



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Disertační práce

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

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

Autor: Ing. Jana Knedlová autora včetně titulů
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-

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	29
5.2 Rozdělení polymerů	29
5.2.1 Termoplasty	30
5.2.2 Reaktoplasty	30
6. ANOVA	32
7. CÍLE PRÁCE	35
8. PŘÍPRAVA VZORKŮ	36
9. STANOVENÍ LASEROVÉ OBROBITELNOSTI POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	38
9.1 Měření hloubky řezu	39
9.2 Statistické vyhodnocení laserové obrobitelnosti	43
10. MĚŘENÍ DRSNOSTI OBRÁBĚNÝCH PLOCH	45

10.1	Vizuální posouzení řezu	45
10.2	Měření drsnosti	56
11.	MĚŘENÍ TVRDOSTI	77
11.1	Měření mikro-tvrdomosti a modulu pružnosti	79
11.2	Statistické vyhodnocení mikro-tvrdomosti	86
12.	TEPLOTNÍ POLE TEPEM OVLIVNĚNÉ OBLASTI MATERIÁLU	97
13.	POROVNÁNÍ KVANTITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM	103
13.1	Infračervená vibrační spektroskopie	104
13.2	Rentgenová difrakční analýza	110
14.	VYHODNOCENÍ	119
15.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	124
	ZÁVĚR	125
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	128
	SEZNAM OBRÁZKŮ	132
	SEZNAM TABULEK	132
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	136
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	138
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	140

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 obrobků 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 NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Nekonvenční metody obrábění patří v rozvoji strojírenství mezi moderní metody a mají významné zastoupení v této oblasti. Při úběru materiálu je využívána forma energie pouhým okem neviditelných částic. 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 ploch.[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 obrábět tvarově 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÷100μm) 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:

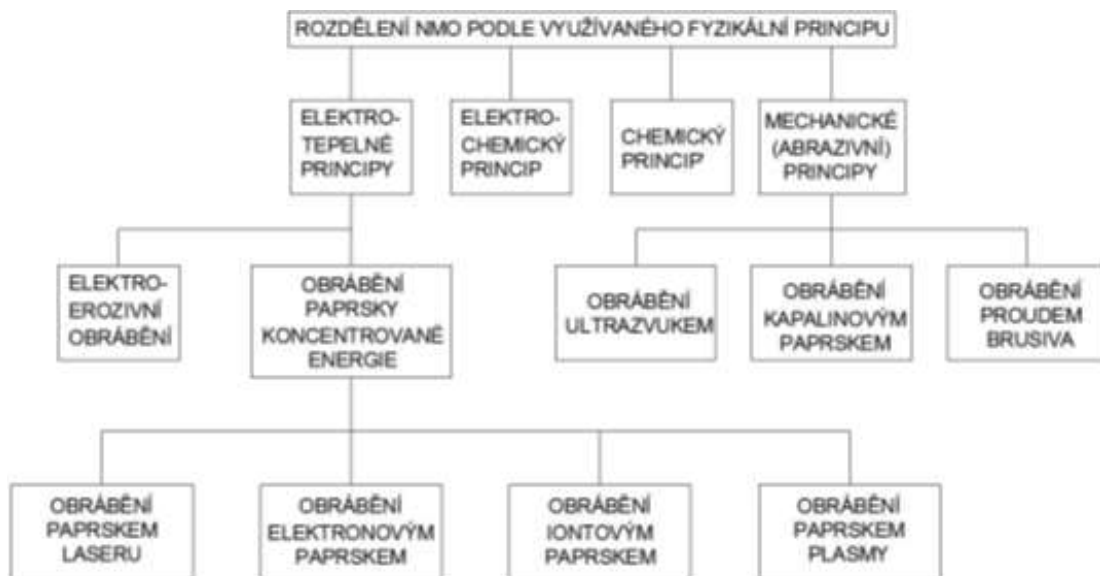
- Chemické obrábění
- Elektrochemické obrábění

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 médium 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).

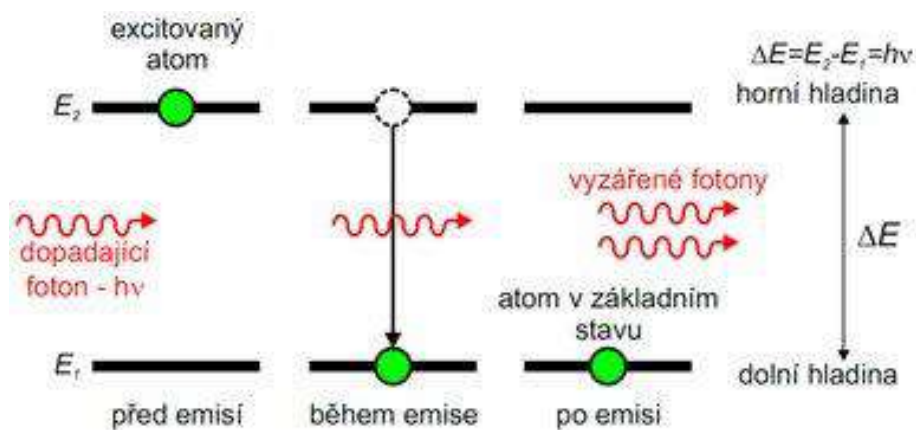
Běžné světelné záření je vlnění, které se šíří všemi směry. Laserové světlo vzniká v prostředí určitého stimulujícího elektromagnetického záření potlačením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Spontánní (samovolná) emise záření vzniká, když vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají tendenci 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]

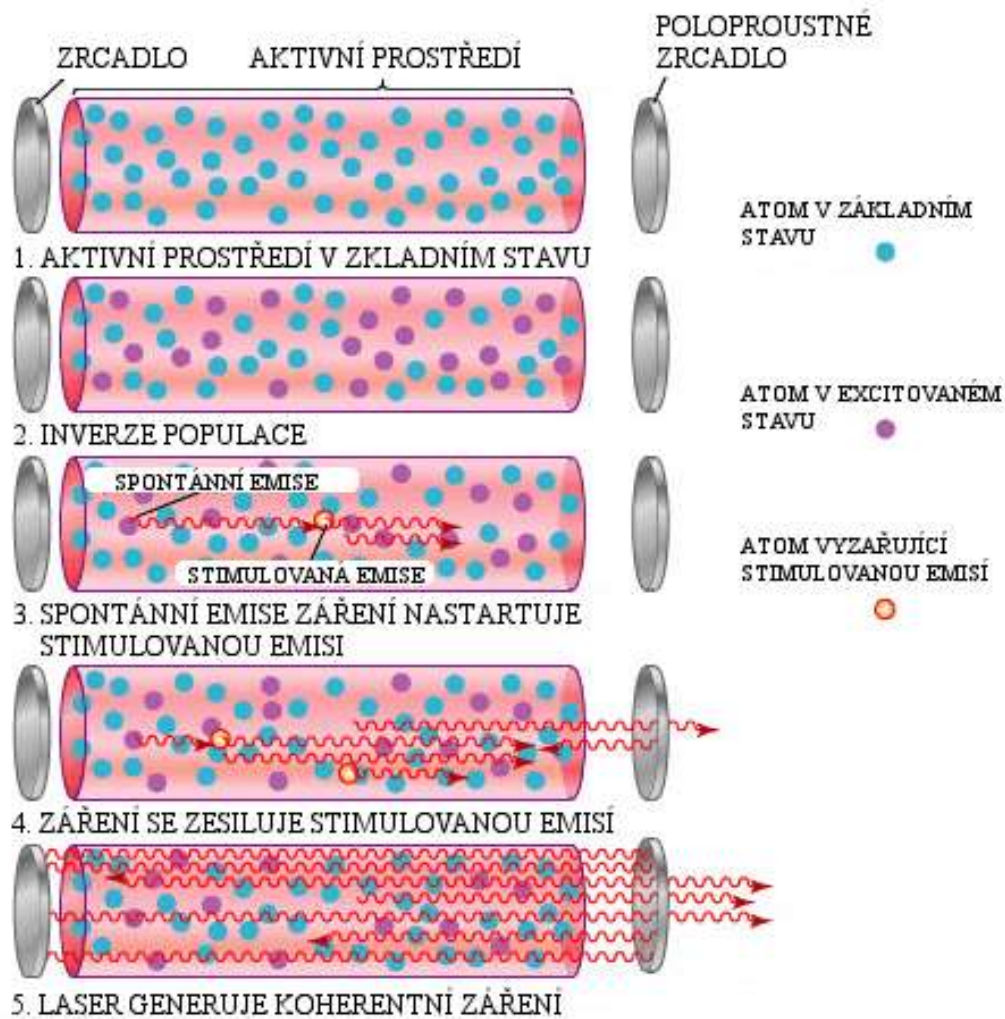


Obr. 4.1: Stimulovaná emise [5]

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]

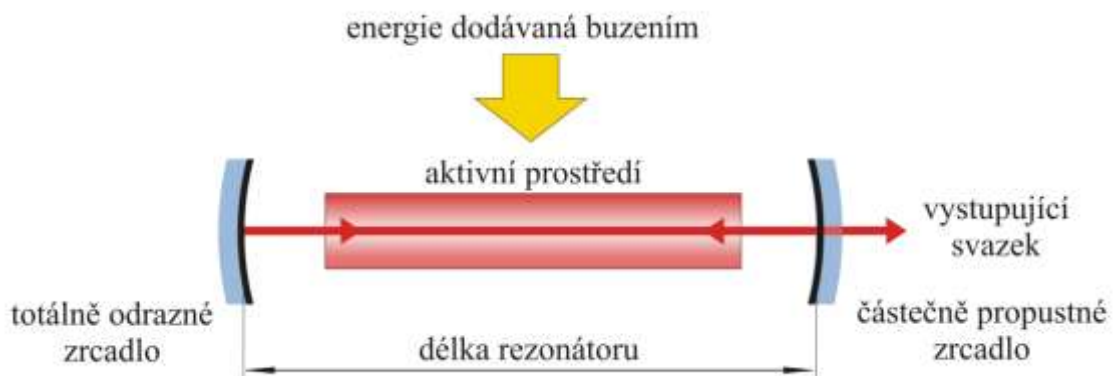
Aktivní prostředí se nachází v rezonátoru. Látkou, ve které se částice dají vybudit na požadovanou pracovní hladinu, může být plyn, pevná látka, polovodič nebo kapalina. Záření, které vychází z aktivního prostředí, se odráží od zrcadla zpátky do aktivního prostředí, což dále podporuje stimulovanou emisi. 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]



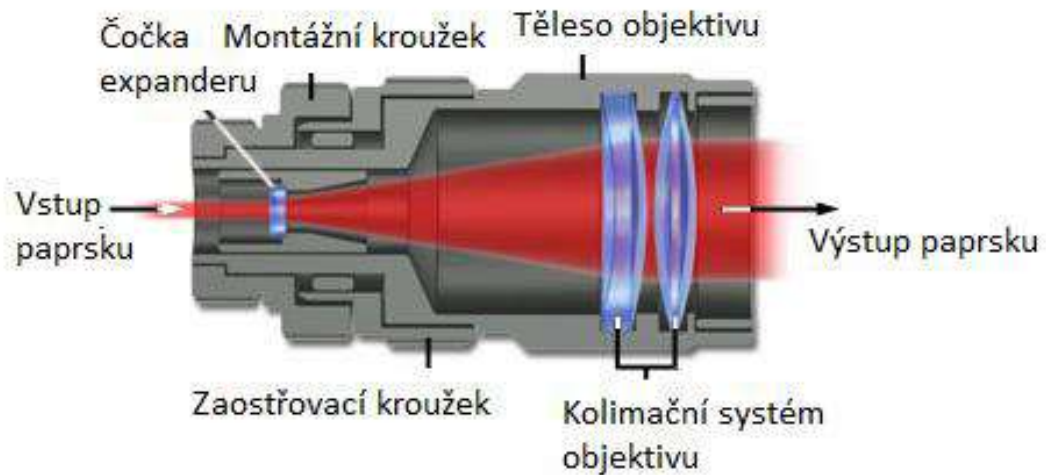
Obr. 4.2: Princip laseru [5]

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

Lasery běžně používané v průmyslu jsou popsány v následujícím obrázku 4.6, ve kterém je ^a Efektivita (účinnost) přeměny elektrické energie na světelnou (optickou) ^b. U pulsních laserů se udává energie v pulsu a doba pulsu, případně střední výkon (v závorce). CW – kontinuální, QCW – kvazikontinuální. ^c Ř – řezání, S – svařování, Z – značení, G – gravírování, K – kalení, N – nanášení vrstev, M - mikro-obrábění, nk - nekovů. [9]

Lasery	Vlnová délka (nm)	Buzení	Efek. ^a	Režim ^b	Výkon / Energie	Typické aplikace ^c	Údržba	Život. (h)
Nd:YAG	1064	LD	~7%	CW	až 6kW	Ř,S	ano	~10 000
		lampy	~3%	pulsní*	~ mJ@ns (~100W)	Z,G		~1000
CO ₂	10 600	RF	~10%	CW / pulsní	10-250W	Z,G, Ř nk.	ano	~20 000
		EL	~25%		až 20kW (průtočné)	Ř,S		--
Diskový	1070	LD	~15%	CW	až 16 kW	Ř,S	ano	~10 000
Vláknový	1070	LD	~30%	CW	až 80 kW	Ř,S	ne	~100 000
				Pulsní	~ J@ms (~1,2kW)	Z,G,M		
Diodový	808-980	EL	~60%	CW	až 10kW	S,K,N	ne	~15 000

Obr. 4.5: Základní průmyslové lasery [9]

4.3 CO₂ Laser

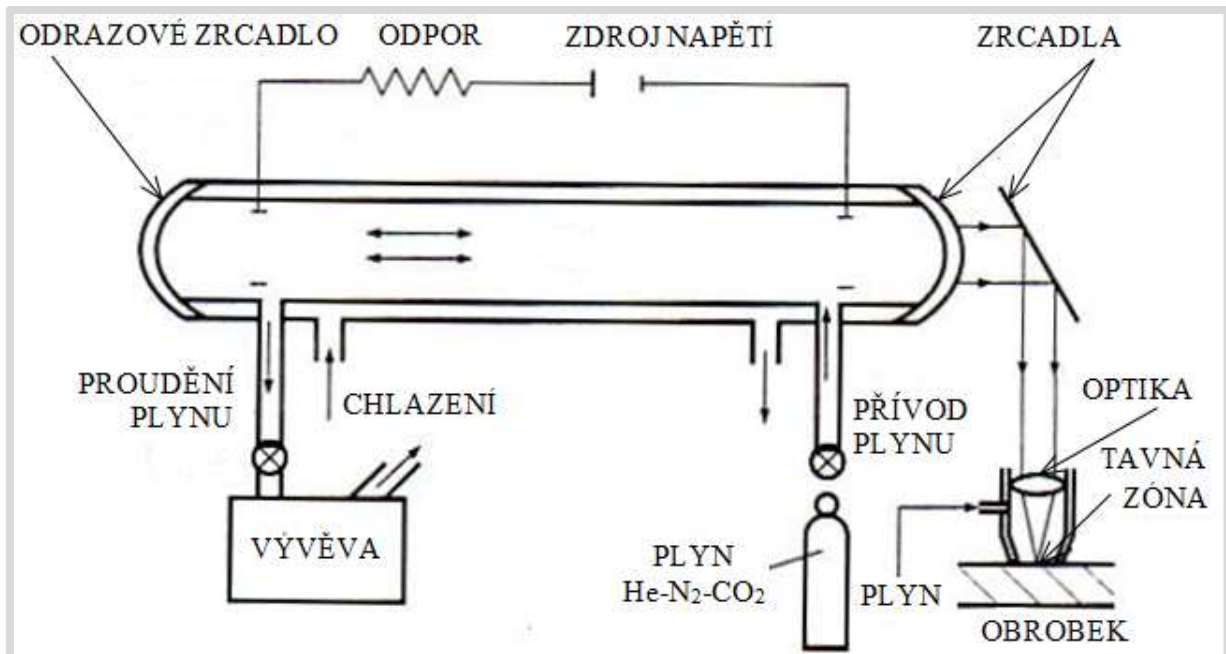
Hlavní částí CO₂ laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů CO₂, N₂ a He. Energie potřebná k excitaci je vytvářena formou doutnavého výboje mezi elektrodami, na které se přivádí vysoké napětí z generátoru vysokého napětí.

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 μ m. [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]

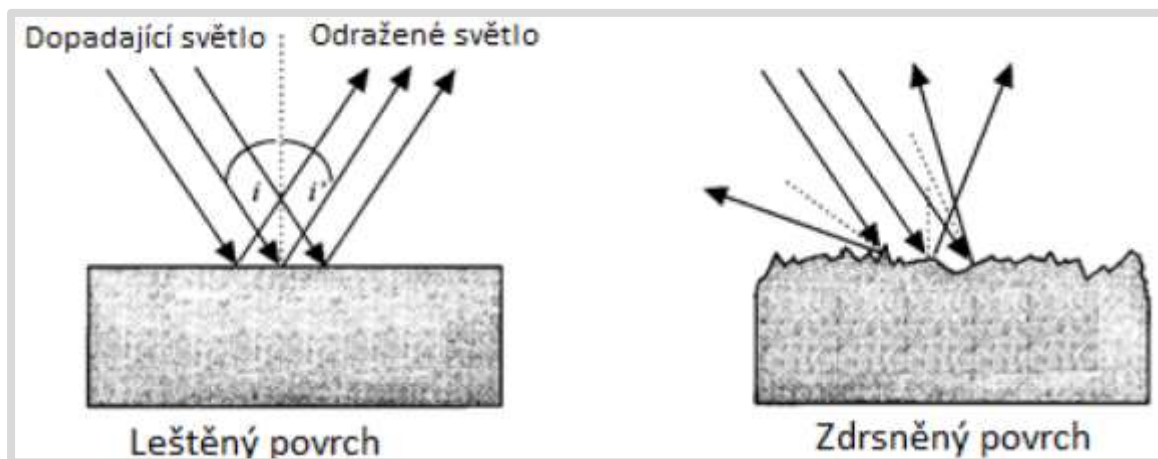


Obr. 4.6: Princip CO_2 laseru [4]

4.4 Interakce materiálu s laserovým paprskem

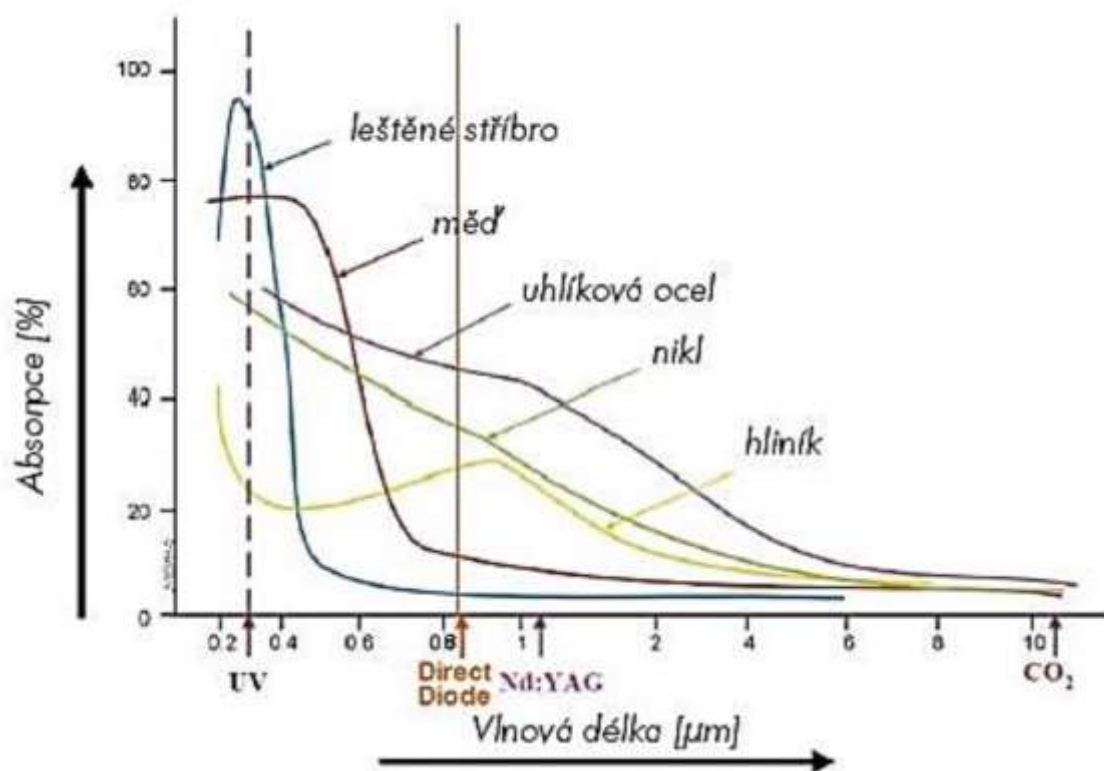
Volba laseru závisí na obráběném materiálu. Vzájemné působení materiálu s laserem ovlivňují:

- koeficient odrazu pro danou vlnovou délku
- koeficient absorpce pro danou vlnovou délku
- drsnost povrchu (drsnější 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:

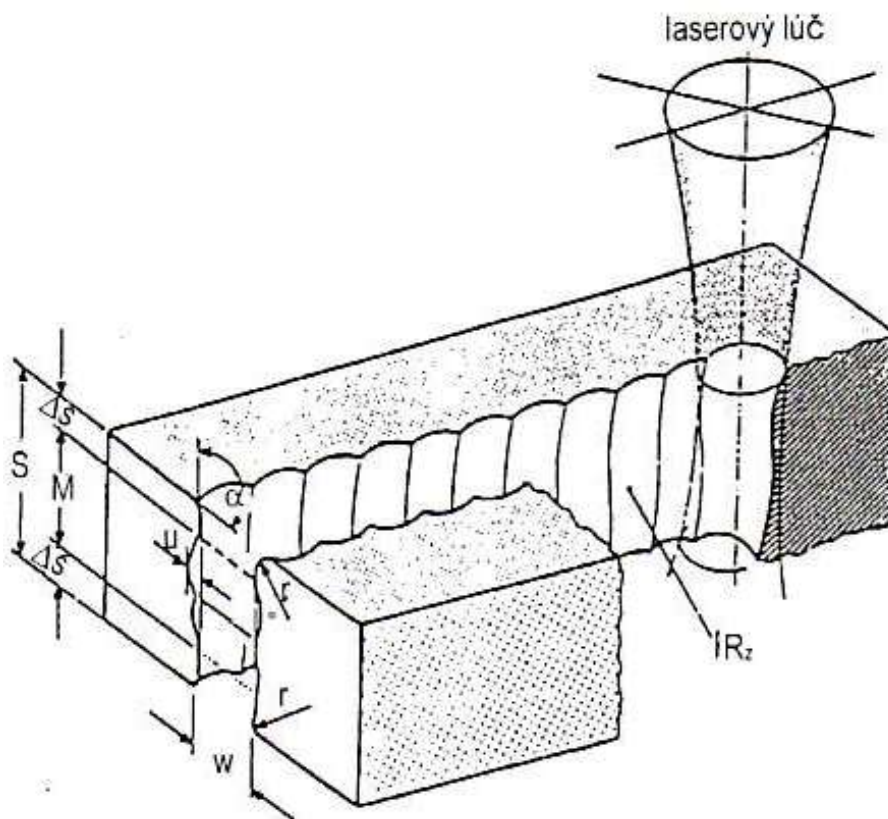
- šířka řezu
- zaoblení hrany vlivem řezání
- nepravidelnost hrany
- šířka teplem ovlivněné vrstvy (poškozené vrstvy)
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou vstupu a výstupem paprsku)
- tvoření trhlin
- úbytek materiálu
- šířka kráteru
- vychýlení paprsku
- změny struktury povrchu materiálu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

- zbytkové napětí

Redukovaný počet parametrů a kvalitu řezu určuje:

1. Charakteristika materiálu, tloušťka HAZ (tepelně postižené zóny) a tvořením mikrotrhlin
2. Geometrické vlastnosti, (drsnot 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

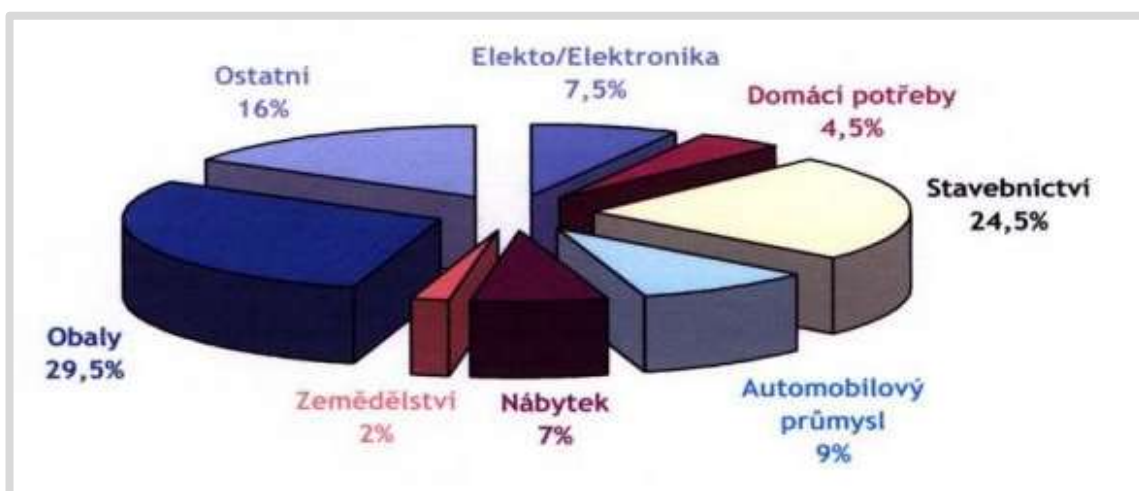
Δs – oblast náběhu a výběhu při řezání (0,1 – 0,2 mm dle tloušťky materiálu)

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

Podle spotřeby materiálu a objemu výroby zauímají polymerní materiály nejvýznamnější složku. Čím dál více jsou využívány pro různá odvětví výroby (v konkurenci s ostatními materiály jako jsou kovy apod.), a to díky jejich snadné zpracovatelnosti, poměrem cena – vlastnosti a nízkou měrnou hmotností. Tento 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]

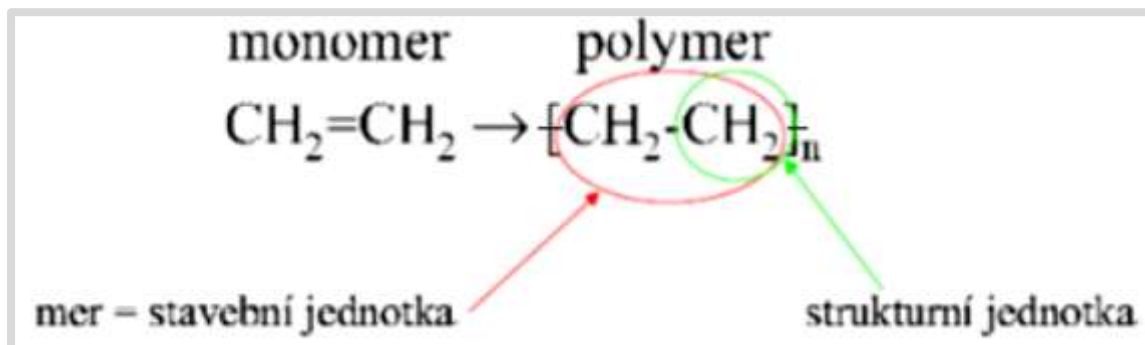


Obr. 5.1: Světová spotřeba plastu ve vybraných odvětvích za rok 2003 [14]

Polymery patří k jedněm z nejmladších skupin konstrukčních materiálů. Jsou to chemické látky, které mají velmi různé vlastnosti a jejich velké molekuly obsahují většinou atomy uhlíku, kyslíku i dusíku, vodíku, chloru a jiných prvků. Polymerní materiály v podobě hotového výrobku jsou v tuhém stavu, ale při zpracování za vysoké teploty a tlaku, jsou kapalné, aby mohly zaujmout budoucí tvar výrobku. Vlastnosti lze upravit různými modifikacemi a příměsemi. Obecně jsou plasty lehké, mají tepelné i elektrické izolační vlastnosti a nekorodují. [14][15][16]

5.1 Struktura polymerů

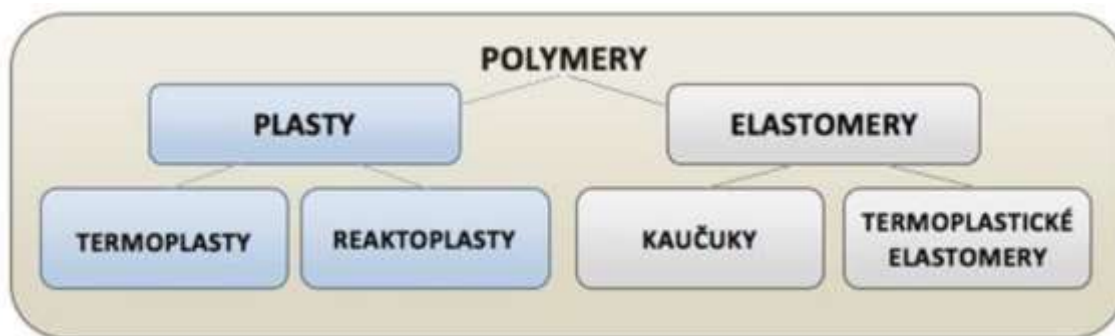
Polymer je makromolekulární látka, kterou tvoří řetězce makromolekul. Ty vznikají spojením stavební jednotky primárními kovalentními vazbami, a obsahují velké množství atomů. Základní stavební částí jsou nízkomolekulární látky, tzv. mery, které se v řetězci stále opakují. Základní část řetězce tvoří 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]

Plasty jsou polymery, které jsou při normálních podmínkách ve většině případů tvrdé, ale často i křehké. Se zvyšující se teplotou se stávají tvarovatelnými a plastickými (proto název plasty). Plasty se dělí na termoplasty a reaktoplasty. Termoplast je možné při opakovaném ohřevu opět převádět do stavu taveniny nebo viskózního toku. Ochlazením pod teplotu tání, která charakterizuje semikrystalické polymery, nebo pod teplotu tečení, která charakterizuje krystalické polymery, je možné nechat termoplasty ztuhnout při teplotách, které charak-

terizují daný typ termoplastu. Díky této schopnosti jsou termoplasty recyklovatelné, protože nedochází ke změně struktury. [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]

Názvosloví jednotlivých polymerů jsou uvedeny v následující tab. 5.1 str. 31.

Tabulka 5.1 Názvosloví polymerů

Zkratka	Název polymeru
ABS	Terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu
PA	Polyamidy
PAN	Polyakrylonitril
PC	Polykarbonát
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PPO	Polyfenylenoxid
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVAC	Polyvinylacetát
PVAL	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVF	Polyvinylfluorid

6. ANOVA

Statistické metody, které umožňují provádět vícenásobné porovnávání středních hodnot, jsou soustředěny pod souhrnným názvem analýza rozptylu (ANOVA – Analysis of Variance). Tato metoda je založena na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů (testování shody středních hodnot se převádí na testování shody dvou rozptylů (F-test)).

Předpoklady pro validní použití metody analýzy rozptylu pro testování rozdílu více středních hodnot:

- nezávislost měření (uvnitř skupin i mezi skupinami)
- normalita dat v každé skupině
- homogenita rozptylů uvnitř skupin (alespoň přibližná shoda rozptylů uvnitř skupin)

Základním úkolem analýzy rozptylu je posouzení hlavních a interakčních účinků jednotlivých faktorů (kategoriálních nezávislých proměnných, jejichž hodnoty nazýváme úrovně faktorů) na závisle proměnnou (proměnné) kvantitativního typu. [20]

Jedno-faktorová analýza rozptylu (analýza rozptylu jednoduchého třídění, one-way ANOVA) představuje nejjednodušší případ analýzy rozptylu, kdy analyzujeme účinek jednoho faktoru na zkoumanou závisle proměnnou.

Jedná se o zobecněnou analogii případu zjišťování rozdílu průměrů mezi dvěma nezávislými skupinami pomocí nepárového t-testu. V případě jedno-faktorové analýzy rozptylu jde o zjišťování rozdílů průměrů mezi více skupinami (které reprezentují jednotlivé úrovně neboli kategorie sledovaného faktoru) prostřednictvím výpočtu testovacího kritéria F. Zjišťuje se, zda skupiny vytvořené klasifikačním faktorem jsou si podobné, nebo zda jednotlivé průměry tvoří nějaké identifikovatelné shluky (homogenní podskupiny s podobnými hodnotami). Jestliže má působící faktor jenom dvě kategorie (úrovně), úloha je totožná s testováním rovnosti průměrů ve dvou nezávislých výběrech pomocí nepárového t-testu.

Testujeme tedy nulovou hypotézu, že střední hodnoty všech skupin se rovnají a testování provádíme na základě analýzy vztahů mezi rozptyly v jednotlivých

skupinách – tedy pomocí F -testu, který představuje základ výpočtů při analýze rozptylu.

Základní statistikou počítanou v analýze rozptylu je obecně testovací kritérium F , pomocí něhož se testuje hypotéza, zda průměry ve skupinách určených působícím faktorem (příp. faktory) se od sebe liší více než na základě působení přirozené variability (náhodného kolísání). Počítaná testovací statistika F zohledňuje variabilitu výběrových průměrů a zároveň přirozenou variabilitu závislé náhodné proměnné.

Celkovou variabilitu (rozptyl) sledované proměnné lze rozdělit na 2 složky:

- **rozptyl „uvnitř skupin“** (rozptyl mezi jedinci ve stejné skupině kolem skupinového průměru – ten je způsoben přirozenou variabilitou (pro nás neznámou, způsobenou náhodnými vlivy).

- **rozptyl „mezi skupinami“** (tzn. rozptyl skupinových průměrů kolem společného, celkového průměru ze všech skupinových průměrů) – o něm předpokládáme, že je způsoben jednak pokusným zásahem (působícím faktorem) a jednak opět přirozenou variabilitou.

Při porovnání obou rozptylů poměrem (pomocí F -testu) pak můžeme testovat nulovou hypotézu o shodě těchto rozptylů.

Výpočet F -statistiky v analýze rozptylu můžeme zapsat v obecné formě:

$$F = \frac{\text{rozptyl "mezi skupinami"}}{\text{rozptyl "uvnitř skupin"}} \quad (6.1) [20]$$

pokud celková variabilita měřená pomocí F -statistiky překročí tuto kritickou hodnotu, zamítneme hypotézu o shodě rozptylů a tím i nulovou hypotézu analýzy rozptylu, že střední hodnoty sledovaných skupin se neliší.

Nulová hypotéza testovaná při jednoduchém třídění je:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_m \quad (\text{kde } m \text{ je počet srovnávaných skupin}).$$

V případě zamítnutí H_0 platí alternativní hypotéza H_1 : Ne všechny střední hodnoty jsou stejné (tj. alespoň jedna ze střední hodnoty se liší od ostatních).

Pokud analýza rozptylu zamítne globální nulovou hypotézu ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_m$) o vlivu působícího faktoru, je nutno doplnit rozbor ještě dalšími metodami následného zkoumání existujících rozdílů. Tyto tzv. multikomparativní testy (testy pro mnohonásobné porovnávání) pak dávají výsledkem statistickou významnost jednotlivých rozdílů středních hodnot u všech možných párů porovnávaných skupin. Mezi nejčastěji používané testy pro mnohonásobné porovnání všech dvojic skupin v experimentu navzájem patří např. Tukey-test.

Více-faktorová analýza rozptylu zkoumá vliv dvou a více faktorů působících na závisle proměnnou. Nejjednodušší je analýza rozptylu dvojného třídění - two-way ANOVA. Při ní se zkoumá vliv dvou faktorů na závisle proměnnou. Analýzou rozptylu dvojného třídění lze hodnotit tzv. blokové experimenty, při nichž se sleduje vliv určitého faktoru (označeného např. A), který se plánovitě mění, zatímco druhý faktor (označený jako B) se považujeme za rušivý vliv, který se snažíme při analýze oddělit od vlivu faktoru A.

Interpretace výsledků analýzy rozptylu pro dvojné třídění závisí na přítomnosti interakcí mezi faktory. Interakce představují jediný podstatný problém při zobecnění postupu analýzy rozptylu jednoduchého třídění pro použití při hodnocení působení více faktorů. Konečná interpretace výsledků analýzy rozptylu dvojného (i vícenásobného) třídění spočívá ve vyhodnocení vlivu kombinací hlavních a interakčních efektů působících v experimentu. [20]

7. 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

8. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vzorky (obr. 8.2, str. 37) k provedení experimentů byly vyrobeny pomocí laserového zařízení ILS3 NM, jehož specifikace je uvedena v tabulce 8.1, str. 37. Tato laserová tiskárna komunikuje se software Corel Draw. Je určena především pro obrábění PMMA, ale lze na ní opracovávat také jiné polymerní materiály.



Obr. 8.1: 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 (1524m. s^{-1}).

Tabulka 8. Specifikační štítek zařízení ILS 3 NM

Laser ILS 3NM	
Výkon	100W
Vnější rozměry	900(D) x 865(H) x 990(V) mm
Pracovní pole	660 x 495 x 210(V) mm
Rozlišení	1000, 500, 333, 250, 200, 166 DPI
Řízení rychlosti posuvu	Nastavitelné od 1 do 1524 mm/sec
Řízení výkonu laseru	Nastavitelné od 1 do 100 % výkonu
Nastavení ohniskové vzdálenosti	Automatické
Operační módy	Rastrové gravírování, vektorové řezání
Komunikační rozhraní	USB, LPT1, LAN
Integrovaná paměť	64 MB – max. 99 souborů
Displej zobrazuje	seznam vzorů, síla laseru, gravírovací rychlost, čas průběhu, načtené soubory, nastavení a diagnostiku
Napájení	~110 / ~240 V
Chlazení	Vzduchové

Obr. 8.2: Specifikační štítek pro zařízení ILS 3



Obr. 8.2: Vzorky pro experimenty

9. 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“ meraním 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 měření hĺbky řezu byly použity různé pracovní podmínky (tab. 9.2, str. 40).

9.1 Měření hĺbky řezu

Měření hĺbky řezu bylo provedeno pomocí přístroje Taylor Hobson Talysurf CLI 500 (obr. 9.1), jehož specifikační parametry jsou uvedeny v tabulce 9.1, str. 40. Jedná se o přístroj k provádění rychlého prostorového měření a hodnocení povrchu s vysokým rozlišením, umožňuje měření dotykové nebo bezdotykové ve třech osách. Mikrometr, který je součástí zařízení, nám umožní zjistit měřenou veličinu.



Obr. 9.1: Taylor Hobson Talysurf CLI 500 [21]

Tabulka. 9.1 Specifikace zařízení Taylor Hobson Talysurf CLI 500

Měřicí prostor	50 x 50 x 50 [mm]
Velikost maximálního posuvu	50mm
Rychlost měření	0,5; 1; 5; 10; 15; 30 [mm. s ⁻¹]
Největší rychlost polohování	30 mm. s ⁻¹
Osová rozlišitelnost	0,5 μm
Možnost měřit bezkontaktně	Ano
Vnější rozměry	500 x 310 x 450 [mm]
Hmotnost zařízení	55 kg
Nosnost stolu	10 kg

Proměnlivými hodnotami byly parametry rychlosti pracovního posuvu a výkonu laserového zařízení. Pro vyhotovení vzorků, pro měření hloubky řezu, jsou uvedeny pracovní podmínky v tabulce 9. 2.

Tabulka 9.2 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 9.3, str. 41 je uveden aritmetický průměr z jednotlivých měření naměřené hloubky opracování.

Tabulka 9.3 Naměřené hloubky opracování

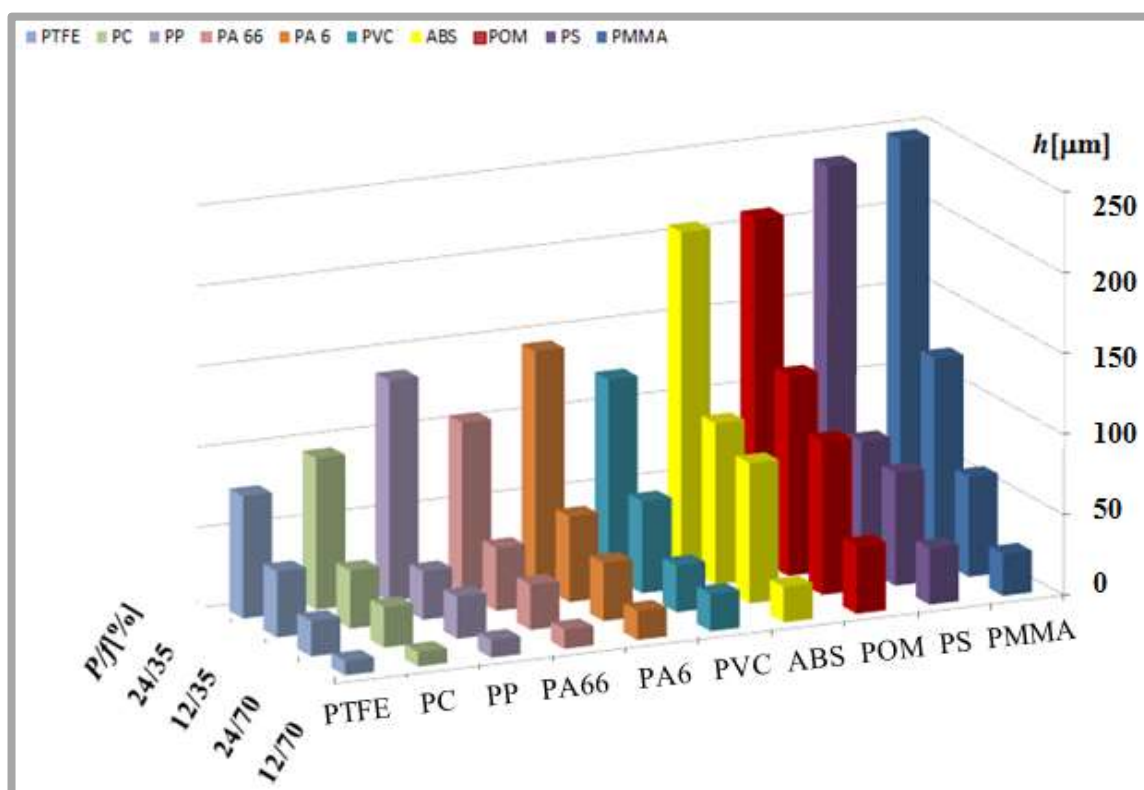
MATERIÁL	$P / f [\%]$			
	12/35	12/70	24/35	24/70
	$P / f [\text{W} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$			
	12 / 533	12 / 1066	24 / 533	24 / 1066
	$h [\mu\text{m}]$			
ABS	100	22	207	87
PA 6	53	18	144	36
PA 66	39	12	105	28
PC	36	9	94	25
PMMA	124	26	248	62
POM	124	42	210	95
PP	30	11	137	26
PS	78	35	237	70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

Jestliže by představitel *"laserové obrobiteľnosti"* mohla být, za použití výkonu 24 W a řezné rychlosti 533 mm. s⁻¹, hloubka řezu $h = 248 \mu\text{m}$, pak by tímto nejvhodnějším materiálem byl PMMA = *nejobrobiteľnějším*, u kterého byla měřením zjištěna největší hloubka při těchto pracovních podmínkách. Snížil-li se výkon na 12 W a řezná rychlost 533 mm. s⁻¹ byla stejná, pak byla opět hloubka řezu naměřena u PMMA, v porovnání s ostatními zkoumanými materiály, největší $h = 124 \mu\text{m}$. Z toho vyplývá, že delší doba působení laserového paprsku, tj. vyšší výkon a nižší řezná rychlost, způsobí větší úběr materiálu u PMMA. Zvýší-li se rychlost na 1066 mm. s⁻¹ u PMMA při stejném výkonu 12 W, pak obrobiteľnost, tedy hloubka řezu $h = 26 \mu\text{m}$, je menší než u materiálu POM, u kterého bylo dosaženo hloubky řezu $h = 42 \mu\text{m}$ při tomto nastavení řezných podmínek. Při zvýšení výkonu na 24 W byla naměřena u materiálu POM hloubka řezu $h = 95 \mu\text{m}$. Množství odebraného materiálu bylo velmi nízké u ma-

teriálů PP ($h = 137 \mu\text{m}$), PA ($h = 105 \mu\text{m}$), PC ($h = 94 \mu\text{m}$), PTFE ($h = 76 \mu\text{m}$). U těchto materiálů bylo také dosaženo velmi špatné jakosti povrchu s částečně ohořelými plochami.

Závěrem lze říci, že měřením byla zjištěna nejlepší obrobiteľnosť při delší době působení laserového paprsku ($24 \text{ W} / 533 \text{ mm. s}^{-1}$), u materiálu PMMA ($248 \mu\text{m}$). Při stejném výkonu a vyšší rychlosti, tedy v kratším čase ($24 \text{ W} / 1066 \text{ mm. s}^{-1}$), vykazuje lepší obrobiteľnosť materiál POM. Porovnání všech zkoumaných materiálů je následně uveden v obr. 9.2.

Pokud by tedy ekvivalentem "laserové obrobiteľnosti" byla hloubka řezu, pak by při pracovních podmínkách rychlosti posuvu 533 mm.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. 9.2: Závislost hloubky řezu na řezných podmínkách

9.2 Statistické vyhodnocení laserové obrobitelnosti

Laserová obrobitelnost byla vyhodnocena různými technologickými parametry. Pro důkaz laserové obrobitelnosti bylo použito dvou-faktorové ANALÝZY s interakcí TUKEY mezi výkonem a řeznou rychlostí pro materiál PMMA, což je nezbytné pro potvrzení výsledků (tab. 9.4)

Tabulka 9.4 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 statisticky 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 rekalkulaci 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 rezné rychlosti f má vliv na hloubku drážky.

10. MĚŘENÍ DRSNOSTI OBRÁBĚNÝCH PLOCH

10.1 Vizuální posouzení řezu

Posouzení řezů bylo provedeno za použití ručního mikroskopu Pro Scope HR (obr. 10.1) se specifikací uvedenou v tabulce 10.1, s čočkou umožňující zvětšení 30x.

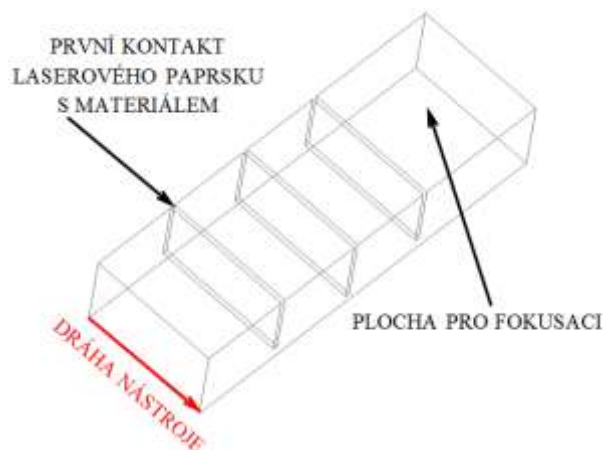


Obr. 10.1: Ruční mikroskop Pro Scope HR [22]

Tabulka 10.1 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.

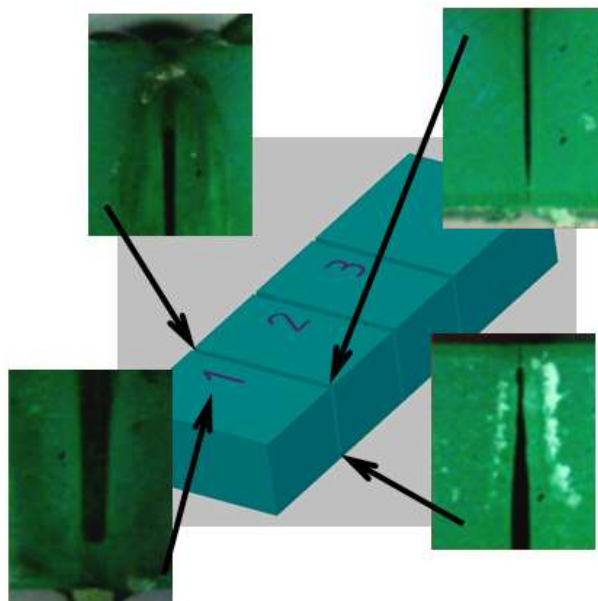


Obr. 10.2: Vnikání laserového paprsku do materiálu

PE 1000

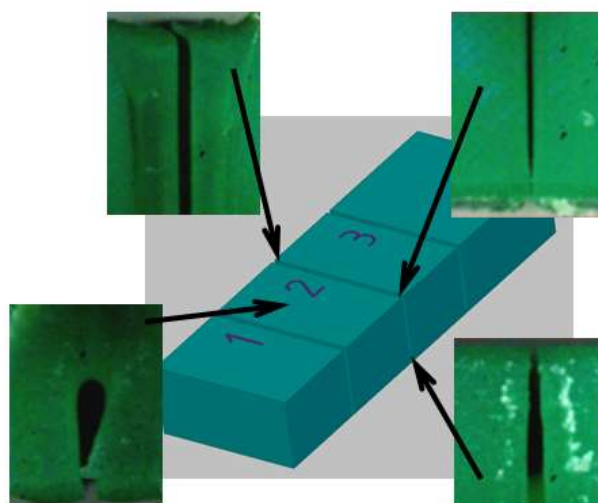
U vzorku z materiálu PE 1000 bylo pro vytvoření první drážky (obr. 10.3, str. 47) bylo použito řezných podmínek o výkonu $P = 100 \text{ W}$ (100%) a řezné rychlosti $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (1%).

V místě prvního kontaktu laserového paprsku je možno spatřit širší drážku s ohořelým povrchem, což představuje jistou degradaci materiálu. Lze zde také pozorovat výstupek vytvořený nataveným materiálem. V místě, kde laserový paprsek opouští materiál, můžeme vidět užší řez, ale na spodní ploše vzorku je řez opět širší.



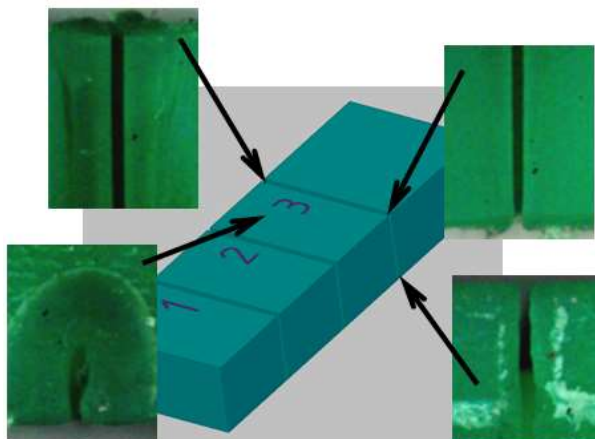
Obr. 10.3: Řez na vzorku z PE 1000 - drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$)

Vytvoření drážky 2 (obr. 10.4) na materiálu PE 1000 bylo provedeno opět výkonem $P = 100W$ (100%). Řezná rychlost byla zvýšena na $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$ (2%). Na snímcích můžeme pozorovat opět přetečený materiál, který je výraznější v prostoru počátečního kontaktu paprsku s materiálem, než v místě výstupu. Se zvýšením řezné rychlosti jsou zřetelně méně ohořelé plochy ve srovnání s prvním řezem. V souvislosti s vyšší rychlostí však došlo k menší hloubce řezu, což se dalo očekávat.



Obr. 10.4: Řez na vzorku z PE 1000 - drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$)

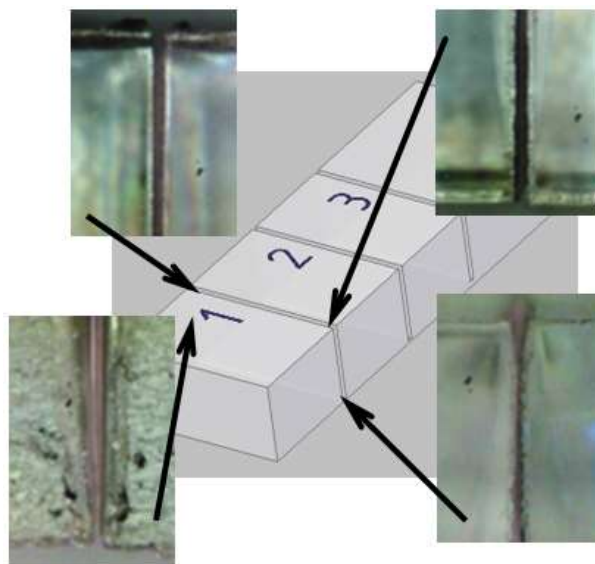
Pro experiment drážky 3 (obr. 10.5) tohoto materiálu byla řezná rychlost zvýšena na $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ (3%). Vystouplý materiál, v porovnání s předchozími dvěma řezy, je minimální. Spálená místa v tomto případě téměř nepozorujeme. Hloubka řezu při těchto řezných podmínkách je však nejmenší.



Obr. 10.5: Řez na vzorku z PE 1000 - drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

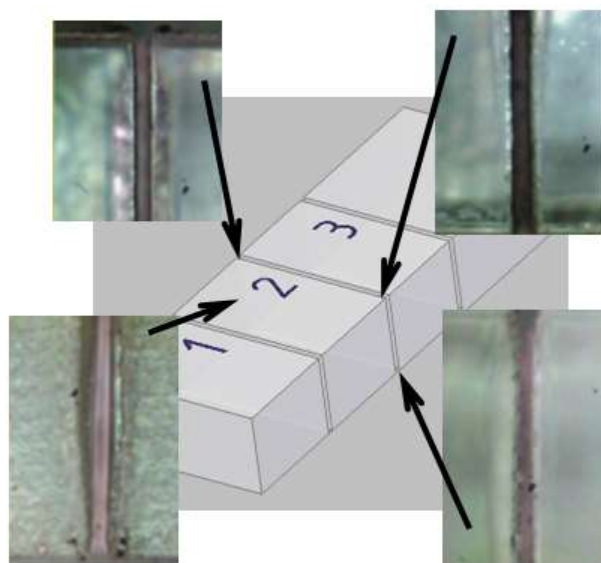
PMMA

Na snímcích první drážky (obr. 10.6) 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 $15,24 \text{ mm. s}^{-1}$, lze pozorovat na okraji řezu výstupky na spodní straně vzorku.



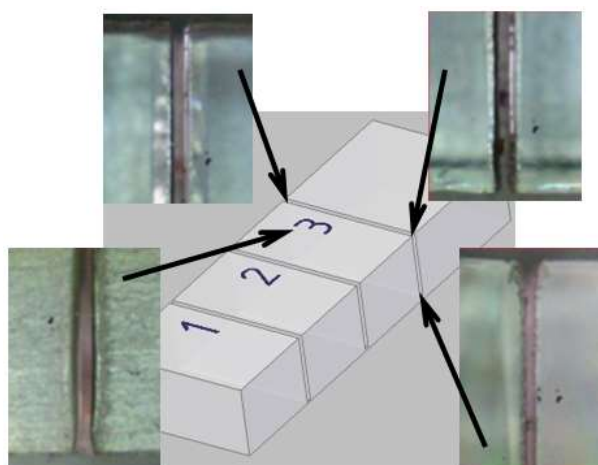
Obr. 10.6: Řez na vzorku z PMMA - drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$)

Stejně jako u předchozího materiálu bylo při nastavení, pro druhou drážku (obr. 10.7), vyšší rychlosti ($f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$) menší zahoření plochy.



Obr. 10.7: Řez na vzorku z PMMA - drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$)

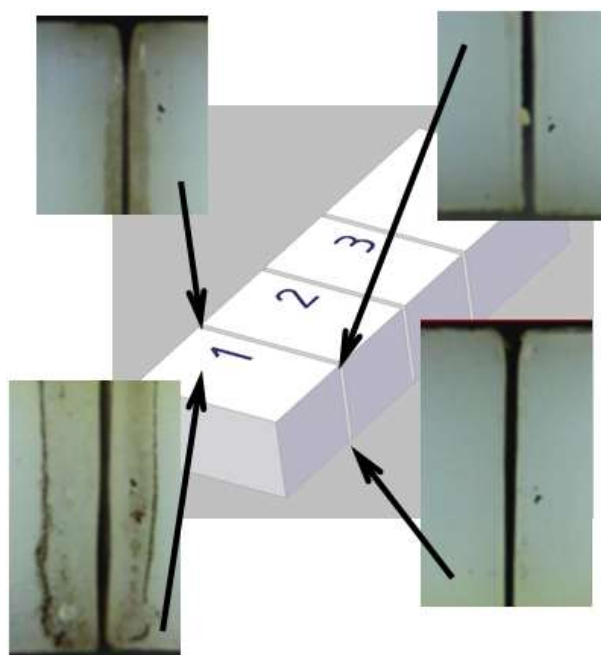
Na snímcích PMMA, třetí drážky (obr. 10.8) vytvořenou řeznou rychlostí $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$, můžeme vidět podobné vyobrazení jako u druhé drážky, s nižší rychlostí $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$. Výkon 100 W je pro tento materiál zbytečně vysoký.



Obr. 10.8: Řez na vzorku z PMMA – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

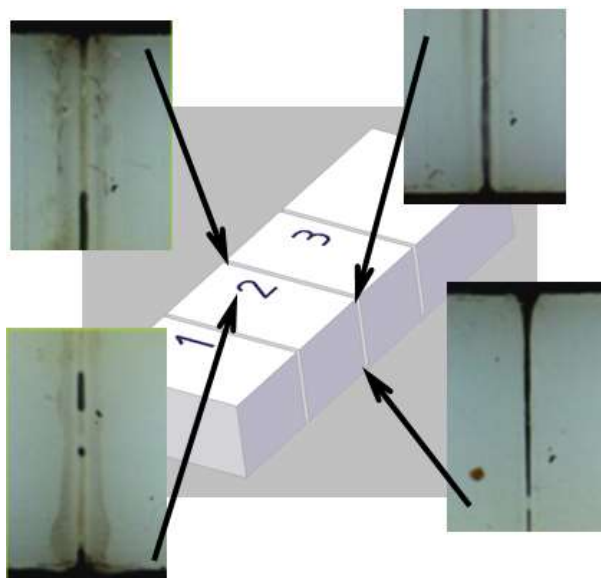
POM C

Ve vzorku z materiálu POM C u první drážky (obr. 10.9) lze pozorovat v místě nástupu laserového paprsku na boční stěně načernalé skvrny. S pracovním posuvem docházelo ke změnám vzhledu řezu. S postupujícím paprskem se tvoří teplotní pole a v místě, kde paprsek vystupuje ze zkoumaného vzorku, je možné vidět řez bez známek defektů. Tento jev mohly způsobit rozdílné teploty na začátku a na konci řezu.



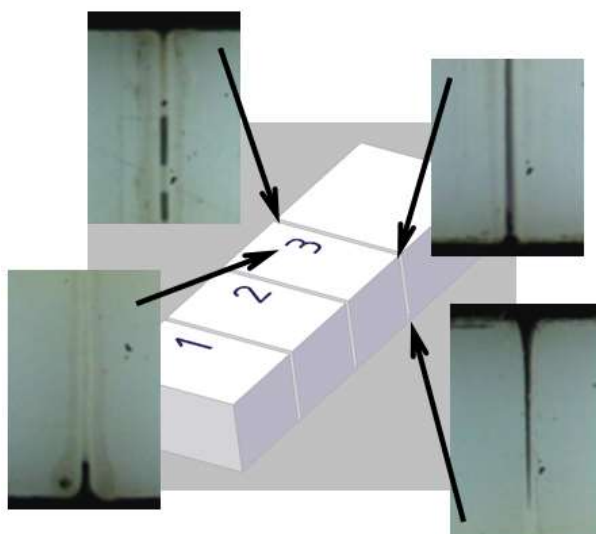
Obr. 10.9: Řez na vzorku z POM C – drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$)

V případě druhé drážky (obr. 10.10, str. 51) za použití vyšší řezné rychlosti ($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$) než u drážky první, došlo ke slití stopy po obrábění z důvodu krátké doby působení laserového paprsku. Materiál se nestihl odpařit. V místě, kde paprsek vystupuje ze vzorku, je vzhled řezu o něco lepší. Snížením výkonu laserového paprsku dochází k nežádoucím jevům v důsledku nízké ablace materiálů.



Obr. 10.10 Řez na vzorku z POM C - drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$)

Jak u druhé drážky, tak i u třetí drážky (obr. 10.11) došlo ke stejné situaci zatuhnutí drážky, s výraznějším efektem v důsledku vyšší řezné rychlosti ($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$).

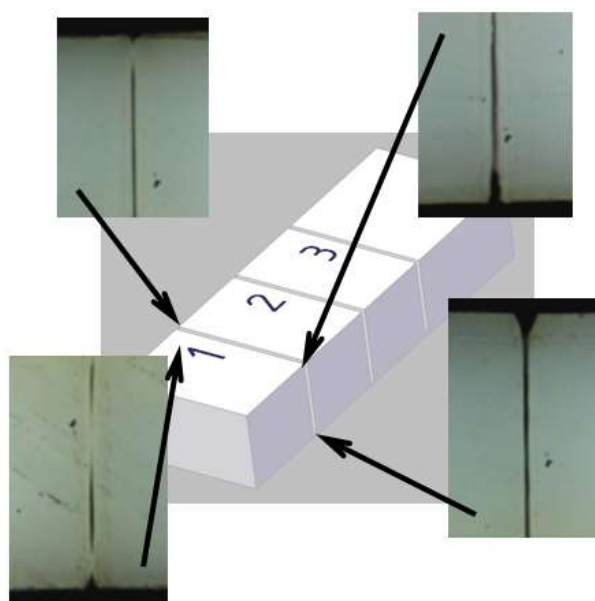


Obr. 10.11: Řez na vzorku z POM C - drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

Při vytvoření drážek v materiálu POM C, za různých řezných rychlostí $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$, $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$, $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ a pro všechny tři drážky stejného výkonu $P = 100W$, došlo k nejlépe obrobene spáře při nejnižší rychlosti $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$.

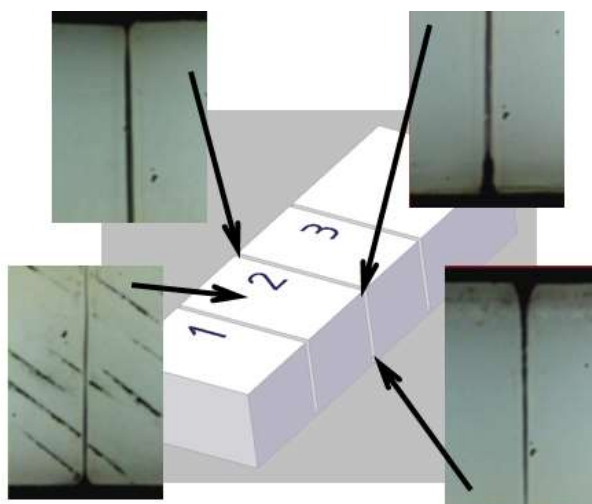
POM H

U materiálu POM H je u první drážky (obr. 10.12) možno spatřit úzký, relativně čistý řez bez ohořelých míst. V místě, kde vstupuje laserový paprsek do materiálu lze pozorovat natavené plochy materiálu. Na boční ploše, kde paprsek vystupuje z materiálu lze pozorovat relativně čistý řez bez degradací. V porovnání s materiálem POM C za těchto řezných podmínek je vytvořena menší hloubku řezu.



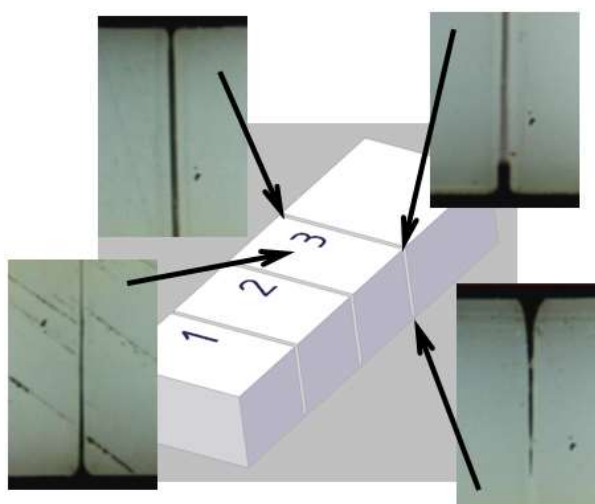
Obr. 10.12: Řez na vzorku z POM H - drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Při nastavení řezných parametrů ($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) pro druhou drážku (obr. 10.13, str. 53), bylo dosaženo úzkého řezu, u kterého nebylo možno číst mikroskopem nějaké defekty. V horní ploše na konci dráhy paprsku se vyskytuje nepatrná oblast ztuhlého materiálu. Opět zde došlo k nedostatečnému odstranění materiálu v důsledku větší řezné rychlosti.



Obr. 10.13: Řez na vzorku z POM H – drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm. s}^{-1}$)

V důsledku zvýšení řezné rychlosti na $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ u drážky 3 (obr. 10.14) je možno opět pozorovat zatuhnutí materiálu ve spáře, tvořené laserovým paprskem, což je nejvíce čitelné v místě výstupu laserového paprsku.

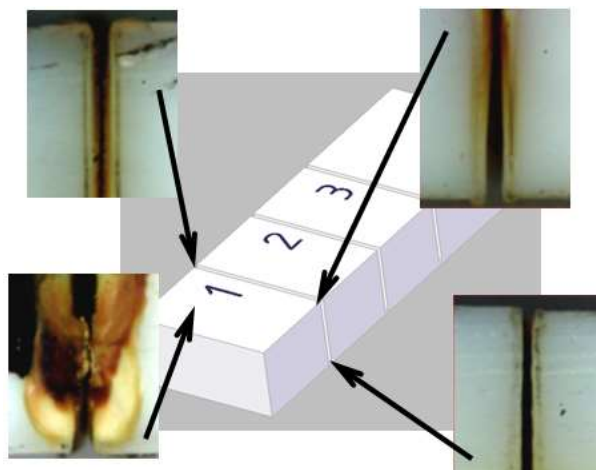


Obr. 10.14: Řez na vzorku z POM H – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

Ze tří drážek vyhotovených na vzorku z POM H je tedy nejkvalitněji obrobena první drážka při nastavení pracovních podmínek o výkonu $P = 100W$ a řezné rychlosti $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$.

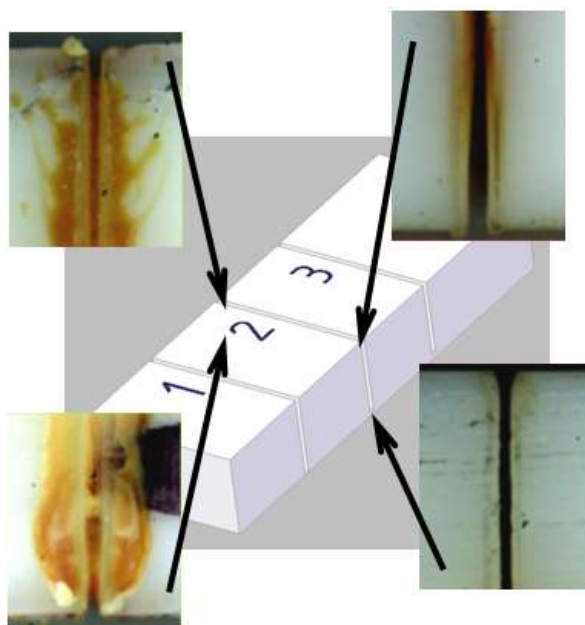
PET

Při vyhotovení první drážky (obr. 10.15) na vzorku z materiálu PET lze pozorovat na vstupu laserového paprsku velmi ohořelé plochy. Z důvodu degradací, které se na tomto materiálu projeví, nebyl tento materiál použit k dalším výzkumům.



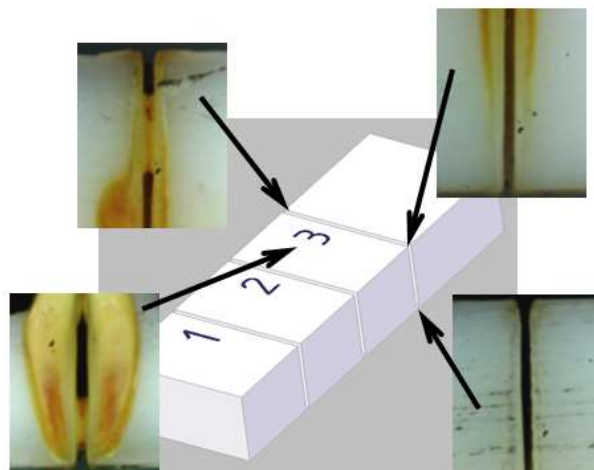
Obr. 10.15: Řez na vzorku z PET – drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Zvýšila-li se řezná rychlost pro druhou drážku (obr. 10.16) na dvojnásobek, objevila se opět spálená místa, avšak v poněkud mírnější podobě, poněvíc na spodní straně místa vstupu laserového paprsku.



Obr. 10.16: Řez na vzorku z PET – drážka 2
($P = 100W$; $f = 30,48 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Při nastavení pracovních parametrů pro třetí drážku (obr. 10.17), tedy při nejrychlejší řezné rychlosti $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$ ze tří drážek, jsou ohořelá místa po řezu stejně jako u předchozích nastavení pro drážku jedna a dva, ale s menší intenzitou.



Obr. 10.17: Řez na vzorku z PET – drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

Žádný ze tří parametrů nebyl vhodný k obrábění materiálu z PET. Přestože zvýšením řezné rychlosti došlo k menšímu zahoření, což bylo na úkor hloubky řezu, ani jeden řez nebylo možno zařadit do dalších experimentů. Dá se říci, že způsob opracování tohoto materiálu laserovým paprskem není vhodný a pro praktické využití nepoužitelný.

10.2 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. 10.18) 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.

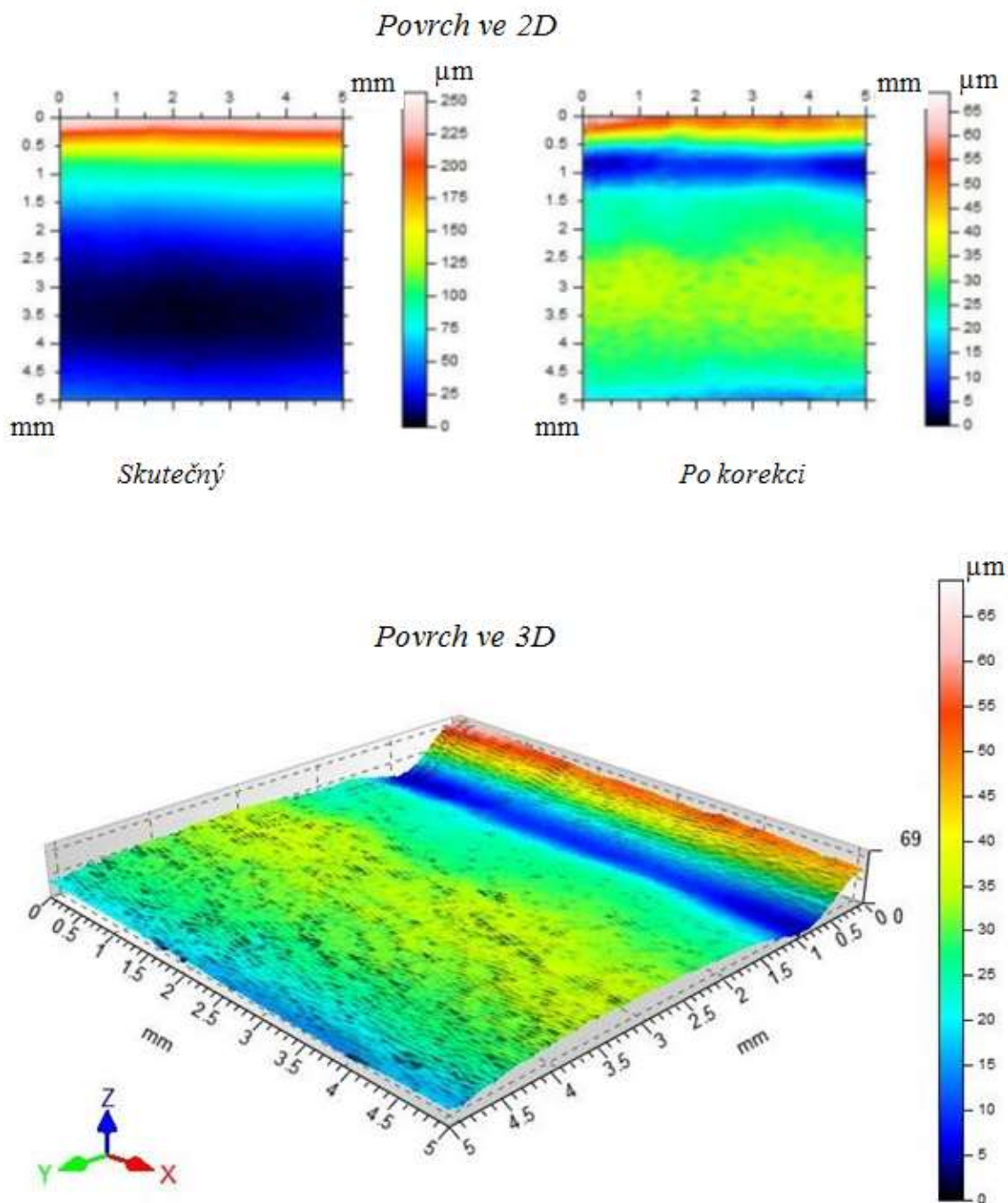
Dvojice nasnímaných povrchů (2D) představuje vlnitost povrchu (vlevo) – skutečný povrch a vyrovnaní vlnitosti (vpravo) – korekce. Pro každý povrch vyrobené plochy je pak uveden konkrétní řez ve 3D s průběhem povrchu první a třetí drážky u jednotlivých zkoumaných materiálů, v prostředí programu Talysurf.



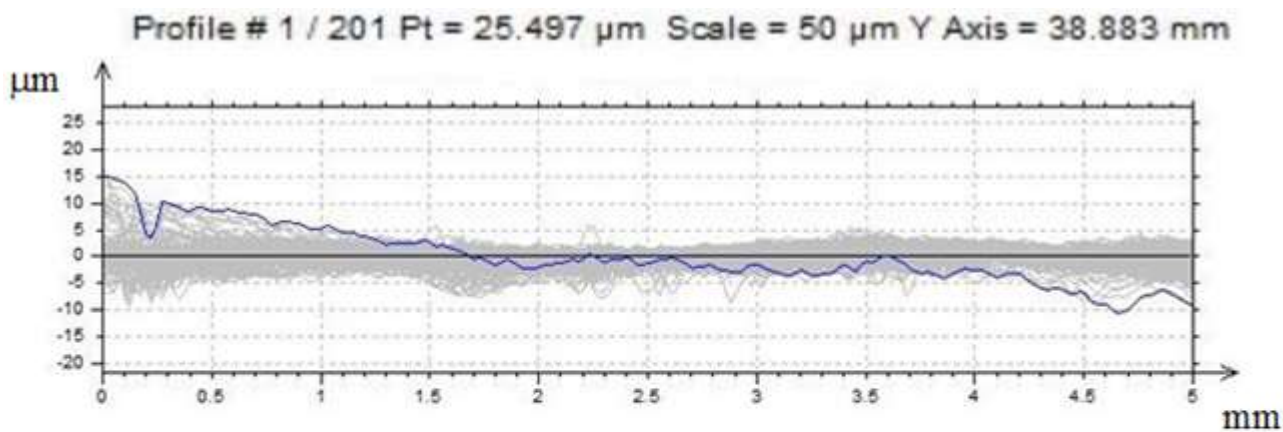
Obr. 10.18: Talysurf CLI 500 [21]

PE 1000

První drážka



Obr. 10.19: Povrch na vzorku z PE 1000 - drážka 1
($P = 100\text{W}$; $f = 15,24\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

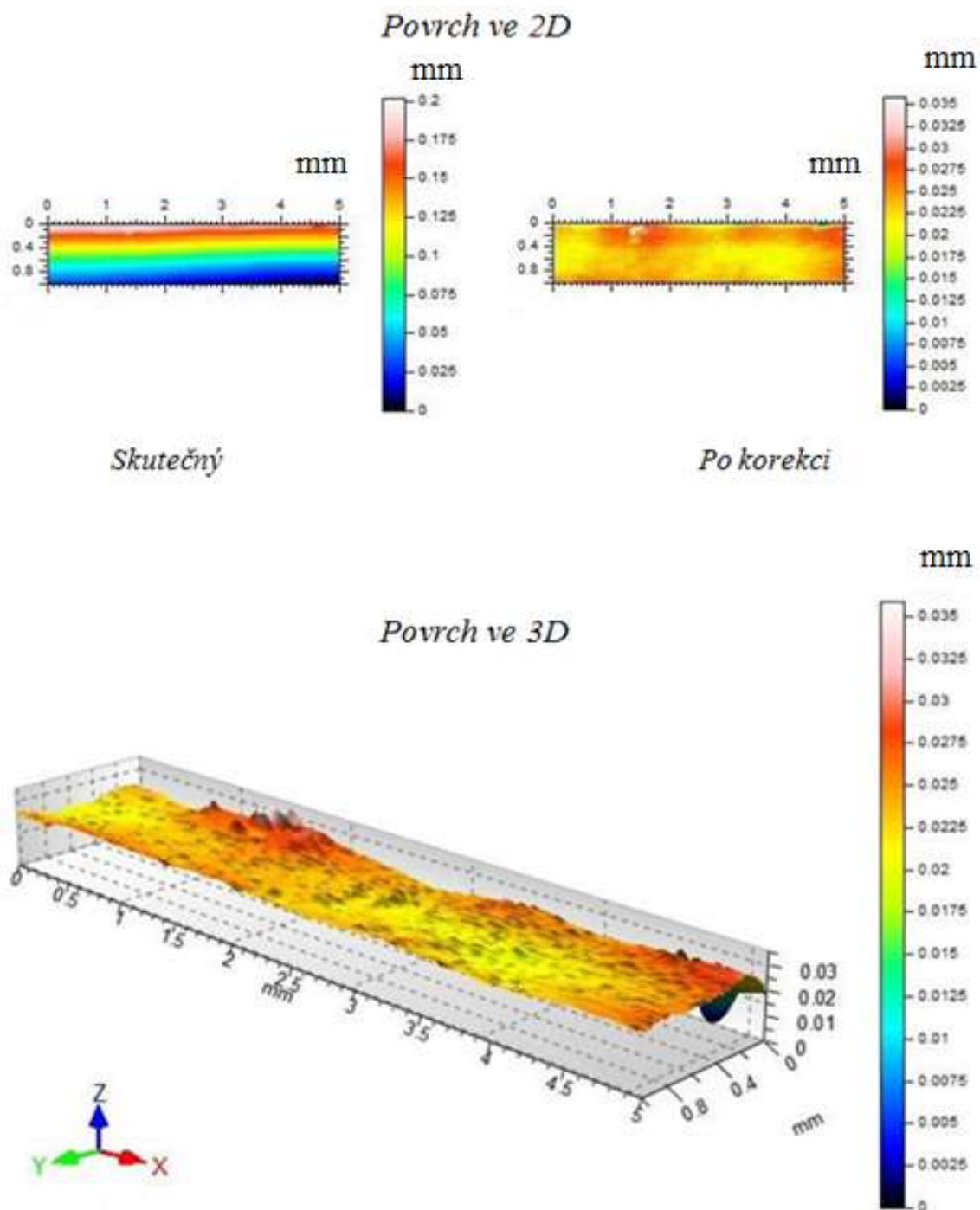


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	2.489	0.664	1.227	4.522
Ra	μm	0.501	0.125	0.275	0.907

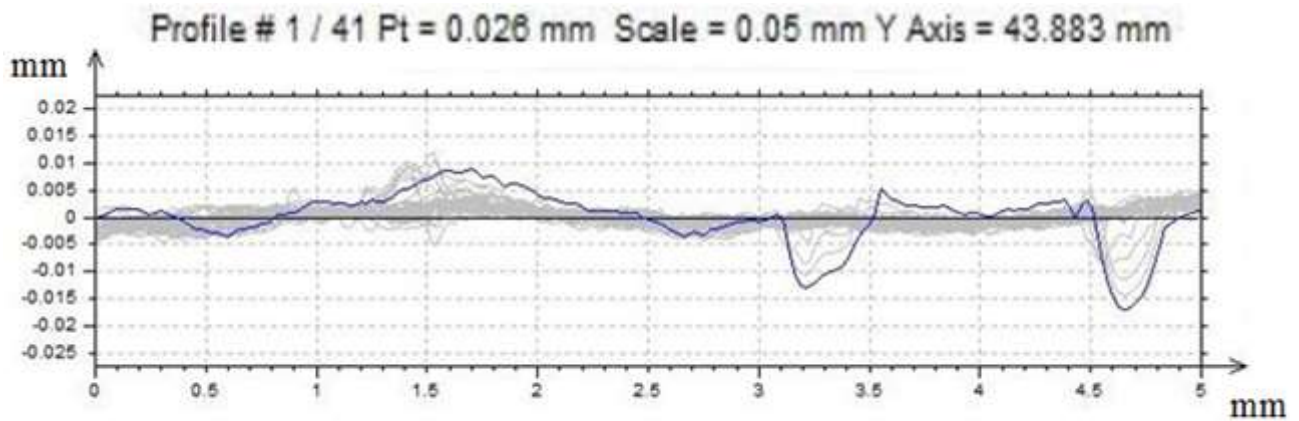
Obr. 10.20 Drsnost povrchu na vzorku z PE 1000 - drážka 1
 $(P = 100\text{W}; f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1})$

Z těchto 200 nasnímaných profilů povrchu můžeme číst průměrnou hodnotu průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu Ra 0,501 μm . Tato zjištěná Ra se jeví jako ne příliš validní. Vzhledem k problémům, provázející obrábění, se tak dá usuzovat na chybu měření.

Třetí drážka



Obr. 10.21: Povrch na vzorku z PE 1000 - 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	mm	0.002	0.001	0.001	0.005
Ra	mm	0	0	0	0.001

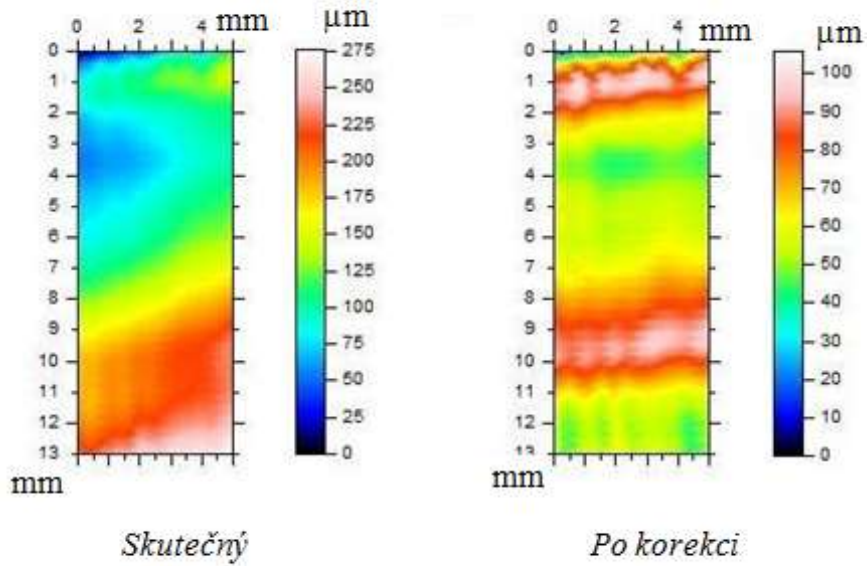
Obr. 10.22 Drsnost povrchu na vzorku z PE 1000 – drážka 3
 ($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Pro posuzování povrchu vzorku z materiálu PE 1000 řezu třetí drážky bylo naskenováno 40 snímků. U tohoto materiálu byla drážka tvořena v malé hloubce. Při posuzování drážky u materiálu z PE 1000 bylo zřejmé, že tato byla zahlcena materiálem, který se nepodařilo při řezání odstranit z důvodu zatuhnutí. Obrobený povrch nelze vyhodnocovat pomocí drsnosti, neboť MEAN hodnoty byly zjištěny pro průměrnou hodnotu střední aritmetické úchylky posuzovaného profilu **Ra 0** a hodnoty nejvyšší výšky profilu **Rz 2**.

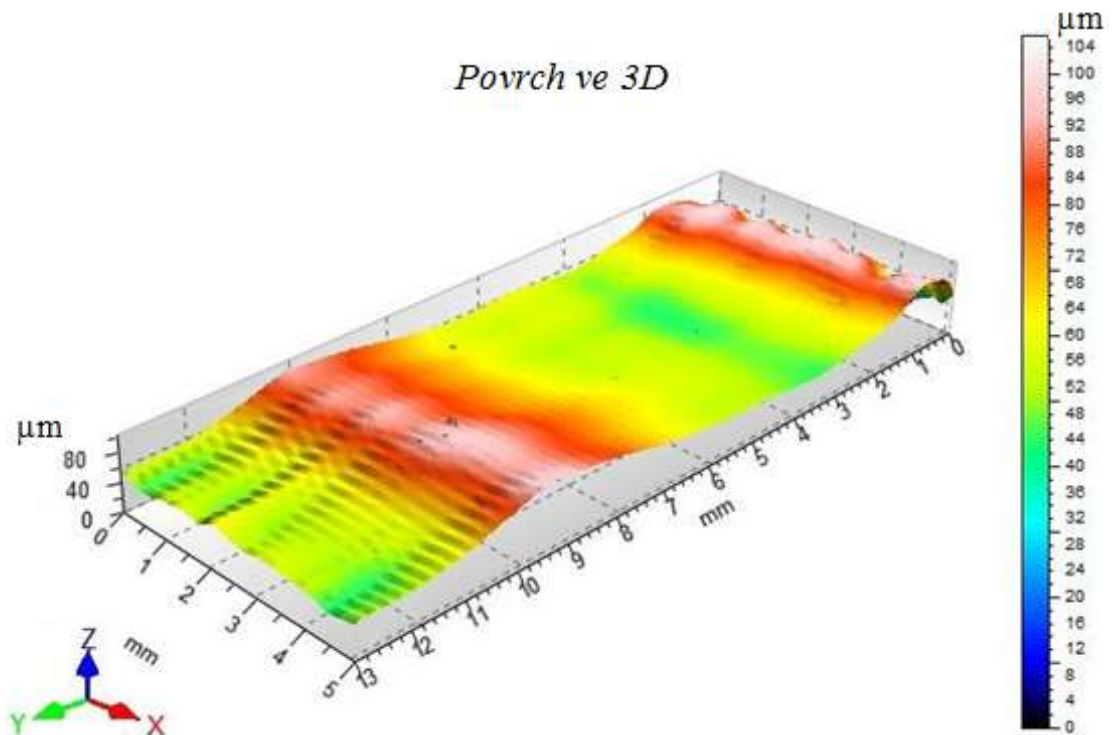
PMMA

První drážka

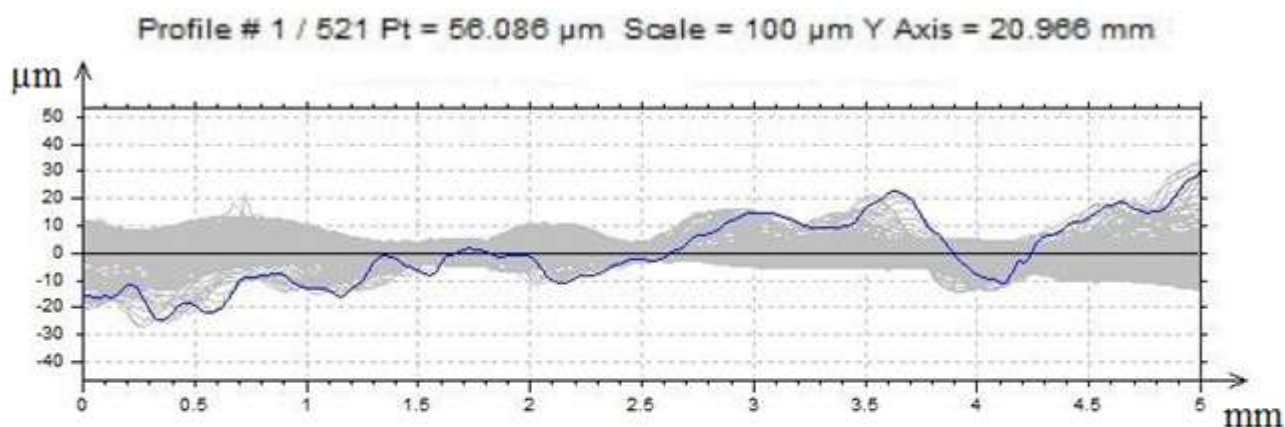
Povrch ve 2D



Povrch ve 3D



Obr. 10.23: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 1
($P = 100\text{W}$; $f = 15,24\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

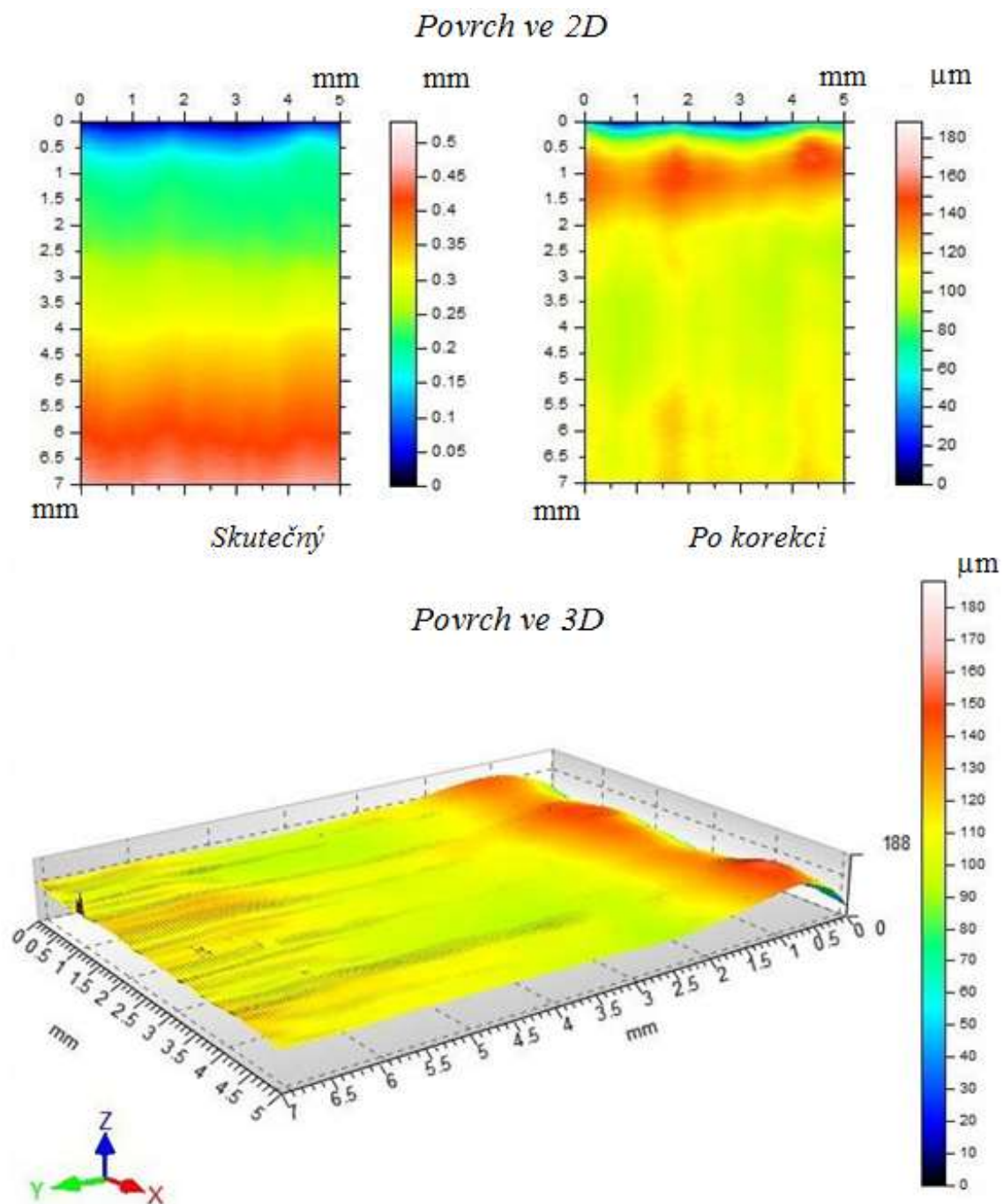


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	1.61	1.53	0.497	9.865
Ra	μm	0.414	0.398	0.122	2.38

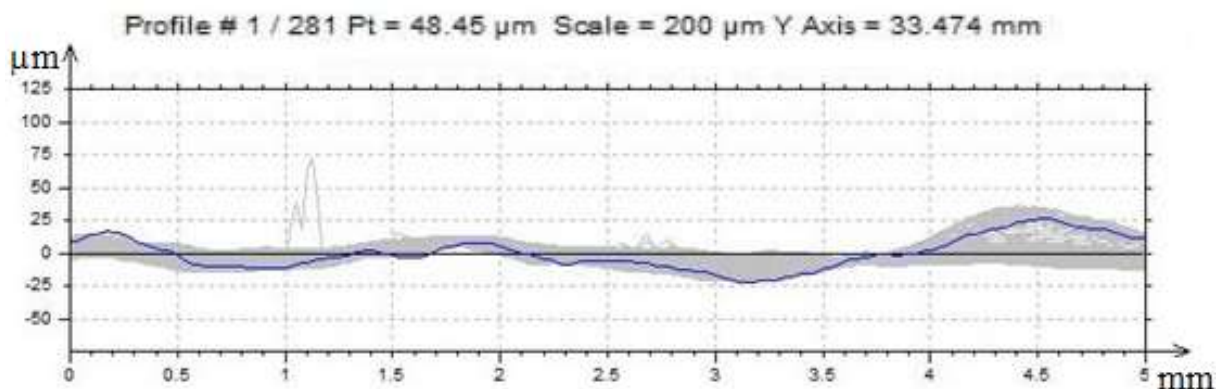
Obr. 10.24: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 1
($P = 100\text{W}$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

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



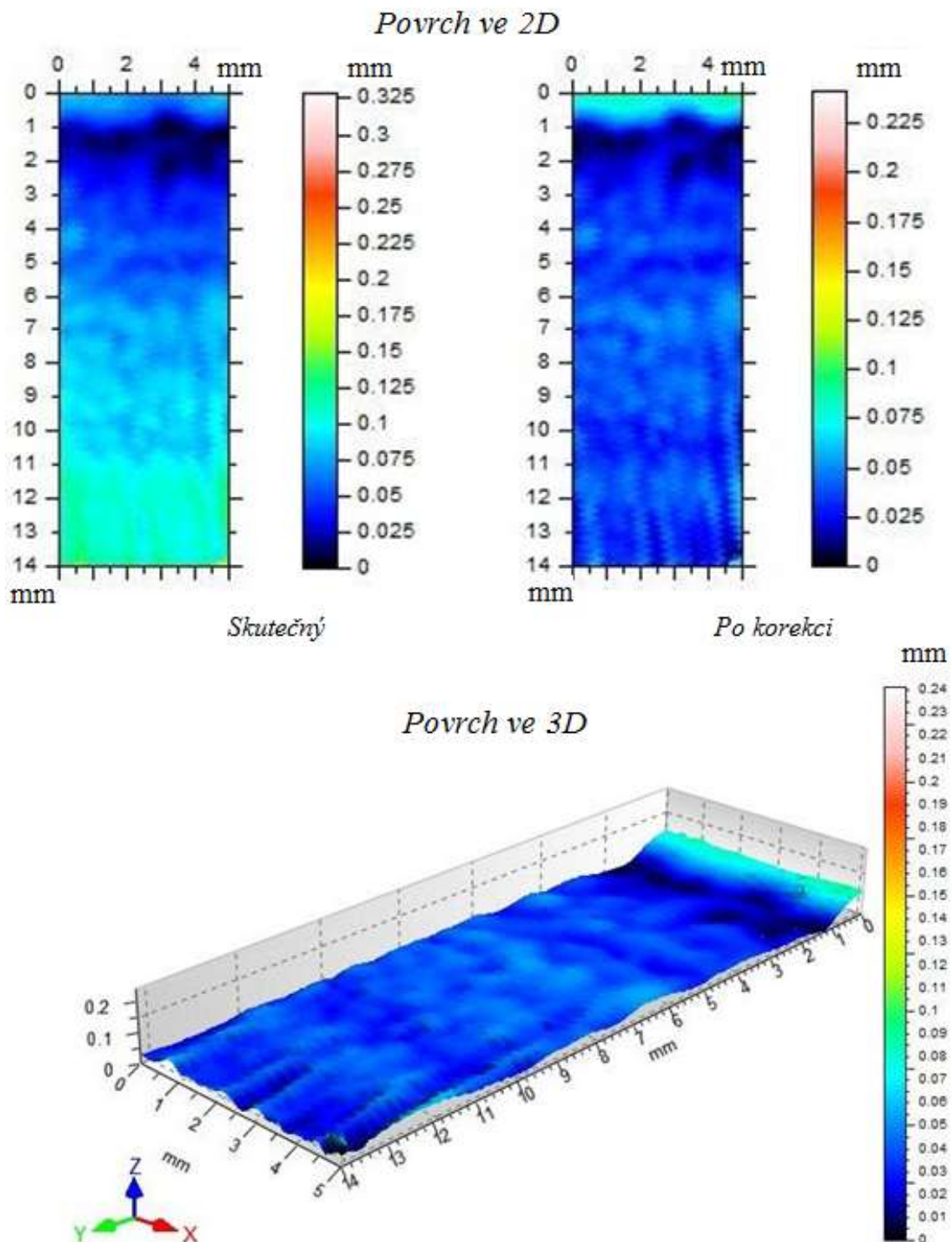
ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	2.907	1.487	1.201	19.941
Ra	μm	0.777	0.301	0.379	3.086

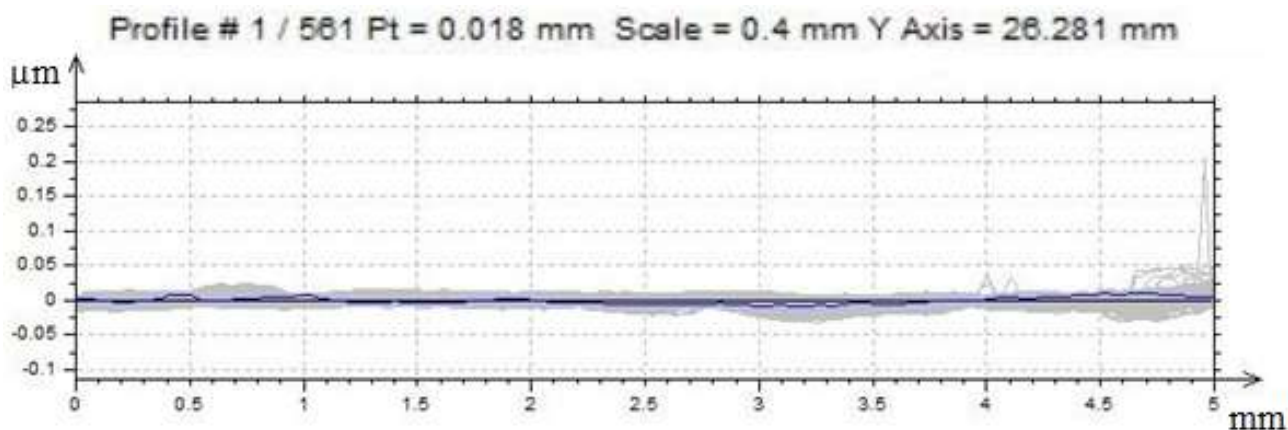
Obr. 10.26: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 3
($P = 100\text{W}$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

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.

POM C

První drážka



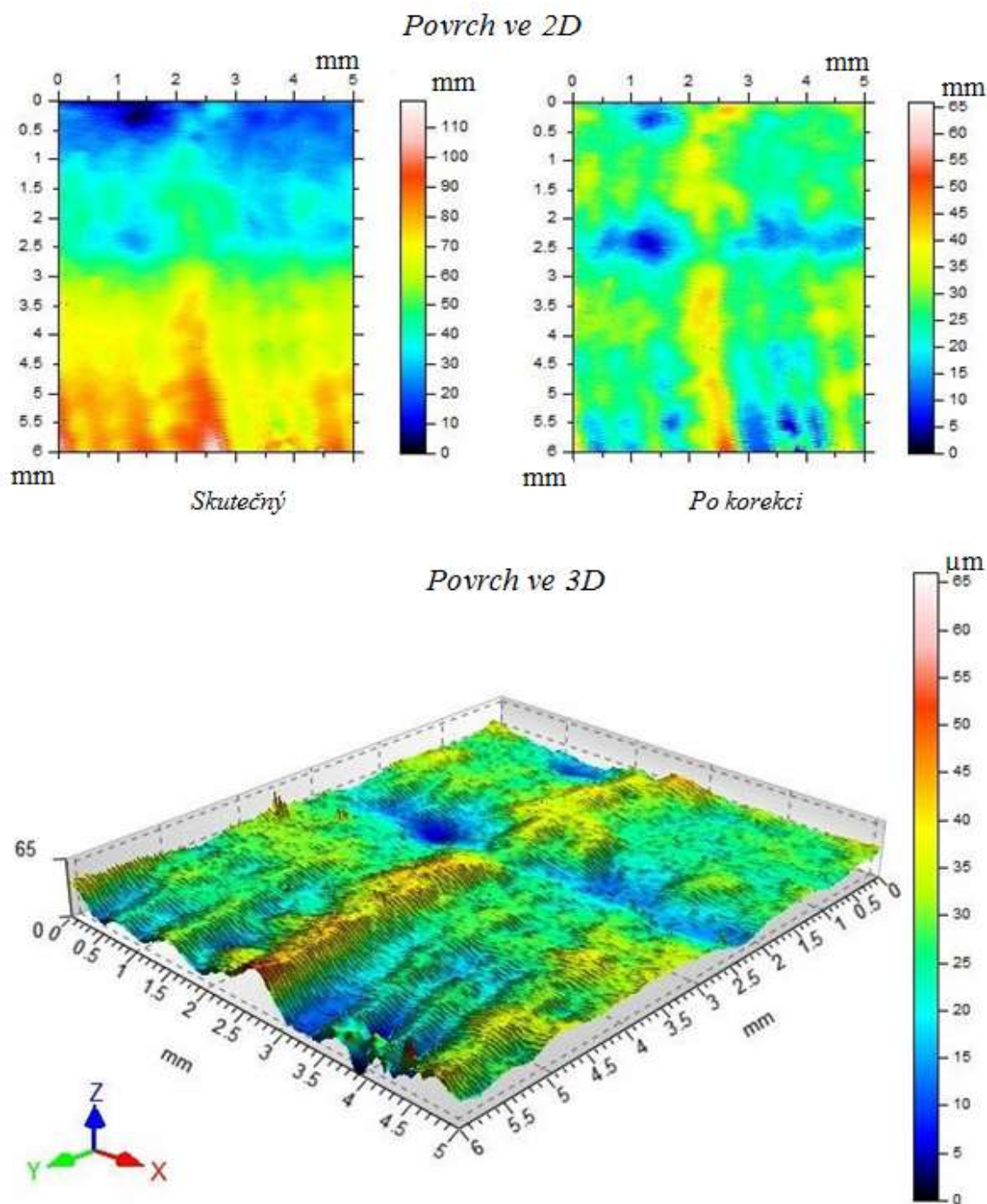


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	mm	0.005	0.002	0.002	0.016
Ra	mm	0.001	0.001	0.001	0.003

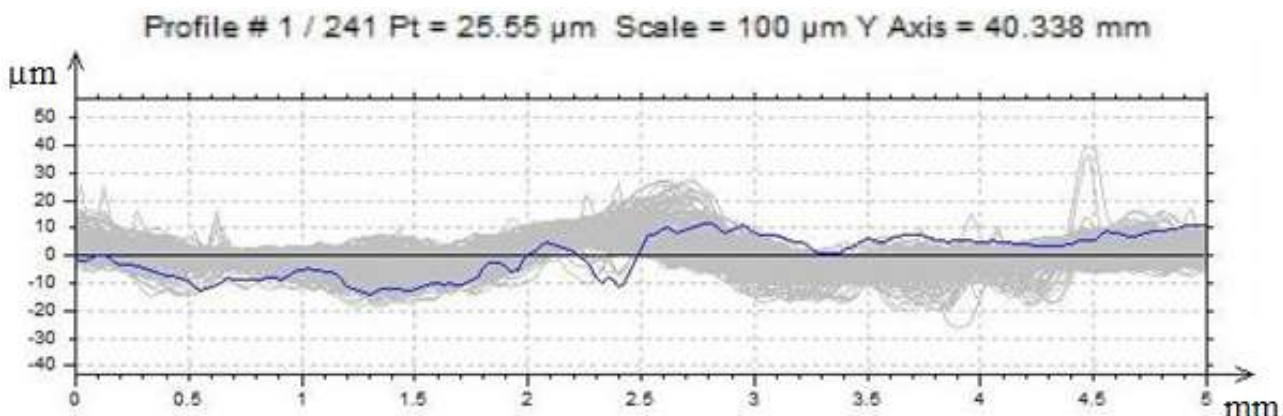
Obr. 10.28: Drsnost povrchu na vzorku z POM C – drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

U vzorku z materiálu POM C bylo pro první drážku provedeno 560 snímků pro vykreslení profilu zkoumaného povrchu první drážky. Jak je z obrázku 10.28 možno pozorovat, byly Mean hodnoty drsnosti pro střední aritmetickou úchylku úchylky **Ra 1** a hodnota nejvyšší výšky profilu **Rz 5**.

Třetí drážka



Obr. 10.29: Povrch na vzorku z POM C - drážka 3
($P = 100W$; $f = 45,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



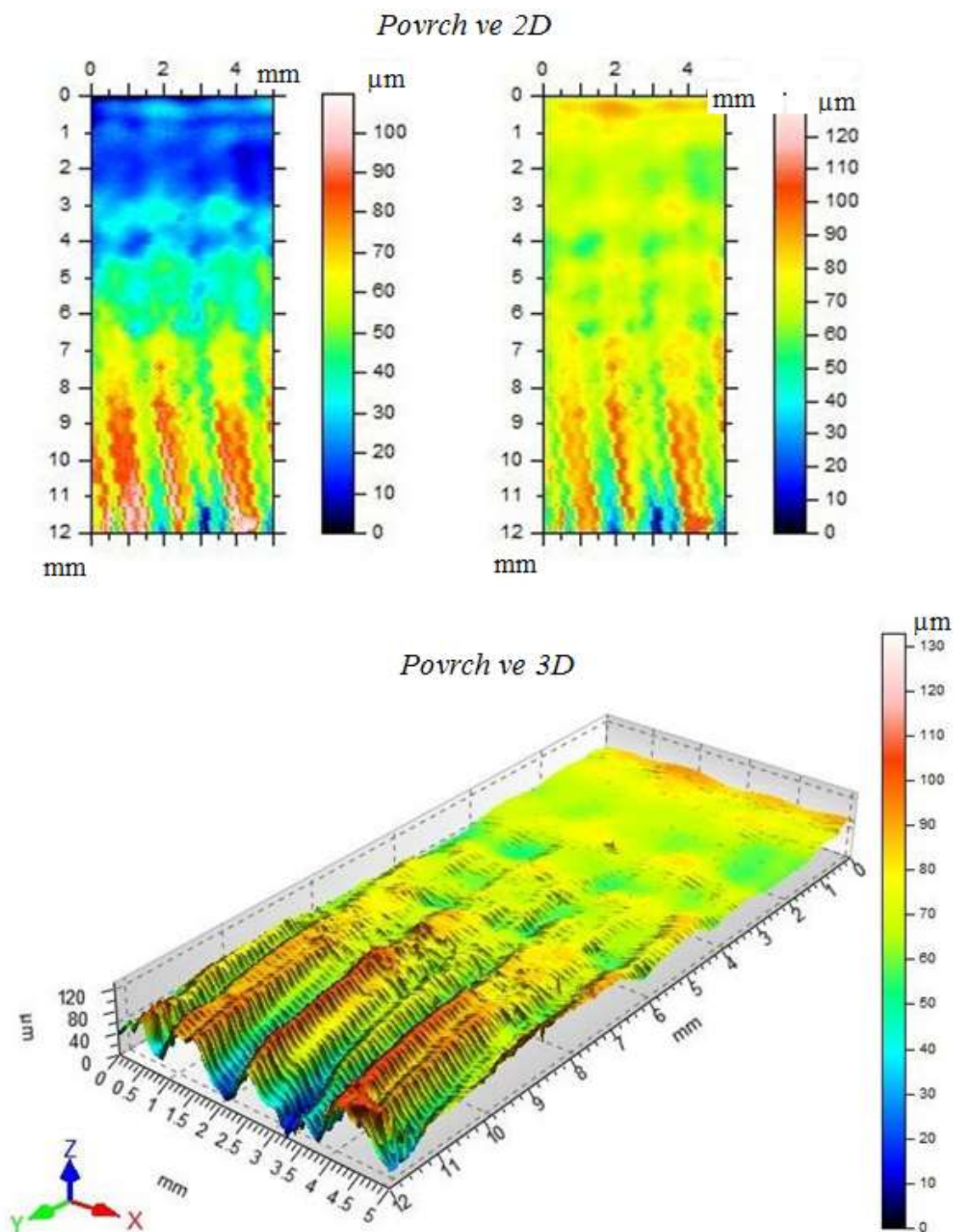
ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	5.595	2.068	2.998	16.053
Ra	μm	1.343	0.564	0.67	4.03

Obr. 10.30: Drsnost povrchu na vzorku z POM C – drážka 3
($P = 100\text{W}$; $f = 45,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

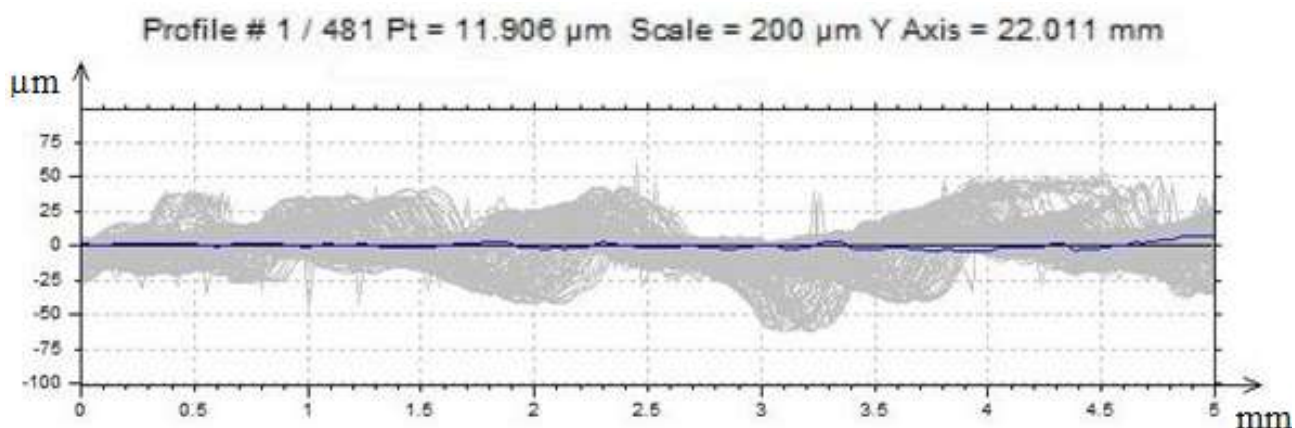
Pro vyhodnocení třetí drážky na vzorku materiálu POM C bylo vyhotoveno 240 snímků. MEAN hodnoty drsností **Ra 1,343** a **Rz 5,595** u tohoto materiálu, stejně jako u předchozího PMMA, vyšly větší se zvýšením řezné rychlosti. V porovnání s materiálem PMMA však byly tyto hodnoty vyšší, tedy se jedná o horší jakost povrchu u materiálu POM C.

POM H

První drážka



Obr. 10.31: Povrch na vzorku z POM H – drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



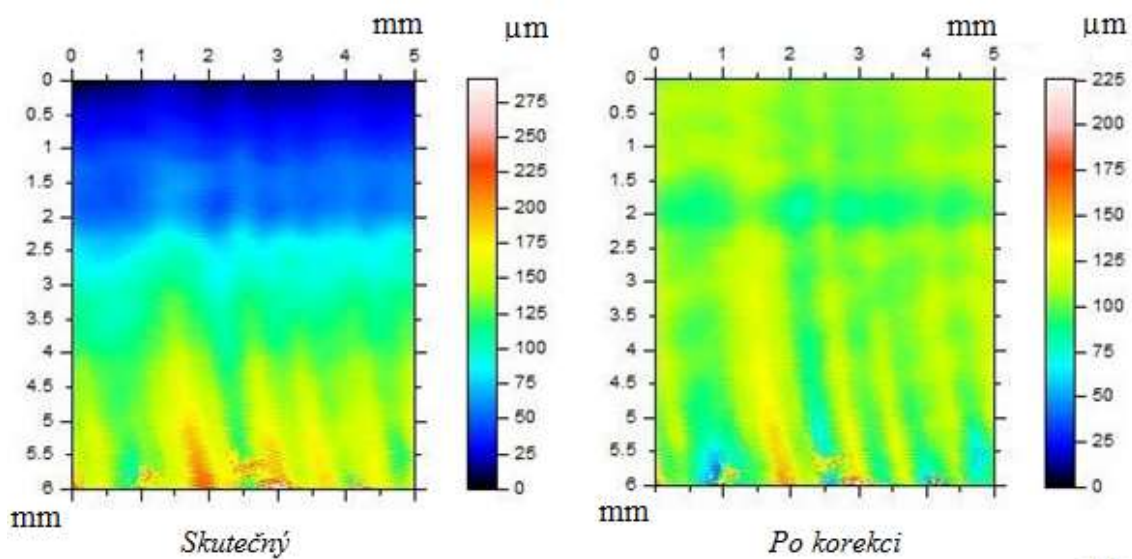
ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	10.555	9.234	1.936	35.778
Ra	μm	2.645	2.46	0.42	9.313

Obr. 10.32: Drsnost povrchu na vzorku z POM H – drážka 1
($P = 100\text{W}$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

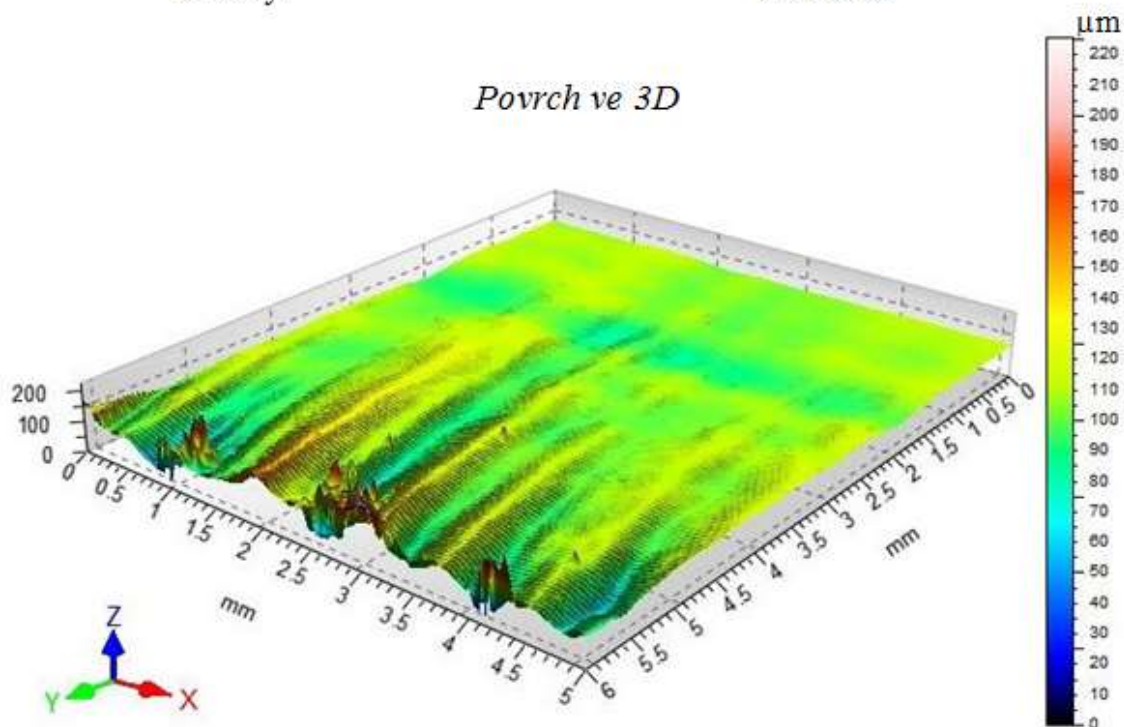
Pro vzorek z materiálu POM H bylo pro vyhotovení profilu provedeno 480 snímků. Jak je z obrázku 10. 32 zřejmé, bylo dosaženo Mean hodnot pro **Ra 2,645** a pro **Rz 10,555**.

Třetí drážka

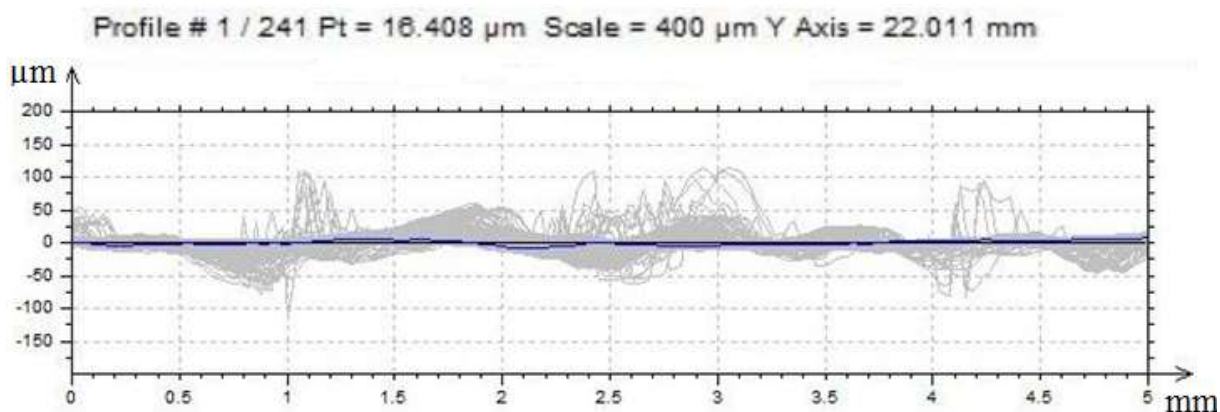
Povrch ve 2D



Povrch ve 3D



Obr. 10.33: Povrch na vzorku z POM H – drážka 3
($P = 100\text{W}$; $f = 45,72\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)



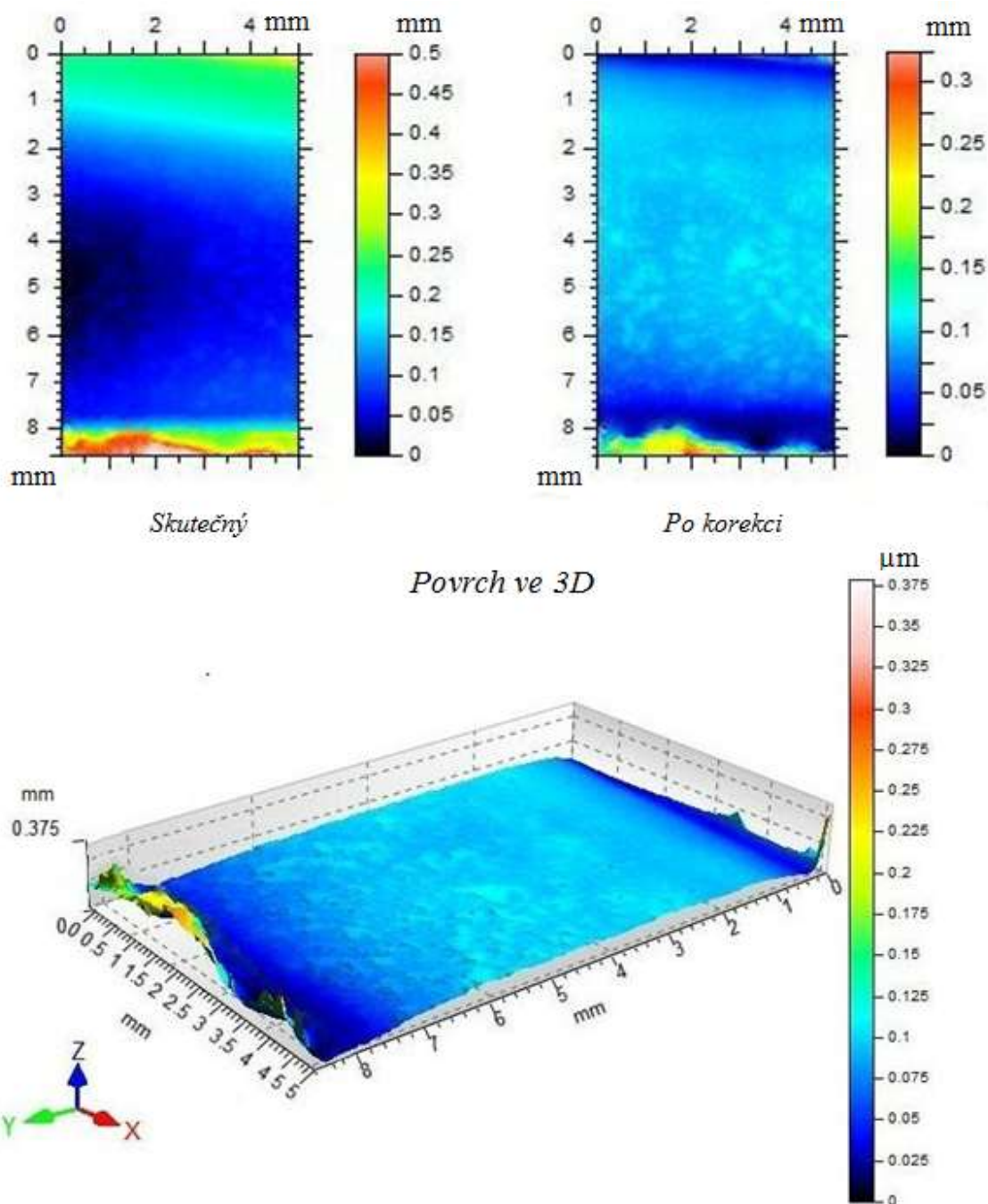
ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	μm	11.609	15.637	2.145	90.44
Ra	μm	2.694	3.054	0.513	17.898

Obr. 10.34: Drsnost povrchu na vzorku z POM H – drážka 3
($P = 100\text{W}$; $f = 45,72 \text{ mm. s}^{-1}$)

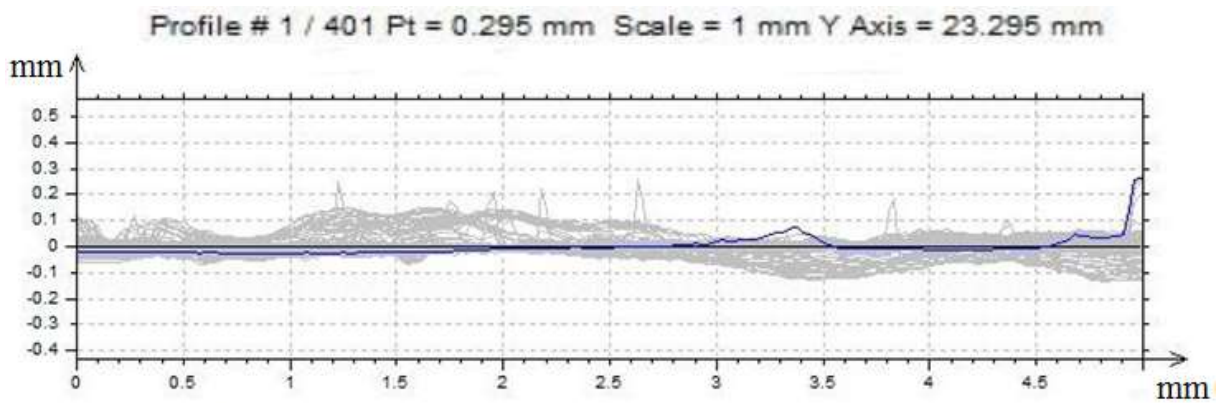
Pro vyhodnocení třetí drážky u vzorku z materiálu POM H bylo pořízeno 240 snímků pro vykreslení profilu. Při zvýšení řezné rychlosti u tohoto materiálu se hodnoty drsností navzájem odlišují jen minimálně (pro $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$ je **Ra** 2,645 a pro **Rz** 10,555). Můžeme tedy usuzovat, že změna řezné rychlosti, v tomto případě, nemá vliv na jakost povrchu.

PP

První drážka



Obr. 10.35: Povrch na vzorku z PP- drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

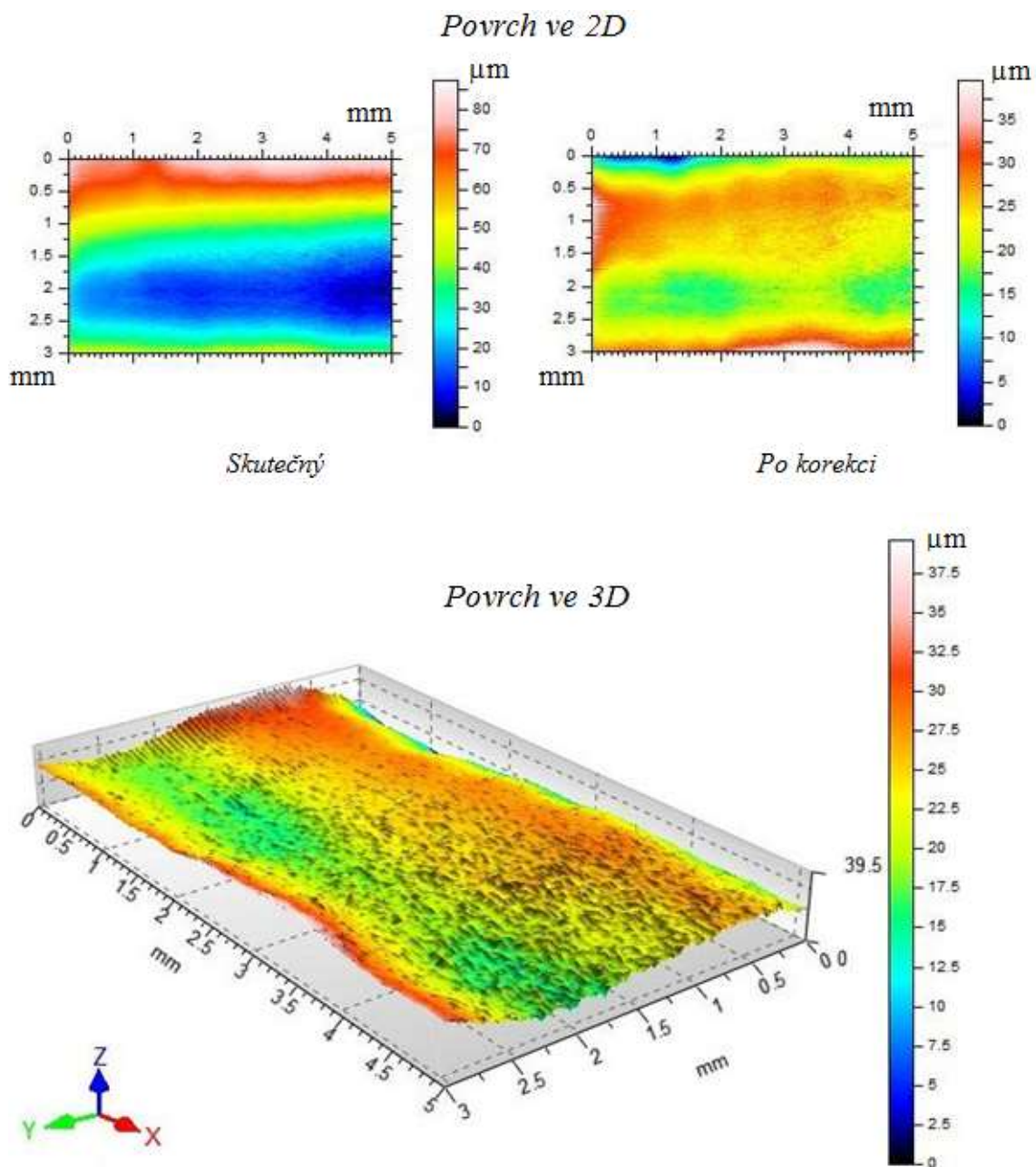


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	mm	0.011	0.012	0.002	0.109
Ra	mm	0.002	0.002	0	0.016

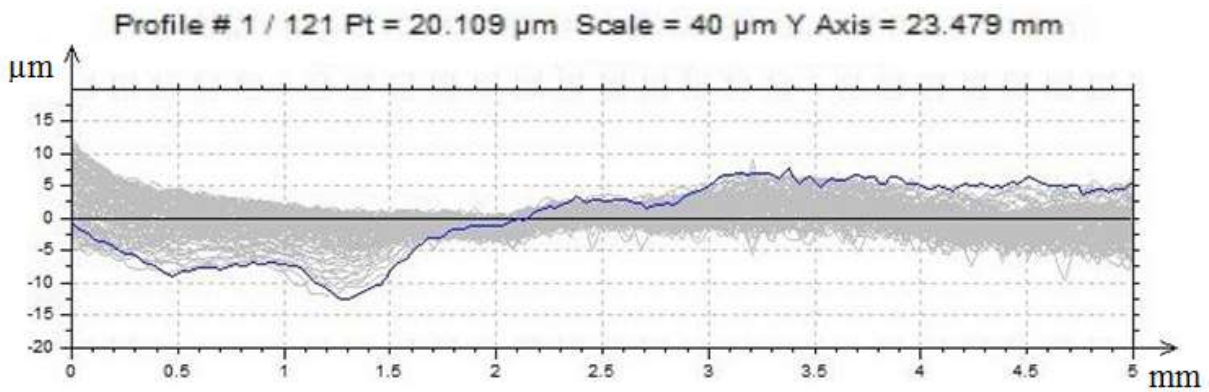
Obr. 10.36: Drsnost povrchu na vzorku z PP - drážka 1
($P = 100W$; $f = 15,24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Pro první drážku vytvořenou na vzorku z materiálu PP bylo pořízeno 400 snímků profilů. Z posuzovaných řezů, podobně jako u materiálu PE 1000 (obr. 10. 20, str. 58) se dalo usuzovat na nečitelnost zkoumané drážky.

Třetí drážka PP



Obr. 10.37: Povrch na vzorku z PP – 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	2.461	0.512	1.653	4.011
Ra	μm	0.49	0.096	0.326	0.832

Obr. 10.38: Drsnost povrchu na vzorku z PP – drážka 3
 ($P = 100\text{W}$; $f = 45,72 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Naměřené hodnoty drsností u tohoto vzorku pro 3. drážku, se zvýšenou řeznou rychlostí, byly příliš nízké v důsledku rozteklých povrchů. Z hlediska vlivu řezné rychlosti na hodnoty Ra a Rz nelze tento materiál posuzovat.

11. MĚŘENÍ TVRDOSTI

Pro měření mikro-tvrdomosti byl použit tvrdoměr, Micro Combi Tester CSM (obr. 11.1), 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. Konkrétní rozsahy zkušební zatěžující síly F pro měření tvrdosti jsou uvedeny v tabulce 11. 2, str. 78. [23]



Obr. 11.1: CSM Micro Combi Tester [24]

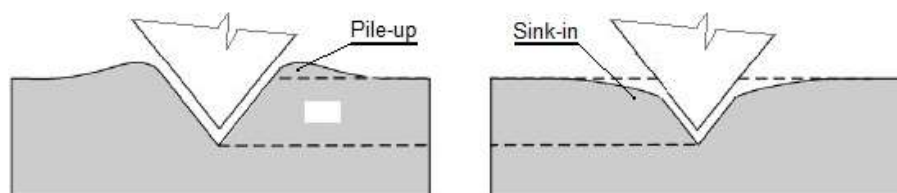
Tabulka 11. 1 Specifikace zařízení CSM Micro Combi Tester

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

Tabulka 11. 2 Rozsahy zatěžujících sil F pro různé zkoušky tvrdosti dle Vikerse

Název zkoušky	Rozsah zatížení [N]	Značení tvrdosti
Zkouška tvrdosti dle Vikerse	$F > 49,03$	$\geq \text{HV } 5$
Zkouška tvrdosti dle Vikerse při nízkém zatížení	$1,961 \leq F \leq 49,03$	$\text{HV } 0,2 \div \text{HV } 5$
Zkouška mikro-tvrdosti dle Vikerse	$0,09807 \leq F \leq 1,961$	$\text{HV } 0,01 \div \text{HV } 0,2$

Vtiskový modul pružnosti E_{IT} , který je v ideálním případě stejný jako u Youngova modulu, je dalším posuzovaným a získaným parametrem. Platí, že vtiskový modul se dá, stejně jako Youngův, vypočítat ze směrnice tečny odtěžující křivky. Z výsledků, které byly získanou veličinou a jež jsou v následných krocích této práce popsány, lze vidět, že získaná tvrdost, resp. vtisková mikro-tvrdost do značné míry koresponduje a odráží podobný průběh výsledků jako u hodnot vtiskového modulu pružnosti. Rozdíl mezi modulem Youngovým a vtiskovým může nastat v případě projevení deformace typu „Pile-up“ (tedy nakupe- ní okraje) nebo „Sink-in“ (tedy vtažení okraje), což znázorňuje následující obrá- zek 11.2.



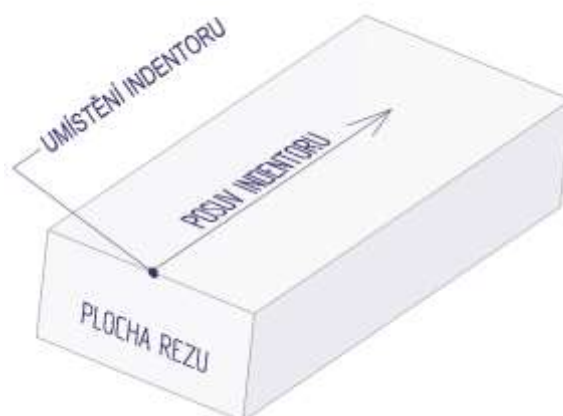
Obr. 11.2: Zobrazení deformace typu Pile-up a Sink-in [23]

Co se týče míry relaxace u vytvořených obrazů vtisku na zkoumaných poly- merních materiálech, platí, že největší míra relaxace vtiskového obrazu probíhá v krátkém čase po vyjetí indentoru z povrchu zkoumaného polymerního materiá- lu. V rámci této problematiky je zvolená metoda DSI zcela ideální. Snímání hloubky vtisku umožňuje získat a posuzovat řadu důležitých veličin, které jsou všeobecně standartními metodami neměřitelné. Metoda DSI je velmi přesná, a to i pro posouzení nejmenších rozdílů, a to buď v hodnotách mikro-tvrdosti podle Vikerse, nebo v hodnotách vtiskového modulu pružnosti. Velkou výhodou této

metody je zároveň její nedestruktivní charakter. Je tedy zcela možné provádět a získat hodnoty jmenovaných veličin i přímo na výrobku, umožní-li toto výrobek svými rozměry vůči umístění na měřicím stole. [23]

11.1 Měření mikro-tvrdomosti a modulu pružnosti

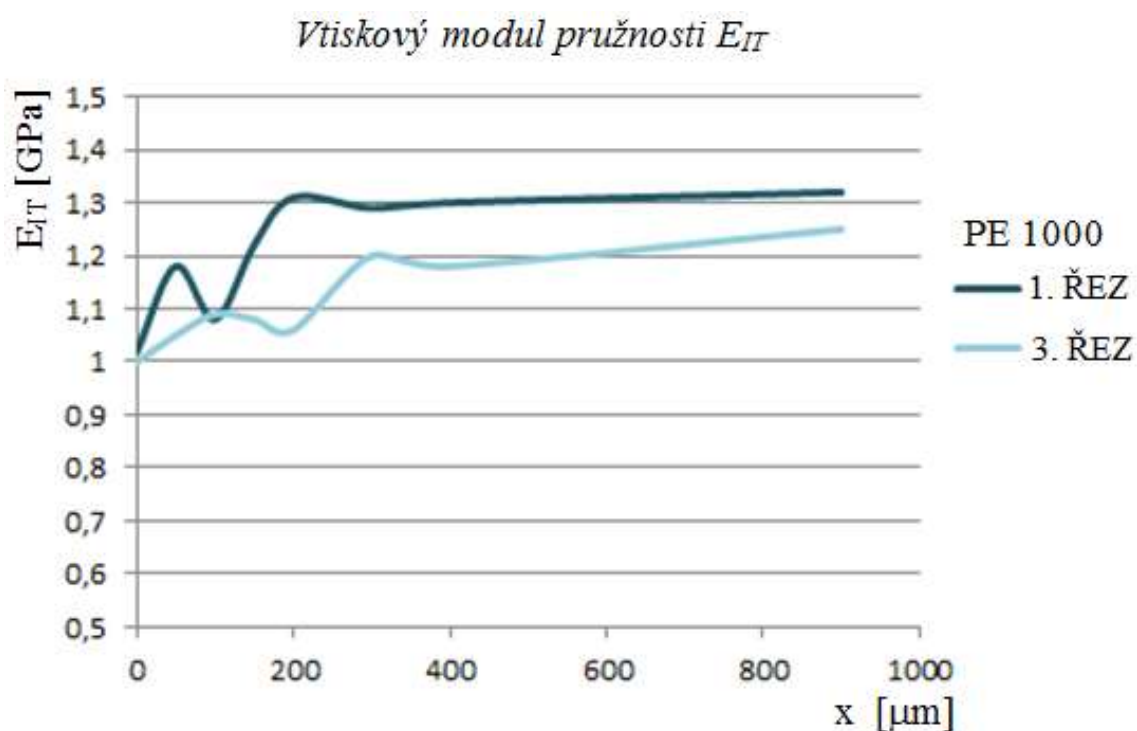
Laboratorní zkoušky byly provedeny na vzorcích z materiálu, PE 1000, PMMA, POM H, PP a zkoumaly se opět drážky prvního a třetího řezu. Důraz u tohoto měření byl kladen na oblast co nejbližší řezu, tj. oblast největšího ozáření laserem tak, aby bylo možno posoudit vliv tohoto ozáření na měřené veličiny. Měření mikro-tvrdomosti proběhlo se zatížením 1N s dobou výdrže 10s. Pro posouzení vlivu laserového paprsku na mikro-tvrdomost byla indentace provedena na zkušebním vzorku postupně od místa řezu (obr. 11. 3) 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.



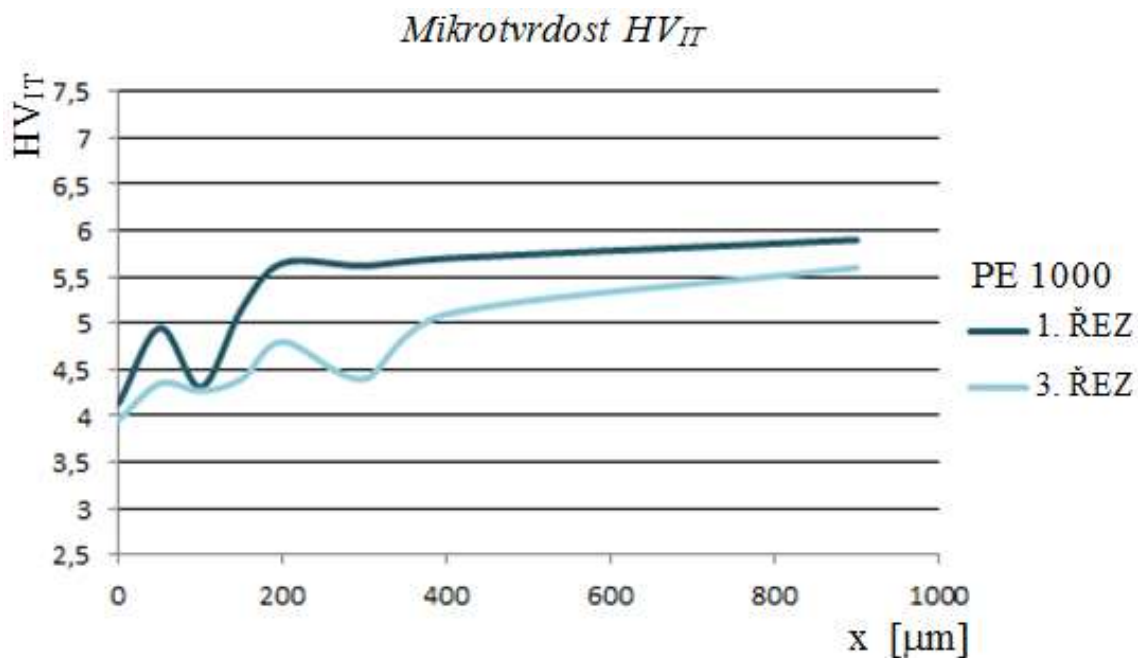
Obr. 11.3: Vzorek pro měření mikro-tvrdomosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT}

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

PE 1000

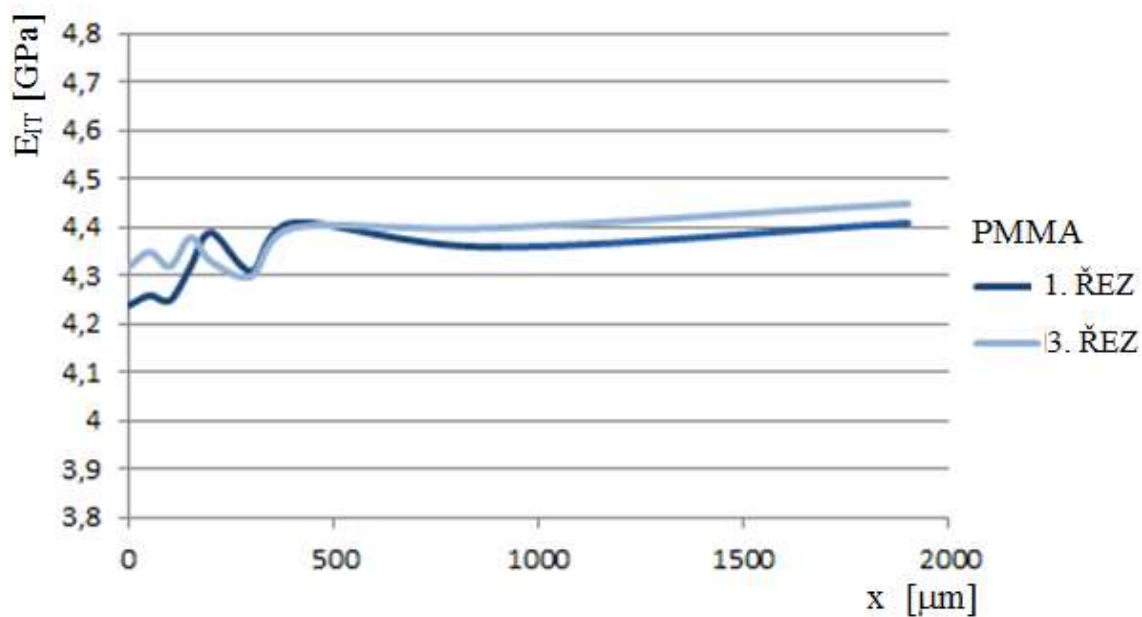


Obr. 11.4: Závislost vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na posuvu indentoru x pro PE 1000

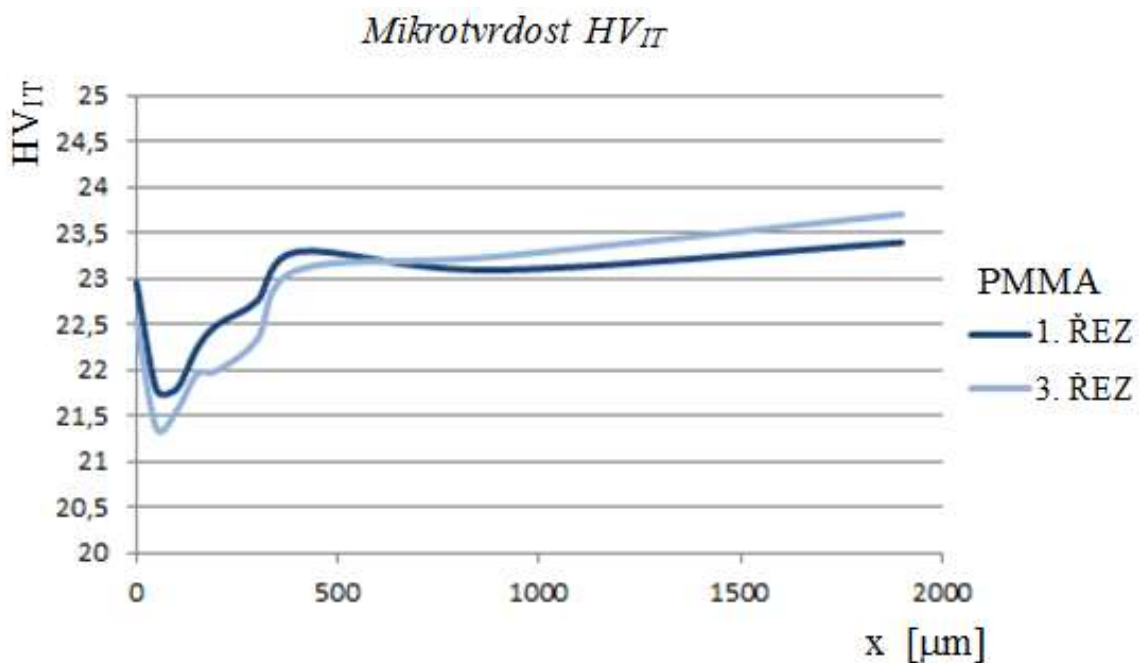


Obr. 11.5: Závislost mikro-tvrdości HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PE 1000

PMMA

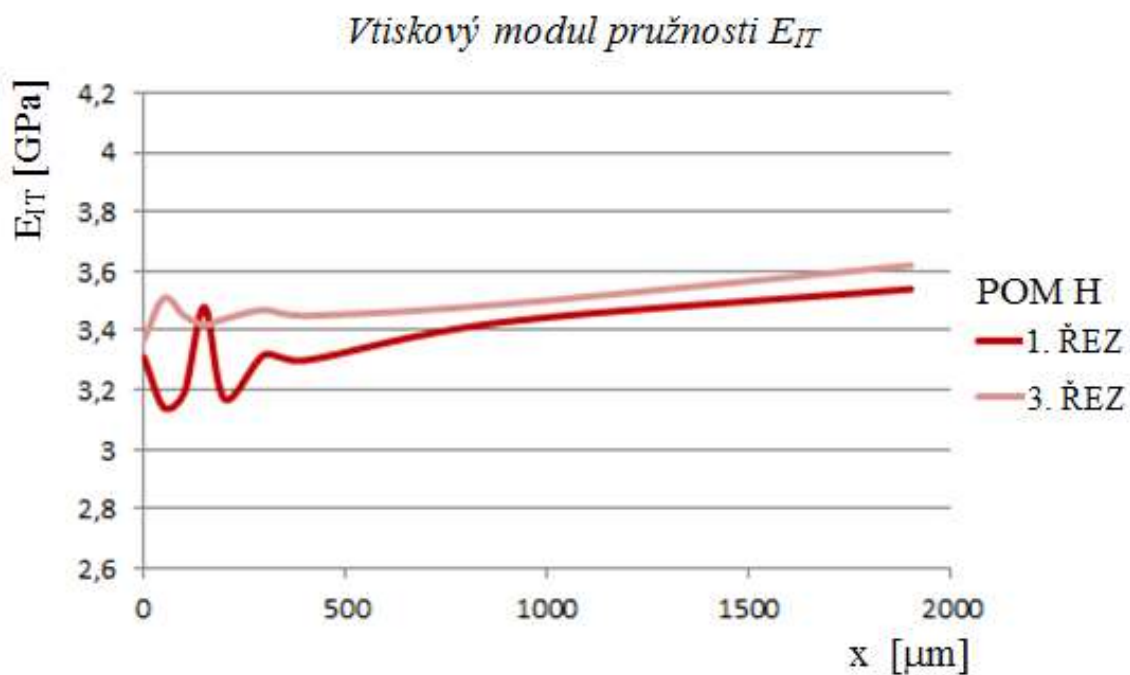


Obr. 11.6: Závislost vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA

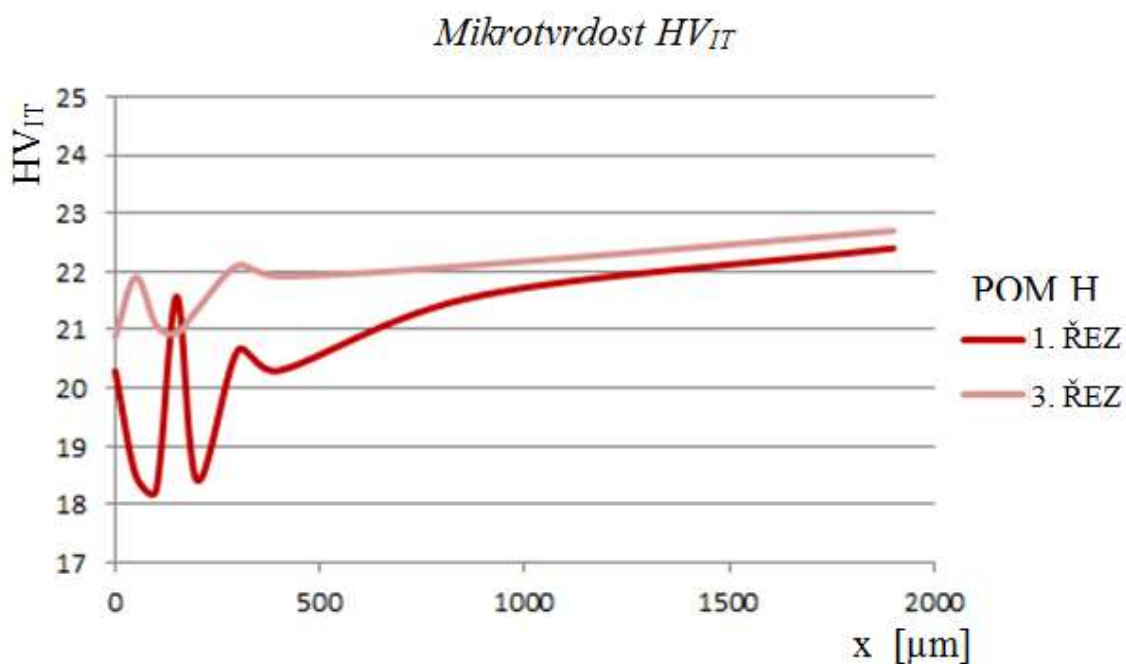


Obr. 11.7: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA

POM H

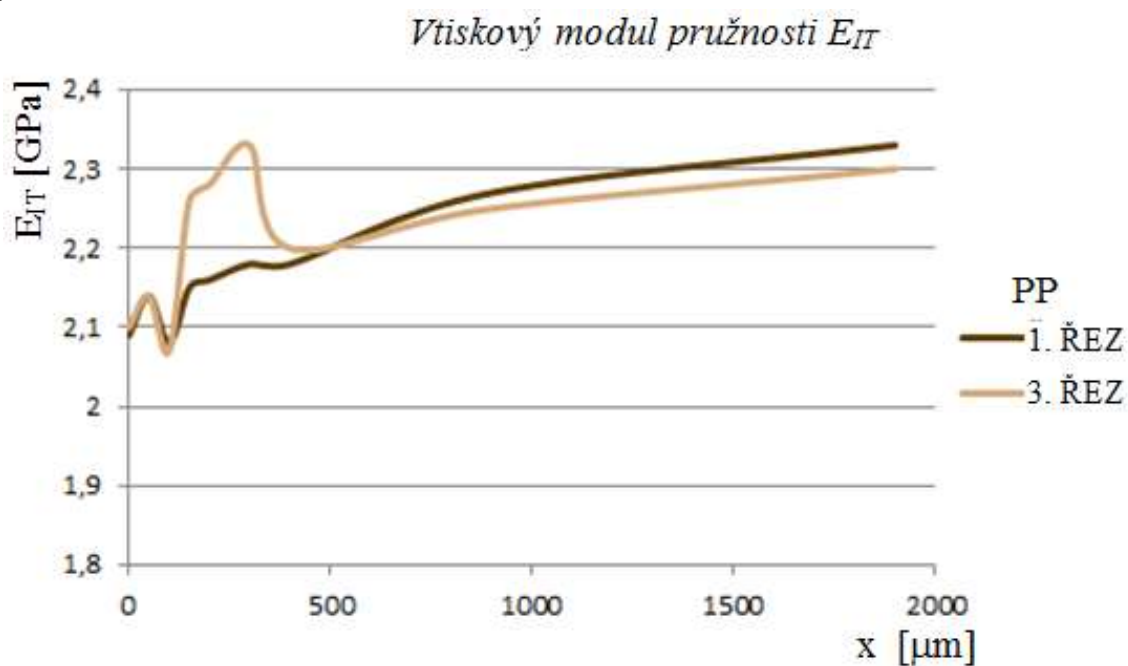


Obr. 11.8: Závislost vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na posuvu indentoru x pro POM H

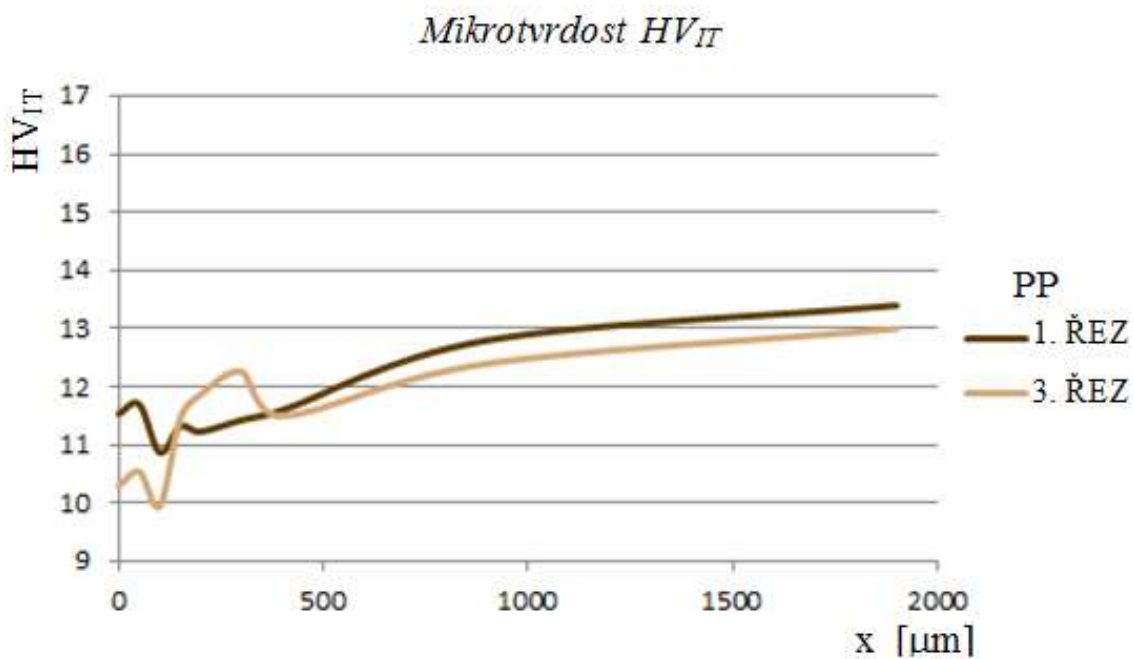


Obr. 11.9: Závislost mikro-tvrdości HV_{IT} na posuvu indentoru x pro POM H

PP



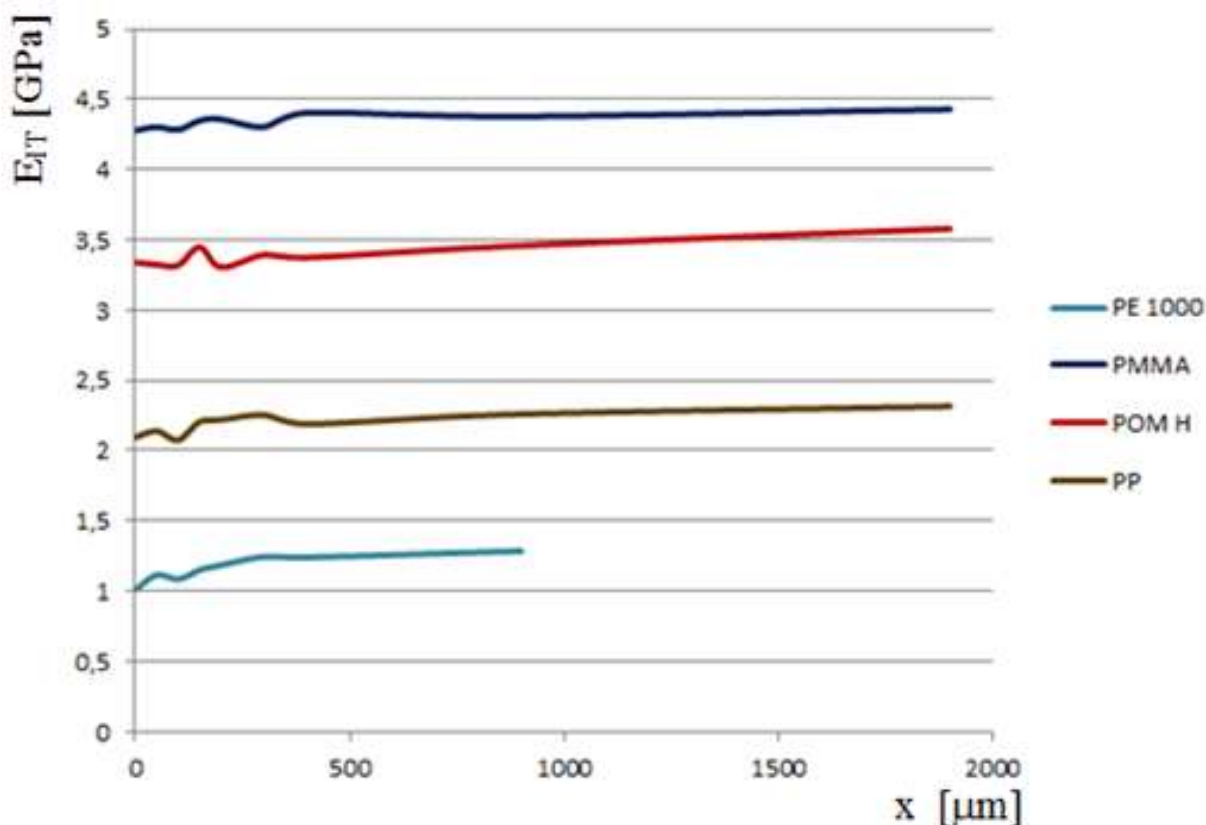
Obr. 11.10: Závislost vtiskového modulu pružnosti E_{IT} na posuvu indentoru x pro PP



Obr. 11.11: Závislost mikro-tvrdości HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PP

Porovnání modulů pružnosti E_{IT}

Pro materiály, PE 1000, PMMA, POM H, PP, které byly pro experiment vybrány, je v následujícím grafu (obr. 11.12) 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.



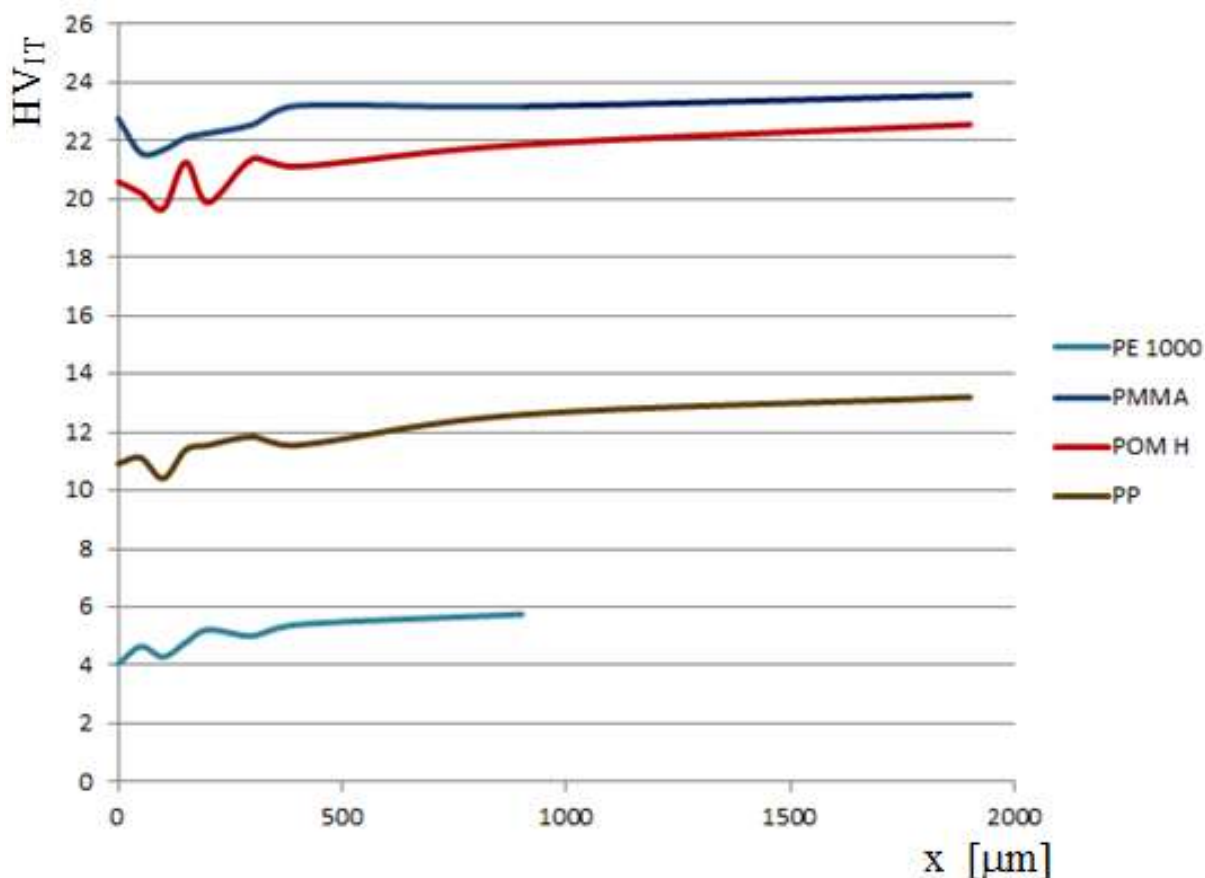
Obr. 11.12: Porovnání vtiskových modulů pružnosti E_{IT} zkoumaných materiálů

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. 11.13) opět vyobrazena měření aritmetických průměrů z 1. a 3. řezu.



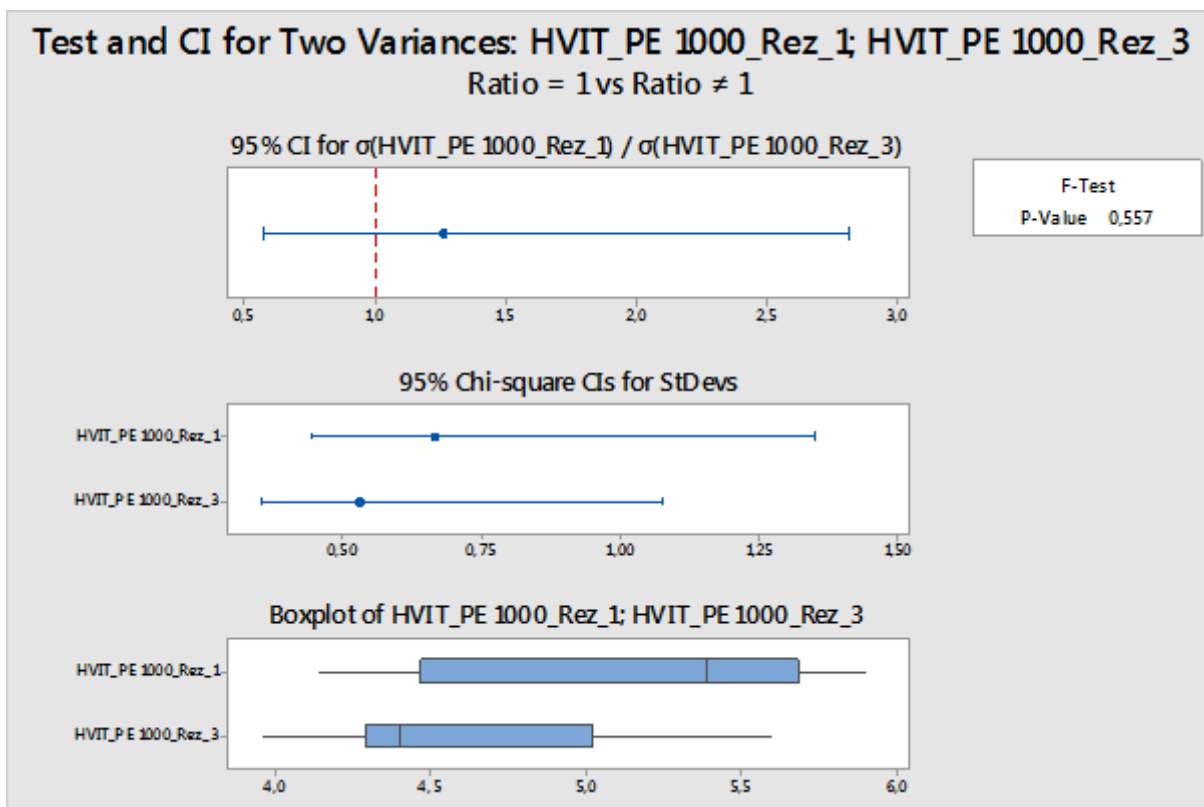
Obr. 11.13: Porovnání mikro-tvrdotí HVIT zkoumaných materiálů

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.

11.2 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. 11.14: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000

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

$$H_a: \text{NON}$$

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

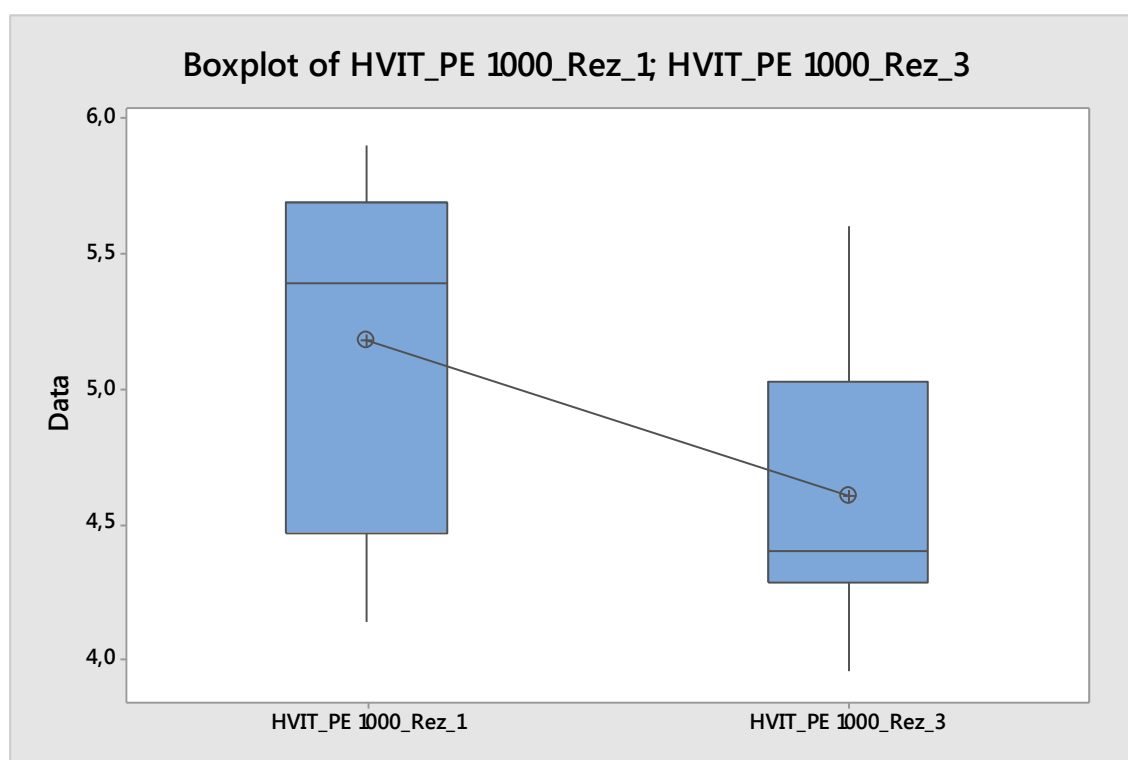
$$p = 0,557 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

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

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

Tabulka 11.3 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000

PE 1000	N	Odhad aritmetického průměru	Odhad směrodatné odchylky	Odhad chyby aritmetického průměru
HV_{IT} - řez 1	8	5,179	0,665	0,24
HV_{IT} - řez 3	8	4,610	0,528	0,19
Rozdíl = μ (HV_{IT} - řez 1) - μ (HV_{IT} - řez 3)				
Odhad pro rozdíl			0,569	
95 % interval spolehlivosti pro rozdíl			-0,075; 1,213	
t - test rozdílu $\mu = 0$ (vs \neq)		$t = 1,89$	P - Value = 0,079	$DF = 14$
Odhad směrodatné odchylky			0,6003	



Obr. 11.15: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000

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

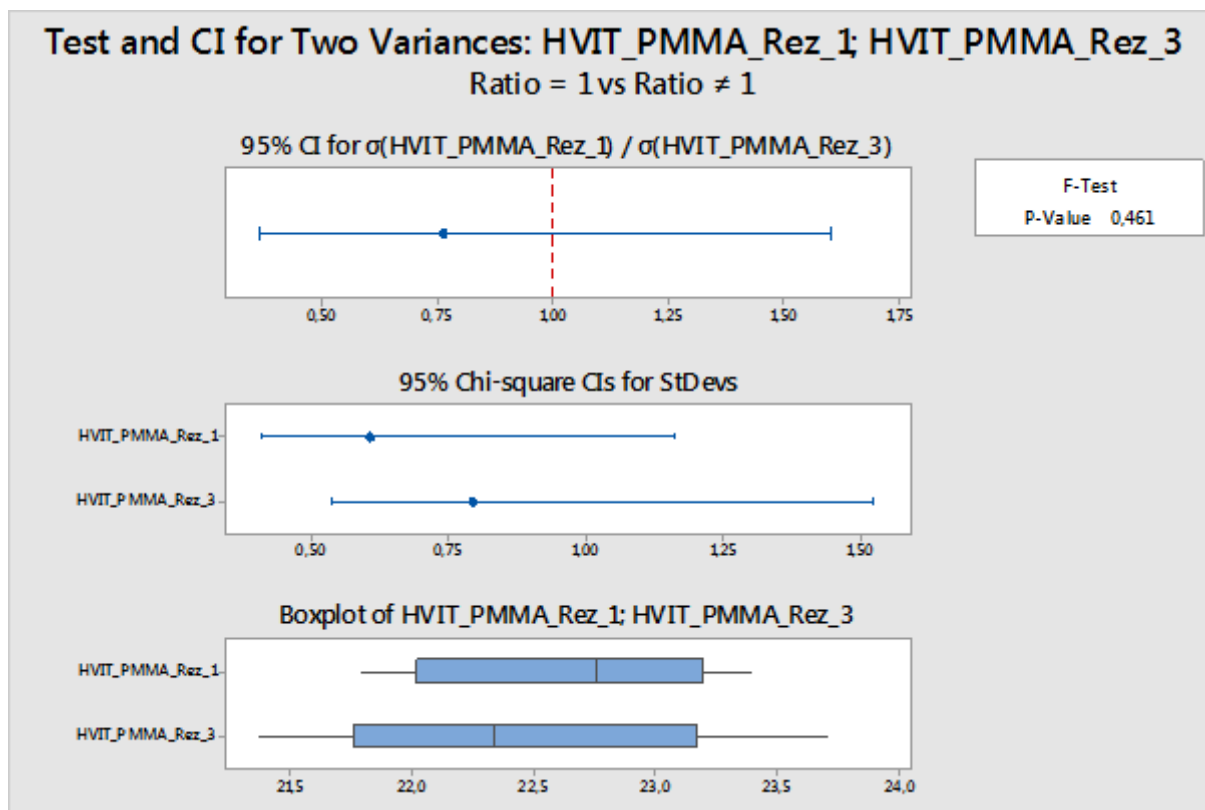
$$H_a: \mu_{HVIT - \text{řez}1} \neq \mu_{HVIT - \text{řez}3}$$

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

$$p = 0,079 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

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

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



Obr. 11.16: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA

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

$$H_a: \text{NON}$$

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

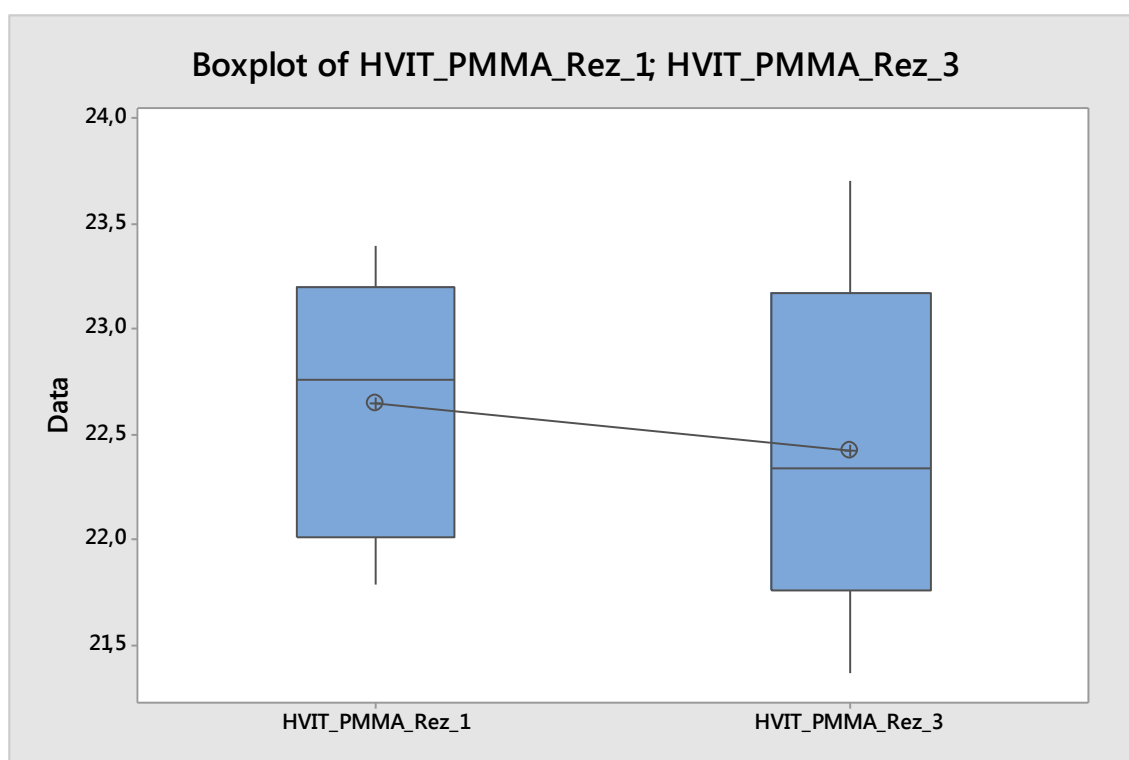
$$p = 0,461 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

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

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

Tabulka 11.4 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. 11.17: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA

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

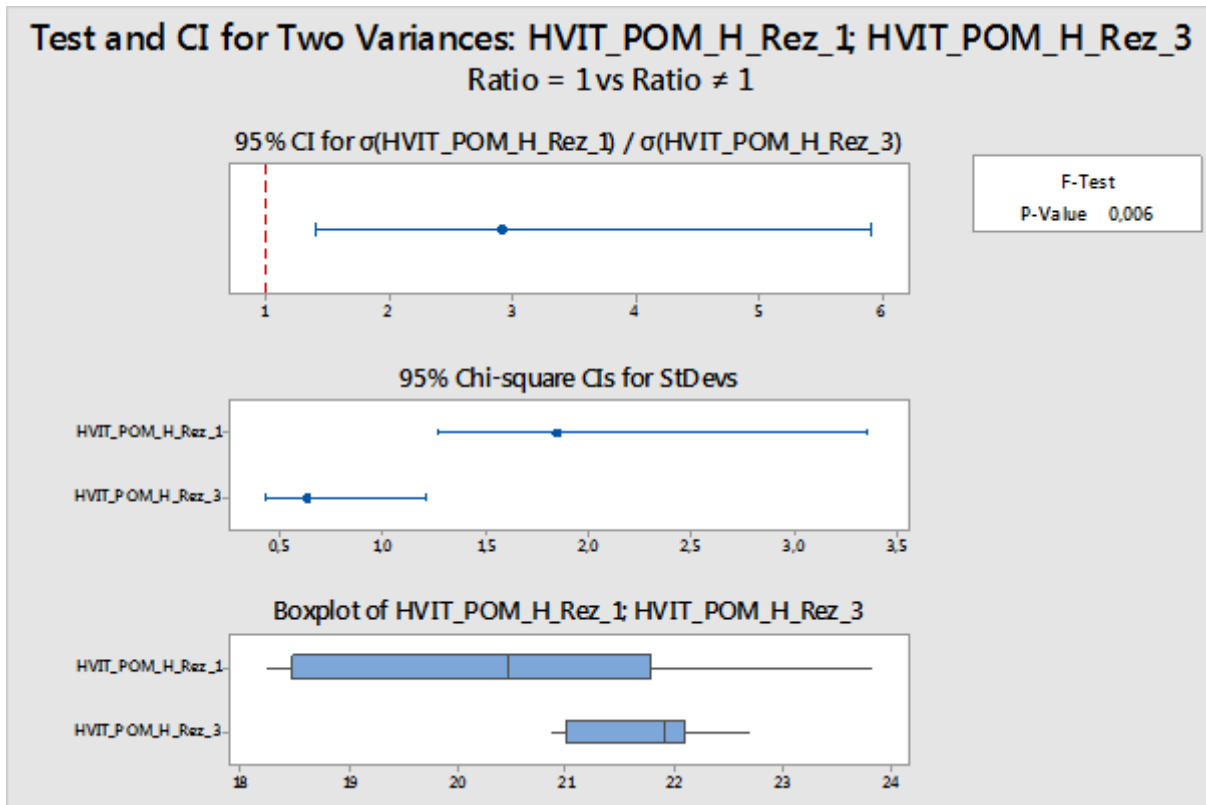
$$H_a: \mu_{HVIT - \text{řez}1} \neq \mu_{HVIT - \text{řez}3}$$

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

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

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

F – TEST pro HV_{IT} POM H řez 1 vs HV_{IT} POM H řez 3



Obr. 11.18: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál POM H

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

$$H_a: \text{NON}$$

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

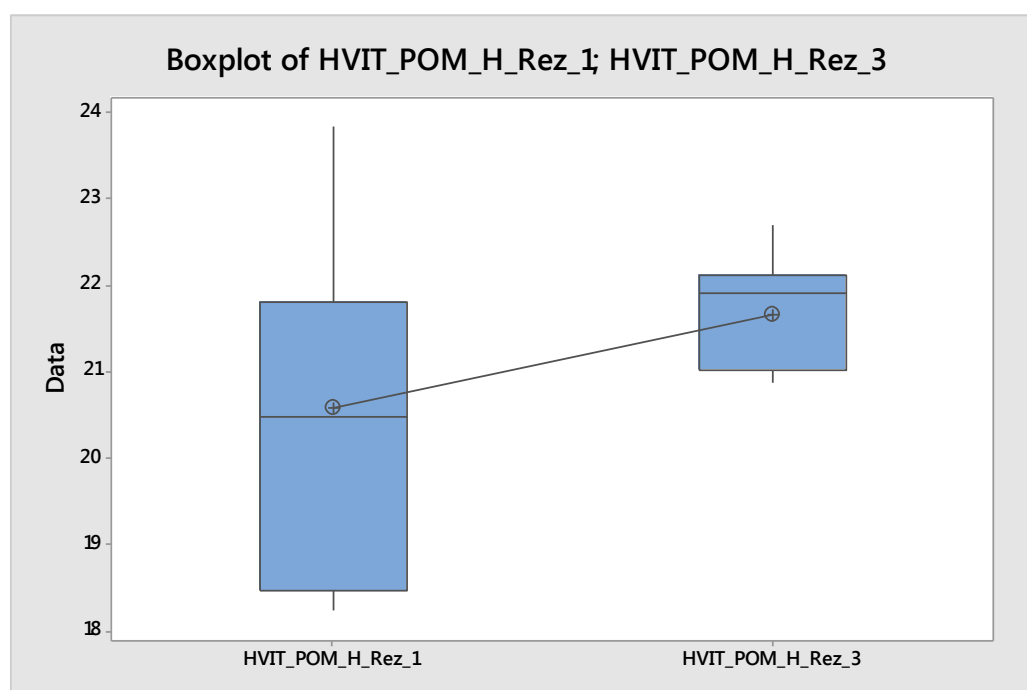
$$p = 0,006 < \alpha = 0,050$$

Rozptyl mezi řezem 1 a řezem 3 materiálu POM H z hlediska HV_{IT} je statisticky významný.

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

Tabulka 11.5 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál POM H

POM H	N	Odhad aritmetického průměru	Odhad směrodatné odchylky	Odhad chyby aritmetického průměru
HV_{IT} - řez 1	10	20,58	1,84	0,58
HV_{IT} - řez 3	9	21,668	0,631	0,21
Rozdíl = μ (HV_{IT} - řez 1) - μ (HV_{IT} - řez 3)				
Odhad pro rozdíl			-1,089	
95 % interval spolehlivosti pro rozdíl			-2,453; 0,275	
t - test rozdílu $\mu = 0$ (vs \neq)		$t = -1,67$	$P - Value = 0,107$	$DF = 11$
Odhad směrodatné odchylky				



Obr. 11.19: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA

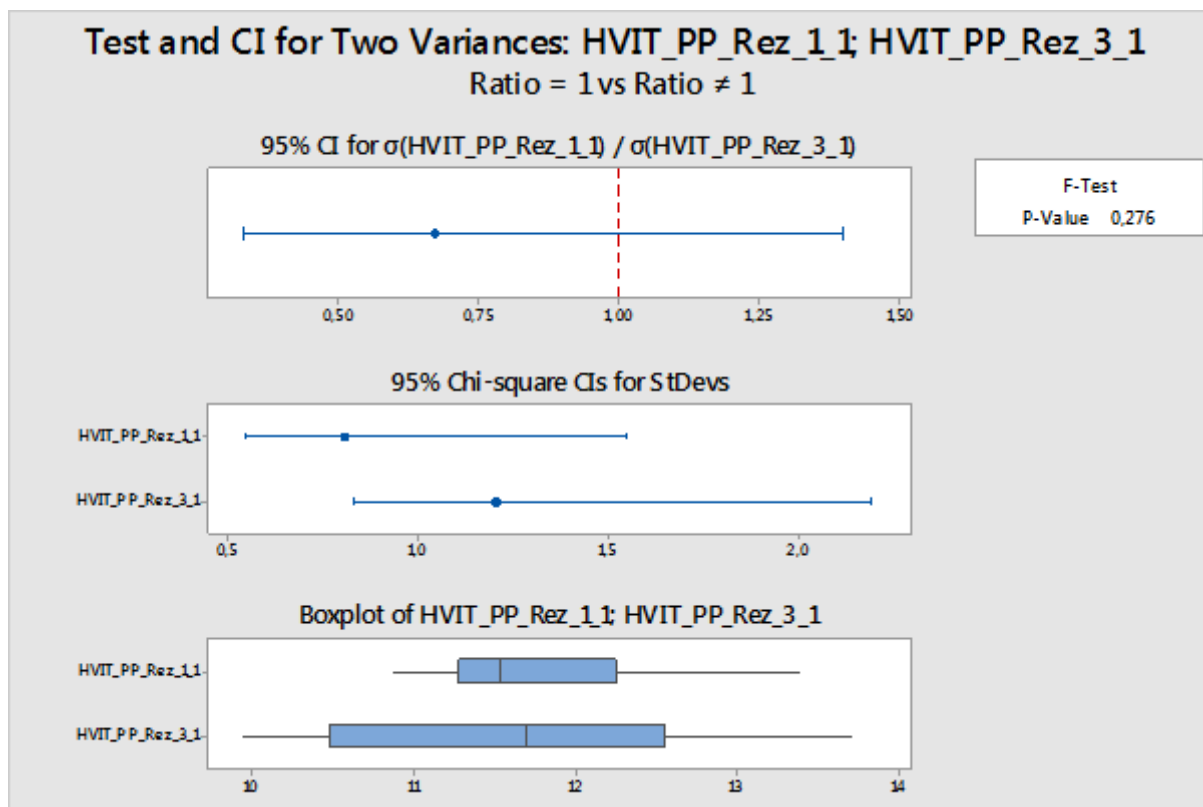
$$H_0: \mu_{HVIT - \text{řez}1} = \mu_{HVIT - \text{řez}3}$$

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

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

$p = 0,107 > \alpha = 0,050 \Rightarrow$ nezamítám H_0 parametru HV_{IT} v 1. řezu a μ parametru HV_{IT} v 3. řezu je statisticky nevýznamný.

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



Obr. 11.20: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP

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

$$H_a: \text{NON}$$

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

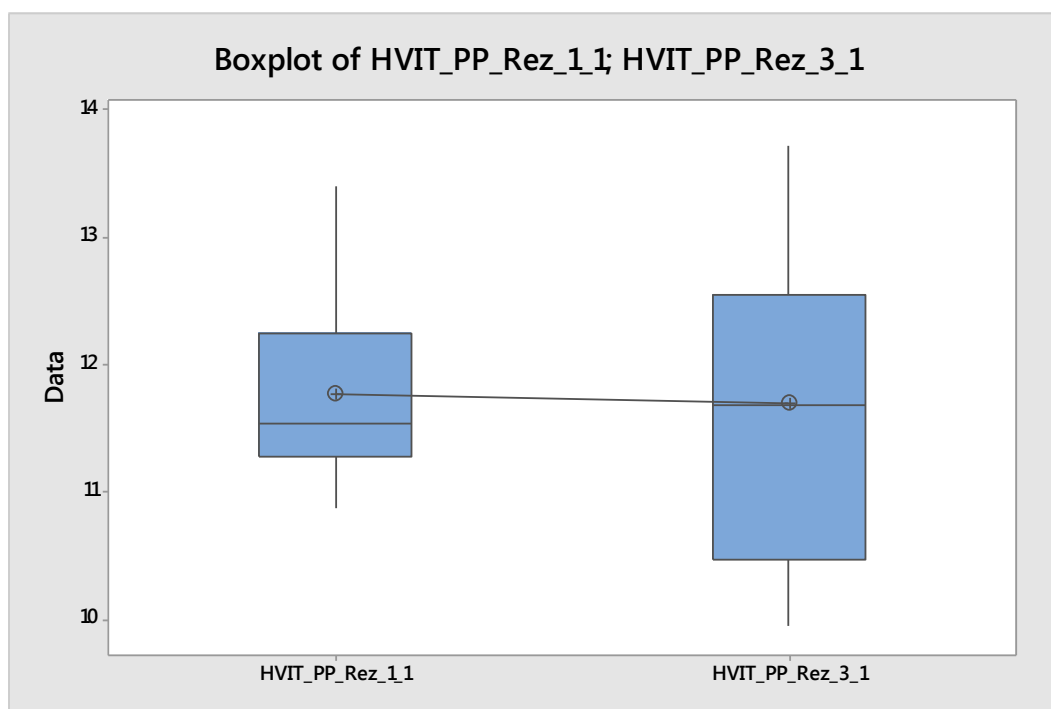
$$p = 0,276 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

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

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

Tabulka 11.6 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP

PP	N	Odhad aritmetického průměru	Odhad směrodatné odchylky	Odhad chyby aritmetického průměru
HV_{IT} - řez 1	10	11,766	0,808	0,27
HV_{IT} - řez 3	9	11,70	1,20	0,38
Rozdíl = μ (HV_{IT} - řez 1) - μ (HV_{IT} - řez 3)				
Odhad pro rozdíl			0,067	
95 % interval spolehlivosti pro rozdíl			-0,938; 1,071	
t - test rozdílu $\mu = 0$ (vs \neq)	$t = -0,14$	$P - Value = 0,890$	$DF = 17$	
Odhad směrodatné odchylky			1,0362	



Obr. 11.21: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP

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

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

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

$$p = 0,890 > \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{nezamítám } H_0$$

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.

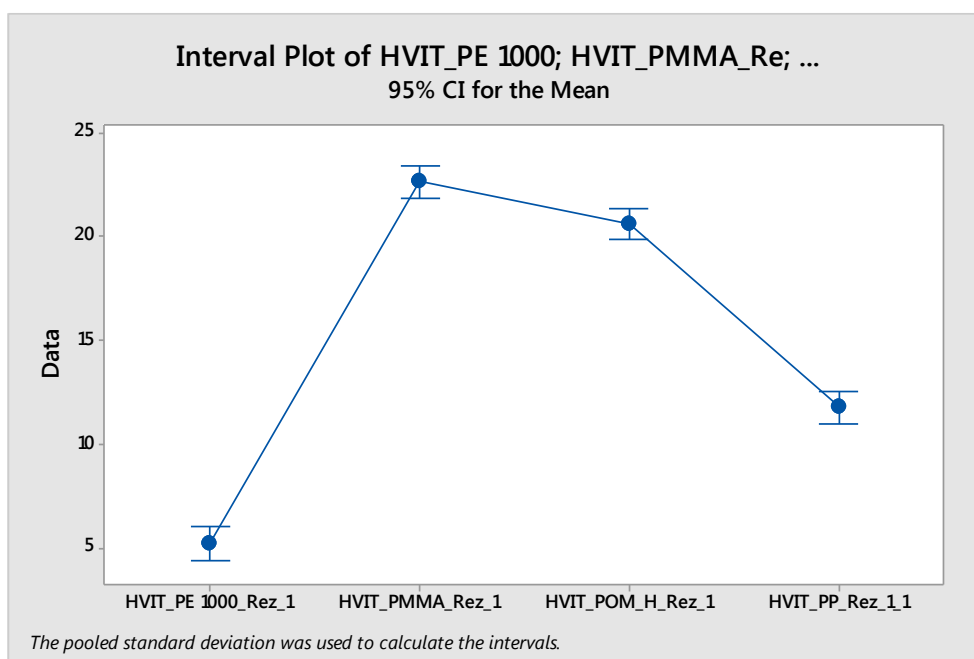
Pomocí jednocestné ANOVY bylo provedeno srovnání různých materiálů z hlediska parametru HV_{IT} :

- a) řezu 1
- b) řezu 3

a) Jednosměrná ANOVA HV_{IT} řezu 1

Tabulka 11.7 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. 11.22: Porovnání materiálů řezu 1

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

$$H_a: \text{NON}$$

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

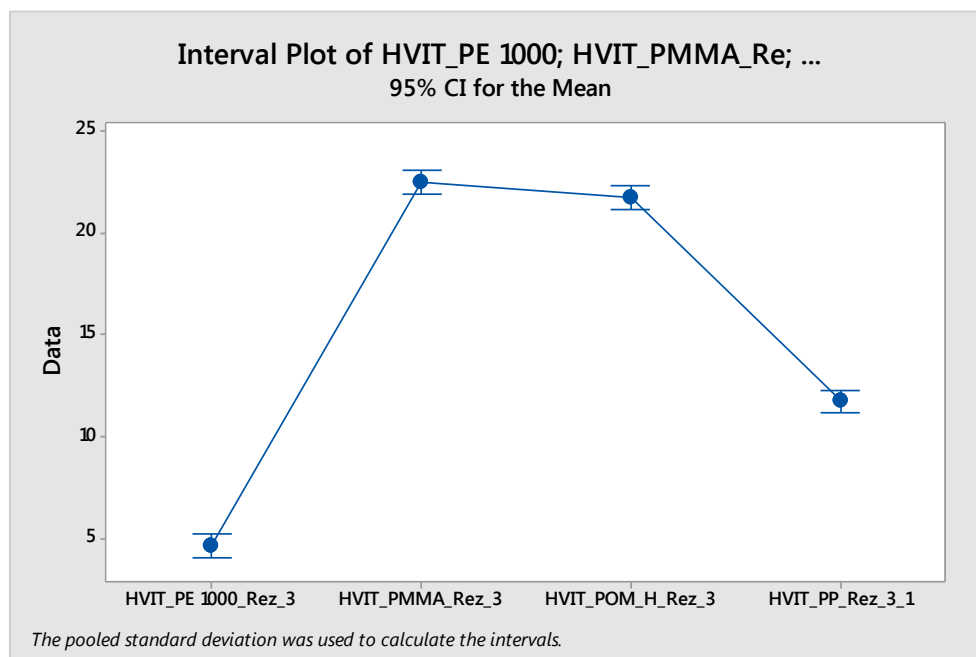
$$p = 0,000 < \alpha = 0,050 \Rightarrow \text{zamítám } H_0$$

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 11.8 Výpočet odchylek HV_{IT} řezu 3

HV_{IT} - 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. 11.23: Porovnání HV_{IT} materiálů 3. řezu

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

H_a : NON

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

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

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

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

12. 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 neměnicí a jsou uvedeny v tabulce 12.1 pro všechny zkoumané materiály.

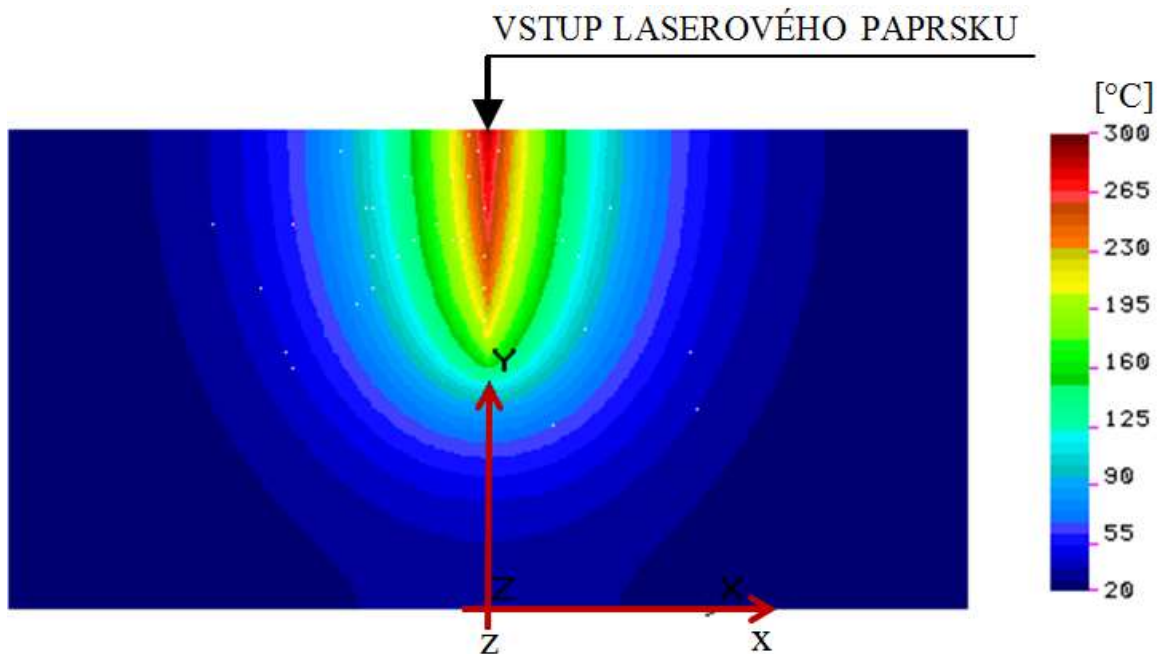
Tabulka 12.1 Fyzikální vlastnosti materiálů

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

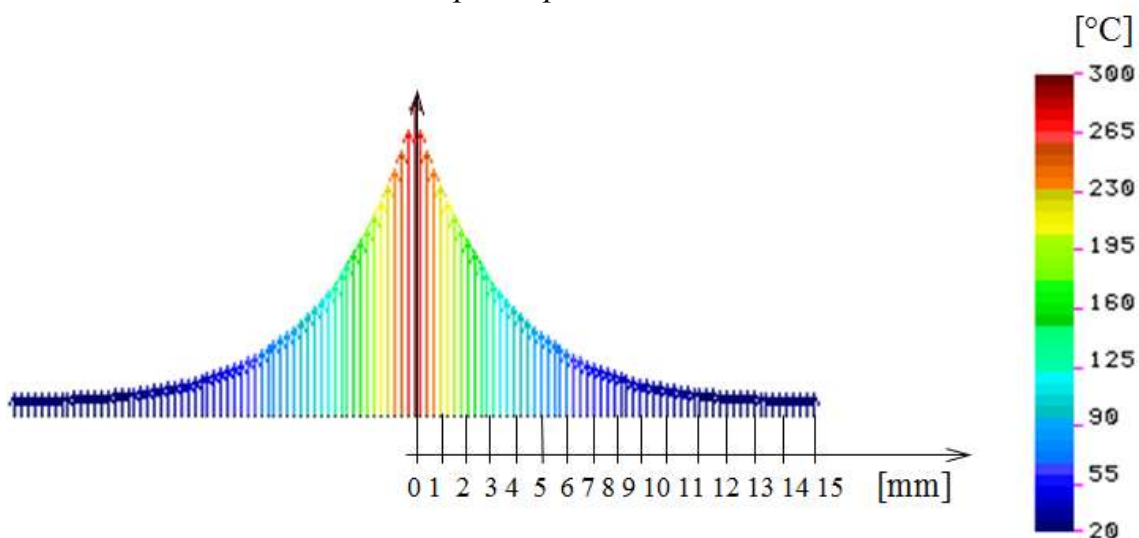
Simulace teplotních polí byla pořízena pouze pro drážku **1** ($P = 100$ W; $f = 15,24$ mm. s^{-1}) u vzorků z materiálu PE 1000, PMMA, POM C, a PP, protože se zde předpokládalo výraznějších změn z důvodu nejpomalejší rezné rychlosti. V příložených výsledných simulacích (obr. 12. 1, obr. 12.3, obr. 12.5, obr. 12.7) jsou vyobrazena teplotní pásma uvnitř materiálu po průchodu paprsku, kde je

šipkou vyznačeno působení laserového paprsku. V následujících vyobrazeních (obr. 12. 2, obr. 12.4, obr. 12.6) lze pozorovat simulace průběhů teplot na povrchu vzorků.

PE 1000

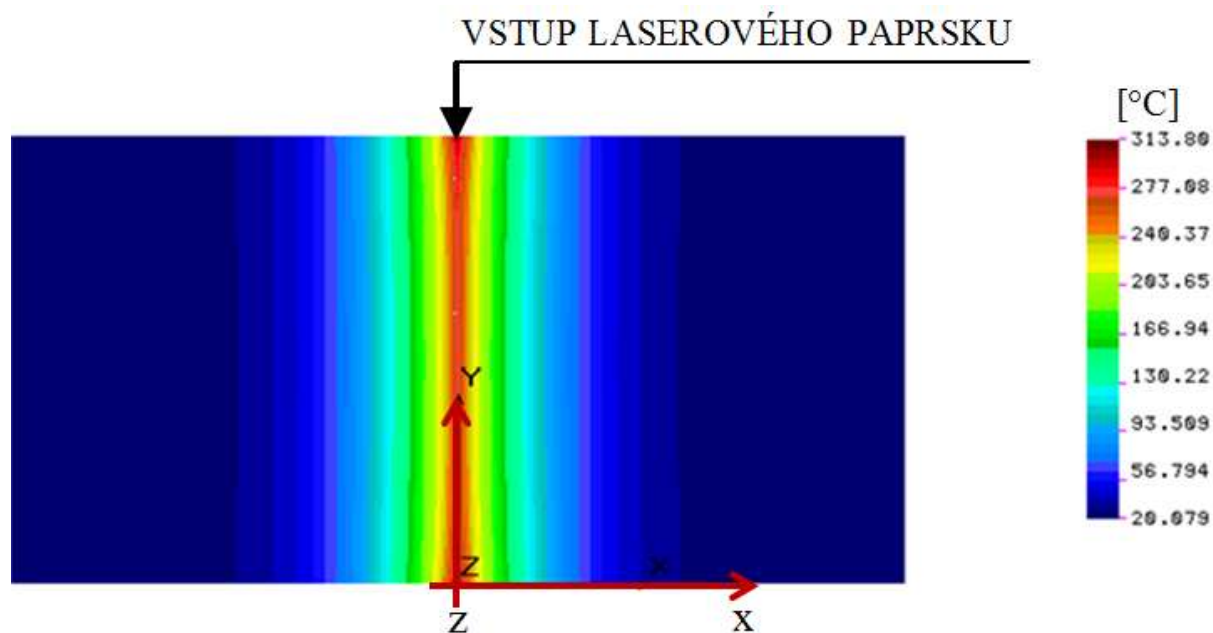


Obr. 12.1: Teplotní pole materiálu PE 1000

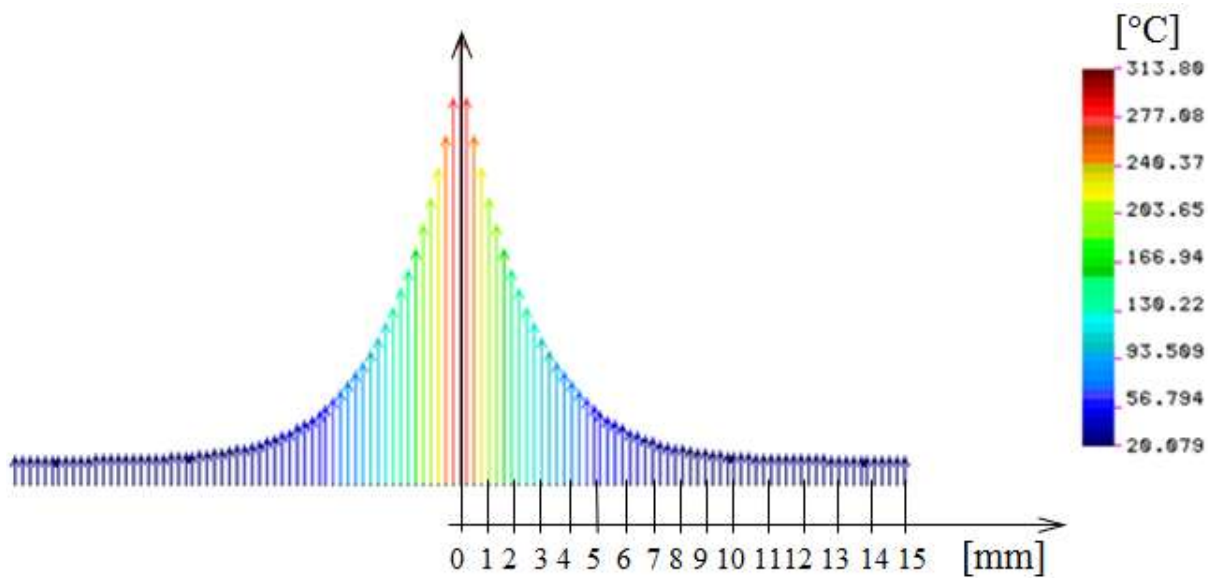


Obr. 12.2: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PE 1000

PMMA

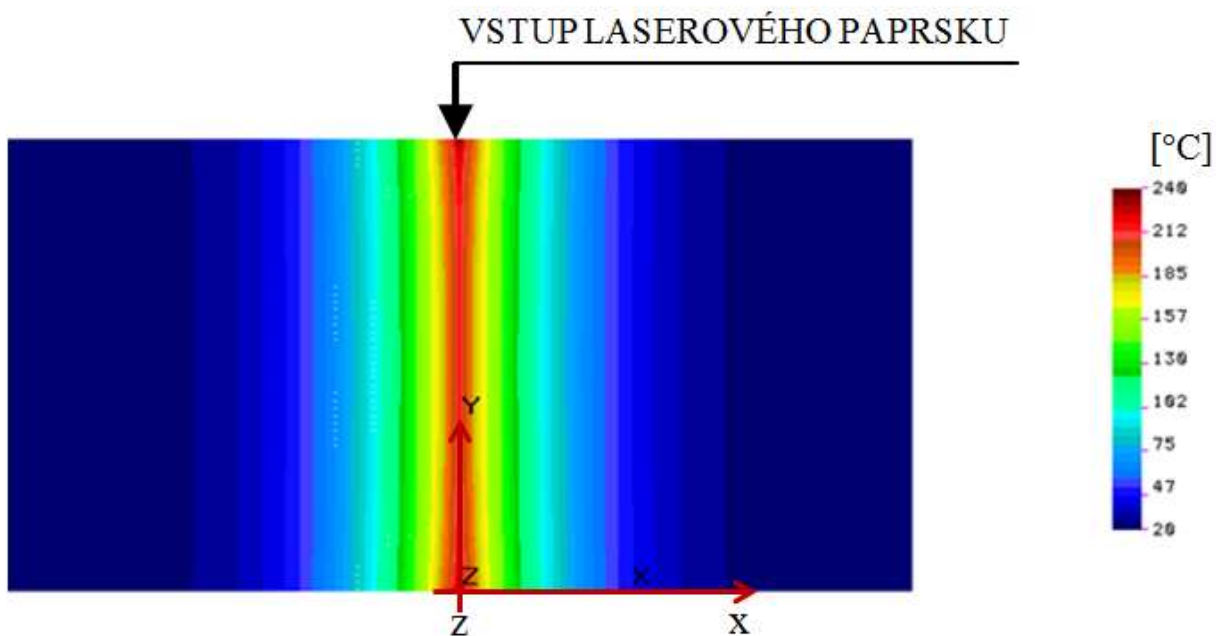


Obr. 12.3: Teplotní pole materiálu PMMA

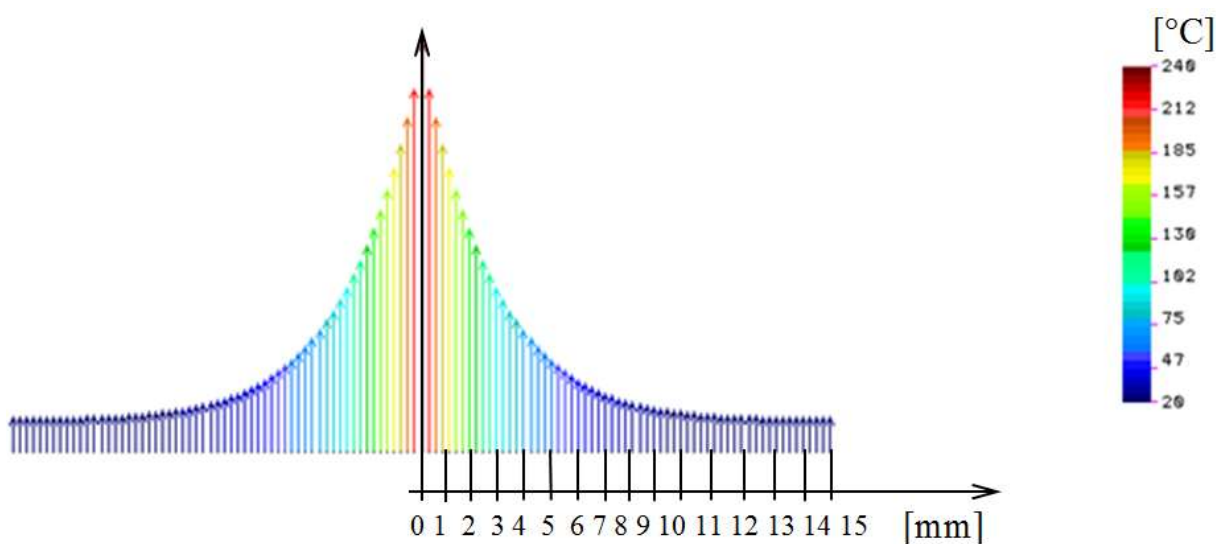


Obr. 12.4: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PMMA

POM C

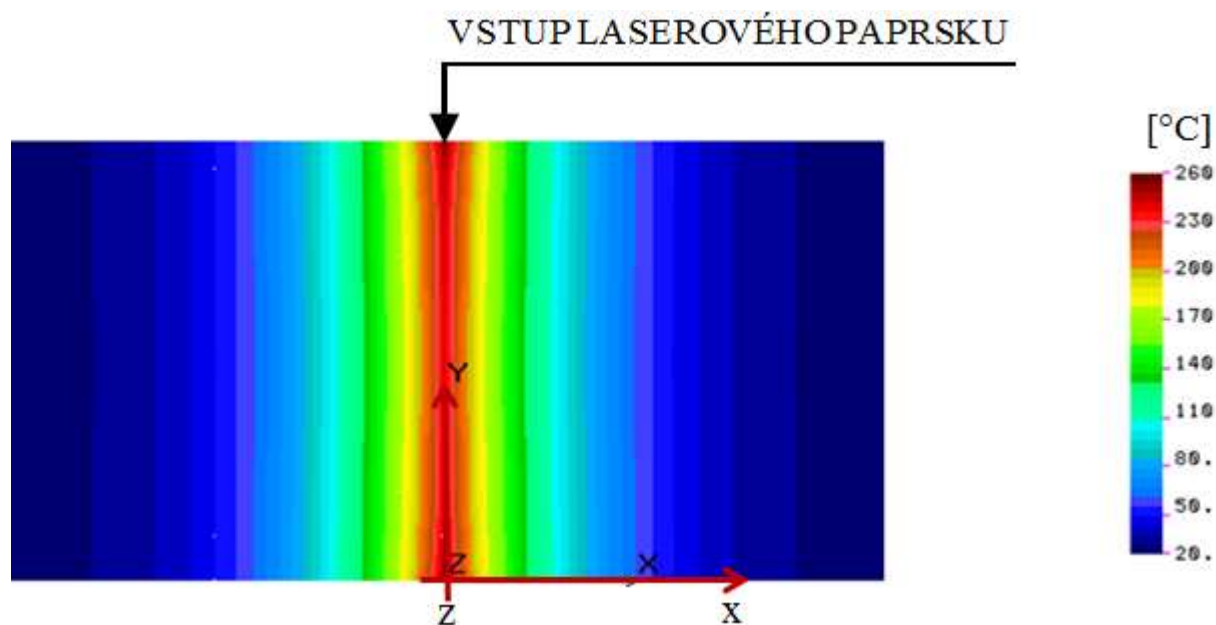


Obr. 12.5: Teplotní pole materiálu POM C

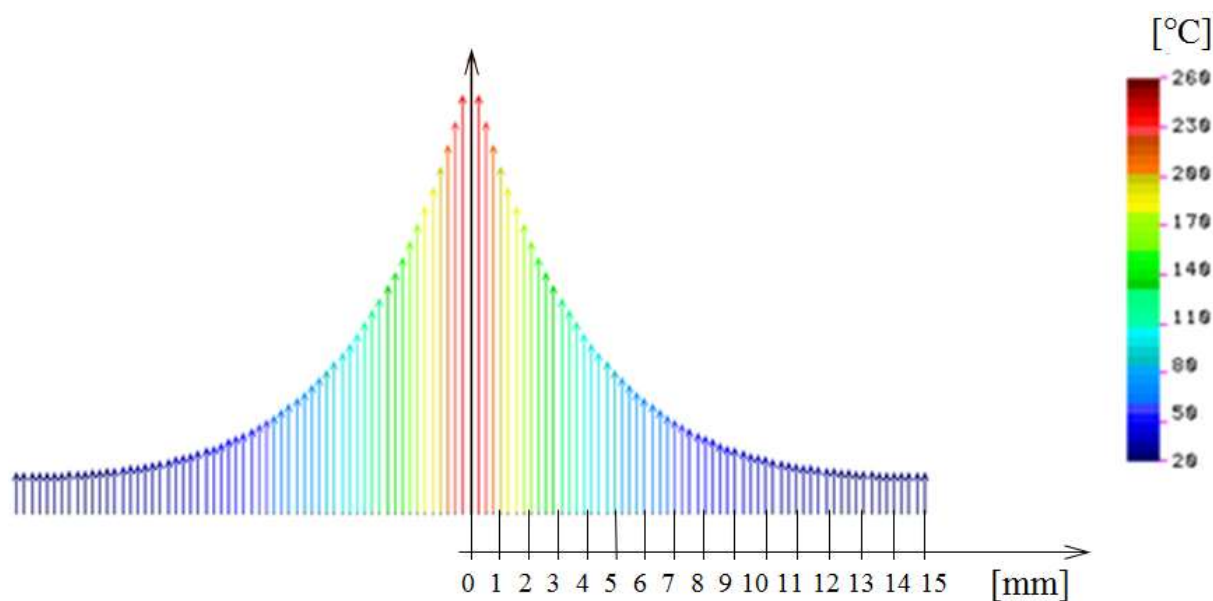


Obr. 12.6: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro POM C

PP



Obr. 12.7: Teplotní pole materiálu PP



Obr. 12.8: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu I pro PP

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.

13. POROVNÁNÍ KVANTITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM

Za normálních teplot jsou polymerní materiály křehké, avšak při namáhání a větší zátěži mohou vykazovat trhliny. Se vzrůstající teplotou se polymery stávají tvárnější, více elastické. Vlastnosti těchto materiálů jsou tedy závislé na teplotě. V určitých oblastech teploty probíhají změny rychleji, nebo se mohou projevit skokově. Tyto oblasti jsou charakterizovány přechodovými teplotami (viz tab. 13.1), jako jsou T_g , což je teplota skelného přechodu, dále jen T_f , která udává teplotu tečení, projevuje se velkým vzrůstem deformace a je nevratná. Jako poslední je T_m , teplota tání. [25]

Tabulka 13.1 Přechodové teploty polymerních materiálů [25]

MATERIÁL	FÁZE PŘECHODU	T_g [°C]	T_f [°C]	T_m [°C]
C	amorfní	80	180	
PMMA	amorfní	100	170	
ABS	amorfní	105	195	
PS	amorfní	100	180	
PC	amorfní	145	220	
PA 66	semikrystalický			265
POM	semikrystalický			160
PTFE	semikrystalický			290
PP	semikrystalický			165
PA 6	semikrystalický			215

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

13.1 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.

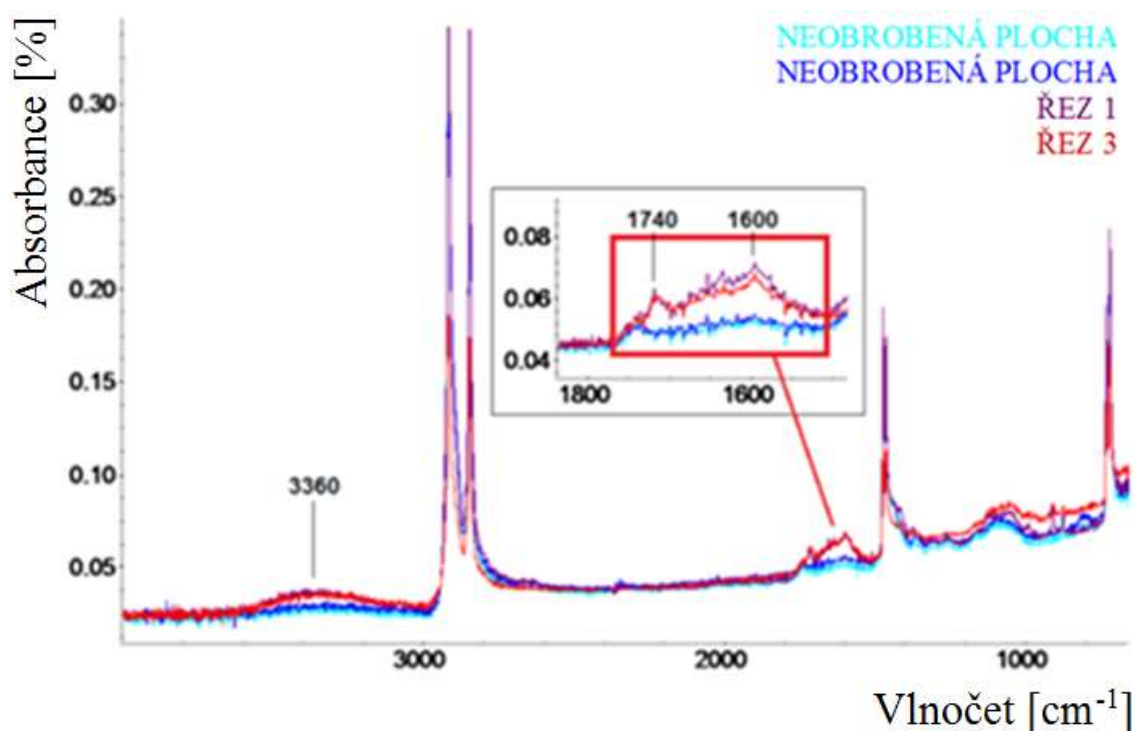


Obr. 13. 1: Nicolet Avatar 320 ATR

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 ($P=100 \text{ W}$; $f=45,72 \text{ mm. s}^{-1}$).

PE 1000



Obr. 13.2: Infračervené spektrum PE 1000

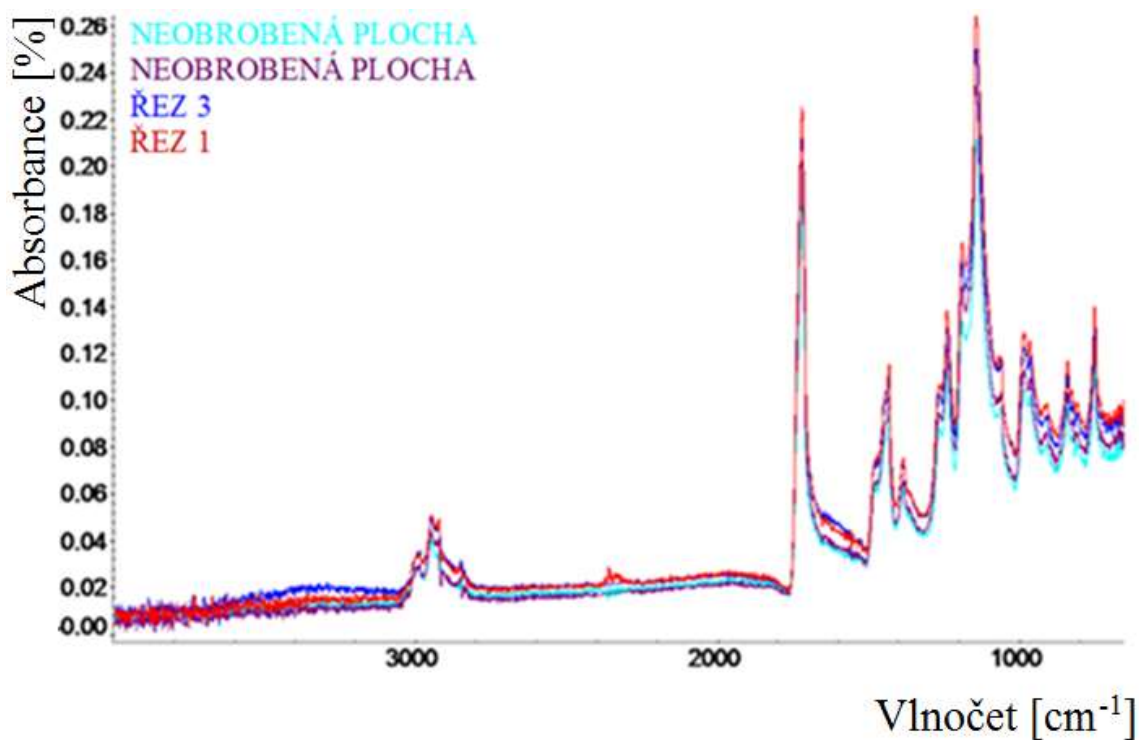
V oblasti pásu 1740 cm^{-1} lze pozorovat, u obrobeného materiálu PE 1000, nárůst absorbance způsobeného přítomností -C=O vazeb. V oblasti vlnové délky 1600 cm^{-1} můžeme, v detailním vyobrazení, spatřit peak s širším nárůstem absorbance IR záření představující vznik esterových vazeb.

Na úrovni peaku 3360 cm^{-1} vlnové délky můžeme číst nárůst široké absorpance, což představuje vznik -O-H vazeb.

Nejvyšší vrcholy v oblasti vlnové délky pod 3000 cm^{-1} představují CH_2 vazby a oproti neozářenému materiálu je zde čitelný pokles těchto vazeb. [27][28][29][30][31]

Za přítomnosti -C=O; -O-H, esterových vazeb a poklesu CH_2 plyne zkrácení polymerních řetězců, a tedy degradace ozářeného materiálu.

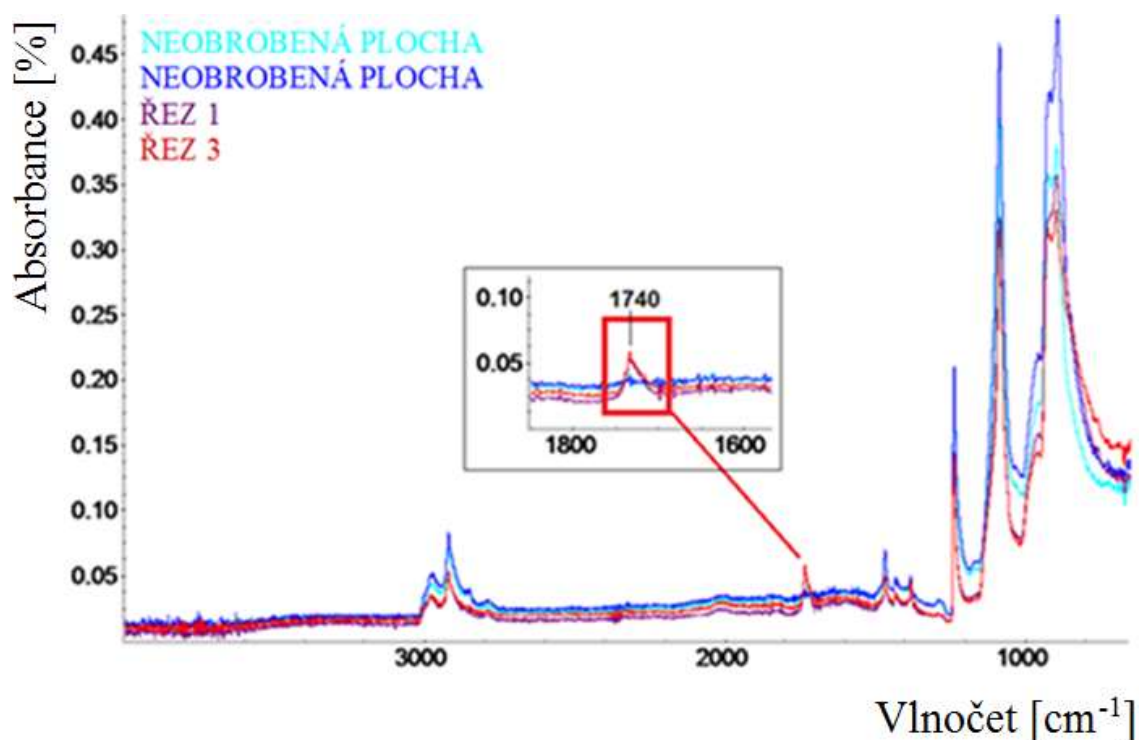
PMMA



Obr. 13.3: 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]

POM C

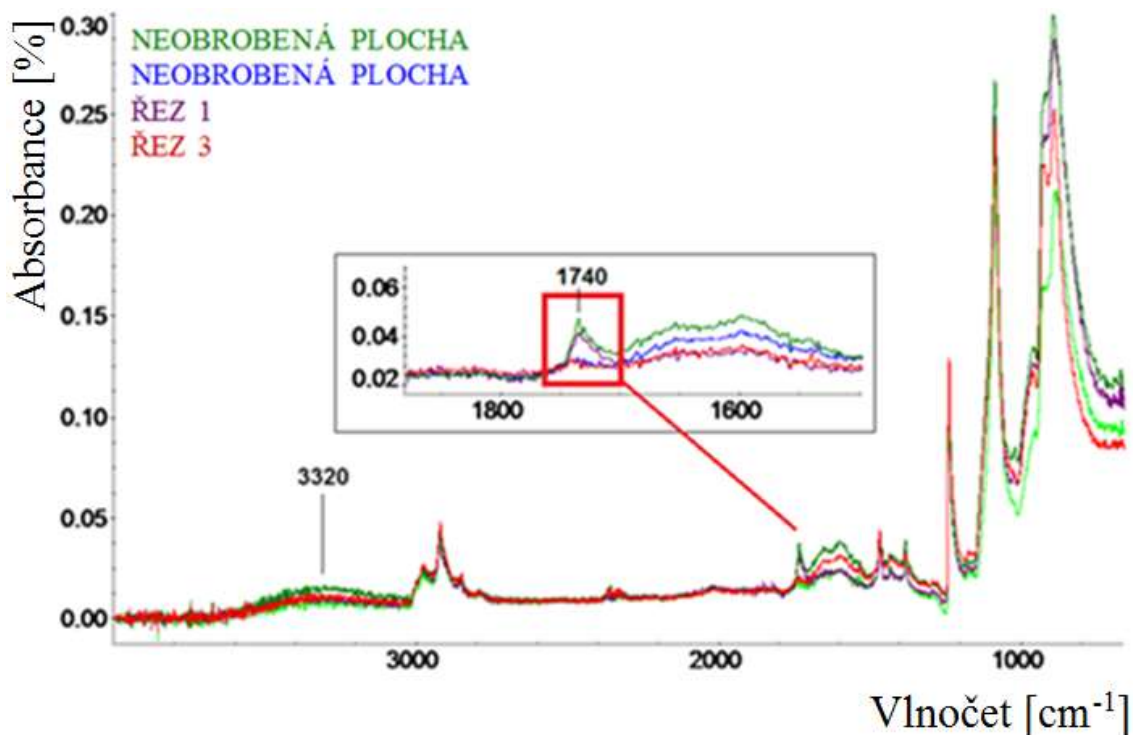


Obr. 13.4: Infračervené spektrum POM C

Peaky v oblasti 1300 – 900 cm⁻¹ odpovídají stabilní trigonální formě POM [].

Z grafu pro zkoumaný materiál POM C lze číst z průběhu křivek velmi malé strukturální změny. V oblasti pásu 1740 cm⁻¹ je možno pozorovat mírný nárůst absorbance v místě obráběné plochy, což představuje výskyt -C=O vazeb, vzniklých v důsledku ozáření této plochy štěpením polymerních řetězců. Pro tento materiál se tato strukturální změna projevila pouze v této oblasti. [27][28][29][30][31]

POM H



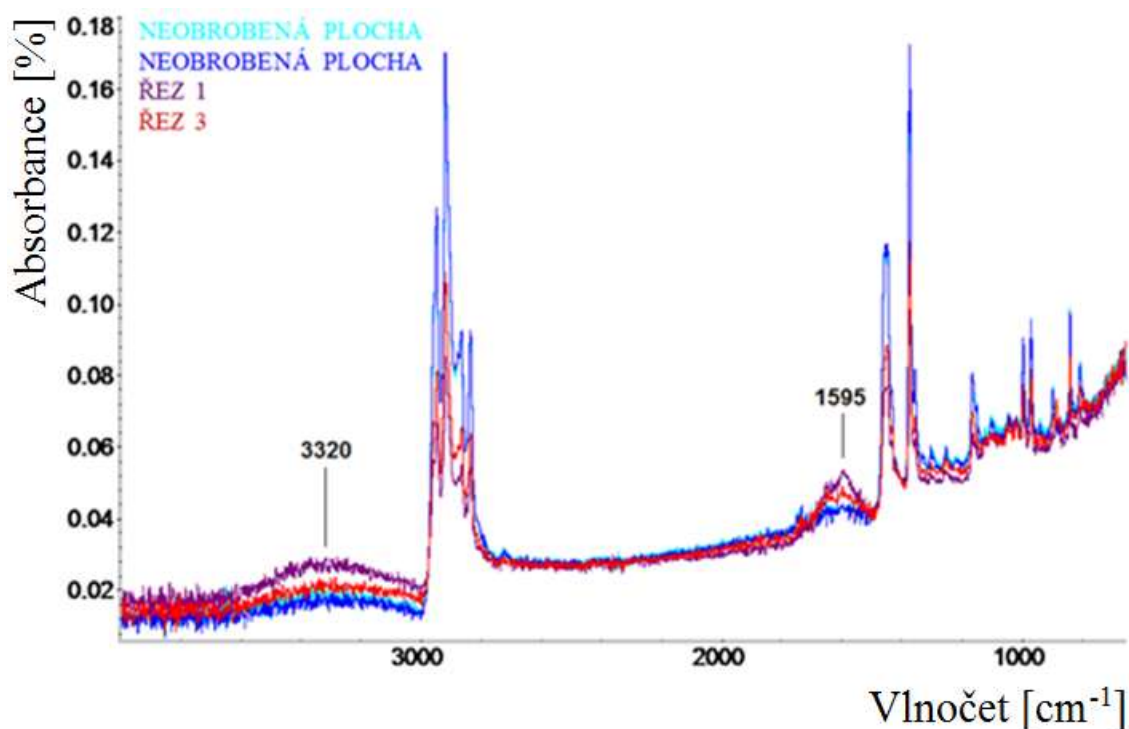
Obr. 13.5: Infračervené spektrum POM H

Peaky v oblasti 1300 – 900 cm⁻¹ odpovídají stabilní trigonální formě POM [].

V porovnání s materiálem POM C z grafu pro materiál POM H můžeme konstatovat, ve zvětšeném vyobrazení vynesené podrobnosti propás 1740 cm⁻¹, že v místě řezu, kde došlo k ozáření, se vykreslil nižší nárůst absorbance způsobené -C=O vazbami ve struktuře materiálu. V místě pásu 1600 cm⁻¹ ve zvětšeném vyobrazení lze pozorovat delší úsek zvýšené absorbance IR záření, což způsobilo nepatrné zvýšení křivky, která ukazuje na přítomnost esterových vazeb. V oblasti vrcholu pásu 3320 cm⁻¹ se vyskytují -O-H vazby, dle nevýrazného nárůstu širšího pásma absorbance. [27][28][29][30][31]

Přítomnost těchto pásů vypovídá o degradaci polymerních řetězců, která je menší ve srovnání s POM C.

PP



Obr. 13.6: Infračervené spektrum PP

Dle vykreslených křivek u materiálu PP, můžeme říci, že zde určité konstituční změny nastaly. Peak v oblasti vlnové délky 1595 cm^{-1} představuje zvýšení ketonových vazeb. V místě pod hodnotou vlnové délky 3000 cm^{-1} lze číst silný výskyt čtyř úzkých vrcholů. Dle literatury dvojice vrcholů ve větší blízkosti této vlnové délky souvisí s $-\text{CH}_3$ vazbami. Druhá dvojice vrcholů, směrem k nižší vlnové délce představuje přítomnost $-\text{CH}_2$ vazby. Zvýšení absorbance IR záření bylo zaznamenáno v širší oblasti kolem hodnot 3320 cm^{-1} , což je spojeno s nárůstem $-\text{O}-\text{H}$ vazeb. [27][28][29][30][31]

Přítomnost $-\text{O}-\text{H}$ 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.

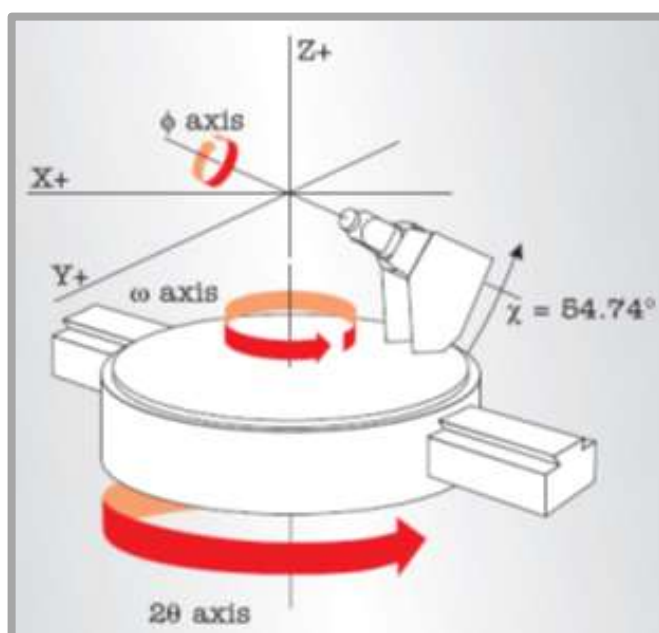
Pomocí infračervené vibrační spektroskopie, bylo zjištěno, že po obrábění laserovým paprskem vzorků z materiálů PE 1000, PMMA, POM C, POM H a PP se určité změny ve strukturách projeví.

13.2 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]

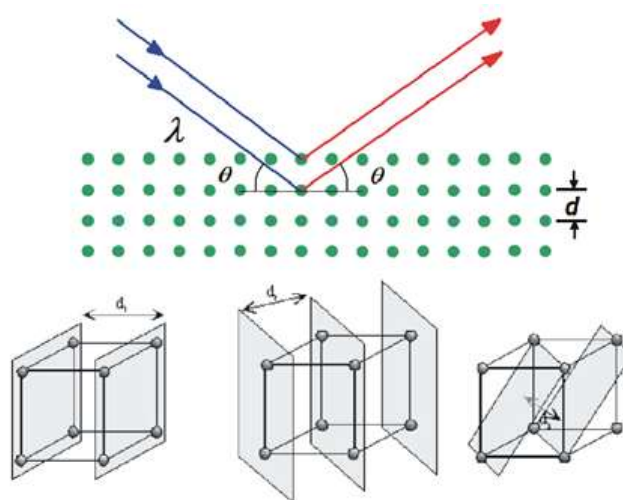


Obr. 13.7: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO



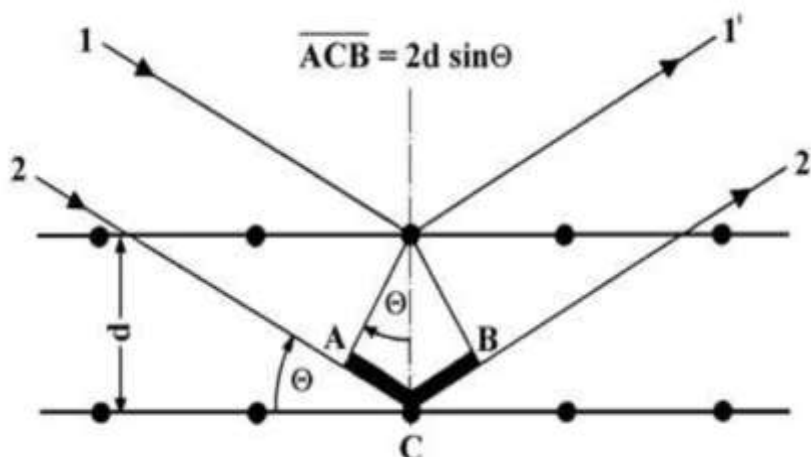
Obr. 13.8: Schéma difraktometru [33]

Využívá se principu rozptylu a interference rozptýleného záření, přičemž při rozptylu dopadá vlna primárního záření na atomy v daném krystalu, s tím, že jádra zůstávají díky své velké hmotnosti bez rozkmitu. Naopak elektrony jsou uvedeny v pohyb a svým rozkmitáním o stejné frekvenci jako primární záření se stávají zdrojem sekundárního záření. Tento rozptyl se nazývá koherentní (pružný). V procesu dochází ke skládání vln, tzn. k interferenci vln vyzařovanými jednotlivými elektrony, které mohou být od sebe fázově posunuty. Výsledkem tohoto skládání je difrakce (soubor vln), které jsou šířeny od krystalu, a to pouze v daných směrech. Vlnová délka RTG záření je srovnatelná se vzdáleností jednotlivých mřížkových rovin, a tak dochází k difrakci. [31][32]



Obr. 13.9: Difrakce na rovinách otočného krystalu [32]

Pro difrakci je podstatný poslední z výše uvedených procesů – tzv. pružný rozptyl (to znamená, že vlnová délka dopadajícího a rozptýleného záření jsou stejné) a z jeho povahy vyplývá, že je to záležitost elektronů vnějších Braggova rovnice vyjadřuje obecné pravidlo pro interferenci dvou paprsků, tzn., že jejich dráhový rozdíl musí být celočíselným násobkem vlnové délky: Součet délek úseček AC a CB představuje dráhový rozdíl mezi paprsky 1' a 2' difraktovanými od dvou sousedních atomových rovin. [33]



Obr. 13.10: Braggova difrakční podmínka [33]

Braggova rovnice vyjadřuje obecné pravidlo pro interferenci dvou paprsků. Jejich dráhový rozdíl musí být celočíselným násobkem vlnové délky:

$$2d(\sin\theta) = n\lambda_0 \quad (13.1) [33]$$

Každá rovina rozptýlí jen malé množství záření, avšak výsledný rozptyl od jinak velkého počtu těchto rovin nám poskytuje dostatečnou intenzitu pro detailní pozorování. Prostorové rozložení těchto rovin, resp. takto difraktovaných vln následně vytváří difrakční obraz zkoumaného krystalu. [31][32]

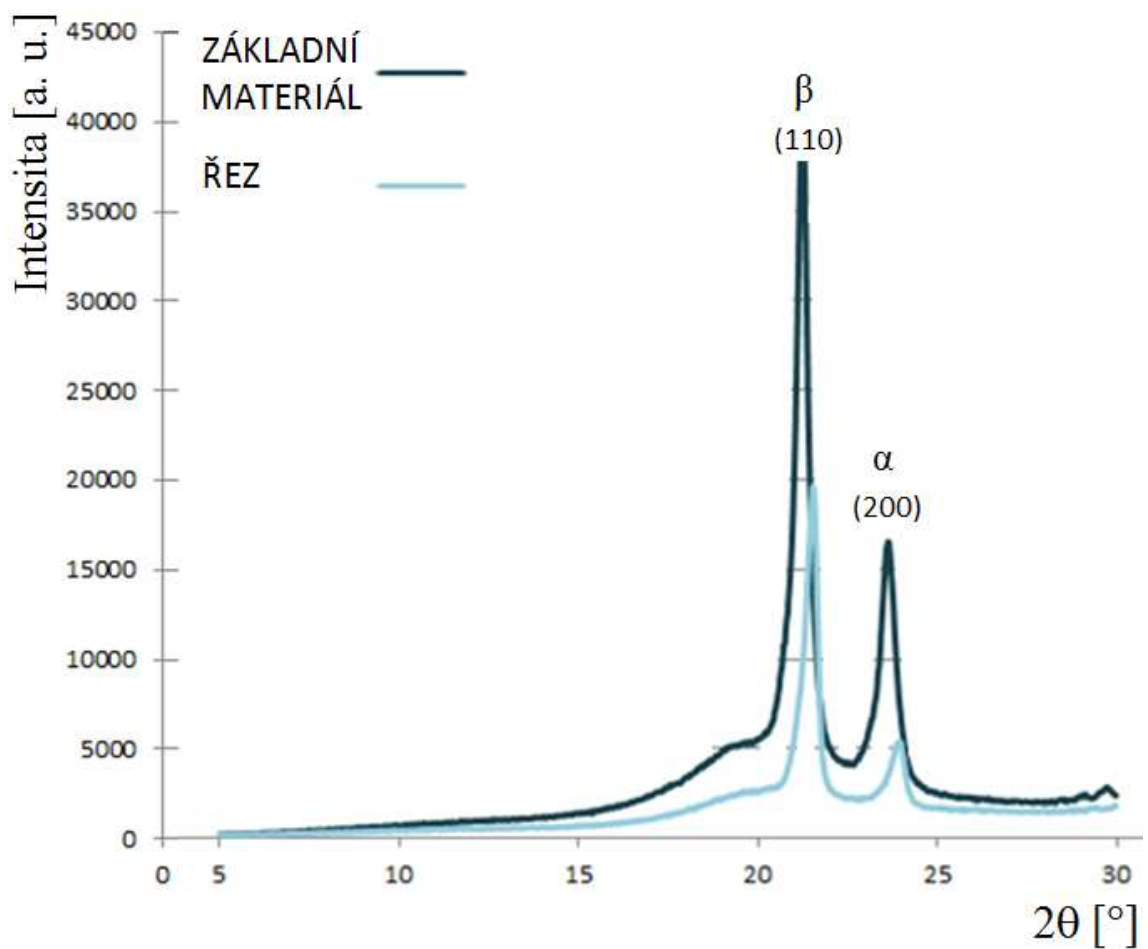
Každé měření bylo provedeno při napětí 40 kV a proudu 30 mA u vzorků materiálů PE 1000, POM C, POM H a PP. Amorfnní PMMA do tohoto experimentu nebyl zařazen z důvodu pro tento materiál RTG nevhodné metody. V grafech jsou vyobrazeny různými barvami jednotlivé materiály, které odpovídají příslušné drážce 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. u.* na hodnotách úhlů natočení 2θ [°].

Experiment byl prováděn na všech výše zmíněných materiálech, vždy v ploše řezu drážky 1 ($P = 100 \text{ W}$; $f = 15,24 \text{ mm. s}^{-1}$), 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. 13.11 str. 113) tak, aby nedošlo k ovlivnění původního složení základního neobrobeného materiálu.



Obr. 13. 11: Vzorek zkoumaného materiálu

PE 1000

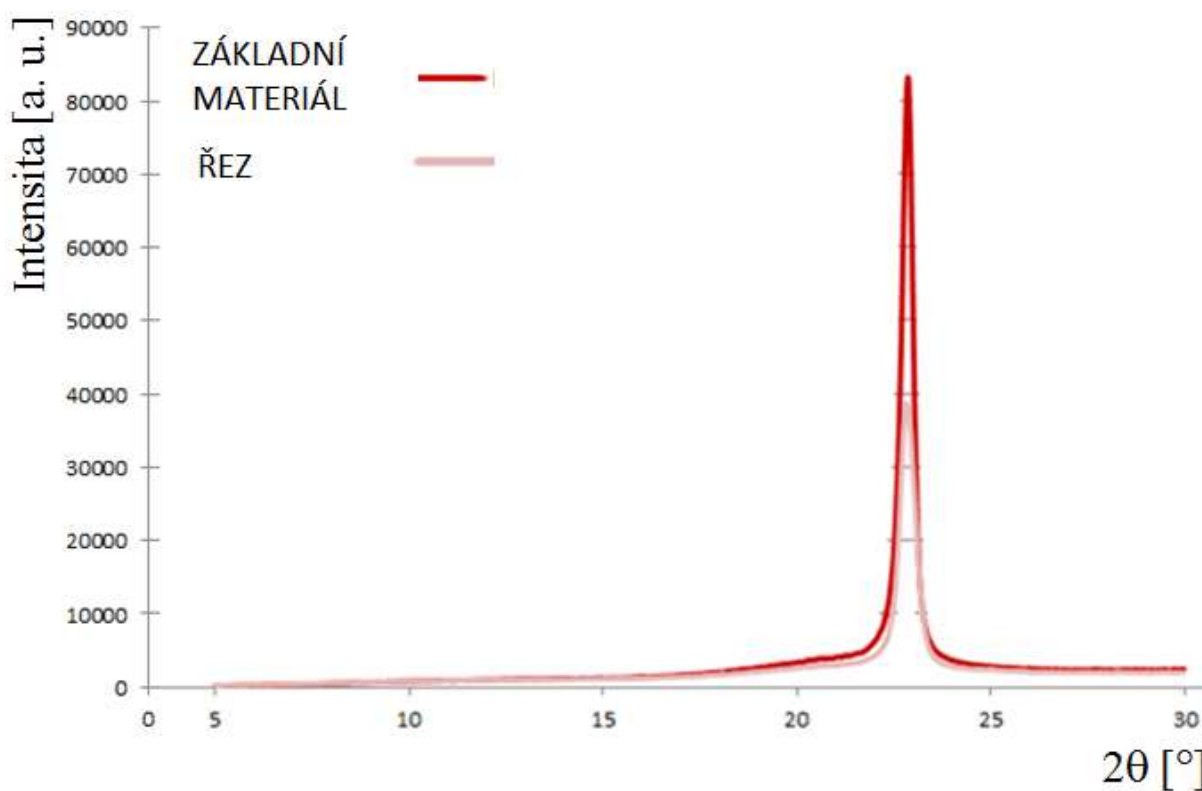


Obr.: 13.12 RTG difrakční snímek PE 1000

Pomocí RTG difraktometru bylo zjištěno, že materiál PE 1000 v neozářeném stavu je krystalický z 75,52%. Ozářená plocha řezu obsahuje nepatrně nižší množství krystalického podílu, tj. 73,03%. [34]

Rozdíl představoval přibližně 2,5 %. V ploše řezu se amorfnní složka struktury zvýšila vzhledem k základnímu materiálu, což koresponduje s výsledky FTIR analýzy poukazující na degradaci polymerních řetězců.

POM C

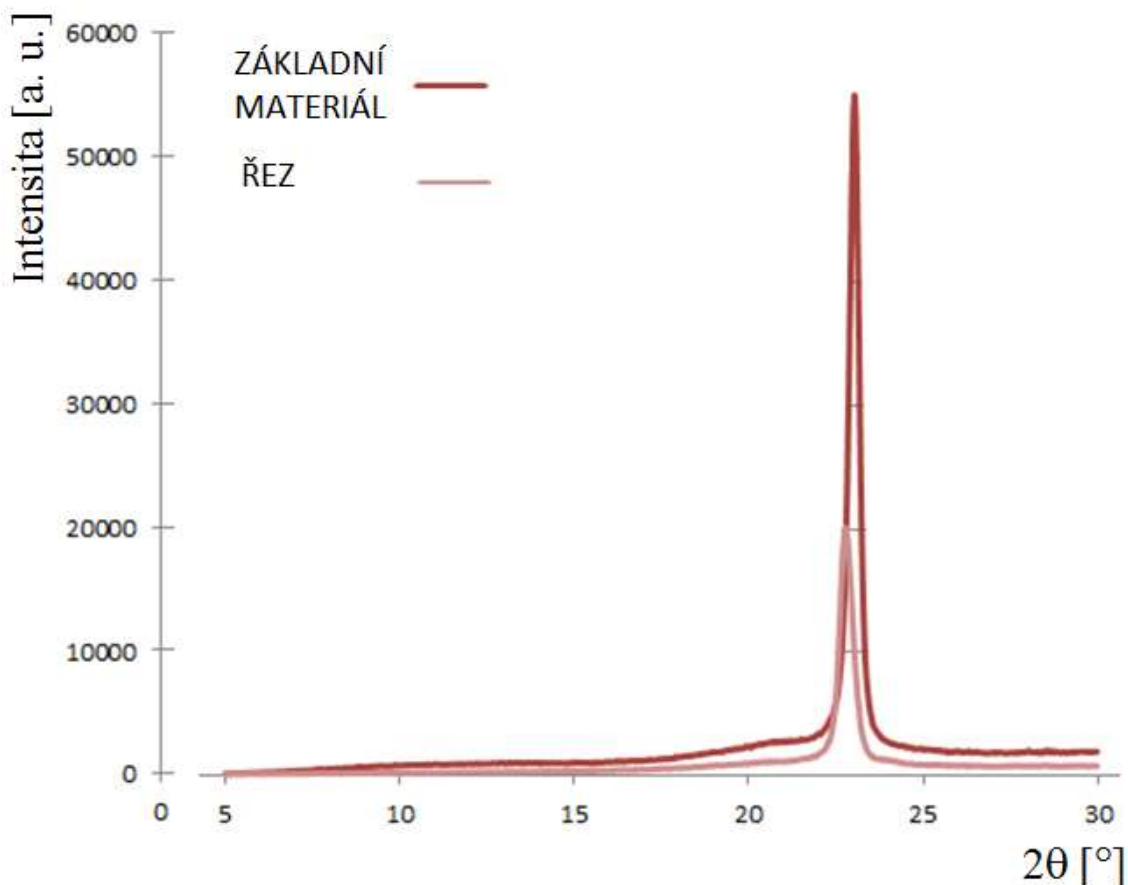


Obr.: 13.13 RTG difrakční snímek POM C

Z RTG difrakčního záznamu lze pozorovat, že materiál POM C v neozářeném stavu je krystalický ze 73, 02 %. Materiál v ozářené ploše řezu vykazuje podíl krystalické složky na 65, 56 %, což činí rozdíl 7,5%, který odpovídá poklesu krystalinity ozářeného vzorku.

V místě řezu došlo ke strukturální změně, amorfnímu nárůstu (neuspořádané struktury), což koresponduje se závěry FTIR analýzy poukazující na degradaci polymerních řetězců. V porovnání s POM homopolymerem se projevil mírný posun peaku z $22,7936^\circ$ na $22,8790^\circ$ (z 77,12% na 73,02%). Tedy o 4,1% je zde nižší krystalinity, což může poukazovat na vliv kopolymerace POM C. [35][36]

POM H



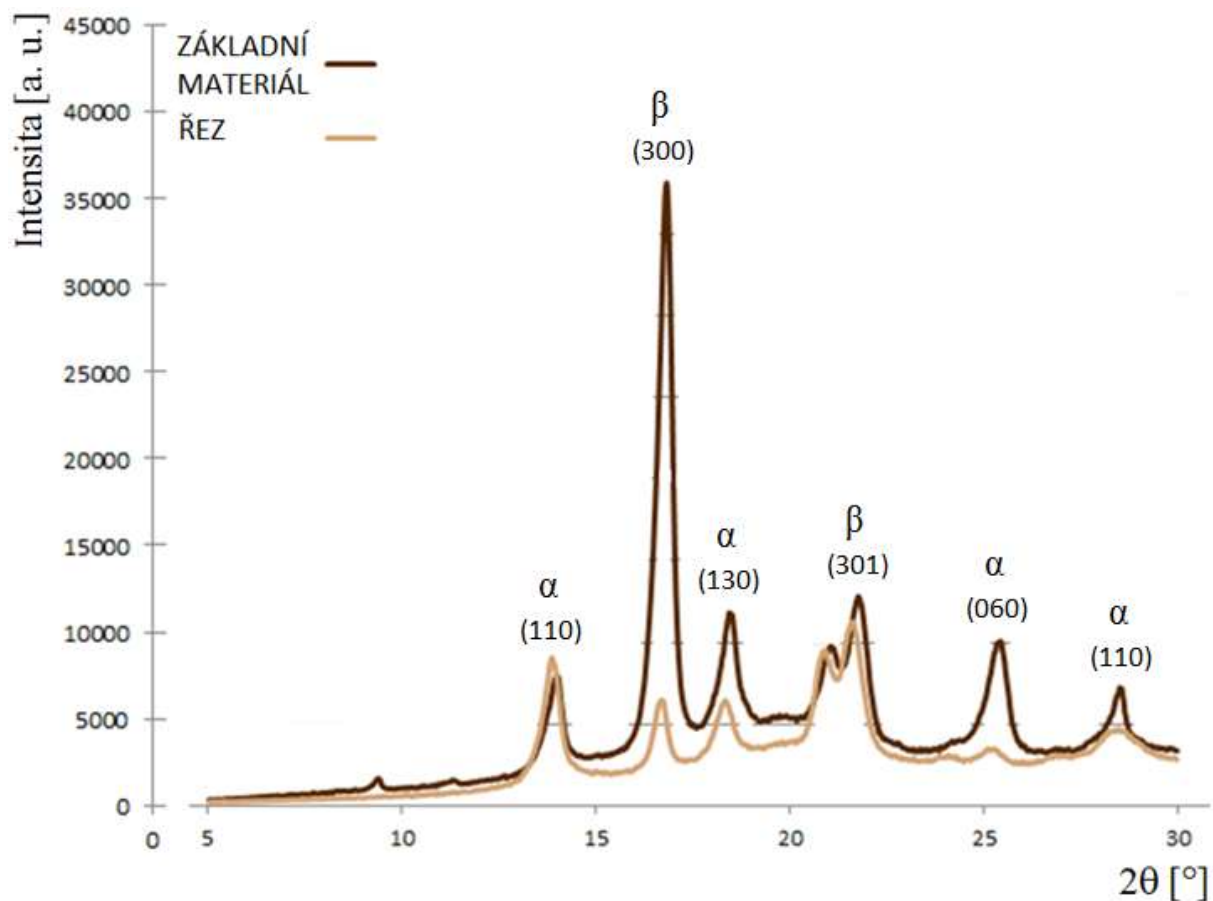
Obr.: 13.14 RTG difrakční snímek POM H

RTG difrakční analýzou bylo zjištěno, že neozářený materiál POM H je krystalický z 77,12%. U vzorku z POM H je v místě řezu složka krystalického podílu 68,74 %.

Stejně jako v případě POM C, tak i u POM H došlo s ozářením k poklesu krystalického podílu ve vzorku o 8,4 %. Tento poměrně významný pokles by

v souladu s FTIR analýzou poukazoval na degradaci polymerních řetězců. [35][36]

PP



Obr.: 13.15 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 podíl 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 rekystalizace. 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. 13.2 jsou uvedeny údaje týkající se zastoupení fází neozářeného 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 13.2 Rozbor obsahu fází semikrystalického podílu základního materiálu

PP	α	β	α	β	β	α	α
Nastavení 2 θ [°]	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 13.3 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 13.3 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			

14. VYHODNOCENÍ

14.1 Laserová obrobiteľnosť

Hĺbkou rezu je definovaná „laserová obrobiteľnosť.“ Za použitia rezných rýchlostí $533 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a výkonu 24 W (viz tab. 9.3, str. 39), bolo najväčšia hĺbky $248 \mu\text{m}$ 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 rezná rychlost na maximální hodnotě, hĺbky se u PMMA snížily a nejvyššího odebrání materiálu bylo dosaženo u POM. Hĺbka vytvořená 12W výkonem laseru byla $42\mu\text{m}$, resp. $95\mu\text{m}$ při 24W .

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.

14.2 Drsnosti obráběných ploch

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

Tabulka 14.1 Porovnání drsností obrobených ploch

	PMMA	PE 1000	POM C	POM H	PP
	DRSNOST [μm]				
$Ra_{\text{REZ}-1}$	0,414	0,501	1,000	2,645	2,000
$Ra_{\text{REZ}-3}$	0,777	0,000	1,343	2,694	0,490
$Rz_{\text{REZ}-1}$	1,61	2,489	5,000	10,555	10,000
$Rz_{\text{REZ}-3}$	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.

14.3 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. 16.2, str. 120).

Z hlediska posouzení výsledků měření mikro-tvrdomosti se ukázalo, že hodnoty HV_{IT} , v těsné blízkosti obráběné plochy, jsou nižší než u základního (neozáře-ného) materiálu. S posuvem indentoru směrem od místa řezu se mikro-tvrdomost postupně zvyšuje (viz tab. 16.2, str. 120).

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 14.2 Porovnání HVIT a EIT

	PMMA	PE 1000	POM H	PP				
MIKROTVRDOST 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
MIKROTVRDOST 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

14.4 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.

14.5 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. 16.3 str. 123).

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 16.3 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 16.4, což vedlo ke zvýšení obsahu modifikace α (monoklinické) fáze, umožněného termo-dynamickými podmínkami laserového obrábění, což je v souladu se simulací teplotního pole.

Tabulka 16.4 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.

15. 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 obrobiteľnosti 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 obrobiteľnost byla stanovena v závislosti na technologických parametrech *hloubkou drážky* vytvořenou laserovým paprskem. Byly určeny materiály s nejlepší „laserovou obrobiteľností“. 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 obrobiteľnost 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 obrobiteľnost 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) Modelování 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>	29
<i>Obr. 5.3: Rozdělení polymerů [19]</i>	29
<i>Obr. 8.1: Laserové zařízení ILS 3 NM</i>	36
<i>Obr. 8.2: Vzorky pro experimenty.</i>	37
<i>Obr. 9.1: Taylor HobsonTalysurf CLI 500 [21]</i>	39
<i>Obr. 9.2: Závislost hloubky řezu na řezných podmínkách</i>	42
<i>Obr. 10.1: Ruční mikroskop Pro Scope HR [22]</i>	45
<i>Obr. 10.2: Vnikání laserového paprsku do materiálu</i>	46
<i>Obr. 10.3: Řez na vzorku z PE 1000 - drážka 1</i>	47
<i>Obr. 10.4: Řez na vzorku z PE 1000 - drážka 2</i>	47
<i>Obr. 10.5: Řez na vzorku z PE 1000 – drážka 3</i>	48
<i>Obr. 10.6: Řez na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	48
<i>Obr. 10.7: Řez na vzorku z PMMA - drážka 2</i>	49
<i>Obr. 10.8: Řez na vzorku z PMMA - drážka 3</i>	49
<i>Obr. 10.9: Řez na vzorku z POM C - drážka 1</i>	50
<i>Obr. 10.10: Řez na vzorku z POM C - drážka 2</i>	50
<i>Obr. 10.11: Řez na vzorku z POM C - drážka 3</i>	51
<i>Obr. 10.12: Řez na vzorku z POM H - drážka 1</i>	52
<i>Obr. 10.13: Řez na vzorku z POM H - drážka 2</i>	52
<i>Obr. 10.14: Řez na vzorku z POM H - drážka 3</i>	53
<i>Obr. 10.15: Řez na vzorku z PET - drážka 1</i>	54
<i>Obr. 10.16: Řez na vzorku z PET - drážka 2</i>	54
<i>Obr. 10.17: Řez na vzorku z PET - drážka 3</i>	55
<i>Obr. 10.18: Talysurf CLI 500 [21]</i>	56
<i>Obr. 10.19: Povrch na vzorku z PE 1000 - drážka 1</i>	57
<i>Obr. 10.20: Drsnost povrchu na vzorku z PE 1000 - drážka 1</i>	58
<i>Obr. 10.21: Povrch na vzorku z PE 1000 - drážka 3</i>	59

<i>Obr. 10.22: Drsnost povrchu na vzorku z PE 1000 – drážka 3</i>	60
<i>Obr. 10.23: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	61
<i>Obr. 10.24: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 1</i>	62
<i>Obr. 10.25: Povrch na vzorku z PMMA – drážka 3</i>	63
<i>Obr. 10.26: Drsnost povrchu na vzorku z PMMA – drážka 3</i>	64
<i>Obr. 10.27: Povrch na vzorku z POM C – drážka 1</i>	65
<i>Obr. 10.28: Drsnost povrchu na vzorku z POM C – drážka 1</i>	66
<i>Obr. 10.29: Povrch na vzorku z POM C – drážka 3</i>	67
<i>Obr. 10.30: Drsnost povrchu na vzorku z POM C – drážka 3</i>	68
<i>Obr. 10.31: Povrch na vzorku z POM H – drážka 1</i>	69
<i>Obr. 10.32: Drsnost povrchu na vzorku z POM H – drážka 1</i>	70
<i>Obr. 10.33: Povrch na vzorku z POM H – drážka 3</i>	71
<i>Obr. 10.34: Drsnost povrchu na vzorku z POM H – drážka 3</i>	72
<i>Obr. 10.35: Povrch na vzorku z PP – drážka 1</i>	73
<i>Obr. 10.36: Drsnost povrchu na vzorku z PP – drážka 1</i>	74
<i>Obr. 10.37: Povrch na vzorku z PP – drážka 3</i>	75
<i>Obr. 10.38: Drsnost povrchu na vzorku z PP – drážka 3</i>	76
<i>Obr. 11.1: CSM Micro Combi Tester [24]</i>	77
<i>Obr. 11.2: Zobrazení deformace typu Pile-up a Sink-in [23]</i>	78
<i>Obr. 11.3: Vzorek pro měření mikro-tvrdosti HV_{IT} a modulu pružnosti E_{IT}</i>	79
<i>Obr. 11.4: Závislost E_{IT} na posuvu indentoru x pro PE 1000</i>	80
<i>Obr. 11.5: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PE 1000</i>	80
<i>Obr. 11.6: Závislost E_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA</i>	81
<i>Obr. 11.7: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PMMA</i>	81
<i>Obr. 11.8: Závislost E_{IT} na posuvu indentoru x pro POM H</i>	82
<i>Obr. 11.9: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro POM H</i>	82
<i>Obr. 11.10: Závislost E_{IT} na posuvu indentoru x pro PP</i>	83
<i>Obr. 11.11: Závislost mikro-tvrdosti HV_{IT} na posuvu indentoru x pro PP</i>	83
<i>Obr. 11.12: Porovnání E_{IT} zkoumaných materiálů</i>	84
<i>Obr. 11.13: Porovnání mikro-tvrdostí HV_{IT} zkoumaných materiálů</i>	85
<i>Obr. 11.14: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000</i>	86
<i>Obr. 11.15: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000</i>	87
<i>Obr. 11.16: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA</i>	88
<i>Obr. 11.17: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA</i>	89
<i>Obr. 11.18: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál POM H</i>	90
<i>Obr. 11.19: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA</i>	91
<i>Obr. 11.20: F - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP</i>	92
<i>Obr. 11.21: t - test řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP</i>	93
<i>Obr. 11.22: Porovnání materiálů řezu 1</i>	94
<i>Obr. 11.23: Porovnání HV_{IT} materiálů 3. řezu</i>	95
<i>Obr. 12.1.: Teplotní pole materiálu PE 1000</i>	98

<i>Obr. 12.2.: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PE 1000</i>	98
<i>Obr. 12.3.: Teplotní pole materiálu PMMA</i>	99
<i>Obr. 12.4.: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PMMA</i>	99
<i>Obr. 12.5.: Teplotní pole materiálu POM C</i>	100
<i>Obr. 12.6.: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro POM C</i>	100
<i>Obr. 12.7.: Teplotní pole materiálu PP</i>	101
<i>Obr. 12.8.: Závislost teploty na vzdálenosti od plochy řezu 1 pro PP</i>	101
<i>Obr. 13.1.: Nicolet Avatar 320 ATR</i>	104
<i>Obr. 13.2.: Infračervené spektrum PE 1000</i>	105
<i>Obr. 13.3.: Infračervené spektrum PMMA</i>	106
<i>Obr. 13.4.: Infračervené spektrum POM C</i>	107
<i>Obr. 13.5.: Infračervené spektrum POM H</i>	108
<i>Obr. 13.6.: Infračervené spektrum PP</i>	109
<i>Obr. 13.7.: Difraktometr PANalytical X'Pert PRO</i>	110
<i>Obr. 13.8.: Schéma difraktometru [33]</i>	110
<i>Obr. 13.9.: Difrakce na rovinách otočného krystalu [32]</i>	111
<i>Obr. 13.10.: Braggova difrakční podmínka [33]</i>	112
<i>Obr. 13.11.: Vzorek zkoumaného materiálu</i>	113
<i>Obr. 13.12.: RTG difrakční snímek PE 1000</i>	113
<i>Obr. 13.13.: RTG difrakční snímek POM C</i>	114
<i>Obr. 13.14.: RTG difrakční snímek POM H</i>	115
<i>Obr. 13.14.: RTG difrakční snímek PP</i>	116

SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 Rozdělení laserů.....	20
Tab. 5.1 Názvosloví polymerů.....	31
Tab. 8.1 Specifikační štítek zařízení ILS 3 NM	87
Tab. 9.1 Specifikace zařízení Taylor Hobson Talysurf CLI 500.....	40
Tab. 9.2 Nastavení pracovních podmínek laserového zařízení	40
Tab. 9.3 Naměřené hloubky opracování.....	41
Tab. 9.4 Výpočty.....	43
Tab. 10.1 Specifikace zařízení Pro Scope HR.....	45
Tab. 11.1 Specifikace zařízení CSM Micro Combi Tester.....	87
Tab. 11.2 Rozsahy zatěžujících sil F	78
Tab. 11.3 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PE 1000	87
Tab. 11.4 Výpočty Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PMMA ...	89
Tab. 11.5 Výpočty t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál POM H.....	91
Tab. 11.6 Výpočet t - testu řezu 1 a řezu 3 pro materiál PP	93
Tab. 11.7 Výpočet odchylek HVIT řezu 1	94
Tab. 11.8 Výpočet odchylek řezu 3	95
Tab. 12.1 Fyzikální vlastnosti materiálů.....	97
Tab. 13.1 Přejíchodové teploty polymerních materiálů.....	103
Tab. 13.2 Rozbor obsahu fází semikryst. podílu základního materiálu	117
Tab. 13.3 Rozbor obsahu fází semikryst. podílu ozářeného materiálu	118
Tab. 14.1 Porovnání drsností obrobených ploch	119
Tab. 14.2 Porovnání HVIT a EIT	121
Tab. 16.3 Změny krystalických podílů	123
Tab. 16.4 Porovnání obsahu fází semikrystalického podílu pro PP	123

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
HAZ	Heat affected zone, 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
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

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

Study of Surface Integrity of Polymer Materials at Laser Machining

Disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

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

Sazba: Ing. Jana Knedlová

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2018

ISBN 978-80-