdomosti můžeme však říci, že oblast možných strukturálních změn je velmi malá.

12. POROVNÁNÍ KVANTITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM

Jak je patrné z předchozích modelů teplotních polí, jsou hodnoty teplot v blízkosti místa řezu velmi vysoké, a tudíž je nutné posoudit vznik možných strukturálních změn v polymerních materiálech.

K tomu byly vybrány dvě metody:

1. Infračervená vibrační spektroskopie
2. Rentgenová difrakční analýza

12.1 Infračervená vibrační spektroskopie

Tato analytická metoda, označována jako FTIR, je nedestruktivní a umožňuje na základě různé interakce infračerveného záření identifikovat a strukturně charakterizovat organické sloučeniny v dané látce. Zároveň se díky této metodě dají stanovit a identifikovat také anorganické látky. Je při tom všeobecně možné analyzovat jak plynné, tak pevné i kapalně látky. Princip této metody spočívá ve zkoumání absorpce IR záření při průchodu materiálem, při kterém dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekul, a to v závislosti na změně dipólových momentů molekul této látky. Každý atom obsažený v molekule vykazuje vibraci kolem své rovnovážné pozice, přičemž frekvence této vibrace je dána hmotou zúčastněných částí a silou vazeb. Frekvence záření tak může v jistých frekvencích rezonovat s molekulárními vibracemi a energie tohoto záření se tak může zároveň absorbovat. Nelze analyzovat ty látky, které neabsorbují IR záření, např. kyslík, dusík, vodík, grafit, síra. [26]

Použitý přístroj Nicolet Avatar 320 ATR FT-IR pracuje s Fourierovou transformací. Označení ATR je zkratka anglického Attenuated Total Reflectance, (zeslabený totální odraz). Hloubka průniku záření do materiálu bývá v rozsahu desetin až jednotek mikrometrů. Pro tyto vlastnosti a princip snímání je tento přístroj vhodný především pro měření kapalin, past, gelů, měkkých práškovitých vzorků a polymerních vrstev.

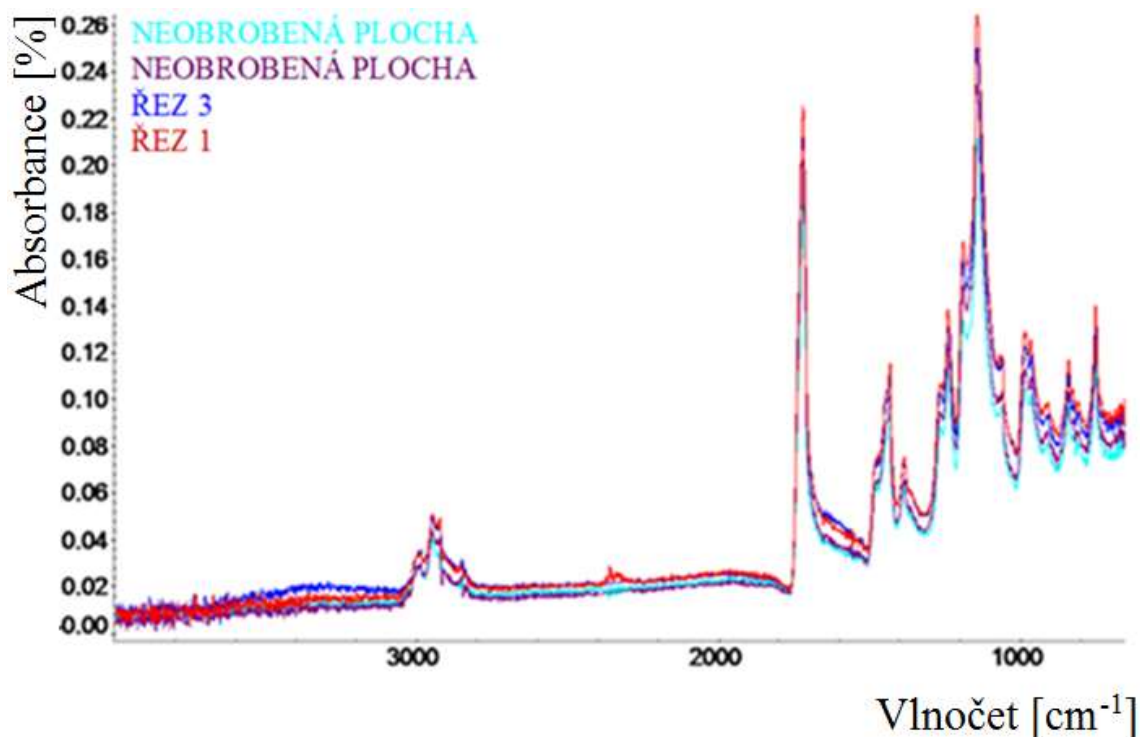


Obr. 12. 1: Nicolet Avatar 320 ATR

Výstupem FTIR analýzy je grafická závislost intenzity (absorbance) infračerveného záření na vlnové délce. Intenzita absorbance se uvádí v procentech, pro vyjádření IR záření se používá vlnočet s jednotkou tzv. reciprokého centimetru, tj. cm^{-1} . Platí, že každá zkoumaná látka má unikátní spektrum, v závislosti na přítomných chemických vazbách, přičemž pro detailní a přesný výzkum bývá využito knihoven spekter, ke kterým není veřejný přístup. [26]

Toto měření bylo provedeno na vzorcích z materiálů PE 1000, PMMA, POM C, POM H, a PP. V grafickém vyjádření představují čtyři křivky, dvě, které vykreslují složení neobrobené plochy a dvě křivky představující stav po ozáření na ploše řezu jedna ($P=100 \text{ W}; f=15,24 \text{ mm. s}^{-1}$) a ploše řezu tři ($P=100 \text{ W}; f=45,72 \text{ mm. s}^{-1}$).

PMMA



Obr. 12.2: Infračervené spektrum PMMA

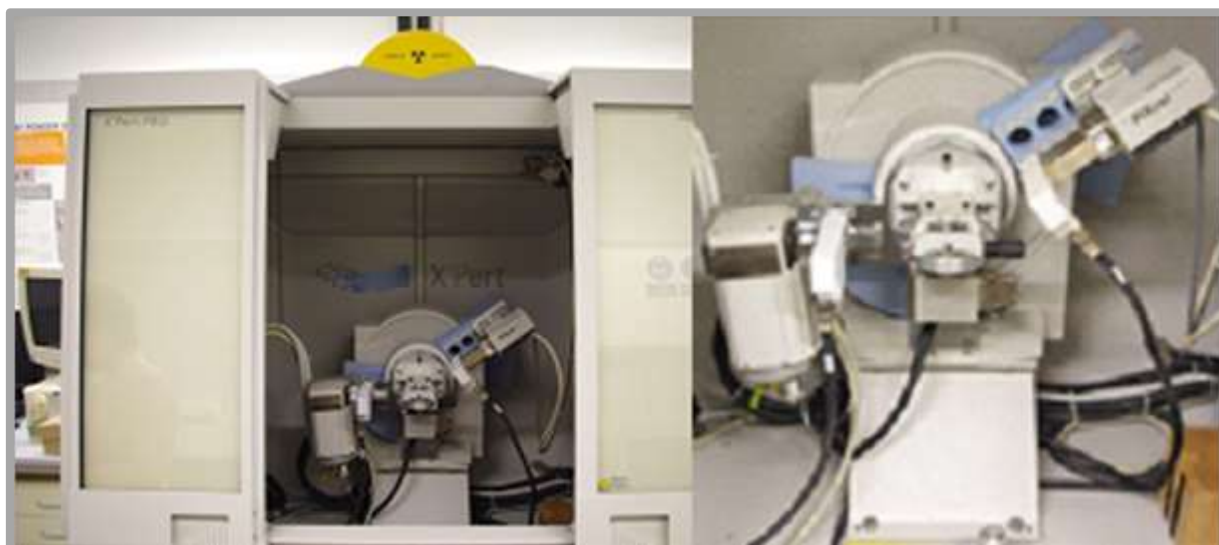
Mírný nárůst červené a modré křivky, v oblasti vlnových délek 3400 až 3200 cm^{-1} , ukazuje na mírný nárůst -O-H vazeb, které vznikly v důsledku degradace polymerního řetězce laserovým obráběním za běžných atmosférických podmínek. Téměř nulové strukturální změny se u amorfního materiálu PMMA mohly předpokládat. [27][28][29][30][31]

Přítomnost -O-H a ketonových vazeb ve vzorku PP představuje degradaci polymerního řetězce. Úbytek $-\text{CH}_2$ vazeb značí rozpad hlavního polymerního řetězce a v případě úbytku vazeb CH_3 se jedná o štěpení boční větve řetězce.

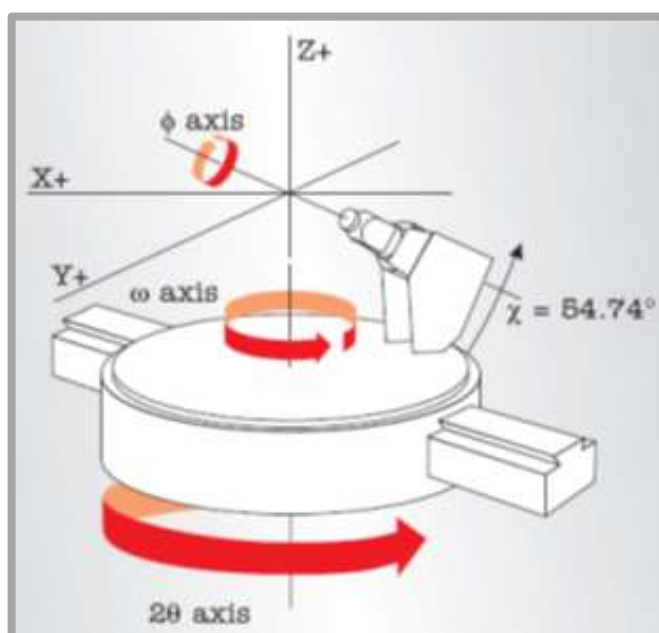
Pomocí infračervené vibrační spektroskopie, bylo zjištěno, že po obrábění laserovým paprskem vzorků z materiálů PE 1000, PMMA, POM C, POM H a PP se určité změny ve strukturách projeví.

12.2 Rentgenová difrakční analýza

Ovlivnění struktury laserovým paprskem z hlediska zkoumání změny krystalické struktury bylo posuzováno také pomocí difraktometru PANalytical X'Pert PRO. Jedná se o zařízení, které je schopno, pomocí rentgenového záření, vykreslit rozptyl ve vysoké kvalitě, na elektronech krystalické hmoty, s vysoce monochromatickým paprskem, s velmi přesně definovanou vlnovou délkou. Geometrie uspořádání je tzv. Bragg-Brentanova, kdy vzorek je umístěný uprostřed kruhu, kolem jehož obvodu se plynule pohybuje zdroj RTG záření i jeho detektor (obr. 5.14). [31] [32]



Obr. 12.3: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO



Obr. 12.4: Schéma difraktometru [33]

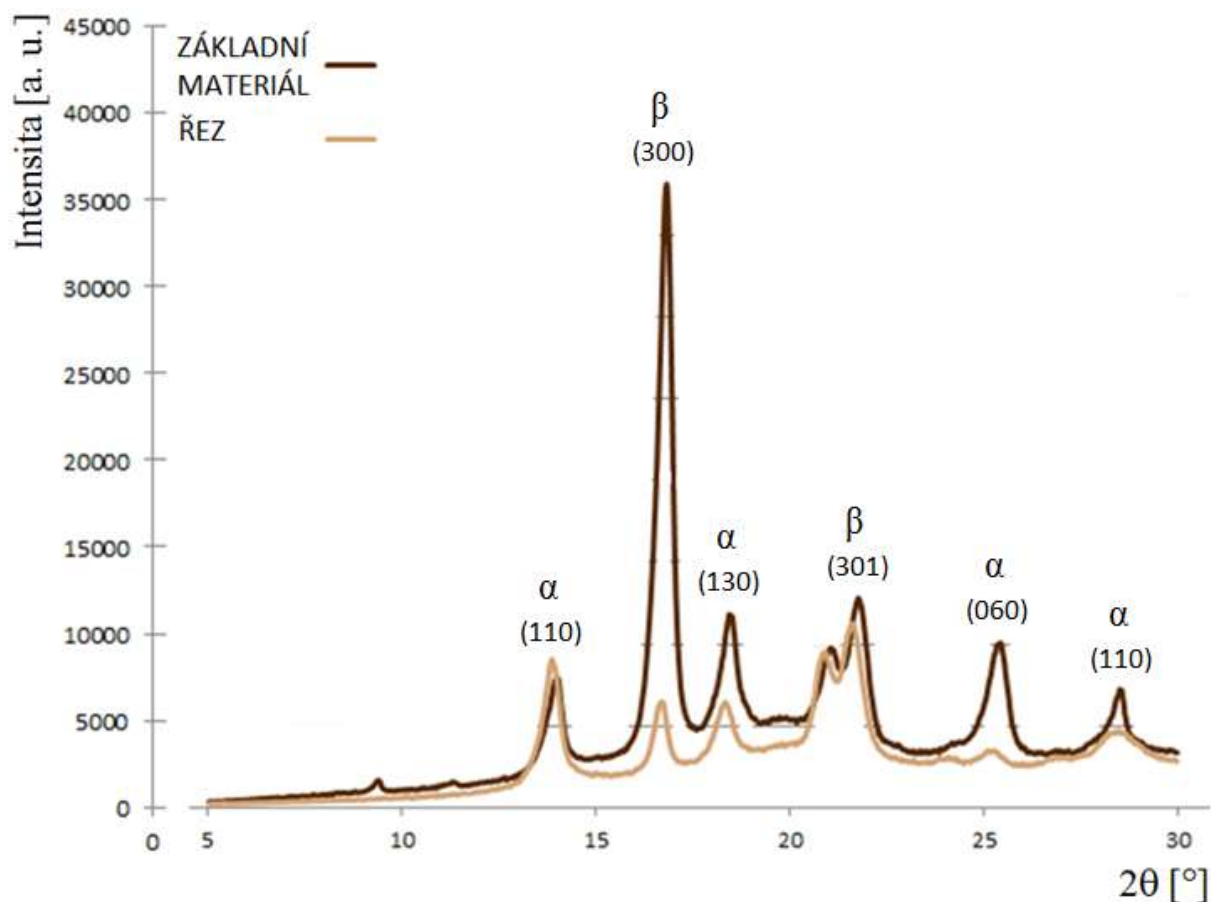
Každé měření bylo provedeno při napětí 40 kV a proudu 30 mA u vzorků materiálů PE 1000, POM C, POM H a PP. Amorfnní PMMA do tohoto experimentu nebyl zařazen z důvodu pro tento materiál RTG nevhodné metody. V grafech jsou vyobrazeny různými barvami jednotlivé materiály, které odpovídají příslušné drážce dle označení. Tmavší barva představuje vždy základní neozářený materiál a světlejší barvou je vykreslen difraktogram ozářené plochy řezu. Rozbor krystalických možných změn ve strukturách zkoumaných vzorků byl proveden z grafů, v nichž je vynesena závislost absorpce záření smluvní hodnotou $a \cdot u$ na hodnotách úhlů natočení 2θ [°].

Experiment byl prováděn na všech výše zmíněných materiálech, vždy v ploše řezu drážky 1 ($P = 100 \text{ W}$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), tzn. v místě maximálně ozářeného materiálu. Poté byla plocha řezu porovnávána se základním materiálem (neozářenou plochou) výchozího složení. Vzorky bylo potřeba rozdělit řezáním na velmi úzké komponenty (obr. 1.5) tak, aby nedošlo k ovlivnění původního složení základního neobrobeného materiálu.



Obr. 12. 5: Vzorek zkoumaného materiálu

PP



Obr.: 12.6 RTG difrakční snímek PP

Difrakční analýzou bylo zjištěno, že u PP je základní materiál semikrystalický z 69,32%. Ozářená plocha v místě řezu představuje menší pokles složky krystalické na 68,44%, tedy nastalo snížení krystalinity přibližně o 0,9%.

Rozbor, který byl proveden pomocí RTG difraktometru, potvrdil u PP schopnost polymorfie. [13]

Z hlediska polymorfie PP se dá očekávat krystalizace ve fázi monoklinické, označované α, hexagonální β a triklinické γ. [37][38]

Po laserovém obrábění se projevilo zvýšení obsahu monoklinické fáze α o 8% na úkor hexagonální fáze β, přičemž v neobrobeném základním (neozářeném) materiálu byla původně ve větším množství zastoupena fáze β.

Změna podílu α a β fází je možná při splnění termodynamických podmínek rekrytalizace. V případě ozáření laserem je možno předpokládat vliv zvýšené teploty a následného pomalého chlazení vhodného pro růst α modifikace.

Přítomnost α či β fáze byla vypočtena jako plocha pod křivkou adekvátního podílu po odečtení amorfního pozadí.

V tabulce tab. 12.2 jsou uvedeny údaje týkající se zastoupení fází neozařeného základního materiálu, ve kterém je fáze β cca 65%. U polypropylénu se jedná o běžný jev, pokud nebylo do materiálu při výrobě dodáno nukleační činidlo, které by mohlo modifikaci změnit.

Tabulka 12.1 Rozbor obsahu fází semikrystalického podílu základního materiálu

PP	α	β	α	β	β	α	α
Nastavení 2θ [°]	13,8	16,8	18,4	21, 2	21,7	25,4	28,5
Maximální intenzita [a. u.]	4739	33472	6975	4822	9743	6453	3069
Area	4692	19761	8319	8360	7234	4816	1471
PP základní materiál							
Fáze	α		β		Celkem		
Area	19298		35355		54653		
Obsah [%]	35,31		64,69		100		

V tabulce 12.3 na straně 118 jsou uvedeny údaje týkající se zastoupení fází ozářeného materiálu v místě řezu 1. V ozářeném stavu polypropylén obsahuje β fáze 55 %. Pomocí RTG difraktografie bylo zjištěno, že ozářený PP obsahoval nižší hodnoty β (hexagonální) fáze přibližně o 10%, což vedlo ke zvýšení obsahu modifikace α (monoklinické) fáze.

Tabulka 12.2 Rozbor obsahu fází semikrystalického podílu ozářeného materiálu

PP	α	β	α	β	β	α	α	α
Nastavení 2θ [°]	13,9	16,7	18,3	22	21,6	24	25,2	28,5
Maximální intenzita[a. u.]	6966	3866	3675	7467	4658	359	813	1687
Area	5475	3206	5139	10817	2215	540	517	1752
PP řez 1								
Fáze	α		β		Celkem			
Area	13423		35355		29661			
Obsah [%]	45,25		54,75		100			

13. VYHODNOCENÍ

13.1 Laserová obrobitelnost

Hloubkou řezu je definována „laserová obrobitelnost.“ Za použití řezné rychlosti $533 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonu 24 W (viz tab. 8.2, str. 34), bylo největší hloubky $248 \mu\text{m}$ dosaženo u materiálu PMMA.

Pokud jde o materiál PMMA, lze říci, že při delší době působení ozáření (nižší rychlostí posuvu) došlo k nejmenšímu množství odstraněného materiálu i při proměnné intenzitě laserového paprsku (změnou výkonu). Jakmile byla řezná rychlost na maximální hodnotě, hloubky se u PMMA snížily a nejvyššího odebrání materiálu bylo dosaženo u POM. Hloubka vytvořená 12 W výkonem laseru byla $42 \mu\text{m}$, resp. $95 \mu\text{m}$ při 24 W .

Nejhorších výsledků bylo dosaženo u materiálů PTFE, PC, PA66 a PA. Množství odstraněného materiálu bylo malé, a zároveň se u obrobeného povrchu projevila, pouhým okem spatřitelná, velmi nízká kvalita povrchu, nebo se vyskytovala ohořelá místa na spodní straně obráběných ploch.

13.2 Drsnosti obráběných ploch

U materiálu PMMA bylo dosaženo u první drážky, vytvořené nižší řeznou rychlostí ($p = 100 \text{ W}$, $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) než u drážky 2 a 3, nejlepších drsností (R_a , R_z). Pomalejší řeznou rychlostí bylo docíleno, jak ukazuje tabulka porovnání drsností 16.1, kvalitnějšího povrchu. Můžu zde hovořit o úměře mezi řeznou rychlostí a drsností obrobené plochy.

Tabulka 13.1 Porovnání drsností obrobených ploch

	PMMA	PE 1000	POM C	POM H	PP
	DRSNOST [μm]				
$R_{a\check{R}EZ-1}$	0,414	0,501	1,000	2,645	2,000
$R_{a\check{R}EZ-3}$	0,777	0,000	1,343	2,694	0,490
$R_{z\check{R}EZ-1}$	1,61	2,489	5,000	10,555	10,000
$R_{z\check{R}EZ-3}$	2,907	2,000	5,595	11,609	2,461

Povrch řezu u **PE 1000** byl zateklý materiálem, který se nestihl odpařit a proto v řezu i částečně zatuhl, o čemž svědčí i hodnoty naměřených drsností (tab.

16.1). Obrobený povrch není vhodný pro posuzování kritériem, kterým je drsnost povrchu.

U materiálu **POM C** lze z tab. 16.1 vyčíst, že při zvýšení rychlosti dojde ke zhoršení jakosti povrchu.

Pro materiál **POM H** je průměrnou hodnotou drsnosti Ra 2,645 μm v místě řezu 1 a Ra 2,694 μm v místě řezu 3, což představuje nepatrný rozdíl v jakosti povrchu. Změna řezné rychlosti z $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$ na $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ nemá významný vliv na drsnost obrobené plochy.

PP byl z hlediska posouzení vlivu posuvu na drsnost povrchu vyřazen, neboť při nižší řezné rychlosti nedocházelo k proříznutí vzorku a při zvýšené řezné rychlosti, stejně jako PE 1000, došlo k roztečení materiálu.

13.3 Vyhodnocení mikro-tvrdomosti

Pro posouzení komplexního mechanického chování materiálu byly provedeny u vybraných vzorků zkoušky vtiskového modulu pružnosti E_{IT} a mikro-tvrdomosti dle Vickerse HV_{IT} .

Hodnoty modulu pružnosti se v místě řezu zmenšily v důsledku působení laserového paprsku a s rostoucí vzdáleností od této plochy se E_{IT} postupně zvyšuje. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší hodnoty vtiskového modulu pružnosti vykazuje materiál PMMA, za ním následuje POM H pak PP a jako poslední PE 1000 (viz tab. 13.2, str. 69).

Z hlediska posouzení výsledků měření mikro-tvrdomosti se ukázalo, že hodnoty HV_{IT} , v těsné blízkosti obráběné plochy, jsou nižší než u základního (neozářeného) materiálu. S posuvem indentoru směrem od místa řezu se mikro-tvrdomost postupně zvyšuje (viz tab. 13.2, str. 69).

Změny mikro-tvrdomosti a modulu pružnosti, u polymerních materiálů, v souvislosti s laserovým obráběním, nejsou příliš výrazné. Ve srovnání s ocelí však mají průběh změn odlišný a s výrazně nižšími charakteristickými veličinami.

Tabulka 13.2 Porovnání HVIT a EIT

	PMMA	PE 1000	POM H	PP				
MIKROTVRDOTI ŘEZ 1								
x [μm]	x_0	1900	x_0	200	x_0	1900	x_0	1900
HV_{IT-1}	22,96	23,40	1,02	5,65	20,29	22,40	11,54	13,40
MIKROTVRDOTI ŘEZ 3								
x [μm]	x_0	1900	x_0	900	x_0	1900	x_0	1900
HV_{IT-3}	22,54	23,71	1,00	5,60	20,88	22,70	10,30	13,00
MODUL PRUŽNOSTI ŘEZ 1								
x [μm]	x_0	1900	x_0	200	x_0	1900	x_0	1900
E_{IT-1} [GPa]	4,24	4,41	1,02	1,31	3,31	3,54	2,09	2,33
MODUL PRUŽNOSTI ŘEZ 3								
x [μm]	x_0	1900	x_0	900	x_0	1900	x_0	300
E_{IT-3} [GPa]	4,32	4,45	1,00	1,25	3,37	3,62	2,10	2,33

13.4 Teplem ovlivněné oblasti materiálů

Simulace teplotních polí ukazuje, že oblast, ve které může dojít ke změnám ve struktuře materiálu vlivem teploty, je pouze v těsné blízkosti místa řezu. Je zde zřejmá podobnost v charakteru, zejména ve tvaru, velikosti, uspořádání a rozložení teplotního pole pro určité typy polymerních materiálů, (např. POM H a POM C). Vliv na průběh a velikost teplotního pole je definována především teplotou tepelného rozkladu polymerů, kterou mají tyto materiály velmi podobnou.

Dle průběhů teplot, závislých na vzdálenosti od plochy řezu, vyobrazených v grafech (obr. 12.1 – obr. 12.8 str. 99-102), se projevilo, že ve vzdálenosti 2 mm je teplota již poměrně nízká, z čehož vyplývá, že zde již nedochází k degradaci materiálu. Oblast možných strukturálních změn je velmi malá.

13.5 Porovnání kvantitativních změn po průchodu laserového svazku materiálem

Analýzou pomocí infračervené vibrační a rentgenové spektroskopie byly ve zkoumaných materiálech zjištěny jisté strukturální změny.

14.5.1 Infračervená vibrační spektroskopie

V ozářeném materiálu **PE 1000** se projevil, v oblasti vlnové délky 1740 cm^{-1} , nárůst absorbance, což představuje přítomnost **-C=O** vazeb. V oblasti peaku vlnové délky 3360 cm^{-1} představuje nárůst absorbance vznik **-O-H** vazeb.

U amorfního materiálu **PMMA** se dalo předpokládat, že k nějakým výrazným změnám ve struktuře nedojde. V oblasti vlnových délek 3400 až 3200 se projevil nárůst **-O-H** vazeb, které vznikly v důsledku vniknutí nepatrného množství kyslíku do materiálu.

U materiálu **POM C** byla zjištěna přítomnost **-C=O** vazeb na vlnové délce 1740 cm^{-1} .

U materiálu **POM H**, na vlnové délce 1740 cm^{-1} se ve struktuře materiálu projeví, stejně jako u **POM C**, **-C=O** vazby a v oblasti vlnové délky 3320 cm^{-1} **-O-H** vazby.

Z vykreslených křivek grafu, závislosti absorbance záření na vlnové délce, a z knihoven spekter, se u materiálu **PP** projeví **-CH₃** vazby pod hodnotou vlnové délky 3000 cm^{-1} a v těsné blízkosti pod touto vlnovou délkou vazby **-CH₂**. V oblasti kolem peaku kolem hodnot vlnové délky došlo k nárůstu **-O-H** vazeb.

14.5.2 Rentgenová RTG difrakční analýza

Pomocí difraktometru byly zjištěny změny obsahu krystalických podílů fází v základním materiálu a v materiálu po ozáření jak ukazuje následující tabulka (tab. 13.3 str. 71).

RTG difrakční analýza u všech zkoumaných semikrystalických polymerů ukázala na snížení krystalického podílu ozářením vzorků, což je možno vysvětlit degradací řetězců, v souladu s FTIR analýzou. V případě amorfního **PMMA** tato metoda není vhodná.

Tabulka 13.3 Změny krystalických podílů

	PE 1000	POM C	POM H	PP
	Krystalický podíl [%]			
Základní materiál	75,52	73,02	68,74	69,32
Řez 1	73,03	65,56	77,12	68,44
Snížení krystalinity	2,49	7,46	8,38	0,88

V případě PP se po laserovém obrábění projevilo zvýšení obsahu monoklinické fáze α na úkor hexagonální fáze β , přičemž v neobrobeném základním (neozářeném) materiálu byla původně ve větším množství zastoupena fáze β .

Pomocí difraktografie bylo zjištěno, že ozářený PP obsahoval nižší hodnoty β (hexagonální) fáze asi o 10% jak ukazuje tabulka 13.4, což vedlo ke zvýšení obsahu modifikace α (monoklinické) fáze, umožněného termo-dynamickými podmínkami laserového obrábění, což je v souladu se simulací teplotního pole.

Tabulka 13.4 Porovnání obsahu fází semikrystalického podílu pro PP

PP základní materiál			
Fáze	α	β	Celkem
Area	19298	35355	54653
Obsah [%]	35,31	64,69	100
PP řez 1			
Fáze	α	β	Celkem
Area	13423	35355	29661
Obsah [%]	45,25	54,75	100

Infračervená vibrační spektroskopie potvrdila konstituční změny řetězců, v tomto případě předpokládaného degradačního charakteru. Pokles tvrdosti může být spojen s degradací polymerních řetězců.

Nejvhodnějšími materiály pro obrábění laserem CO₂ se jeví materiály PMMA a POM.

14. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

Předpokládané přínosy pro vědu a praxi jsou následující:

- Rozbor LBM nekonvenčních technologií
- Shrnutí LBM technologických parametrů ovlivňujících integritu povrchu po obrábění CO₂ laserem jako levnější varianty excimerových a UV laserů (nižší provozní náklady, nižší pořizovací cena, avšak nižší výsledná kvalita)
- Vymezení technologických možností CO₂ laseru
- Detailní studium povrchu vzniklého LBM řezáním, experimentální ověření teoretických poznatků

Hlavním přínosem řešené problematiky je tady na základě výše vymezených poznatků vytvoření modelu laserového obrábění aplikovatelného v praxi, který dokazuje možnost aplikace CO₂ laseru pro obrábění mikrodrážek a podobných entit do polymerních materiálů za exaktního řízení tvarů, rozměrů a kvality povrchu.

ZÁVĚR

Na obrobeném povrchu jsou ve velké míře závislé užité vlastnosti výrobků. V různých podmínkách nabývají mimořádný význam specifické vlastnosti výrobků, jako je jejich odolnost proti opotřebení, citlivost ke koncentraci napětí, odolnost proti porušení při statických, rázových či střídavě cyklických zatíženích a další.

Nositelem vyjmenovaných vlastností je jejich povrch. Význam vhodného povrchu se projevuje zejména tam, kde vzájemná vazba funkčních ploch významně ovlivňuje charakter nějakého fyzikálního procesu. Při definování a optimalizaci těchto vazeb je zapotřebí pečlivě zvažovat obrobené povrchy ve vztahu k jejich budoucí funkci.

Funkčnost povrchu ve velké míře závisí na tom, jak byl daný povrch vyroben. Lze tedy konstatovat, že každý obrobený povrch tvoří výstup metody určitého výrobního systému. V posledních letech se dostává do popředí nová vědní oblast, sledující vliv jednotlivých technologií, parametrů a podmínek obrábění na jakost a funkčnost obrobených povrchů, tzv. technologická dědičnost. Jedná se o soubor charakteristik, které určují stav obrobeného povrchu, tj. formují jeho funkčnost.

Za nejvýznamnější a nejčastější sledované jakostní ukazatele, podle kterých se posuzuje technologická dědičnost obrobených povrchů je možno považovat:

- makro-geometrii a mikro-geometrii
- změny fyzikálně-mechanických vlastností
- zbytkové napětí pod obrobeným povrchem
- fyzikálně-chemický stav povrchu

[39]

V souvislosti s výše jmenovanými kritérii se tato práce zabývá studiem integrity povrchů obráběných laserovým paprskem, napomáhá k hodnocení vlivů pracovních podmínek na polymerní materiály.

Cílem práce bylo:

1. Stanovení laserové obrobitelnosti v závislosti na technologických parametrech
2. Měření drsnosti obráběných ploch laserem
3. Měření tvrdosti
4. Modelování teplotního pole po průchodu koncentrované energie záření
5. Posouzení možných strukturálních změn

Experimentální obrábění vzorků bylo provedeno na CO₂ laseru pro porovnáání kvality obráběných ploch při různých technologických parametrech.

ad. 1) Laserová obrobitelnost byla stanovena v závislosti na technologických parametrech *hloubkou drážky* vytvořenou laserovým paprskem. Byly určeny materiály s nejlepší „laserovou obrobitelností“. S měnicími se procesními podmínkami se měnila nejen dosažená hloubka drážky, ale i vhodnost jednotlivých materiálů pro obrábění. Některé výsledky, zvláště u nižších výkonů laseru, poukazují na velmi těžkou obrobitelnost materiálu, a tedy pro laserové aplikace nepoužitelné.

Pomocí teorie hypotéz bylo prokázáno, že je možné odmítnout hypotézu, že ze statisticky významného hlediska neexistuje žádná interakce mezi řeznou rychlostí f a výkonem P na laserovou obrobitelnost definovanou hloubkou drážky.

ad. 2) Měření drsnosti ploch obráběných laserem bylo provedeno systémem snímání topografie povrchu, který dokáže přesně určit parametry výsledné plochy. Zobrazení těchto parametrů ve 2D a 3D umožňuje získat reálnou představu o jakosti. Současně byly kontrolovány veličiny drsnosti Ra a Rz . Tento ukazatel výskytu nerovností je natolik vypovídající, že nám poskytne kompletní přehled celé struktury měřené délky. Limitující faktory měření neumožnily provést výzkum u všech materiálů. Z hlediska posouzení vlivu posuvu a výkonu laserového paprsku na **drsnost** povrchu z naměřených hodnot **Ra a Rz** vyplynula úměra mezi řeznou rychlostí a drsností obroběné plochy. Nejnižších hodnot drsnosti, bylo dosaženo u materiálu PMMA.

ad. 3) Měření tvrdosti, v souvislosti s komplexním vyhodnocením mechanického chování materiálu po obrábění LBM, byly zjišťovány možné změny v hodnotách mikro-tvrdosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT} . Změny v hodnotách mikro-tvrdosti se v materiálech projeví v těsné blízkosti plochy řezu. Tyto změny však nebyly nijak výrazné. Na rozdíl od ocelí, kde se působením laserového paprsku tvrdost zvyšuje, však došlo u polymerních materiálů ke snížení hodnot mikro-tvrdosti.

Výsledky měření tvrdosti byly statisticky ověřeny pomocí jednosměrné ANOVY. Bylo provedeno porovnání různých materiálů z hlediska řezu 1 a řezu 3 pro vyhodnocení HV_{IT} a E_{IT} . Potvrdilo se, že z hlediska *porovnání řezů* (1 a 3) nedochází k průměrně statisticky významným rozdílům HV_{IT} . Z hlediska *porovnání různých materiálů* dochází k statisticky významným rozdílům HV_{IT} .

ad. 4) Modelováním teplotního pole po průchodu koncentrované energie záření, byly zkoumány možné strukturální změny v materiálech po ozáření LBM paprskem. Z grafických závislostí průběhu teplot na vzdálenosti od místa řezu bylo potvrzeno, že se jedná o velmi malou oblast v blízkosti řezu, podobně jako u mikro-tvrdosti.

ad. 5) Posouzení možných strukturálních změn ve zkoumaných materiálech (PE 1000, PMMA, POM C, POM H a PP) bylo provedeno za použití infračervené vibrační spektroskopie FTIR a rentgenové difrakční analýzy. Pomocí spektroskopie FTIR byly změny ve strukturách, po obrábění laserovým paprskem potvrzeny. Strukturální RTG difrakční analýza u všech zkoumaných semikrystalických polymerů ukázala na snížení krystalických podílů ozářením vzorků, což je možno vysvětlit degradací řetězců.

Nejvhodnějšími materiály pro obrábění laserem CO_2 se jeví materiály PMMA a POM. Výsledné struktury mohou být velmi přesné. Vysoká kvalita povrchu je závislá na parametrech laseru a druhu obráběných materiálů. Největším problémem je přeměna nezpracovaného materiálu zpět do pevného stavu. Tento jev způsobuje zhoršení jak přesnosti rozměru, tak kvality povrchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci, frézování III*, pp. 95-102, ISBN 80-214-2436-2, (2003), VUT FSI v Brně.
- [2] KOCMAN, K., BUMBÁLEK, B. a kol.: 2002, *Typologie povrchu ploch dokončených vysoce přesnými metodami obrábění*. VZ ÚST-FSI, VUT Brno.
- [3] MORÁVEK, R. *Nekonvenční metody obrábění*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [4] Maňková, Ildikó. *Progresívne technológie*. Vienala Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] *Laserové technologie v praxi* [online]. LAPŠANSKÁ, Hana. Univerzita Palackého v Olomouci, 2010 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [6] GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. Bratislava: Slovenská technická Univerzita, 2013. ISBN 9788022739979.
- [7] *Resin transfer moulding* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: http://www.nuplex.com/composites/getmedia/e8e6ac3a-e002-4189-ba1e-52e1ac8321f7/Process_resintransfermolding?width=400&height=233
- [8] *Laser Systems for Optical Microscopy* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z:
- [9] *Seriál na téma lasery - Hlavní typy laseru používaných v průmyslu* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [10] *Interakce laserů s materiálem* [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2009/C6251/lasery_L1_1.ppt
- [11] *Co rozhoduje při volbě typu laseru* [online]. RÜTERING, Marus. 2011 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
- [12] *Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání* [online]. KOŘÁN, Pavel. 2012 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>

- [13] L. LAPČÍK, M. RAAB. *Nauka o materiálech II*. Učební texty vysokých škol, UTB – Academia centrum Zlín. UTB, 2004.
- [14] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. Dostupný z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.html
- [15] Ducháček, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [16] Hluchý, M., a kolektiv: *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1978. 360 s. ISBN 04-212-78
- [17] Machek, Václav a Jaromír Sodomka. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [18] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] *Rozdělení a charakteristika polymerů* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [20] *Analýza rozptylu (ANOVA)* [online]. Dostupný z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>
- [21] *Taylor Hobson Talysurf CLI 500* [online]. Dostupný z: <https://ft.utb.cz./ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojovevybaveni/>
- [22] *Ruční mikroskop Pro Scope HR* [online]. Dostupný z: <https://www.bodelin.com/proscope/proscope-hr>
- [23] OVSÍK, M., *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů: disertační práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2013. 179 s. Školitel disertační práce: David Maňas. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25609/ovs%C3%ADk_2013_dp.pdf?sequence=1
- [24] *CSM Micro Combi Tester* [online]. Dostupný z: <https://ft.utb.cz./ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojovevybaveni/>
- [25] *Přechodové teploty polymerů* [online]. Dostupný z: <https://publi.cz/books/180/06.html>
- [26] *Infračervená spektroskopie* [online]. Dostupný z: https://tftp.zcu/files/projects/frvs-3892007/skripta_kap3_irspektrome.pdf

- [27] *Table of IR Absorptions. WebSpectra – Problem in NMR and IR Spectroscopy*. [online]. 14.4.2017 [cit. 2017-4-14]. Dostupné z: <https://webspectra.chem.ucla.edu/https://webspectra.chem.ucla.edu/irtable.html>
- [28] *IR Lecture*. University of Delaware. [online]. 16. 4. 2017 [cit. 2017-4-16]. Dostupné z: https://www1.udel.edu/chem/fox/Chem333/Fall2013/Chem333Fall2013/Welcomefile/IRcome_files/IR%20handout.pdf
- [29] *Infračervená spektroskopie* [online]. [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm/>
- [30] *Characteristic IR Absorption Frequencies of Organic Functional Groups*. University of Puget Sound. [online]. 20.4.2017 [cit. 2017-4-20]. Dostupné z: <http://www2.ups.edu/faculty/hanson/Spectroscopy/IR/IRfrequencies.html>
- [31] GRYGAR, T., *Metody analýza pevných látek*. Ústav anorganické chemie AV ČR, v.v.i.. [online]. 7.4.2017 [cit. 2017-4-7]. Dostupné z: <http://www.iic.cas.cz/~grygar/mapl-L4.pdf>
- [32] ČAPKOVÁ, P., *RTG difrakce v materiálovém výzkumu*. KMT TU Liberec. [online]. 7.4.2017 [cit. 2017-4-7]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf
- [33] *Rentgenová difraktometrie* [online]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/matejka/RTG-difrakce-09.pdf>
- [34] Butler, M., Donald, A., Bras, W., Mant, G., Derbyshire, G., Ryan, A., *Macromolecules*, 28, 6383, (1995)
- [35] KOBAYASHI M., *Polymorphism and morphologies of linear and macrocyclic pom*.
- [36] DOSIÈRE, M. *Crystallization of Polymers*. [online]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=HMbrCAAAQBAJ&pg=PA285&lpg=PA285&dq=Structure+of+the+normal+crystal+form+of+polyoxymethylene&source=bl&ots=f_PUD-rVKI&sig=Brx96EAHpbkbNiY8MVQqL6WhF-I&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKewjj65eX0ZvcAhXDDCwKHQdSBRkQ6AEIazAM#v=onepage&q=Structure%20of%20the%20normal%20crystal%20form%20of%20polyoxymethylene&f=false

- [37] Ward IM. *In structure and properties of oriented polymers*. London: Applied Science Publishers; 1975.
- [38] AURREKOETXEA J., SARRIONANDIA MA., URRUTIBEASCOA I., MASPOCH ML., *Effects of injection moulding induced morphology on the fracture behaviour of virgin and recycled polypropylene*. Polymer. 2003;44(22):6959-6964.
- [39] BÁTORA, B., *Obrobený povrch- hlavný fenomén technológie obrábania*. In.: *V. medzinárodná konferencia „Nové smery vo výrobných technológiach“*, Prešov, 15. - 6. 6 2000, str. 139-321.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3.1: Rozdělení NMO dle využívaného fyzikálního principu [4]</i>	15
<i>Obr. 4.1: Stimulovaná emise[5]</i>	17
<i>Obr. 4.2: Princip laseru [5]</i>	18
<i>Obr. 4.3: Základní sestava laseru [5]</i>	18
<i>Obr. 4.4: Laserová hlava [8]</i>	19
<i>Obr. 4.5: Základní průmyslové lasery [9]</i>	21
<i>Obr. 4.6: Princip CO₂ laseru [4]</i>	22
<i>Obr. 4.7: Vliv jakosti na odrazivost [10]</i>	23
<i>Obr. 4.8: Graf absorpce materiálu v závislosti na vlnové délce [12]</i>	23
<i>Obr. 4.9.: Doporučený výběr laseru pro určitý materiál [6]</i>	24
<i>Obr. 4.10: Kritéria hodnocení povrchu po řezání laserem [4]</i>	26
<i>Obr. 5.1: Světová spotřeba plastu ve vybraných odvětvích za rok 2003 [14]</i>	28
<i>Obr. 5.2: Struktura polymeru [10]</i>	28
<i>Obr. 5.3: Rozdělení polymerů [19]</i>	29
<i>Obr. 7.1: Laserové zařízení ILS 3 NM</i>	31
<i>Obr. 7.2: Vzorky pro experimenty.</i>	31
<i>Obr. 8.1: Taylor HobsonTalysurf CLI 500 [21]</i>	33
<i>Obr. 8.2: Závislost hloubky řezu na řezných podmínkách</i>	35
<i>Obr. 9.1: Ruční mikroskop Pro Scope HR [22]</i>	38
<i>Obr. 9.2: Vnikání laserového paprsku do materiálu</i>	39
<i>Obr. 9.3: Řez na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	39
<i>Obr. 9.4: Řez na vzorku z PMMA - drážka 2</i>	40
<i>Obr. 9.5: Řez na vzorku z PMMA - drážka 3</i>	40
<i>Obr. 9.6: Talysurf CLI 500 [21]</i>	41
<i>Obr. 9.7: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	42
<i>Obr. 9.8: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	43
<i>Obr. 9.9: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 3</i>	44
<i>Obr. 9.10: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 3</i>	45
<i>Obr. 10.1: CSM Micro Combi Tester [24]</i>	46
<i>Obr. 10.2: Vzorek pro měření mikro-tvrdomosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT}</i>	47
<i>Obr. 10.3: Závislost E_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA</i>	48
<i>Obr. 10.4: Závislost mikro-tvrdomosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA</i>	48
<i>Obr. 10.5: Porovnání E_{IT} zkoumaných materiálů</i>	49
<i>Obr. 10.6: Porovnání mikro-tvrdomostí HV_{IT} zkoumaných materiálů</i>	50
<i>Obr. 10.7: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA</i>	51
<i>Obr. 10.8: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA</i>	52
<i>Obr. 10.9: Porovnání materiálů řezu 1</i>	53
<i>Obr. 10.10: Porovnání HV_{IT} materiálů 3. řezu</i>	54
<i>Obr. 11.1.: Teplotní pole materiálu PMMA</i>	57

<i>Obr. 11.2.: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PMMA</i>	57
<i>Obr. 12.1.: Nicolet Avatar 320 ATR</i>	60
<i>Obr. 12.2.: Infračervené spektrum PMMA</i>	61
<i>Obr. 12.3.: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO</i>	62
<i>Obr. 12.4.: Schéma difraktometru [33]</i>	62
<i>Obr. 12.5.: Vzorek zkoumaného materiálu</i>	63
<i>Obr. 12.6.: RTG difrakční snímek PP</i>	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Rozdělení laserů	20
Tab. 8.1 Nastavení pracovních podmínek laserového zařízení.....	34
Tab. 8.2 Naměřené hloubky opracování	34
Tab. 8.3 Výpočty	36
Tab. 9.1 Specifikace zařízení Pro Scope HR	38
Tab. 10.1 Specifikace zařízení CSM Micro Combi Tester	46
Tab. 10.2 Výpočty Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA....	51
Tab. 10.3 Výpočet odchylek HVIT řezu 1	52
Tab. 10.4 Výpočet odchylek řezu 3.....	53
Tab. 11.1 Fyzikální vlastnosti materiálů	56
Tab. 12.2 Rozbor obsahu fází semikryst. podílu základního materiálu.....	65
Tab. 12.3 Rozbor obsahu fází semikryst. podílu ozářeného materiálu	66
Tab. 13.1 Porovnání drsností obroběných ploch.....	67
Tab. 13.2 Porovnání HVIT a EIT	69
Tab. 13.3 Změny krystalických podílů.....	71
Tab. 13.4 Porovnání obsahu fází semikrystalického podílu pro PP.....	71

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Význam symbolu
T_m	[°C]	Teplota tání
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_f	[°C]	Teplota tečení
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_z	[μm]	Největší výška profilu
h	[μm]	Hloubka opracování
f	[mm. s ⁻¹]	Řezná rychlost
h	[μm]	Hloubka opracování
P	[W]	Výkon

Zkratky

PMMA	Polymethylmetakrylát
POM C	Polyoxymetylen kopolymer
POM H	Polyoxymetylen hopolymer
PA	Polyamid
PA 66	Polyamid 66
PE 1000	Polyetylen 1000
Nd-YAG	Yttrium Aluminium Granátu
GaAs	Arsenid gallitý
LBM	Laser Beam Machining – řezání laserem
	Heat affected zone,
HAZ	Teplem ovlivněná oblast

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Publikace evidované v databázi Web of Science:

- 1) KNEDLOVÁ Jana, SÝKOROVÁ Libuše, PATA Vladimír, MALACHOVÁ Martina. Evaluation of DPI Change Impact on Laser Machined Surface Quality. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 474, pp 369-374, ISSN: 1662-7482
- 2) PATA Vladimír, SÝKOROVÁ Libuše, **KNEDLOVÁ** Jana. Application of Fractal Geometry for Laser Engraving of Article Leather Surface. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 693, pp 256-260. ISSN: 1662-7482
- 3) SÝKOROVÁ Libuše, ŠUBA Oldřich, **KNEDLOVÁ** Jana. Laser Micro-machining and Temperature Field Simulation. *Key Engineering Materials*, 2014, 581, pp 322-325

Publikace evidované v databázi SCOPUS

- 1) **KNEDLOVÁ** Jana, BÍLEK Ondřej, SÁMEK David, CHALUPA Petr. Construction and Manufacture of an Inspection Vehicle for Inspection of Piping Systems. *Novel Trends in Production Devices and Systems IV*
- 2) SÝKOROVÁ Libuše, PATA Vladimír, KUBIŠOVÁ Milena, **KNEDLOVÁ** Jana. Effect of concentrated energy of Laser Beam on Polymer Material. *MATEC Web of Conferences 2017*. University of Sibiu, 2017, p. 89. ISBN 978-80-971555-4-4.
- 3) **KNEDLOVÁ** Jana, BÍLEK Ondřej, SÁMEK David, CHALUPA Petr. Design and Construction of an Inspection Robot for the Sewage Pipes. *MATEC Web of Conferences 2017*. University of Sibiu, 2017, p. 41. ISBN 978-80-971555-4-4.
- 4) PATA Vladimír, SÝKOROVÁ, Libuše, **KNEDLOVÁ** Jana, ŘEZNÍČEK Martin. Application of Theory of Hypothesis Testing in Process of Laser Micro-machining. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 693, pp 247-255. ISSN: 1662-7482

- 5) PATA Vladimír, ŘEZNÍČEK Martin, SÝKOROVÁ Libuše, **KNEDLOVÁ** Jana, MALACHOVÁ Martina. Use of Relocation Device at Scanning of Polymeric Material Surface Quality. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 693, pp 243-246. ISSN: 1662-7482
- 6) KUBIŠOVÁ, Milena, PATA Vladimír, SÝKOROVÁ Libuše, **KNEDLOVÁ** Jana. Influence of laser beam on polymer material. *Manufacturing Technology*, 2017, roč. 17, č. 5, s. 742-746. ISSN 1213-2489. JR - Ostatní strojírenství
- 7) **KNEDLOVÁ** Jana, BÍLEK Ondřej, SÁMEK David, CHALUPA Petr. Design and Construction of an Inspection Robot for the Sewage Pipes. *MATEC Web of Conferences* 2017. University of Sibiu, 2017, p. 41. ISBN 978-80-971555-4-4.
- 8) PATA Vladimír, JANIŠ Rahula, SÝKOROVÁ Libuše, ZAPLETALOVÁ Andrea, **KNEDLOVÁ** Jana. Scanning and evaluation of biological surfaces using the technique of rapid prototyping. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 693, pp 256-260. ISSN: 1662-7482
- 9) BÍLEK Ondřej, SÁMEK David, **KNEDLOVÁ** Jana. Offline programming for robotic deburring process of aluminium wheels. *Manufacturing Technology*, 2013 (3), 693, pp 267-275. ISSN 1213–2489

Sborník

- 1) **KNEDLOVÁ** Jana, SÝKOROVÁ, Libuše, PATA Vladimír. Laserové popisování materiálů. *Strojírenská technologie*, XVIII,2,67-71,2013
- 2) SÝKOROVÁ Libuše, ŠUBA Oldřich, **KNEDLOVÁ** Jana. Practical use of laser technologies in field of plastics. *Chemické listy*, 2013, 183-185
- 3) SÝKOROVÁ, Libuše, Jana **KNEDLOVÁ**. Mikroobrábění polymerních materiálů CO2 laserem, 62. *Článek ve sborníku*. Třešť, 2010. ISBN 978-80-87441-03-9

Řešené projekty

SÁMEK, David, BÍLEK, Ondřej, **KNEDLOVÁ**, Jana, CHALUPA, Petr. Vývoj podvozku čtyřkolového robota. *Zvědka s.r.o.*, 2014. 1.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno: Ing. Jana Knedlová, Ph.D.

Místo narození: Zlín

Bydliště: Jasenná 53, 760 13

Národnost: Česká

Zaměstnavatel: Ústav výrobního inženýrství,
Fakulta technologická,
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Vavrečkova 275, 760 01 Zlín

E-mail: knedlova@utb.cz

Studium:

2011- doposud Doktorské studium v oboru: Nástroje a procesy,
Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati
ve Zlíně, (téma disertační práce: Studium integrity
povrchu polymerních materiálů při obrábění laserem)

2004-2006 Universita Tomáše Bati ve Zlíně, Celoškolská
pracoviště (B7507), Učitel odborných předmětů
(Bakalářské studium)

1982-1987 Vysoké učení technické Brno, Fakulta strojního
inženýrství, Strojírenská technologie

1978-1982 Střední průmyslová škola Zlín, Strojírenství

Pedagogická praxe:

Vedení cvičení v předmětech: T1TK1 – Technické kreslení I
TXPK2 – Počítačová podpora konstrukce II
T2PK1 – Počítačová podpora konstrukce II
TXCD1 – CAD I
TYCD3 – CAD III
T9NT – Nekonvenční technologie

Vedení bakalářských prací (6),
vedení diplomových prací (12),
recenze bakalářských prací (18),
recenze diplomových prací (11).

Zaměstnání:

2010 – dosud	UTB ve Zlíně, asistentka
2003-2010	SPŠ Zlín, učitel odborných předmětů
1999-2003	Tegema, konstruktérka, projekční činnost v Unigrafics
1992-1999	ZPS Zlín, konstruktérka (obráběcí centra), projekční činnost v ProEngineer
1991-1992	SPŠ Zlín, učitel odborných předmětů (externě)
1985-1987	ZPS Zlín, provozní konstruktérka

Ing. Jana Knedlová, Ph.D.

**Studium integrity povrchu polymerních materiálů při obrábění
laserem**

Study of Surface Integrity of Polymer Materials at Laser Machining

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Jana Knedlová, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2018

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7454-786-7

