

# **Studium strukturálních změn po průchodu laserového paprsku polymerními materiály**

Bc. Petr Dančák

---

Diplomová práce  
2016/2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2016/2017

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Dančák**  
Osobní číslo: **T15333**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium strukturálních změn po průchodu laserového paprsku  
polymerními materiály**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární studie na dané téma**
- 2. Experimentální obrábění vybraných polymerních materiálů**
- 3. Modelování transientního teplotního pole polymerů**
- 4. Laboratorní zkoušky za účelem posouzení strukturálních a chemických změn v materiálu**
- 5. Vyhodnocení získaných dat a statistické zpracování**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucí práce**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Libuše Sýkorová, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

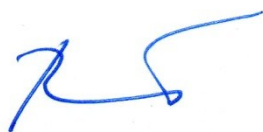
Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**12. května 2017**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: ..... PETR DANČÁK .....

Obor: ..... VI .....

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně ..... 12.5.2017 .....



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

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

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

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

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



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

<sup>21</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá studiem vlivu laserového paprsku na strukturální změny v polymerních materiálech. V teoretické části je nejprve popsáno polymerních materiálů včetně jejich rozdělení, následně je zde krátce uvedeno rozdělení nekonvenčních metod a odtud se pak práce směřuje na popis laserů jako takových.

V části praktické je nejprve popsáno konkrétních materiálových vzorků, jež byly pro výzkum poskytnuty, načež je zde uvedeno a popsáno všech metod, kterými se tyto vzorky budou zkoumat. Na závěr praktické části jsou zde uvedeny hlavní výsledky práce ze všech jednotlivých měření.

Klíčová slova:

Laser, polymerní materiály, struktura materiálu, změny povrchu, změny v materiálu

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is based on studying of changes in material by laser machining after use. At first there are describe polymer materials including their distribution, as next there is describe the base of unconventional methods, and from those the work is directed to the description of laser machining.

In the practical part of this diploma thesis there are describe specific material samples, which have been provided for testing. Then, there is mentioned all of methods which are ordered for the main research and measuring. At the conclusion of the practical part there are presented the main results of the work from all individual measurements.

Keywords:

Laser, polymeric materials, material structure, surface changes, material changes

Tímto děkuji mé vedoucí diplomové práce, paní doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D., za ochotu, poznatky a cenné rady, které jsem ve své práci zužitkoval. Dále děkuji všem zaměstnancům Fakulty technologické, zejména z Ústavu výrobního inženýrství, kteří mi pomohli realizovat vlastní měření a výzkum. V poslední řadě, avšak neméně důležité, bych chtěl poděkovat rodičům a rodině, za všeobecnou, a to jak morální, tak materiální podporu během celého studia.

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

Ve Zlíně 12.5.2017

.....

podpis diplomanta

<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>2</b>
<b>1 POLYMERNÍ MATERIÁLY .....</b>	<b>3</b>
1.1 KLASIFIKACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	4
1.1.1 Dělení dle tvaru molekul .....	4
1.1.2 Dělení dle chování při ohřevu .....	5
1.1.3 Dělení dle nadmolekulární struktury .....	5
1.1.4 Dělení dle postavení na trhu .....	6
1.1.5 Dělení dle způsobu přípravy .....	7
1.2 VÝVOJ POLYMERNÍHO MATERIÁLU NA TRHU .....	7
1.3 EKOLOGIE, POLYMERY A LIDSKÁ KULTURA.....	9
1.3.1 Jednu třetinu spotřeby tvoří obalový průmysl.....	10
<b>2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ .....</b>	<b>11</b>
2.1 DĚLENÍ DLE ZPŮSOBU ÚBĚRU MATERIÁLU .....	11
2.2 KLASIFIKACE.....	12
<b>3 LASER.....</b>	<b>13</b>
3.1 HISTORIE LASERU .....	14
3.2 PRINCIP LASERU .....	15
3.2.1 Inverzní populace .....	16
3.2.2 Stimulovaná emise záření.....	16
3.2.3 Optický rezonátor.....	17
3.3 KONSTRUKCE LASERU .....	18
3.3.1 Laserová hlavice.....	19
3.3.2 Výstup paprsku.....	19
3.3.3 Aktivní prostředí .....	19
3.3.4 Budící zařízení.....	19
3.3.5 Chladicí zařízení.....	20
3.4 ROZDĚLENÍ LASERŮ.....	20
3.5 OBECNÉ POUŽITÍ LASERŮ .....	21
3.6 MOŽNOSTI A VÝHODY V OBLASTI LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ, ZEJMÉNA ŘEZÁNÍ .....	22
3.6.1 Řezání laserem .....	23
3.7 BEZPEČNOSTNÍ TŘÍDY LASERŮ .....	23
3.8 INTERAKCE LASEROVÉHO PAPERU S OBRÁBĚNÝM MATERIÁLEM .....	26
3.8.1 Posloupnost absorpčních jevů .....	27
3.8.2 Vliv vlnové délky světelného paprsku a odrazivost .....	27
3.8.3 Vliv povrchové vrstvy .....	27
3.8.4 Vliv úhlu dopadu .....	27
3.8.5 Vliv materiálu a drsnosti povrchu .....	28
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>29</b>
<b>4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....</b>	<b>30</b>
<b>5 POPIS ZVOLENÝCH MATERIÁLŮ.....</b>	<b>31</b>



5.1	POLYMETYLMETAKRYLÁT – PMMA.....	32
5.2	POLYACETAL – POM C A POM H.....	32
5.3	POLYETYLÉN – PE 1000.....	33
5.4	POLYAMID MODIFIKOVANÝ – PA 6 G + OLEJ.....	34
5.5	POLYPROPYLEN – PP.....	35
5.6	POLYAMIDY – PA 6 A PA 66.....	36
5.7	POLYETHYLENTEREFTALÁT – PET.....	37
<b>6</b>	<b>ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ A POPIS ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>38</b>
6.1	DĚLENÍ MATERIÁLU – PÁSOVÁ PILA PROMA PPK – 90U.....	38
6.1.1	Parametry zařízení.....	38
6.2	PROCES LASEROVÉHO OBRÁBĚNÍ – LASER ILS 3NM.....	39
6.2.1	Parametry zařízení.....	39
6.2.2	Navržení správného vzorku.....	40
6.2.3	Volba vstupních parametrů.....	41
6.2.4	Předmluva k výběru materiálových vzorků (dovětek k laserovému obrábění).....	42
6.3	VIZUÁLNÍ UKÁZKA ŘEZŮ – RUČNÍ MIKROSKOP PROSCOPE HR.....	43
6.3.1	Parametry zařízení.....	43
6.4	SNÍMÁNÍ 3D POVRCHU A DRSNOSTI PLOCH – TALYSURF CLI 500.....	44
6.4.1	Parametry zařízení.....	44
6.5	MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI - CSM MICRO COMBI TESTER.....	45
6.5.1	Parametry zařízení.....	46
6.6	SIMULACE TEPLOTNÍCH POLÍ – SOFTWARE COSMOS.....	47
6.7	INFRAČERVENÁ VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE – NICOLET AVATAR 320 ATR.....	48
6.8	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA – PANALYTICAL X’PERT PRO.....	50
6.8.1	Morfologie.....	51
<b>7</b>	<b>HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE.....</b>	<b>53</b>
7.1	ZOBRAZENÍ ŘEZŮ DIGITÁLNÍ MIKROSKOPEM.....	53
7.1.1	POM C – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	54
7.1.2	POM C – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%).....	55
7.1.3	POM C – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	56
7.1.4	POM H – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	57
7.1.5	POM H – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%).....	58
7.1.6	POM H – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	59
7.1.7	PMMA – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	60
7.1.8	PMMA – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%).....	61
7.1.9	PMMA – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	62
7.1.10	PE 1000 – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	63
7.1.11	PE 1000 – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%).....	64
7.1.12	PE 1000 – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	65
7.1.13	PET – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	66
7.1.14	PET – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%).....	67
7.1.15	PET – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	68
7.2	MĚŘENÍ HLOUBEK JEDNOTLIVÝCH ŘEZŮ.....	69
7.2.1	Zpřístupnění řezů jednotlivých drážek.....	69

7.2.2	Hloubky řezů pro jednotlivé materiály.....	69
7.3	3D SNÍMÁNÍ A VYHODNOCENÍ POVRCHŮ.....	70
7.3.1	POM C – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%) .....	71
7.3.2	POM C – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%) .....	72
7.3.3	POM H – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%) .....	74
7.3.4	POM H – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%) .....	75
7.3.5	PMMA – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%).....	77
7.3.6	PMMA – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%).....	78
7.3.7	PE 1000 – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%) .....	80
7.3.8	PE 1000 – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%) .....	81
7.3.9	PP – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%) .....	83
7.3.10	PP – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%) .....	84
7.4	MĚŘENÍ VTISKOVÉHO MODULU PRUŽNOSTI A MIKROTVRDNOSTI DLE VICKERSE.....	86
7.4.1	POM H .....	87
7.4.2	PMMA.....	88
7.4.3	PE 1000 .....	89
7.4.4	PP .....	90
7.4.5	Souhrnné zobrazení modulu pružnosti .....	91
7.4.6	Souhrnné zobrazení vtiskové mikrotvrdnosti.....	92
7.5	SIMULACE TEPLOTNÍHO POLE .....	93
7.5.1	POM C.....	94
7.5.2	POM H .....	95
7.5.3	PMMA.....	96
7.5.4	PE 1000 .....	97
7.5.5	PP .....	98
7.6	FTIR – INFRAČERVENÁ VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE .....	99
7.6.1	POM C.....	100
7.6.2	POM H .....	101
7.6.3	PMMA.....	102
7.6.4	PE 1000 .....	103
7.6.5	PP .....	104
7.7	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA.....	105
7.7.1	POM C.....	105
7.7.2	POM H .....	106
7.7.3	PMMA.....	107
7.7.4	PE 1000 .....	108
7.7.5	PP .....	109
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>111</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY.....</b>	<b>113</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>117</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>121</b>
	<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>122</b>

## ÚVOD

O polymerních materiálech a jejich širokém využití se v dnešní době stačí uvědomit a přesvědčit pomalým rozhlédnutím kolem sebe. Obrovský vývoj polymerních materiálů způsobil, že se jazyk i odborná terminologie ještě zcela nestačily vyrovnat se všemi novými hmotami a jevy. Polymerní materiály tak lze často v obecném jazyce zaznamenat jako umělé hmoty, plasty, syntetické materiály apod.

V teoretické části této diplomové práce jsou tak nejprve popsány polymerní materiály, jejich klasifikace dle různých kritérií, obecné zajímavosti, charakteristiky a vlastnosti. Dále je zde krátce popsáno nekonvenčních metod, kam spadá mimo jiné i laserové obrábění, přičemž se v následující kapitole teoretické části věnují právě popisu laseru jako takového, čili jeho využití, rozdělení a bezpečnostních tříd laserů.

V praktické části této diplomové práci je následně úkolem jednak potvrdit a zkoumat vliv laserového paprsku na změnu struktury ve vybraných polymerních materiálech, ale také zkoumat vliv laserového paprsku na další změny v oblasti materiálových vlastností těchto polymerních materiálů.

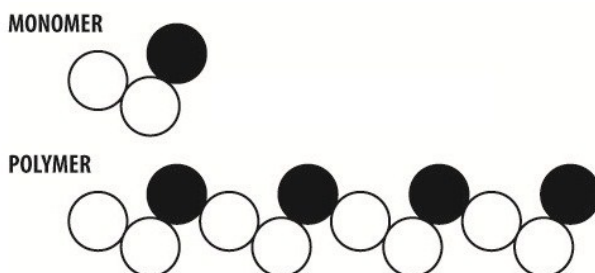
# **I. TEORETICKÁ ČÁST**



# 1 POLYMERNÍ MATERIÁLY

O polymerních materiálech a jejich širokém využití se v dnešní době stačí uvědomit a přesvědčit jedním pomalým rozhlédnutím kolem sebe. Obrovský vývoj polymerních materiálů způsobil, že se jazyk i odborná terminologie ještě zcela nestačily vyrovnat se všemi novými hmotami a jevy. Polymerní materiály tak lze často v obecném jazyce zaznamenat jako umělé hmoty, plasty, syntetické materiály apod. Nejprve uvedu pár základních termínů, načež nastíním i terminologii další. [8]

- Monomer je výchozí nízkomolekulární látkou pro výrobu polymeru. Obsahuje nejméně jednu dvojnou vazbu, případně dvě funkční skupiny schopné vzájemně reagovat a vytvořit polymer.
- Polymer je opakující se základní jednotka, jež vytváří makromolekuly. Je to látka přírodního nebo syntetického původu obsahující atomy uhlíku, vodíku nebo kyslíku, často též chloru, dusíku, případně jiných prvků. Na rozdíl od běžných materiálů je polymer tvořen strukturou, která může být lineární, větven, případně zesíťovaná.



Obr. 1 – Monomer vs. polymer [8]

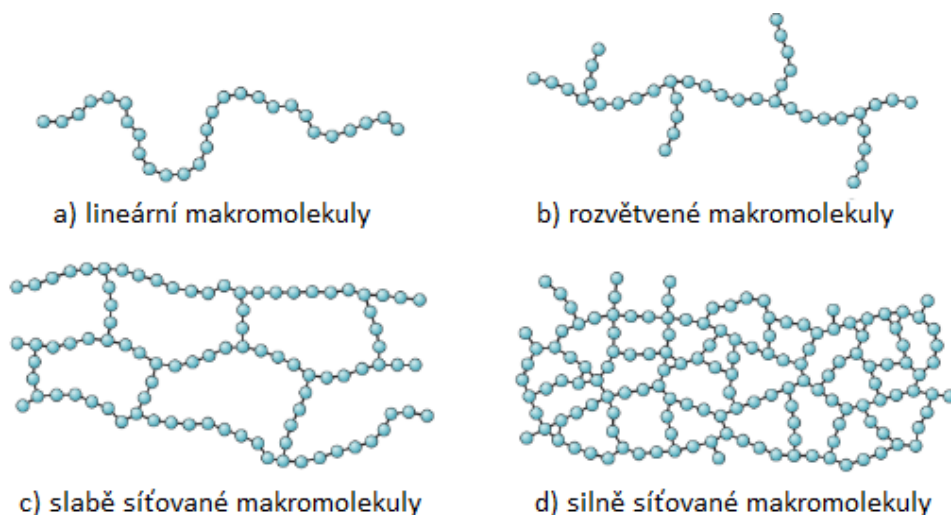
- Umělá hmota je látka připravena na základě umu člověka (odtud slovo „umělá“) o shodném chemickém složení, s jakým se vyskytuje v přírodě.
- Plast je polymerní technický materiál, který kromě polymeru obsahuje také přísady, které jsou běžné pro úpravu jeho vlastností. Mezi ně patří zejména plniva, změkčovadla, stabilizátory a barviva. V průběhu procesu zpracování projde plast alespoň jednou plastickým stavem.
- Elastomer je vysoce elastický materiál, který můžeme za běžných podmínek malou silou deformovat, a to bez porušení. Vyznačuje se nízkou tuhostí.
- Kaučuk je typický elastomer, jenž je možno vulkanizací převést na pryž (nespisovně gumu).

- Syntetický materiál, je polymerní materiál, který v přírodě neexistuje a je připraven chemickým postupem zvaným syntéza. Původně určen jako izolant pro elektrotechnický průmysl, později využit jako náhrada kaučuku.

## 1.1 Klasifikace polymerních materiálů

### 1.1.1 Dělení dle tvaru molekul

- Lineární polymer je polymer s makromolekulami řazenými jednotlivě za sebou mající dvě funkční skupiny. Ideální lineární polymer neobsahuje žádné boční řetězce.
- Rozvětvený polymer vzniká z vícefunkčních monomerů, přičemž na základním řetězci makromolekul vytváří krátké boční větve, což způsobuje oddálení dlouhých makromolekul od sebe. To ovlivňuje užité vlastnosti polymeru a přispívá ke zhoršení jeho pevnosti, tvrdosti a ovlivnění modulu pružnosti.
- Zesíťovaný polymer je složen z vícefunkčních monomerů a na různých místech v rozhraní sousedních řetězců vytváří chemickou vazbu, čímž vzniká hustá prostorová síť. Zesíťováním se snižuje pohyblivost makromolekul, což ovlivňuje a zhoršuje rozpustnost, tavitelnost i houževnatost. Polymer zároveň zvyšuje svou tvrdost, teplotní odolnost a též modul pružnosti. Výsledný vliv na změnu vlastností se bude vždy odvíjet od hustoty zesíťování. Zesíťování totiž může proběhnout slabě i silně (viz. obr. 2). [13]



Obr. 2 – Makromolekulární struktury polymerů [12]

### 1.1.2 Dělení dle chování při ohřevu

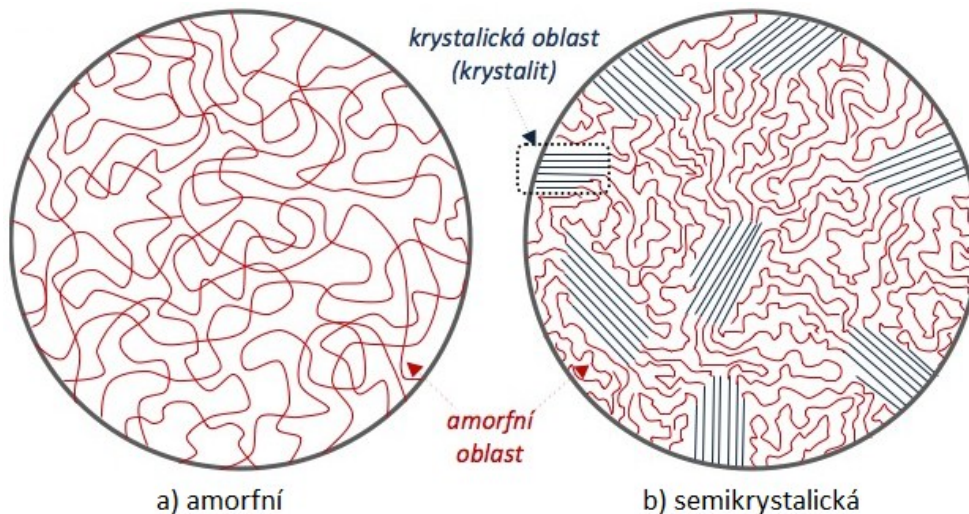
Názvoslovně rozlišujeme dvě velké skupiny polymerních materiálů:

- Termoplasty jsou opakovaně tavitelné polymerní materiály, které při zahřátí měknou a stávají se viskózní taveninou. Přechod do taveniny je velmi pozvolný. Jsou složeny z jednotlivých makromolekul vzájemně spojených pouze fyzikálními vazbami. Tím se termoplasty liší od běžných kovových materiálů. Ochlazením ve formě tuhnou, čímž udávají konečný tvar výrobku. Zpracování termoplastů lze realizovat ve všech běžných zpracovatelských technologiích. [12] [13]
- Reaktoplasty jsou naproti tomu polymerní materiály, jež se při ohřevu chemickou reakcí nevratně síťují. Tomuto hustému prostorovému síťování se též říká vytvrzování. Takto vytvrzený reaktoplast se následně ohřevem již nedokáže tavit a naopak zvyšuje svou tuhost i tvrdost. Reaktoplastům se dříve říkalo též termosety. [12] [13]

### 1.1.3 Dělení dle nadmolekulární struktury

Jedná se o uspořádání makromolekul na nadmolekulární úrovni, jež se tvoří při tuhnutí a ochlazení polymerní taveniny. Tímto lze polymerní materiály rozdělit na dvě základní skupiny:

- Amorfnní polymery zaujímají neuspořádanou strukturu.
- Semikrystalické polymery jsou proti tomu částečně uspořádané struktury. Tato míra uspořádání je vyjádřena stupněm krystalinity. Stojí za zmínku, že čistě krystalický polymerní materiál neexistuje, neboť i sebeuspořádanější struktura bude vždy obsahovat zlomek amorfnních struktur. Amorfnní oblasti plastům dodávají ohebnost, krystalické oblasti pak zejména pevnost. [12] [13]



Obr. 3 – Nadmolekulární struktura polymerů [13]

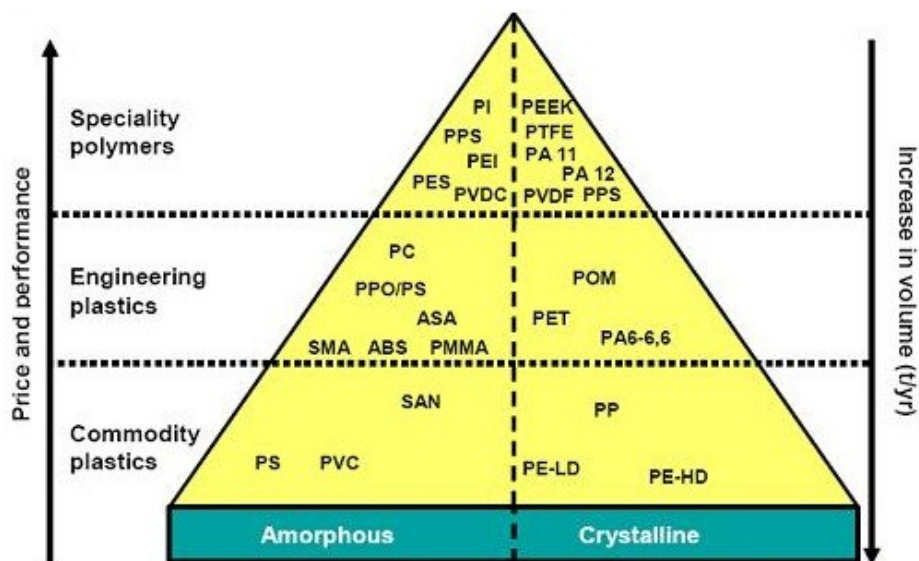
#### 1.1.4 Dělení dle postavení na trhu

Další z možností je klasifikace polymerů dle vlastního postavení na trhu. Podle toho rozlišujeme tři třídy.

- Komoditní polymery zabírají nejširší objem výroby i spotřeby na trhu, zároveň se řadí mezi polymery nejlevnější.
- Konstrukční polymery jsou proti komoditním výrazně dražší, avšak nabízejí znatelně lepší užitné vlastnosti. Často jsou i lépe tepelně odolné.
- Speciální polymery nabízejí pak unikátní užitné vlastnosti, zároveň se řadí mezi jednoznačně nejdražší polymery.

Toto rozdělení lze demonstrovat jako schematickou pyramidu, kde směrem nahoru odzdola roste kvalita, zároveň však i cena materiálu. Lze říci, že spolu s tímto vzrůstá, resp. i klesá informační hledisko, což vždy vyjadřuje úsilí výzkumu, jež předchází uvedení daného materiálu na trh. [10]





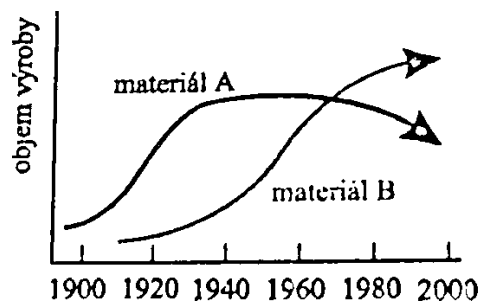
Obr. 4 – Dělení polymerů dle postavení na trhu [1]

### 1.1.5 Dělení dle způsobu přípravy

Jiný způsob rozdělení polymerů vychází z chemické reakce při jejich procesu přípravy. Některé vznikají polymerační reakcí, při níž se sestavují monomerní jednotky přímo do makromolekul polymeru. Tyto polymery mohou nést název dle výchozího monomeru (např. polyethylen, polyvinylchlorid, polypropylen, polystyren). Některé polymery také vznikají polykondenzací, kdy připojováním monomerních jednotek k polymernímu řetězci odpadá nízkomolekulární produkt, což může být např. voda. Takové polymery mohou nést název obvykle odvozen od charakteru chemické skupiny (např. polyamidy, polyimidy). [1]

## 1.2 Vývoj polymerního materiálu na trhu

Dá se říci, že úspěch jednotlivých materiálů s jejich uvedením na trh, resp. jejich volba pro ten, který výrobek, vychází vždy z poměru mezi cenou a užitnou hodnotou (price/performance ratio) tohoto materiálu. Na základě analogie s klasickými materiály jako jsou kovy nebo slitiny lze v některých případech orientačně předpovědět obecný vývoj rozvoje výroby a spotřeby pro polymerní materiály. Příkladem je časový vývoj interpretující nahrazení lehkých slitin polymerními materiály ve 20. století. [1]



Obr. 5 – Vývoj materiálů z hlediska objemu výroby v časové ose 20. století [1]

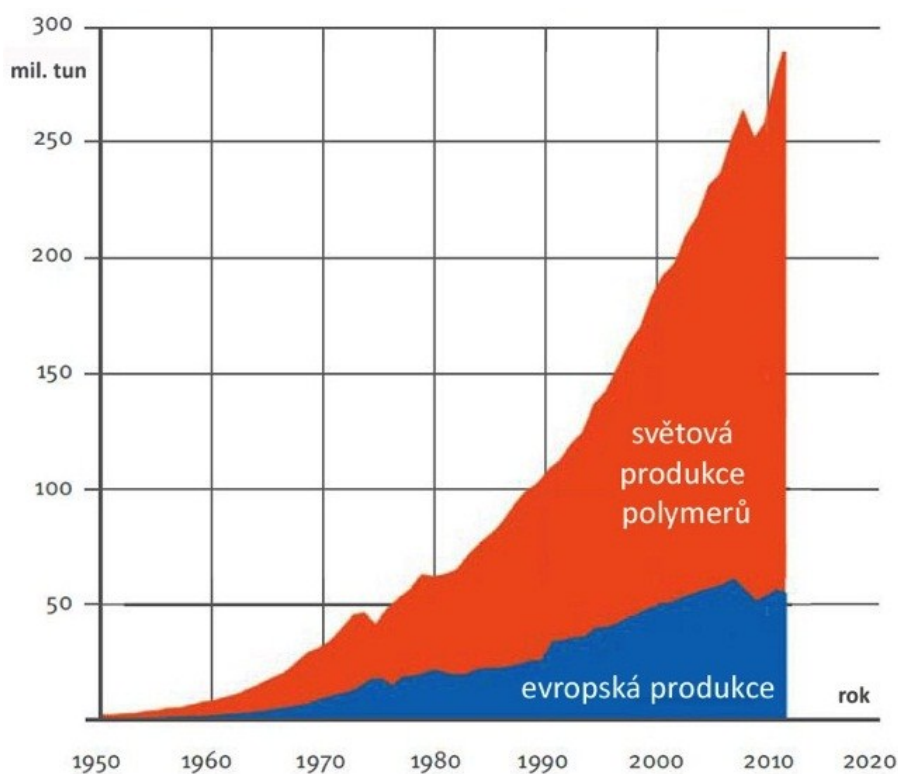
Křivka materiálu A (lehká slitina) proniká na trh. Následuje úspěch a vzrůst výroby i spotřeby. To je spojeno se snahou nalézt nové spotřební oblasti. V této době je již objeven konkurenční materiál B (polymerní materiál). Výrobní objem a spotřeba materiálu, který postupně určitými vlastnostmi zastarává tak začíná stagnovat. Tímto stavem pomáhá trhu poskytnout prostor k vyplynutí nových modifikací a nových uplatnění pro nový materiál. [1]

Když se na trhu objevuje nový materiál, resp. výrobek se zajímavými, často novými aplikačními možnostmi a výrobce investuje s uvedením produktu potřebnou částku do propagace a reklamy, může si takto, po funkčním období této strategie do jisté míry diktovat cenu. Do jisté tržní doby, a sice do doby, kdy začne působit a snižovat cenu konkurence s produktem velmi podobným. Cena za materiál u původního výrobce tak může začít stagnovat, ale i klesat. Tímto je původní výrobce vystaven k otázce investic do dalšího výzkumu, s cílem o nalezení materiálové inovace. Pokud výrobce uvedením svého materiálu/výrobku docílil úspěšného počátečního prodeje, skýtá se možnost vstoupit do další etapy – tedy inovace. Může-li tak výrobce ve vhodné chvíli investovat finance do vývoje inovací, často vzniknou materiály zcela netušených vlastností a možností. Tímto vznikají v konečném důsledku i nové netradiční výrobky. Jak již bylo zmíněno, na úspěšné uplatnění určitého materiálu na trhu má podstatný vliv poměr jeho ceny a užitných vlastností. [1]

Ne každý vývoj materiálu však může být (resp. mohl být v minulosti) vždy takto jednoduchý, jako je demonstrováno na obr.4. V minulosti se na vývoji odrážely vždy faktory globálních, či lokálních krizí, případně válečné události apod., což ovšem a naneštěstí v některých případech k vývoji přispělo. [1]

Vývoj produkce polymerních materiálů celoplošně a neustále vzrůstá. V roce 2012 například dosáhla celosvětová roční produkce 288 mil. tun vyprodukovaných polymerů, přičemž 57 mil. tun náleželo produkci v Evropě. Tento stav je dán skutečností, že se poly-

mery prosazují stále více jako materiály konstrukční. Díky svým vlastnostem jako jsou nízká hmotnost, vysoká životnost a spolehlivost, odolnost vůči korozi, či vynikající estetické vlastnosti, tak nachází uplatnění ve velmi širokém měřítku průmyslové odvětví. Z hlediska výrobního jsou navíc realizovány ekonomicky i ekologicky přijatelnou technologií výroby. [8]



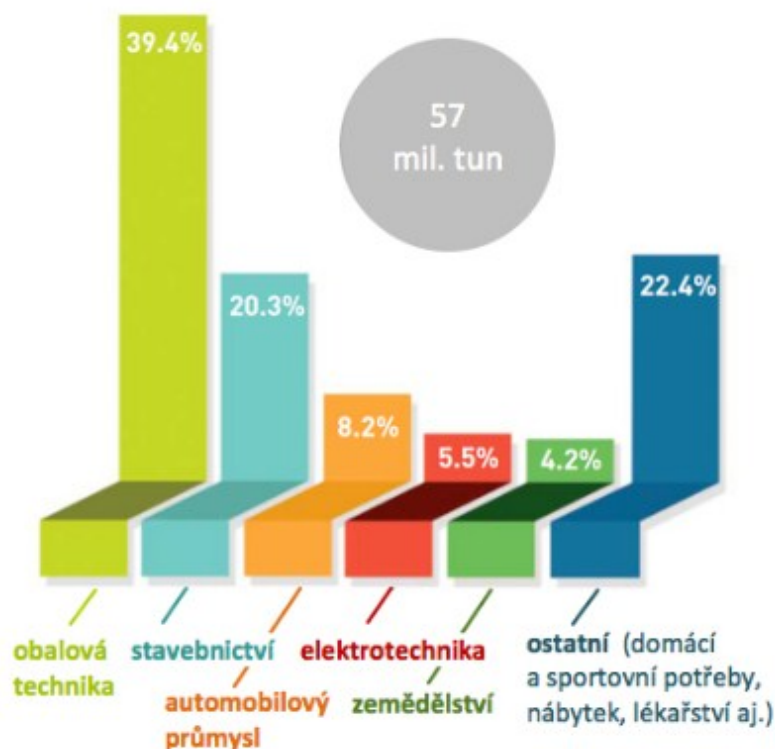
Obr. 6 – Vývoj produkce polymerů mezi lety 1950 – 2012 [8]

Dle prognóz se pro rok 2020 výroba plastů zvýší na hodnotu 400 mil. tun polymerních materiálů. Při tom všem pouze obalový průmysl zaujímá dlouhodobě zhruba třetinu veškeré této spotřeby. Například v roce 1970 plasty představovaly zhruba 6% hmotnosti vozidla, zatímco v dnešní době je to zhruba 12 až 15% hmotnosti vozu, přičemž dle prognóz k roku 2020 může tento podíl vzrůst až na jednu čtvrtinu, tedy 25%. [27]

### 1.3 Ekologie, polymery a lidská kultura

Účelné a ekologicky správné aplikace polymerních materiálů by měly vždy využívat takových vlastností, díky kterým překonávají klasické materiály. Jelikož se polymerní materiály díky své nízké hustotě a užitným vlastnostem stávají čím dál častěji nahrazením materiálů kovových, úměrně tak snižují hmotnost těchto dílců, resp. celku. To, že dochází k nahrazení kovových dílců plastovými, vede například v automobilovém průmyslu

k úspoře hmotnosti automobilu, což je faktorem ke snížení spotřeby paliva. Uvádí se, že při úspoře 100 kg hmotnosti lze snížit průměrnou spotřebu až o 0,4 l na 100 km. Nehledě na skutečnost, že při zpracování kovů je potřeba výrazně vyšších zpracovatelských teplot než u zpracování plastů, lze tak jistě hovořit o ekologicky správné cestě v materiálovém světě moderní doby. [28]



Obr. 7 – Průměrná evropská spotřeba polymérů [8]

### 1.3.1 Jednu třetinu spotřeby tvoří obalový průmysl

Ne všechny obaly jsou PET lahve, avšak například v sousedním Německu mají na všechny tyto obaly od nápojů vratnou zálohu. Nestává se tak neblahým pravidlem a ani náhodou, že by byly tyto obaly pohozeny např. kolem cest, jako je zvykem všude tam, kde je PET lahev pouze odpadem. Každý zřejmě ví, že lze PET lahev používat dlouhodobě, neboť to její vlastnosti umožňují. Vyhodit tak bezmyšlenkovitě každou takovou lahev ihned po vyprázdnění obsahu do příslušného kontejneru (v lepším případě), je zřejmě pouze zažitým zvykem, který je však výsledným nešvarem politiky zálohování obalů. Nezbývá než doufat v inspiraci od německých sousedů, a to jak v nařízení, tak i v počínání této problematiky. V konečném důsledku by se díky každému jedinci mohla alespoň zlomkově snížit tato spotřeba polymerních materiálů. Otázkou však zůstává, zda je tento záměr žádoucí, či ne, a pro koho. Nicméně znovupoužití dané lahve je jen otázkou uvědomění.

## **2 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ**

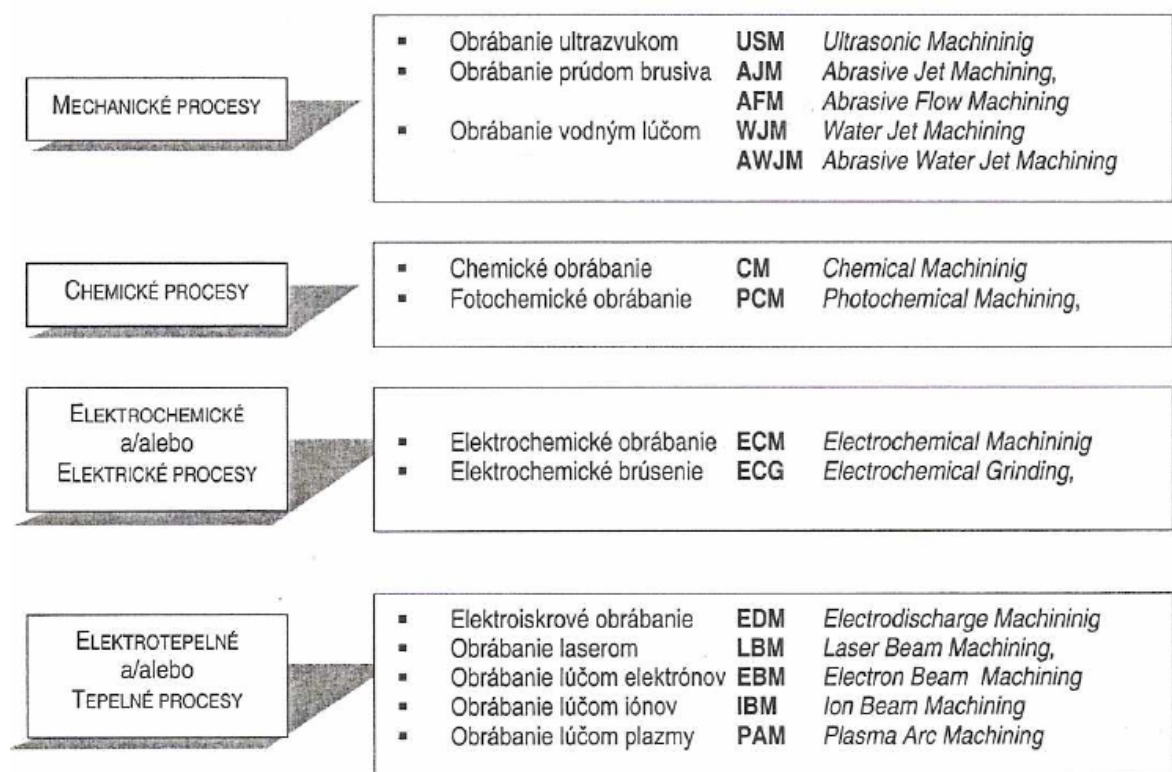
Nekonvenční metody jsou charakteristické tím, že k úběru materiálu dochází buďto tepelný, chemickým, či abrazivním účinkem, případně jejich kombinacemi. Nevyužívá se úběru mechanickým způsobem, ale jedná se o úběr cestou fyzikální, či chemickou. Nekonvenční metody obrábění uplatňujeme tam, kde by obrábění klasickým způsobem složité, až nemožné. Nekonvenční metody obrábění se vyznačují bezdotykovým způsobem obrábění, totiž nedochází zde k přímému styku mezi nástrojem a obrobkem. Nevznikají tak ani třísky, jinak typické pro konvenční způsoby obrábění. Zároveň platí, že úběr materiálu není závislý na mechanických vlastnostech obrobku, dokonce ani rychlost a ani výkonnost nezávisí na mechanických vlastnostech obrobku. Nevyužívá se úběru mechanickým způsobem, tedy faktory jako tvrdost a pevnost, stejně jako houževnatost, zřejmě přestávají mít svůj vlivný význam. Nekonvenčním způsobem lze obrábět materiály o vysoké pevnosti i tvrdosti a zároveň lze obrábět i velmi složité tvary.

### **2.1 Dělení dle způsobu úběru materiálu**

Nekonvenční metody se mohou dělit na základě způsobu úběru materiálu:

- tepelným účinkem
- chemickým či elektrochemickým účinkem
- mechanickým účinkem

## 2.2 Klasifikace



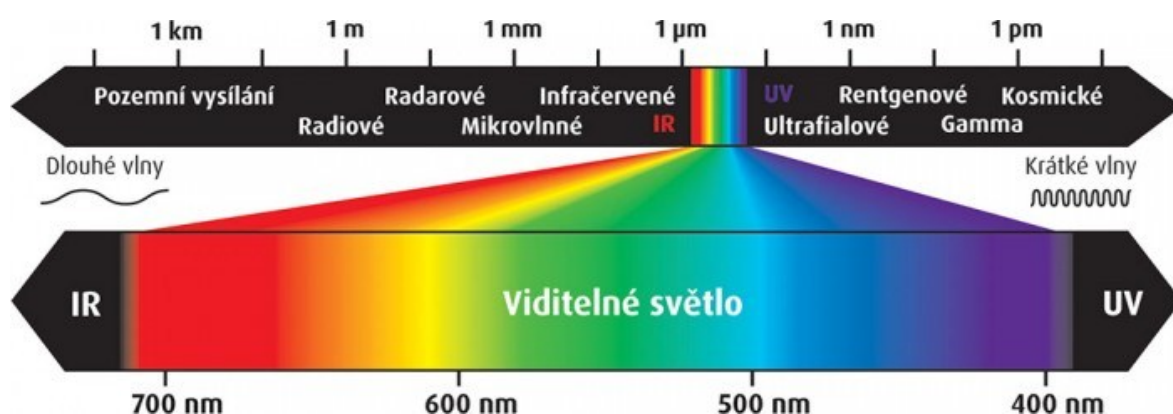
Obr. 8 – Rozdělení progresivních technologií [18]

### 3 LASER

Laser je zdrojem specifického typu světla, který se nikde v přírodě samo nevyskytuje. Jedná se o světlo monochromatické (tj. o stejné vlnové délce), které je koherentní (tj. jedná se o vlnění o stejné frekvenci, o stejném směru kmitání a stejné fázi) a jenž má podobu úzce směřovaného paprsku s velmi malou rozbíhavostí, čímž umožňuje soustředit velké množství energie na velmi malou plochu, čímž lze dosáhnout teploty v ohnisku paprsku až 10 000°C. Vlnové délky mohou nabývat hodnot od stovek mikrometrů až po jednotky nanometrů, což odpovídá širokému okruhu využití. Lasery se v dnešní době vyrábí v komplexním spektru možného generovaného záření. Jsou to záření mikrovlnné, infračervené, ultrafialové až rentgenové. Laserem se tak mohou obrábět různé materiály, jako například dřevo, plasty, kovy nebo keramika. Nezpochybnitelnou výhodou laserového paprsku je jeho vysoká přesnost a úzký řez na obrobené ploše. [6] [22] [31]

Laser je tedy v podstatě kvantový optický zdroj elektromagnetického záření, kde vzniká úzký svazek intenzivních světelných paprsků spadajících do viditelného, avšak vzhledem k vnímání lidského oka i neviditelného barevného spektra (více na Obr. 8). Barevná spektra tak jsou rozdělena do těchto základních třech oblastí, a sice:

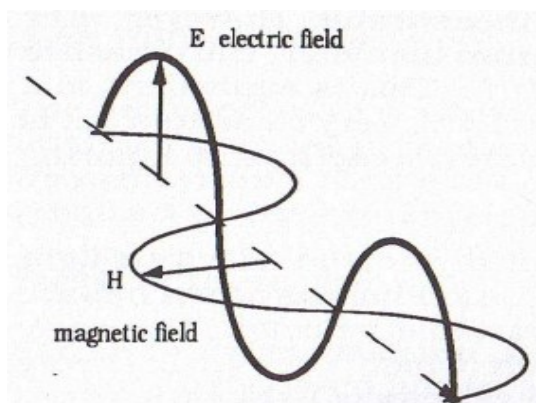
- infračervené elektromagnetické záření (IR)
- viditelná barevná škála (viditelné světlo)
- ultrafialové elektromagnetické záření (UV)



Obr. 9 – Komplexní spektrum záření [22]

### 3.1 Historie laseru

O světelný paprsek projeví zájem již staří Řekové, avšak jejich znalosti nestačily k popisu světelných dějů. Za zmínku stojí, že první rozložení bílého slunečního světla ukázal v 17. století již Isaac Newton, neboť dokázal užitím skleněného hranolu rozložit bílé sluneční světlo na kompletní světelné spektrum, čímž nepochybně otevřel cestu k vynálezu laseru. Současník Isaaca Newtona – Christian Huyghes viděl podstatu světla jako vlnění. K tomu nakonec pomohl Thomas Young se svou teorií o interferenci světla. Albert Einstein jako první popsal stimulovanou emisi záření v roce 1917. Richard Chace Tolman v roce 1924 pak poznamenal, že by zřejmě stimulovaná emise záření byla koherentní a se stejnou fází jako stimulující záření. [4] [6] [22] [31]



Obr. 10 – Elektrické a magnetické vektorové pole el.mag. záření [4]

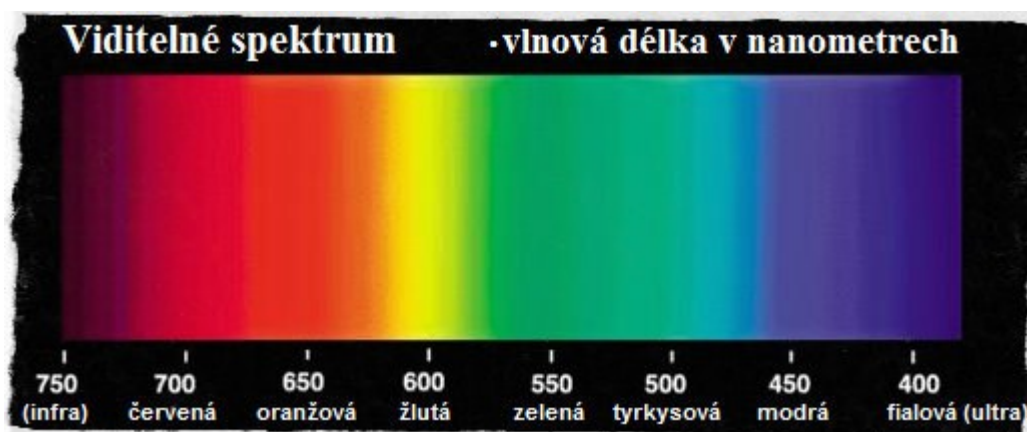
Ve 2. světové válce se začaly používat radiolokátory (radary), jež pomocí mikrovln, což jsou vlny o vlnové délce 1 mm až 1 m, umožňovaly zjistit polohu nepřátelských letadel. Využívalo se zde odrazu elektromagnetických vln. Po válce vývoj mikrovlnných přijímačů a vysílačů pokračoval a konstruktéři šli za zlepšením dosažitelných parametrů. Vědci se vrátili k myšlence Alberta Einsteina z roku 1917 o stimulované emisi záření. [31]

Je pozoruhodné, že úspěchu v rámci objevení tehdy fyzikové dosáhli téměř současně jak ve Spojených státech, tak v tehdejší Sovětské svazu. Výrobě laseru v roce 1953 předcházela konstrukce zařízení tzv. maseru (což je akronym z anglického Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – narozdíl od laserového Light Amplification by Stimulated of Radiation). Tedy první popis skutečného laseru směřující k realizaci jeho sestavení přichází o čtyři roky později, tedy v roce 1957. Některé zdroje uvádí sestavení prvního maseru i laseru o rok později, tedy maser v roce 1954 a laser v roce 1958. [22] [31]



První laser byl sestaven v roce 1960 a šlo o laser rubínový, jehož první využití bylo pro vrtání otvorů do kalibrů z diamantu. Jeho vlnová délka byla 694,3 nm. Ve srovnání s dnešními lasery byl však velmi nedokonalý a zdaleka ne tak efektivní. Brzy se začaly objevovat nové typy laserů, které se lišily jak konstrukčním uspořádáním a tedy výkonem a účinností, ale také vlnovou délkou generovaného záření. Například v roce 1962 byl vynalezen polovodičový laser a v roce 1964 pak následně CO<sub>2</sub> laser. Zároveň první zmínka o laseru kapalinovém je z roku 1966. [22] [23]

Není pravda, že by lasery byly závratně novou technologií, avšak lze říci, že jsou zřejmým oborem budoucnosti. Lze se dočíst, že k nám laser pronikl až v posledních letech, což je jednak výrok relativní, tedy ne příliš pravdivý, neboť například polovodičové lasery (též známé jako laserové diody, či polovodičové laserové diody) se v Československu (pod značkou Tesla) vyráběly již od roku 1981, přičemž funkce této laserové diody je stejná jako funkce jiných laserů, tedy založena na principu stimulované emise. [22]



Obr. 11 – Spektrum viditelného záření [22]

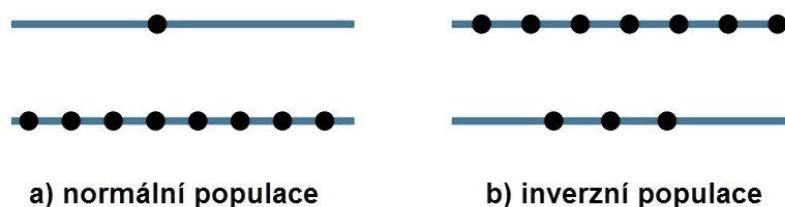
### 3.2 Princip laseru

Laserové světlo má prakticky jen jednu vlnovou délku, jež určuje, v jaké části spektra se bude takový paprsek pohybovat. V případě, že se v prostoru nachází elektron, do něhož tzv. „vletí“ foton, nastává pohlcení energie fotonu tímto elektronem, což vede k přesunu, resp. excitaci tohoto elektronu na jinou (vyšší) energetickou hladinu, přičemž zmíněný foton musí vykazovat stejnou hodnotu energie, jež je potřebná k přesunu elektronu na právě tuto vyšší energetickou hladinu. Při přechodu z vyšší do nižší energetické hladiny však foton zaniká. Elektron se spontánní emisí velmi rychle dostane zpět na základní energetickou hladinu (řádově se jedná o čas  $10^{-8}$  s), neboť je tento stav přirozeným stavem, avšak právě při tomto přechodu na nižší úroveň dojde k vyzáření energie formou fotonu. Právě

díky vybuzení aktivního prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina částic ve stavu s vyšší energií, dosáhneme stavu, jenž se nazývá inverzní populací. Aktivní prostředí musí při tom obsahovat prvky, jež obsahují tzv. metastabilní hladinu, do které pakliže elektron spadne, je schopen na této hladině i po uvolnění fotonu vydržet až 100 000 x déle než na vyšších energetických hladinách. Tím pádem je zajištěno, že takový elektron „počká“ na další foton, což vede k již zmíněnému stavu tzv. inverzní populace. [22] [23]

### 3.2.1 Inverzní populace

Je označením stavu dosažení populace energetických hladin tak, že průběh počtu elektronů na jednotlivých vyšších hladinách (zejména metastabilních) je vyšší než na základní rovině. Podmínkou k dosažení tohoto stavu je dostatečně výkonné nabuzení v oblasti aktivního prostředí. Elektron má snahu vrátit se do základního stavu – tj. snaha k uvolnění energie ve formě fotonu. Tímto se naskládá většina elektronů na metastabilní hladinu, kde počkají, než přiletí stimulující foton, jež nejprve musí přiletět z libovolného směru, načež se fotony budou stimulovat vzájemně. Při sestupu elektronů na základní hladinu, což vynutí potřebný stimulující foton, se všechny tyto fotony včetně toho stimulujícího spojí v jednu vlnu s amplitudou součtu, čímž dojde k výraznému zesílení tzv. stimulovanou emisí záření, přičemž však tato vlna nevykazuje dosud žádný žádoucí směr, neboť ten je stejný jako směr stimulujícího fotonu. [21]



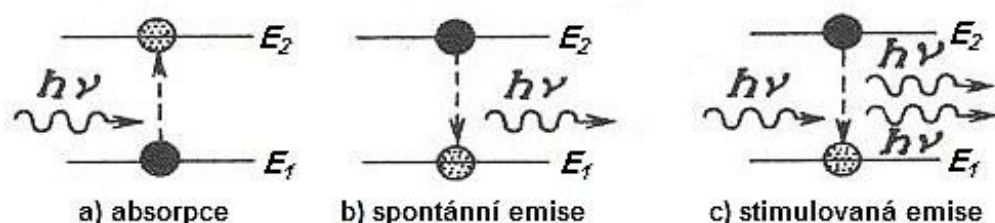
Obr. 12 – Schéma normální a inverzní populace

### 3.2.2 Stimulovaná emise záření

Bez ohledu na směr letících fotonů se jedná se o emisi elektromagnetického koherentního záření, vyvolanou dopadajícím zářením za současného přechodu z excitovaného stavu do základního. Vezmeme-li v potaz mnohonásobnost počtu atomů, ve kterých proběhne popsaná interakce, nachází se tyto elektrony na metastabilní hladině, kde zároveň čekají. Ke všem těmto vzápětí přiletí fotony, které působí jako stimulující fotony, čímž donutí ostatní elektrony k přesunu zpět a vypuštění náležitých fotonů, jež se připojí ke stimulujícím fotonům. Takové fotony se následně mnohonásobně zesílí, avšak pro nesjednocení

směru jejich pohybu se stále nedá mluvit o funkčnosti laseru, neboť je nutno zařazení tzv. rezonátoru laseru.

Při tomto jevu, kdy nastává interakce fotonu s atomem nebo molekulou, jsou obecně možné tři základní druhy interakcí (viz. Obr. 11). [21]



Obr. 13 – Schéma stimulované emise záření [1]

V excitovaném stavu (stav absorpce) atom setrvává pouze na velmi krátkou dobu, a sice řádově  $10^{-3}$  až  $10^{-7}$  vteřiny, načež následně přechází do základního stavu, což je zároveň stav vyzáření fotonu, tedy stav tzv. spontánní emise. V tomto stavu zpětným přechodem je pak dodaná energie vyzářena ve formě elektromagnetického záření. Ke stimulované emisi při tom dochází zároveň tehdy, když do excitované soustavy přijde foton o energii rovné rozdílu těchto energetických hladin, tj. energii

$$E = h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

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

$\nu$  – frekvence záření [Hz], přičemž z té lze vyjádřit vlnovou délku

$$\lambda = c / \nu \quad (2)$$

kde  $c$  je rychlost světla [ $m \cdot s^{-1}$ ].

### 3.2.3 Optický rezonátor

Jedná se o systém nejčastěji dvou (ojediněle i více) zrcadel, přičemž první z nich bývá propustné a druhé nepropustné, obě nejčastěji sférického charakteru. Částice dodané budícím zařízením se pohybují mezi těmito zrcadly tam a zpět, do určité meze intenzity, načež dochází k průniku polopropustným zrcadlem.

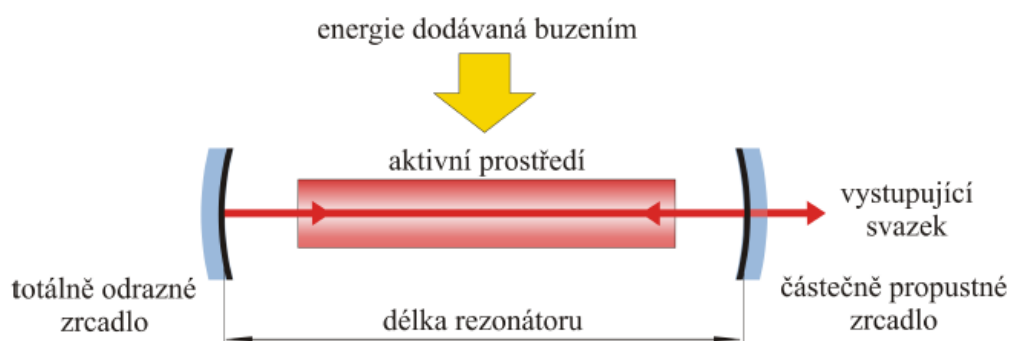
Princip je takový, že foton letící mimo osu rezonátoru buď vyletí ihned, nebo se párkrát mezi zrcadly odrazí, načež vyletí a zanikne. S velkou pravděpodobností zde však

bude mnoho fotonů, jež mají směr rovnoběžný s osou rezonátoru, resp. laseru, a tyto fotony začnou též díky systému zrcadel létat tam a zpět a nabíjet další fotony. Dá se tedy říci, že špatně letící fotony budou neustále zanikat a rovnoběžné letící fotony se zachovávají, přičemž náležitě stimulují další fotony. Tímto principem nakonec bude rovnoběžně letících fotonů čím dál více, neboť špatně letící fotony přestanou „stíhat“ a tudíž těchto fotonů začne ubývat, neboť je pravděpodobně strhne některých z rovnoběžně letících fotonů. Z důvodu, aby fotony počkaly a samovolně se rychle neuvolňovaly špatným směrem je nutná a nezbytná zmíněná metastabilní hladina, kde každý foton počká do té doby, než jej strhne foton letící žádoucím a správným směrem. Tím pádem špatně letící fotony buďto vymizí částečně nebo úplně, avšak laser začne s velkou pravděpodobností fungovat, jak má. V okamžiku, kdy se foton zesílí na požadovanou úroveň, jej polopropustné zrcadlo vypustí ven a dá podnět ke vzniku žádoucího laserového paprsku.

Energetické pole uvnitř rezonátoru má charakter stojatých vln, tzv. modů. Mody jsou tvořeny pouze zářením o vlnových délkách, kdy rozměry rezonátoru lze vyjádřit jako celý násobek jejich poloviny vlnové délky  $\lambda/2$ . Příčné mody určují charakteristiku a tvar emitovaného svazku. Podélné mody pak tvoří základní vlnové spektrum laseru. Tvar průřezu emitovaného svazku je závislý jednak na vlnové délce fotonů, dále souososti, vzdálenosti a zakřivení zrcadel, ale též na průměru laserové trubice. Existují i lasery tzv. superradiační, u kterých stačí jediný průchod paprsku laserovým médiem k získání potřebné energie.

Závěrem popisu principu stojí za zmínku říct, že vše popsané proběhne uvnitř laserového zařízení (resp. v aktivním prostředí po náležitých fyzikálních podmínkách) v řádech několika milisekund. Tedy počet fotonů obsažených v relativním okamžiku na velmi důležité metastabilní hladině může být klidně několik milionů.

### 3.3 Konstrukce laseru



Obr. 14 – Schéma optického rezonátoru [1]

### 3.3.1 Laserová hlavice

Jedná se o pevný rám (tělo) zařízení obsahující jeho aktivní součásti.

### 3.3.2 Výstup paprsku

Svazek světla (fotony), jež pomocí rezonátoru a aktivního prostředí získal potřebnou energii k průchodu polopropustným zrcadlem. Jedná se o fotony vzniklé stimulovanou emisí. Vzniklý laserový paprsek je monochromatický (jednobarevný), koherentní (tj. stejná frekvence, stejný směr kmitání a stejná fáze, případně fázový rozdíl), polarizovaný a s nepatrnou divergencí. Stimulovanou emisí je paprsek soustředěn do úzkého svazku paprsků.

### 3.3.3 Aktivní prostředí

Aktivním prostředím může být pevná látka, kapalina nebo plyn. Obecně při tom slouží k odvodu tepla, přičemž je ohraničená skleněnou či plastovou trubicí, v níž jsou obsaženy excitované (vybuzené) elektrony. Tato látka bývá též označována jako tzv. laserové médium. Atomy v tomto prostředí mohou setrvávat relativně dlouho. Látka aktivního prostředí je nasycena atomy převážně na vyšších energetických hladinách.

*Tab. 1. Přehled vlnových délek nejpoužívanějších aktivních prostředí*

Aktivní prostředí	Vlnová délka [nm]	Popis
Argon – Fluor	193	UV, excimer
Krypton – Fluor	248	UV, excimer
Xenon – Fluor	308	UV, excimer
Helium – Kadmium	325, 442	UV, excimer
Argon	488, 514	Viditelné
Rubín	694	Viditelné
Nd:YAG	532	Viditelné, IČ
Helium – Neon	543, 594, 612, 633, 1150, 3390	Viditelné, IČ
Polovodičové diody	630 ÷ 1600	Viditelné, IČ
Erbium	1540	Infračervené
Oxid uhličitý	9600, 10600	Infračervené

### 3.3.4 Budící zařízení

Jedná se o speciální typ síťového napáječe, jenž dodává do soustavy potřebnou energii. Způsob buzení je dán laserovým médiem. Platí, že:

- plynné médium bývá buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, tedy stejnosměrným, či střídavým proudem
  - pevné laserové médium je nejběžněji buzeno výbojkami (lampami) nebo diodami.
- [10]

### 3.3.5 Chladicí zařízení

Jelikož se nikdy všechna energie nepřemění v záření a dochází vždy k částečné přeměně v teplo vně laseru, je nutno pro správnou funkci a prodloužení životnosti laseru toto teplo odvádět. Většinou se pro tento odvod používá chlazení vodou, ale existují též lasery chlazené okruhem vzduchu.

## 3.4 Rozdělení laserů

Z hlediska konstrukce lze rozdělit lasery na:

- systém pevného laserového systému a pohyblivého stolu, kde je upnutý obrobek
- pohyblivý laserový systém a nepohyblivý stůl – tedy obrobek
- systém pohyblivého laserového systému zabezpečený zrcadly, zatímco hlavice a obrobek jsou stacionární.

Z hlediska režimu paprsku lze rozdělit lasery na:

- kontinuální režim
- pulzní režim
- Qs režim – tedy zvláštní kontinuální režim s vysokou energií paprsku.

Z hlediska použití lze lasery rozdělit na:

- úběr materiálu
- spojování součástí a jejich zpevnování
- tepelné zpracování povrchů
- jiné (nové) procesy.

Z hlediska aktivního prostředí pak lasery dělíme na:

- pevnolátkové lasery
- plynové lasery
- kapalinové lasery
- polovodičové lasery

- plazmatické lasery
- chemické lasery.

### 3.5 Obecné použití laserů

Od vynálezu prvního laseru tak uplynulo v roce 2017 již 57 let a v současné době je využití laseru tak široké, že si již nelze představit prakticky běžný život bez něj. Úvodním výčtem možností aplikací se tak pokusím nejlépe demonstrovat tento široký rozsah a tato úvodní slova. [21]

- Laserové technologie v oblasti obrábění (samostatně blíže popsáno v kapitole 3.6)
- Zobrazovací a diagnostické metody v lékařství, biologii a technice
- Lékařské využití laserů (chirurgie, terapie, dermatologie, neurochirurgie, urologie, gynekologie, oční operace, plastická chirurgie, apod.)
- Laserové gyroskopy (navigační nebo naváděcí systémy pro letadla a lodě)
- Laserové systémy v geodézii, astronomii a geofyzice (měření vzdáleností, skenování objektů, jejich vytyčování apod. Pulzními lasery na základě odrazu záření je možno měřit vzdálenosti družic, určení jejich drah, zkoumání vzdáleností různých vesmírných objektů)
- Laserová spektroskopie (analýza a důkaz existence prvků obsažených ve vzorku neznámých látek)
- Vlákňové optické komunikace
- Snímače čárových kódů
- Laserová ukazovátka
- Vojenské aplikace (zaměřovače zbraní, naváděcí systémy střel, určení vzdálenosti cíle)
- Výpočetní technika (laserová kopírka / tiskárna)
- Záznam a čtení dat (CD, DVD, Blue Ray)
- Laserová fotolitografie (výroba mikrostruktur, nejdůležitější část výroby integrovaných obvodů – zároveň též nejnákladnější)
- Holografické aplikace (vytvoření trojrozměrného obrazu)
- Interferometrické měřicí metody v technice
- LIDAR (Light Detection And Ranging – optická metoda mapování a monitorování vzdálených objektů)
- Bezpečnostní systémy

- Zdroje a detektory
- Základy fotovoltaiky

### 3.6 Možnosti a výhody v oblasti laserového obrábění, zejména řezání

Laserem se dají obrábět všechny typy materiálů, a to bez ohledu na jejich tvrdost, křehkost nebo pevnost. Obrábění laserem lze rozdělit do čtyř základních skupin materiálů, přičemž v těchto skupinových třídách má každá své specifické podmínky a omezení, kvůli kterým lze, resp. nelze takové materiály obrábět. [10]

- kovové materiály
- neželezné kovové materiály
- nekovové materiály
- kompozitní materiály

Mezi výhody laserového obrábění jistě patří, že deformace řezaných částí je obecně na obrobku velmi malá – jedná se totiž o bezkontaktní (nekonvenční) způsob obrábění. Odpadá tím komplexní problém s vibracemi strojů a nástrojů, specifický tolik pro konvenční způsoby obrábění. Není tak nutno ani upínání obrobků. Jedná se o velmi kvalitní řezání, přičemž změny a plánování výroby na rozhraní PC a CNC je velmi jednoduché. Šířka řezu obrobené plochy je za optimálních řezných podmínek úzká a získáváme zde ostré hrany, přičemž přesnost i rychlost řezání lze zajistit optimální volbou posuvu, případně množstvím přídavného plynu. [10]

Rychlost řezání (resp. posuvu) tak obecně závisí na typu použitého laseru, jeho výkonu a na tloušťce obráběného materiálu. Například pro ocel o tloušťce 2 mm je posuvová rychlost (resp. řezná rychlost) až okolo 6 m/min. Posuv bývá na laserovém zařízení často vyjadřován, resp. zadáván v procentech. Vždy je zde uvedena hodnota plného, tedy 100% posuvu, takže přepočítání na jednotlivou hodnotu je velmi snadný a běžný – je běžné setkat se právě s tímto zadáváním. [10]

Šířka zářezu (tzv. řezné škáry) se uvádí v závislosti na tloušťce obráběného materiálu a může být realizována v rozsahu 0,64 ÷ 2,54 mm. Platí, že užší zářez se realizuje vyššími rychlostmi posuvu a naopak. Ne všechny materiály však vykazují čitelný řez, resp. obrobenou plochu, neboť takové materiály bývají různě strukturálně a povrchově změněny a upraveny, což je částečně předmětem této diplomové práce. [10]



### 3.6.1 Řezání laserem

Pro řezání nekovových materiálů (plastů, papíru, dřeva, atd.) se nejběžněji užívá CO<sub>2</sub> laserů. Při použití tohoto typu je nutno odsávat výpary a dýmy, které jsou zdraví škodlivé a při procesu vznikají.

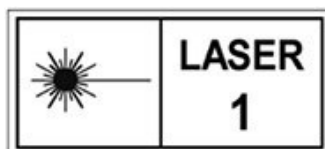
U křehkých materiálů (keramika, sklo) je možné riziko vzniku prasklin z důvodu tepelného zatížení, které je nerovnoměrné. Vlastní proces řezání pak závisí na druhu materiálu a použitém plynu:

- laserové sublimační řezání – materiál je odstraněn formou páry na čele řezu vlivem dosažení teploty odpařování
- laserové tavné řezání – materiál je odstraněn formou silného proudu inertního plynu, ohřev je zde pouze na teplotu tavení
- laserové řezání s aktivním plynem – materiál je odstraněn díky vzniklé exotermické reakci kyslíku

### 3.7 Bezpečnostní třídy laserů

Jelikož jsou laserová zařízení schopna pracovat na hodnotách určité vlnové délky, mající pro lidské oko možnost upoutání pozornosti (resp. soustředění se na sítnici a rohovce), je pak vzhledem k vysoké koherenci (tedy vlnění o stejné frekvenci, stejném směru kmitání a stejné fázi) a malému rozptylu u takových laserových paprsků možné riziko, že bude přijímaný paprsek soustředěn do extrémně malého bodu na sítnici, a že dojde k bodovému přehřátí sítnice a dojde tak k trvalému poškození zraku. Stejně může laserový paprsek poškodit i kůži. Lasery tak rozdělujeme do následujících bezpečnostních tříd:

- Třída 1 – výkon menší než 0,4 μW; možnost dlouhodobého pohledu do svazku paprsku laseru; zařízení bývají zcela zakrytována, čili i potenciálně nebezpečné záření jinak vysokovýkonného laseru je zcela zakrytováno a znepřístupněno. [23] [24]



Obr. 15 – Označení laserového zařízení třídy 1 [24]

- Třída 1M – záření v rozsahu 302,5 nm do 4 000 nm; možnost dlouhodobého pozorování laserového svazku nechráněnými očima; nebezpečí hrozí, pokud by uživatel

pro sledování svazku využil optické přístroje; záření může způsobovat oslnivé optické efekty, a to zejména při slabém okolním osvětlení. [23] [24]



Obr. 16 – Označení laserového zařízení třídy 1M [24]

- Třída 1C – tato zařízení produkují svazek laserového záření určený pro přímou aplikaci na pokožku a vnitřní tkáň – tedy pro lékařské procesy; záření může svým vyzařováním nabývat úrovně až 3R, 3B nebo 4, avšak ozáření lidského oka je zabráněno technickými prostředky; třídy 3R, 3B nebo 4 jsou pro zařízení specifikace 1C neadekvátní. [23] [24]



Obr. 17 – Označení laserového zařízení třídy 1C [24]

- Třída 2 – výkon menší než 1 mW, vlnová délka záření 400 nm až 700 nm; přímý pohled do svazku laserového paprsku možný, déletrvající pohled může činit nebezpečí; oko ochraňuje zpravidla mrkací reflex (0,25 vteřiny – bezpečná doba); uživatel je pomocí bezpečnostního štítku informován o tom, aby se upřeně nedíval do laserového svazku; na rozdíl od třídy 2M zde použití optických pomůcek nezvyšuje riziko nebezpečí. [23] [24]



Obr. 18 – Označení laserového zařízení třídy 2 [24]

- Třída 2M – paprsek je rozšířen, stupeň ohrožení zraku jako u třídy 2; doporučení nepoužívat brýle a optické pomůcky, neboť mohou zaostřit a směřovat svazek laserového paprsku do oka a ohrozit oční sítnici; při nízké úrovni okolního osvětlení při pohledu na svazek hrozí nebezpečí oslnění, zábleskové slepoty a přetrvávající zrakové vjemy. [23] [24]



Obr. 19 – Označení laserového zařízení třídy 2M [24]

- Třída 3R – brýle nepovinné; výkon menší než 5 mW; lidské oko může být trvale poškozeno, zejména při pohledu přes zvětšovací optickou soustavu; při nízké úrovni okolního osvětlení při pohledu na svazek hrozí nebezpečí oslnění, zábleskové slepoty a přetrvávající zrakové vjemy; zařízení třídy 3R by měla být použita jen tam, kde je přímý pohled do svazku laserového paprsku nepravděpodobný. [23] [24]



Obr. 20 – Označení laserového zařízení třídy 3R [24]

- Třída 3B – brýle povinné; výkon menší než 0,5 W; nebezpečí poškození zraku i při pozorování nahodilých odrazů svazku laserového paprsku; lasery třídy 3B mohou vytvářet poškození pokožky; v případě malého průměru, či velkého zaostření hrozí též zapálení hořlavých materiálů. [23] [24]



Obr. 21 – Označení laserového zařízení třídy 3B [24]

- Třída 4 – lasery velkých výkonů, tedy větších než 0,5 W; svazek laserového paprsku je schopen způsobit popáleniny a řezné, či tržné rány na pokožce; rovněž představuje nebezpečí požáru, resp. zapálení hořlavých materiálů. [23] [24]



Obr. 22 – Označení laserového zařízení třídy 4 [24]

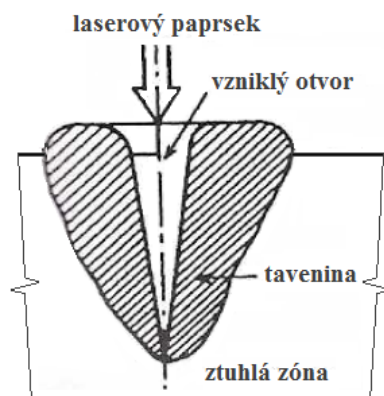
Název a datum vydání příslušné normy, dle které bylo laserové zařízení klasifikováno, by mělo být k nalezení na informačním štítku zařízení. S výjimkou třídy 1 musí mít každé laserové zařízení na štítku uvedenou informaci o maximálním výkonu záření, době trvání impulzu tohoto záření (je-li nutno vědět), případně informace o vlnové délce. Pro třídu laserů 1 a 1M tyto informace mohou být zmíněny pouze v informačních materiálech o výrobku pro uživatele, tedy ne přímo na štítku zařízení. [23] [24]

Každý ochranný panel laserového zařízení, tedy např. panel ochranné skříně, by měl být opatřen štítkem s nápisem, že při jeho odejmutí, či posunutí je umožněn nežádoucí styk lidského těla se zářením překračujícím limit té, které normy, což může být provedeno např. varovným textem „*Pozor – při odstranění krytu se vystavujete laserovému záření třídy 2, nedívejte se proto do svazku*“. [24]

### 3.8 Interakce laserového paprsku s obráběným materiálem

Při obrábění materiálů je laseru využito jako nositele intenzivního a energeticky činného elektromagnetického záření, které je usměřováno na konkrétní objekt. Účinek laseru je závislý na charakteru materiálu obrobku (tedy jeho fyzikálních vlastnostech, struktuře, atd.), parametrech samotného laseru a je též ovlivněn dobou interakce mezi materiálem a laserovým paprskem. Z hlediska obrábění a hodnocení kvality povrchu je vzhledem k materiálu klíčovým aspektem ta část laserového paprsku, jež je materiálem absorbována.

Při dopadu paprsku na povrch materiálu se část paprsku odrazí, ale část se absorbuje do materiálu a část též projde skrz materiál. Při absorpci dochází k ohřevu materiálu, který se tímto jednak nataví a také následně z oblasti odpaří. Množství odražených paprsků závisí na vlastnostech materiálu a schopnosti laserové záření pohlcovat a odrážet. Rozměry a tvary libovolné, laserem obrobenej struktury závisí jednak na optice a mechanice zařízení, ale též na vlastnostech obráběného materiálu. [31]



Obr. 23 – Natavení materiálu při průchodu laserového paprsku [31]

### 3.8.1 Posloupnost absorpčních jevů

Proces ablace (odstraňování materiálu) je relativně složitý kombinace dvou procesů, a sice fotochemického a fototermického. Pojmem ablace je myšleno odpařování, resp. odtažování materiálu z povrchu. Častým způsobem odchodu materiálu při obrábění laserem je právě odpařování materiálu. [3] [4] [10] [31]

### 3.8.2 Vliv vlnové délky světelného paprsku a odrazivost

Při menších vlnových délkách záření můžou být fotony s větší energií absorbovány větším počtem vázaných elektronů materiálu. Z tohoto důvodu se odrazivost v závislosti se zkracující vlnovou délkou zmenšuje – tím pádem pohltivost materiálu naopak stoupá. Odrazivost je zde absorpční součinitel funkce vlnové délky. Čím je vlnová délka nižší a čím má obráběný materiál nižší tepelnou vodivost, tím je lépe a snadněji obráběn. [3] [4] [5] [10]

### 3.8.3 Vliv povrchové vrstvy

V případě, že povrch obsahuje antireflexní nátěr, může se při odražení podílet na vzniku destruktivního křížení paprsků. [3] [4] [5] [10]

### 3.8.4 Vliv úhlu dopadu

Dle Brewsterova zákona se světlo dopadající na povrch lomí na rozhraní dvou prostředí, a sice je tak částečně odraženo zpět, a také se část světla lomí do druhého prostředí. Velký vliv na odrazivost, resp. absorpci paprsku, má úhel dopadu na obráběnou plochu, což závisí na vektoru příchozího paprsku. [3] [4] [5] [10]

### **3.8.5 Vliv materiálu a drsnosti povrchu**

Drsnost povrchu má značný vliv na absorpci v důsledku různé odrazivosti od nerovností povrchu. Touto skutečností se na povrchu materiálu může vyskytovat tzv. stimulovaná absorpce, jež bývá způsobena interferencí paprsků s paprsky vedlejšími – odraženými.

[3] [4] [5] [10]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

V předešlých kapitolách této diplomové práce bylo popsáno rozdělení polymerů, krátké nastínění rozdělení nekonvenčních metod, a odtud specifikovaný popis funkce laserů a jejich technologie. V praktické části budou proto cíle následující:

1. Popis vybraných materiálů, jež byly pro výzkum práce dodány, a které budou v rámci práce zkoumány.
2. Popis zvolených metod a popis zařízení, na kterých se budou patřičná měření realizovat.
3. Zpracování dodaných polymerních materiálů. Zde patří jak příprava samotných vzorků pro tvorbu řezů za proměnných vstupních parametrů laseru, tak zkoumání a měření těchto řezů. Patří sem mikroskopické přiblížení a znázornění jednotlivých řezů, měření mikrotvrdomosti a modulu pružnosti za účelem posouzení vlivu paprsku v místě řezu, dále zobrazení 3D povrchů a měření drsnosti obrobených ploch. Jako další metody je zařazeno simulace teplotních polí v jednotlivých materiálech v místě řezu, přičemž dále je zkoumáno strukturálních změn, a to díky metodám infračervené vibrační spektroskopie a rentgenové difrakční analýzy.
4. Hlavní výsledky práce. Zde jsou vyobrazeny a popsány všechny získané poznatky a výsledky jednotlivých měření.
5. Závěr.



## 5 POPIS ZVOLENÝCH MATERIÁLŮ

Vzorky z polymerních materiálů mi pro mou diplomovou práci byly dodány po oslovení firmy VM Plast – Nedakonice, která se zabývá prodejem a opracováním technických plastů, přičemž zaměření opracování je směřováno na řezání, obrábění, odlévání a svařování. Při těchto službách se Firma VM Plast s.r.o. pyšní širokou škálou zpracovávaných materiálů. Po zkontaktování jednatele firmy s uvedením mého záměru a popsáním cíle diplomové práce, mi byly s upřímnou ochotou poslány materiálové vzorky přesně dle mého požadavku. Jediným materiálem mimo tuto škálu je získané plexisklo, tedy PMMA, jež byl pro účely této práce poskytnut Ústavem výrobní inženýrství UTB ve Zlíně. Komplexně se jedná o vzorky o různých tloušťkách a různých obdélníkových rozměrech. Tyto, řekněme polotovary, budou nejprve popsány. Při popisu je kladen důraz na obecné vlastnosti a možnosti aplikací jednotlivých materiálů.

- PMMA – tloušťka vzorku 15 mm
- POM C – tloušťka vzorku 16 mm
- POM H – tloušťka vzorku 17 mm
- PE 1000 – tloušťka vzorku 15 mm
- PA 6 G + olej – tloušťka vzorku 18 mm
- PP – tloušťka vzorku 15 mm
- PA 6 – tloušťka vzorku 16 mm
- PA 66 – tloušťka vzorku 17 mm
- PET – tloušťka vzorku 17 mm.

Za zmínku stojí, že pro výzkum bylo poskytnuto i materiálu PVC, avšak tento materiál byl ihned zavržen, neboť řezání laserem je u PVC výslovně zakázáno, a to z důvodu uvolňování toxických a karcinogenních látek.

## 5.1 Polymetylmetakrylát – PMMA

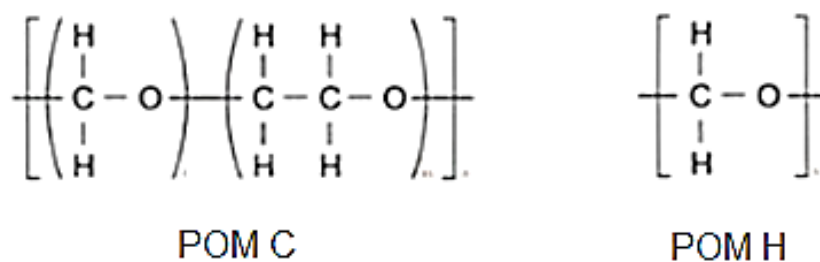
Jedná se o jediný amorfní materiál, který je v této práci zahrnut. Obchodním názvem tohoto vysoce transparentního (tedy průhledného) termoplastického polymeru je plexisklo. Tuto vlastnosti si PMMA drží i při velkých tloušťkách samotného materiálu a je snadno obarvitelný, čehož se v průmyslu hojně využívá. Jedná se o zdravotně nezávadný materiál, jež je dobře tvarovatelný zejména v oblasti teplot mezi 130, až 140°C. Nevýhodou vůči své dokonalé průhlednosti může být zejména malá povrchová odolnost vůči oděru, čili velmi snadno dojde k poškrábání. Hlavními zpracovatelskými technologiemi jsou procesy vstříkování, lisování a vytlačování, přičemž u lisování dochází zpravidla k výrobě deskových a tyčových polotovarů, které jsou vhodné pro další části zpracování, resp. výroby produktů. Pro svou transparentnost je často využíván pro nahrazení skel například u dopravních prostředků, ochranných krytů apod.

Svou amorfností znamená, že jeho makromolekuly zaujímají nahodilou pozici, je zároveň nejvhodnějším adeptem pro měření např. hodnot tvrdosti, resp. mikrotvrdosti.

## 5.2 Polyacetal – POM C a POM H

Polyacetalu jsou semikrystalické termoplasty, jež jsou produkovány buďto jako kopolymery nebo homopolymery formaldehydu. Tímto se následně označují jako kopolymery (POM C) a homopolymery (POM H).

POM C má vůči POM H vyšší odolnost vůči chemikáliím a proti působení silných zásad. Rovněž má vyšší stabilitu v rámci dlouhodobého teplotního zatížení. Z hlediska obecných zpracovatelských času pak platí, že jsou kopolymery polyacetalu zpracovatelné rychleji, než jejich příbuzné homopolymery. V případě acetalového homopolymeru, který má ve srovnání s kopolymerem nižší odolnost vůči chemikáliím a proti působení silných zásad, má homopolymer také nižší stabilitu v rámci dlouhodobého teplotního zatížení. Jinak se však jedná o velmi blízké materiály, co se vlastností týče.



Obr. 24 – Strukturní vzorec POM C a POM H [15]

Na trhu lze POM C objevit pod obchodními názvy Ertacetal C, Tecaform C, či Duraccon. Jedná se o čistý acetalový kopolymer, přičemž možné názvy jsou též Polyacetal kopolymer, či Polyformaldehyd kopolymer.

Materiál POM C vykazuje vysokou mechanickou pevnost, tuhost i tvrdost, ale též vynikající pružnost a rázovou houževnatost, a to i za nízkých teplot. POM C se vyznačuje též vynikající obrobitelností. Je vhodný pro výrobu přesných a rozměrově stálých mechanických dílů. Mezi přednosti POM C patří dobré kluzné vlastnosti a dobrá odolnost proti tečení. Jelikož se jedná o materiál fyziologicky nezávadný a zcela omyvatelný, je vhodný pro přímý styk s potravinami. Využívá se tedy pro výrobu součástí potravinářských strojů a dopravníků. Má však také dobré elektroizolační vlastnosti. Pro svou velmi nízkou absorpci vody (při ponoření ve vodě o teplotě 23°C činí hodnota nasákavosti 0,85%) je vhodný pro kluzné prvky vystavené vlhkému prostředí. Teplota tání POM C je 165°C a nejvyšší dlouhodobá teplota použití po dobu 5,000 hodin je 115°C a z hlediska doby 20,000 hodin rovných 100°C. Nejnižší provozní teplota je pak -50°C. Hustota acetalového kopolymeru je 1,41 g/cm<sup>3</sup>. [15] [17]

Z hlediska vynikající obrobitelnosti se vyznačuje POM C tvorbou krátkých třísek a obrábění probíhá často na mechanických soustruzích, avšak častými obráběcími technologiemi jsou též frézování, či vrtání. Při obrábění je doporučeno použít rozpustnou mazací kapalinu. Je tak zaručeno, že se materiál nebude přilepovat na nástroj. Při řezání za použití CO<sub>2</sub> laseru dochází na obrobené ploše POM C k typicky čistému řezu.

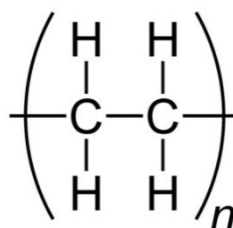
### **5.3 Polyetylén – PE 1000**

Materiál Polyetylén 1000 lze na trhu nalézt též pod názvem TIVAR 1000, či UHMW-PE (z anglického Ultra high molecular weight, znamenající „s ultra vysokou molekulární hmotností“).

Jedná se o velmi houževnatý konstrukční materiál s nejvyšší rázovou pevností mezi všemi termoplasty. Má vynikající kluzné a samomazné vlastnosti, vysokou odolnost proti oděru a své jedinečné vlastnosti si drží i při extrémně nízkých teplotách (až – 200°C). Mezi další důležité přednosti tohoto materiálu patří například jeho vysoká chemická odolnost, extrémně nízká absorpce vody, dobrá obrobitelnost a tvarová stálost. Tyto vlastnosti tak z PE 1000 vytváří velice vyvážený konstrukční materiál. Teplota tání se pohybuje v rozmezí 130 až 135°C, avšak nejvyšší trvalá teplota použití (výdrž po dobu 20,000 hodin) je 80°C. PE 1000 má nízkou hustotu 0,93 g/cm<sup>3</sup>. Je tedy lehčí než voda. Molekulární

hmotnost je v rozmezí 2 až 6 milionů. Absorpce vody při ponoření do vody o teplotě 23°C je pouhých 0,01%. [15, 17]

Řetězce ve struktuře jsou extrémně dlouhé (číslo  $n$  je větší než 100,000). Tyto dlouhé polymerní řetězce se při tvorbě obvykle orientují s pravděpodobností více než 95% právě stejným směrem.



Obr. 25 – Strukturální vzorec PE 1000 [15]

Z hlediska těchto vlastností je pak často PE 1000 využíván jako součást dopravníků a výrobních linek, ale samozřejmě též pro výrobu všeobecných strojírenských součástí. Častou funkční aplikací jsou pak například vedení řetězů, pásů a řemenů, dále jsou samomazná kluzná pouzdra a vložky, vodící boční a spodní lišty, případně podávací, či obracecí součásti výrobních linek a zařízení. Díky své zdravotní nezávadnosti se PE 1000 využívá např. v potravinářském, zejména nápojovém průmyslu, ale též v chemickém, či textilním. Možnost obecného použití je často jako třecích, či dopadových ploch. Vyrábí se v různých barevných provedeních, nejčastěji však jako bílý, zelený a černý. Existují i provedení v barvě modré, červené, či žluté, avšak ne vždy bývají u firem prioritně skladem. Pro mou diplomovou práci mi byl firmou VM Plast dodán PE 1000 v provedení barvy zelené. [15]

V případě cenového omezení ze strany výrobce je možno zvážit použití UHMW-PE typu 1000 R, který je směsí čistého a recyklovaného PE 1000, který má ovšem nižší mechanické vlastnosti, což však ve výsledku snižuje i jeho cenu. Je tak možnou alternativou. Při potřebě vyšší dlouhodobé teplotní zátěže a dovolených tlaků je pak možností materiálové alternativy volba PA 6 G s obsahem oleje.

#### 5.4 Polyamid modifikovaný – PA 6 G + olej

Tento konstrukční materiál ze skupiny polyamidů lze na trhu vyhledat též pod názvem Ertalon LFX, Tecast L, či Oilamid.

Jedná se o vnitřně mazaný litý nylon speciálně vyvinutý pro aplikace pohyblivých a nemazaných součástí. Díky sníženému koeficientu tření až o polovinu a zvýšené odolnosti

proti opotřebení (až 10x) významně rozšiřuje současné aplikace obecného použití nylonů. Modifikací olejem a speciálními stabilizátory dosahuje PA 6 G podobných kluzných vlastností a odolnosti proti opotřebení jako PE 1000. Má vysokou pevnost, tuhost i tvrdost. Z hlediska obrobitelnosti se jedná o materiál výborně obrobitelný. Typické aplikace výrobků z vnitřně mazaného PA 6 G jsou kluzné lišty, kluzná vedení, podložky, či pouzdra u lisů a hydraulických, zejména zdvihacích zařízení (zajišťují zde mimo jiné eliminaci nežádoucích axiálních a radiálních sil). Dále slouží pro výrobu ozubených kol a pro výrobu namáhaných axiálních a radiálních (dříve bronzových) ložisek. Teplota tání je 220°C a nejvyšší trvalá teplota použití je po dobu 5,000 hodin 105°C, případně po dobu 20,000 hodin 90°C. Zároveň nejnižší teplota použití je -30°C. Hustota tohoto materiálu je 1,14 g/cm<sup>3</sup>. [15, 17]

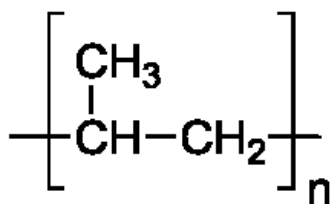
Slabou stránkou polyamidu může být nasákavost vodou. Ta při ponoření ve vodě o teplotě 23°C činí hodnoty až 7%. V případě omezení ze strany absorpce je možno využít materiálové alternativy formou POM C, tedy Polyoxymethylenu, který je zároveň v pořadí dalším popisovaným a zkoumaným materiálem v rámci této práce. [15]

## 5.5 Polypropylen – PP

Polypropylen je krystalický termoplastický materiál ze skupiny polyolefinů, vyznačující se chemickou odolností (s výjimkou oxidačních kyselin), dobrou mechanickou odolností a má též výborné elektroizolační vlastnosti. Polypropylen lze najít pod obchodními názvy Triplen, Tatren, či Mosten. Je to jeden z nejlehčích polymerů.

Zpracovává se obdobně jako Polyetylen, tedy vstřikováním a vyfukováním, ale též vytlačováním i výtlačným vyfukováním (podobné fyzikální a chemické vlastnosti). Využívá se široce, například pro výrobu dílů v automobilovém průmyslu, ve spotřebním průmyslu, ale také v průmyslu vodovodním, či chemickém. Z hlediska téměř nulové absorpce vody se tak používá pro potrubní systémy, k výrobě čerpadel a ventilů, ale také v mnoha odvětvích potravinářského a textilního průmyslu, případně pro výrobu prvků laboratorních vybavení. Jedná se o materiál odolný vůči organickým rozpouštědlům, olejům a alkoholům. Je dobře svařitelný, avšak obtížně lepitelný. Není odolný vůči UV záření a není náchylný k působení vnitřního pnutí. Před zpracováním je nutno polymer upravit přidáním vhodných světelných a tepelných stabilizátorů (u nestabilizovaného Polypropylenu již po několika týdnech na slunci hrozí křehnutí a praskání). Díky svým elektroizolačním vlastnostem lze PP použít místo PVC, a to zejména pro vedení kabeláže v nedostatečně větraných prostorách, například v tunelech. Teplota tavení PP je kolem 160 až 170°C, avšak

měknout začíná kolem 140°C. Zaručeně jej lze používat v teplotním rozpětí od 5 do 100°C, přičemž hustota PP je 0,95 g/cm<sup>3</sup>. Je tedy (stejně jako PE) lehčí než voda.



Obr. 26 – Strukturální vzorec PP [15]

Přestože je PP velkým představitelem komoditních (velkotonážních) plastů, svými některými modifikacemi se řadí až mezi konstrukční, či speciální materiály. Ze speciálních je to např. výroba netkané textilie spun-bond a melt-blown. Touto aplikací využitím vysoké tekutosti pak mnohonásobně nadhodnocují výchozí materiál. Polypropylen je snadno recyklovatelný.

PP lze zpracovávat řadou zpracovatelských technologií, a sice např. vytlačováním, vstřikováním, lisováním, či žárovým stříkáním a nanášením. Zejména pak vytlačováním jsou vyráběny trubky, desky a fólie, přičemž desky a větší blokové profily lze též lisovat použitím granulátu. Jelikož se PP dobře svařuje, spojování desek a trubek probíhá právě svařováním (pistolí s horkým plynem). Fólie se pak svařují buďto tepelným impulzem nebo sálavým teplem.

## 5.6 Polyamidy – PA 6 a PA 66

Polyamidy jsou nejčastěji využívanou skupinou plastů mezi technickými polymery. Existují dva hlavní typy polyamidů, a sice Polyamid 6 (PA 6) a Polyamid 6.6 (PA 66).

Co se týče PA 6, tento materiál byl vyvinutý v roce 1952. Jedná se o materiál známý též pod názvy Silon, Ertalon, či Alkamid.

Materiál Polyamid 66 byl vyvinut v roce 1935. Jedná se o typ nylonu 66. materiál s vyšší mechanickou pevností. Oproti základním polyamidům PA 6 má vyšší ořezuvzdornost i vyšší teplotu tání (250°C). Jeho vlastnosti jsou také velmi podobné jako u olejem plněného polyamidu PA 6 G. S tímto polyamidem má PA 66 však vyšší nasákavost.

Polyamidy jsou velmi tuhé a pevné materiály, které se obecně vyznačují velmi dobrou odolností proti stárnutí, a to i při vysokých teplotách a dlouhé expozici působení. Polyamidy mají rovněž vynikající chemické odolnosti a dobrou odolnost proti hoření. Vykazují též

vysokou hodnotu toku, což umožňuje jejich snadné plnění do dutin vstřikovacích forem. Polyamidy jsou svými vlastnostmi na velmi dobrém poměru nabízených materiálových vlastností a jejich ceny. Využití tak nalezneme například v průmyslu automobilovém, elektrotechnickém, ale i v průmyslu sportovním, nábytkářském, či balicím. Z polyamidů tak lze spatřit výrobky jako např. kryty motorů, zrcátka, ozubené převody, potrubí do moře, kryty, konektory, vzduchová potrubí, lyžařská vázání apod.

## **5.7 Polyethylentereftalát – PET**

Jedná se o termoplastický materiál ze skupiny polyesterů, jenž byl vyvinut v roce 1941. Přesný název tohoto materiálu je Polyethylentereftalát. Základní surovinou pro jeho výrobu je kyselina tereftalová, která se získává z vytěžené ropy – tedy hlavního neobnovitelného přírodního zdroje. K asi nejznámějšímu využití materiálu PET patří výroba tzv. PET lahví, pro kterou v roce 1973 nechal Nathaniel Wyeth udělat patent. PET materiál nevykazuje žádnou reakci s potravinami a je odolný i vůči mikroorganismům. Je tak výborným materiálem vhodným pro výrobu hygienicky nezávadných obalů, díky čemu je primárním materiálem právě pro balení potravin, zejména tedy lahví, ale i jiného zboží jako jsou například tkaniny pro oblečení, fólie apod. Jedná se o materiál světově nejvíce recyklovaný. Totiž – recyklace může být opakována několikrát po sobě. Pro svou širokou využitelnost tvoří PET velké množství odpadních plastů, přičemž pouze zhruba třetina je recyklována, přičemž je zbytek uložen zpravidla na skládkách. V nejhorších případech jsou PET produkty spalovány v nedostatečných (malých) tepelných zdrojích. Jelikož je rozložitelnost PET v přírodě v řádu stovek let, jsou skládky náležitě velkou ekologickou hrozbou. Hustota PET je přibližně  $1,38 \text{ g/cm}^3$  a bod tání leží na hodnotě  $260^\circ\text{C}$ .

## 6 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ A POPIS ZAŘÍZENÍ

Materiály, které byly dodány na výzkum, přišly v různých rozměrech ve formě krátkých desek. Tyto desky bylo nutno nařezat na potřebný rozměr. Vzorky o různých tloušťkách tak byly upnuty postupně na upínací zařízení pásové pily a řezány na šířku vzorku 30 mm. Takto nařezané jednotlivé vzorky bylo následně možno umístit na rošt laserového zařízení, aby zde došlo k zahájení laserového řezání. Tyto materiály bylo potřeba rozdělit na dále měřitelné a dále neměřitelné. Proto bylo využito digitálního mikroskopu, kterým se velmi rychle a se zvětšením 30x posoudilo vlastností řezu.

### 6.1 Dělení materiálu – pásová pila PROMA PPK – 90U

Jedná se o pásovou pilu určenou pro řezání všech běžně využívaných materiálů, jako jsou hliníkové slitiny, neželezné kovy, ale i oceli vysoké pevnosti. Pilový pás je zde poháněn jednofázovým motorem, a to prostřednictvím šnekové převodovky a klínového řemene. Touto pásovou pilou byly vzorky řezány několikrát, a to vždy na potřebnou velikost, vhodnou pro tu, kterou metodu zkoumání. [19]



Obr. 27 – Pásová pila PROMA PPK - 90U [19]

#### 6.1.1 Parametry zařízení

- **Max. rozměr materiálu při 90°:** 90 x 120 mm
- **Příkon:** 400 W
- **Řezná rychlost:** 20/29/50 m/min
- **Hmotnost stroje:** 37 kg



## 6.2 Proces laserového obrábění – Laser ILS 3NM

Jedná se o laserové CO<sub>2</sub> zařízení vhodné pro řezání a gravírování různých materiálů. Obrábět lze materiály jako je dřevo, kovy, sklo, gumy, tkaniny, či kámen, ale také plasty a plastové fólie. Propojení je kompatibilní se systémem Microsoft Windows a s PC může být zprostředkováno rozhraním USB, paralelním portem LPT, či prostřednictvím LAN. Z hlediska bezpečnosti se jedná o třídu 1. Součástí zařízení je možnost auto fokusace. Program, v němž v rámci této diplomové práce postupují, je Corel Draw. Součástí zařízení je též display, kde je možno kontrolovat parametry nastavení, jako jsou výkon laseru, čas průběhu, načtené soubory, rychlost apod.



*Obr. 28 – Laser ILS 3 NM [20]*

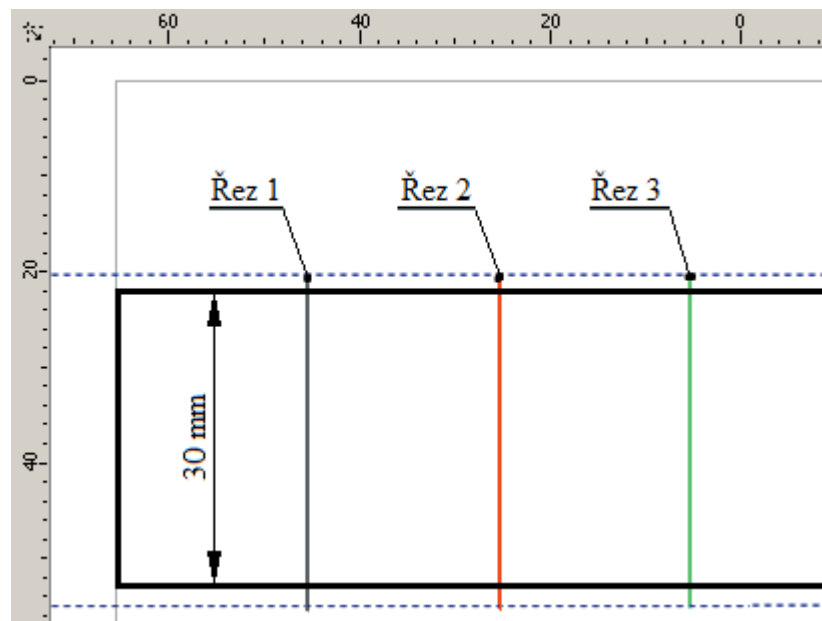
### 6.2.1 Parametry zařízení

- **Vnější rozměry:** 900 x 865 x 990 mm
- **Největší rozměr materiálu:** 660 x 495 x 210 mm
- **Posuv v ose Z:** 210 mm
- **Vlnová délka:** 10,6  $\mu\text{m}$
- **Chlazení:** Vzduchové

- **Auto fokusace:** Ano
- **Připojení:** USB, LPT, LAN
- **Operační módy:** Rastrové gravírování, vektorové řezání
- **Napájení:** 230 V; 50/60 Hz; 10 A
- **Paměť:** 64 MB (max. však 99 souborů)

### 6.2.2 Navržení správného vzorku

Jelikož by vzorky a zkoumané plochy polymerních materiálů měly mít stejný tvar i rozměry, programování laseru pro zhotovení vzorků se odvíjelo od výrobního schéma řezů přiloženého níže. U každé ze tří drážek se měnilo vstupních parametrů. Konkrétně se jednalo o hodnoty posuvu, aby se následně tyto jednotlivé obrobené plochy daly s rozdílem porovnávat. Z těchto poznatků bude možno vyhodnotit též optimální nastavení vstupních parametrů pro každý obráběný materiál této studie.



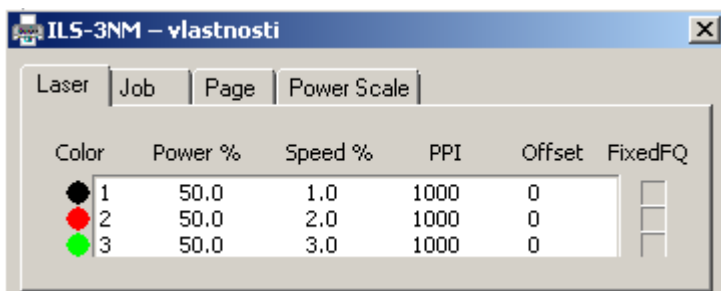
Obr. 29 – Schéma řezů na vzorku

Je zde možno vidět záměrné přesahy, které jsou nastaveny na hodnotu 2 mm na každou stranu tak, aby bylo zaručeno projetí laserového paprsku skrz celou šířku vzorku. Vzorky byly před umístěním na laserový rošt nařezány na šířku 30 mm. Následně tak zde byly provedeny tři řezy tak, že jsou od sebe vzdáleny 20 mm, což platí i pro řez 1 od levého okraje.

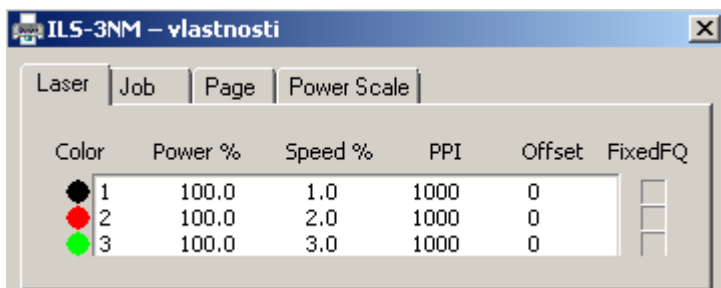
### 6.2.3 Volba vstupních parametrů

Jedná se o důležité nastavení laserového zařízení. Ne všechny materiály vykazují okem uspokojivé obrobene plochy. Některé vzorky měly snahu materiálu zatéct, jiné zase byly viditelně spáleny. Z důvodu omezení výkonu laserového zařízení hodnotou 100 W, tak bylo určeno dvou různých nastavení. V prvním případě bylo použito standardního maximálního výkonu laseru, tedy hodnoty 100 W. V případě, že vzorek obnášel některou z vad a materiál byl jakkoli degradován, bylo užito nastavení o sníženém výkonu na polovinu, tedy 50 W. Hodnoty posuvu byly zvoleny pro obě nastavení jako 1%, 2% a 3%, přičemž tato hodnota je vzata z maximálního, tedy 100% posuvu, který činí 1524 mm/s. Pro tuto skutečnost jsou v následné tabulce vyčísleny tyto hodnoty jak na procenta, tak na milimetry za vteřinu.

U barevného značení (Obrázek 31 a 32) je uvedeno číslo jednotlivých řezů 1, 2 a 3. Procenta posuvu jsou voleny (náhodou) stejně jako pořadové číslo řezu při daném výkonu. Tedy číslo řezu je rovno hodnotě posuvu v procentech.



Obr. 30 – Nastavení laseru při výkonu 50 W a hodnoty posuvů 1%; 2% a 3%.



Obr. 31 – Nastavení laseru na výkon 100 W a hodnoty posuvů 1%; 2% a 3%.

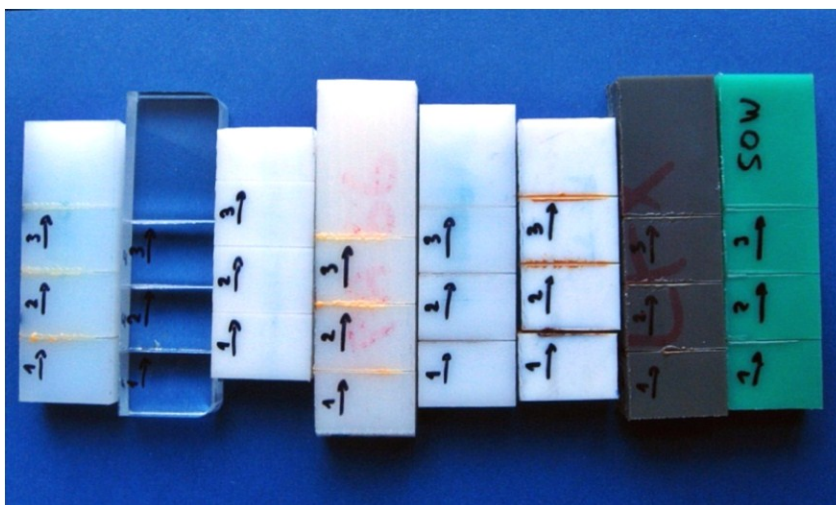
Tab. 2. Přepočítání hodnot posuvů

Řez	Posuv [%]	Posuv [mm·s <sup>-1</sup> ]
1.	1	15,2
2.	2	30,5
3.	3	45,7

#### 6.2.4 Předmluva k výběru materiálových vzorků (dovětek k laserovému obrábění)

Lze říct, že u některých materiálů, byť došlo k průchodu paprsku, došlo souhlasně k okamžitému zalití taveninou zpět – tedy materiály se jaksi „svařily“. Dalším případem byly vzorky, které po průchodu paprsku vykazovaly spálené povrchy a obrobená plocha tak byla degradována a byla nečitelná. Některé materiály zase vykazovaly při obrábění mnoho viditelného kouře a jiné měly tendenci poněkud rychle vzplanout a hořet. Proto je u všech zařazených zkoušek vždy vybráno jen určitých vzorků, resp. takových, které jsou pro danou zkoušku měřitelné, ale jsou – resp. byly zároveň jakýmsi kompromisem, neboť se zřejmě při jejich obrábění nepředpokládá použití hasicích přístrojů. Zároveň si dovoluji říci, že označení, resp. určení, které vzorky jsou vhodné, resp. nevhodné bylo možná to nejtěžší, neboť s postupem všech měření se dokázala spousta faktů a v podstatě pozitivní změny, resp. výsledky (na vliv strukturálních změn) tak zřejmě vykazují materiály, které však měly laserový řez nečitelný. To je zcela logické, avšak úvaha, resp. záměr práce byl, aby bylo možno posoudit ty materiály, které měly řez relativně čitelný a použitelný i v rámci praxe, resp. nepředpokládalo se, že by se kupříkladu spálené materiály daly považovat jako úspěšně obrobené. Otázkou strukturálních změn by se však dalo na tyto pohlédnout jinak. Proto však píši tento dovětek, resp. pár úvodních slov, na které bych rád kladl záměr.

Tedy jinými slovy – při výběru a vybrání jednotlivých materiálových vzorků šlo především o kompromis mezi všemi faktory, a to počínaje samotným řezem laseru. Následně se proto do užšího výběru dostala takřka polovina ze všech materiálů, a to zejména takové, které nečinilo problém, či nebezpečí obrobit.



Obr. 32 – Fotografie vzorků

### 6.3 Vizuální ukázka řezů – ruční mikroskop ProScope HR

Jedná se o první ruční digitální mikroskop z roku 2006. Ten díky technologii Aptina imager a schopnosti přizpůsobení světelné intenzity vůči povrchu, přináší obraz ve skutečném rozlišení až 1280 x 1024 pixelů. Volbou pro snímání povrchů je možnost zhotovení snímků, videa, či časoběrného videa, tzv. timelapse capture. Pro snímání je využito osvětlení formou LED diod, přičemž je možno zvolit dvě různé intenzity, případně osvětlení zcela vypnout. Propojení s počítačem je zprostředkováno přes rozhraní USB 2.0 a využití příloženého software v balení – tedy programu ProScope HR.

Součástí mikroskopu bylo balení čoček o různém zvětšení 400x, 100x, 50x a 30x. Pro snímání vzorků této práce bylo využito čočky o zvětšení 30x, neboť bylo dostatečné. V balení je též nabídnuto přídatného stojanu, na který se mikroskop může uchytit a lze tak snímat snímky ze zadané výšky a bez nutnosti držení. Pro práci však bylo zvoleno snímání ručního, jednak protože vzorky neměly zcela stejnou výšku, ale také pro lepší možnost manipulace a ostření. Rozlišení sejmutých snímků je 640 x 480 pixelů.



Obr. 33 – Mikroskope ProScope HR [20]

#### 6.3.1 Parametry zařízení

- **Možnost nasvícení povrchu:** Ano; formou LED diod (A-OFF-B přepínač)
- **Možnosti použití čoček o zoomu:** 10x; 30x; 50x; 100x; 200x; 400x; 500x; 1000x
- **Napájení:** 400 mA (při zapnutém LED osvětlení)
- **Video parametry:** 30 fps / 320 x 240; 15 fps / 640 x 480;  
3,75 fps / 1280 x 1024
- **Vnější rozměry:** 152 x 45 x 45 mm
- **Hmotnost zařízení:** 185 g

## 6.4 Snímání 3D povrchu a drsnosti ploch – Talysurf CLI 500

Přístroj Talysurf CLI 500, který je dílem firmy Taylor Hobson, je vysoce účinný měřicí prostředek pro rychlé prostorové a bezkontaktní měření, analýzu povrchů a též patřičné vyhodnocení těchto dat, a to ve velmi vysokém rozlišení. Jedná se o univerzální měřicí zařízení, které je schopno měřit ve třech možnostech provedení, a sice dotykově – tedy indukčním způsobem Form Talysurf, dále bezdotykově – tedy laserovou triangulační sondou, případně CLA konfokálním snímačem (CLA jako akronym slov Chromatic Length Aberration). Tyto tři způsoby v praxi zajišťují téměř neomezené možnosti zkoumání struktury z hlediska jakosti, přesnosti i druhu materiálu dané součásti, resp. objektu. Toto zařízení bylo poskytnuto v rámci vybavení laboratoře měření tvrdostí Ústavu výrobního inženýrství. [25]

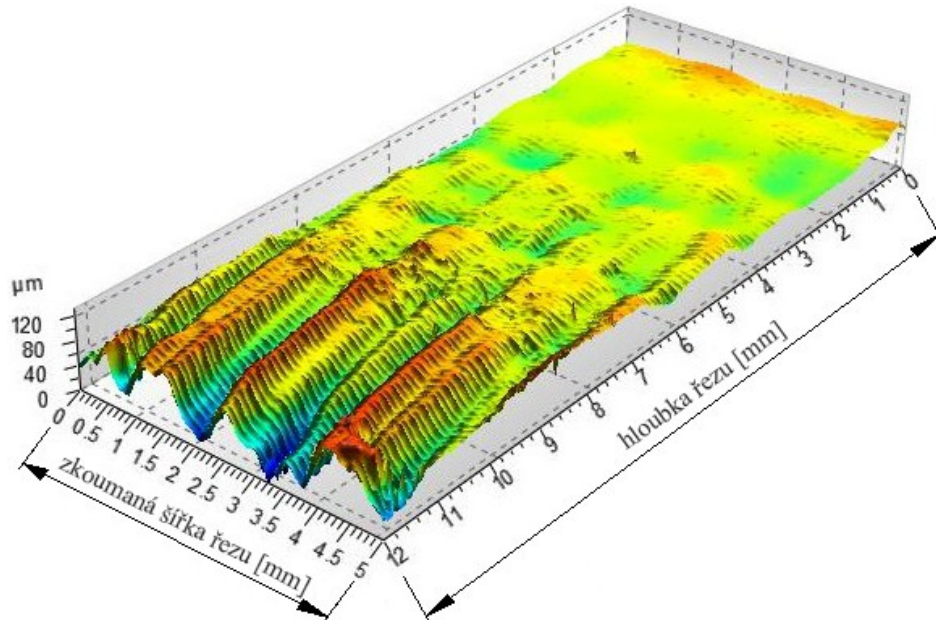


Obr. 34 – Talysurf CLI 500

### 6.4.1 Parametry zařízení

- **Měřicí prostor:** 50 x 50 x 50 mm
- **Velikost max. posuvu:** 50 mm
- **Rychlost měření:** 0,5; 1; 5; 10; 15 a 30 mm/s
- **Nejvyšší rychlost polohování:** 30 mm/s
- **Osová rozlišitelnost:** 0,5  $\mu\text{m}$

- **Možnost měřit bezkontaktně:** Ano
- **Vnější rozměry:** 500 x 310 x 450 mm
- **Hmotnost zařízení:** 55 kg
- **Nosnost stolu:** 10 kg



Obr. 35 – Schéma snímání 3D povrchu

## 6.5 Měření mikrotvrdomosti - CSM Micro Combi Tester

Jedná se o zařízení švýcarské značky CSM, které je určené pro měření mikrotvrdomosti různých materiálů. Toto zařízení bylo poskytnuto v rámci vybavení laboratoře měření tvrdostí Ústavu výrobního inženýrství.

V rámci této diplomové práce byl zkoumanou a vyhodnocovanou veličinou vtiskový modul pružnosti a tvrdost podle Vickerse, přičemž zkušební zatížení bylo zvoleno 1 N a doba výdrže 10 s. Vnikacím tělesem pro posouzení vtiskové mikrotvrdomosti dle Vickerse  $H_{VIT}$  byl čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ , vyrobený z diamantu. Jedná se o tzv. Vickersův indentor, který se běžně používá pro měření kovových, ale i polymerních materiálů. Úhel  $136^\circ$  je zvolen s ohledem tak, aby svým třením co nejméně ovlivnil výsledek. Co se týče zkušebního zatížení, pro posuzování mikrotvrdomostí náleží přirozeně velmi malých hodnot zatížení. Konkrétní rozsahy zkušebního zatížení síly  $F$  pro získání tvrdosti jsou v následující tabulce 2. [26]





Obr. 36 – CSM Micro Combi Tester

### 6.5.1 Parametry zařízení

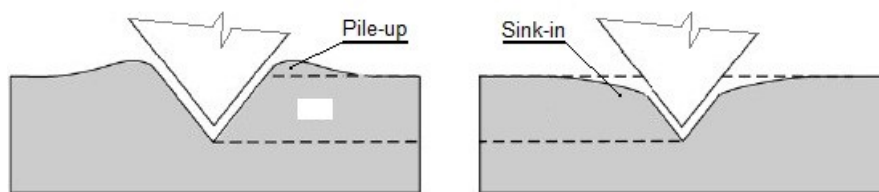
- **Rozsah aplikovaného zatížení:** 0,5 N; 1 N; 5 N
- **Zvolené zatížení:** 1 N
- **Max. výdrž na max. zatížení:** 90 s
- **Zvolená výdrž na zatížení:** 10 s
- **Poissonovo číslo:** 0,3

Tab. 3. Rozsah zatěžující síly  $F$  při různých zkouškách tvrdosti dle Vickerse

Rozsah zatížení silou $F$ [N]	Značení tvrdosti	Název zkoušky
$F > 49,03$	HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 ÷ HV 5	Zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F \leq 1,961$	HV 0,01 ÷ HV 0,2	Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Vtiskový modul pružnosti  $E_{IT}$ , jež 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 získány a jež jsou v následných krocích této práce popsány, lze vidět, že získaná tvrdost, resp. vtisková mikrotvrdost do značné míry koresponduje a odráží podobný průběh výsledků jako u hodnot vtiskového modulu pružnosti.





Obr. 37 – Zobrazení deformace typu Pile-up a Sink-in

Rozdíl mezi modulem Youngovým a vtiskovým může nastat v případě projevení deformace typu „Pile-up“ (tedy nakupení okraje) nebo „Sink-in“ (tedy vtažení okraje), což znázorňuje následující obrázek.

Co se týče míry relaxace u vytvořených obrazů vtisku na zkoumaných polymerních materiálech, platí, že největší míra relaxace vtiskového obrazu probíhá téměř ihned po vyjetí indentoru ze zkoumaného zkušebního tělíska, resp. polymerního materiálu. V rámci této problematiky je zvolená metoda DSI zcela ideální. Jak již bylo řečeno, tato metoda nám umožňuje získat a posuzovat řadu důležitých veličin, které jsou všeobecně standartními metodami neměřitelné. Metoda DSI je velice přesná, a to zejména i pro posouzení nejmenších rozdílů, ať už v hodnotách mikrotvrdoti podle Vickerse, či v hodnotách vtiskového modulu pružnosti a dalších. 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. [26]

## 6.6 Simulace teplotních polí – software Cosmos

Simulací jakéhokoli stavu rozumíme napodobení stavu reálného. Tento stav může být buď již existující, nebo takový, že jej chceme teprve vytvořit a simulací dopomůžeme k alespoň přibližnému stavu, resp. přibližným výsledkům. Modelování teplotních polí je zde řešeno pomocí softwaru COSMOS/M, který pracuje na principu konečných prvků. V procesu nestacionárního sdílení tepla, jakým tento případ sdílení je, platí Kirchhoffova rovnice, která říká, že rychlost teplotních změn obecně určuje koeficient teplotní vodivosti  $\lambda$ . Nestacionárním sdílením tepla se rozumí to, že teplota jednotlivých prvků teplotního modelu je funkcí času. Pro metody simulace teplotního pole lze vycházet z dvou hlavních pohledů. [31]

Prvním možným způsobem je respektování změn fází, které v materiálu při působení laserového paprsku zřejmě probíhají, neboť se materiál nejprve taví a následně vypařuje.

Tento způsob uvažování změn fází a tedy i fyzikálních veličin (hustota, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita k té které fázi) v závislosti na čase, resp. měnící se teplotě, by mohlo vést k velmi reálnému modelu tepelného zatížení, avšak vzhledem ke složitosti popisu a rychlosti během procesu laserového úběru materiálu je toto skoro až nemožné, resp. především velmi složité. [31]

Proti tomu jednodušším způsobem pohledu je nebrat tuto fázovou změnu a nebrat tak v potaz ani změnu s tím spojené struktury. Tím se myslí nebrat v potaz děje, jež probíhají mimo pevnou fázi – tedy z toho plynoucí zaměření se pouze na děje v rámci sdílení tepla v rámci pevné fáze materiálu. Přestože je touto metodou, resp. zjednodušením a zanedbáním změn fází způsobena nepřesnost, stále se vzhledem k určitým důvodům jedná o relativně dostatečnou přesnost, alespoň tedy pro základní ponětí o rámcovém rozsahu vrstvy ozářené laserovým paprskem (což doplňuje měření mikrotvrdosti a modulu pružnosti, resp. doplňuje ponětí o velikosti pole ozářeného materiálu). Tím důvodem, který částečně ospravedlňuje zanedbání změn fází je pak především vysoká rychlost provedeného procesu, neboť proces řezání laserem patří mezi velmi rychlé procesy, co se změn v materiálu týče. [31]

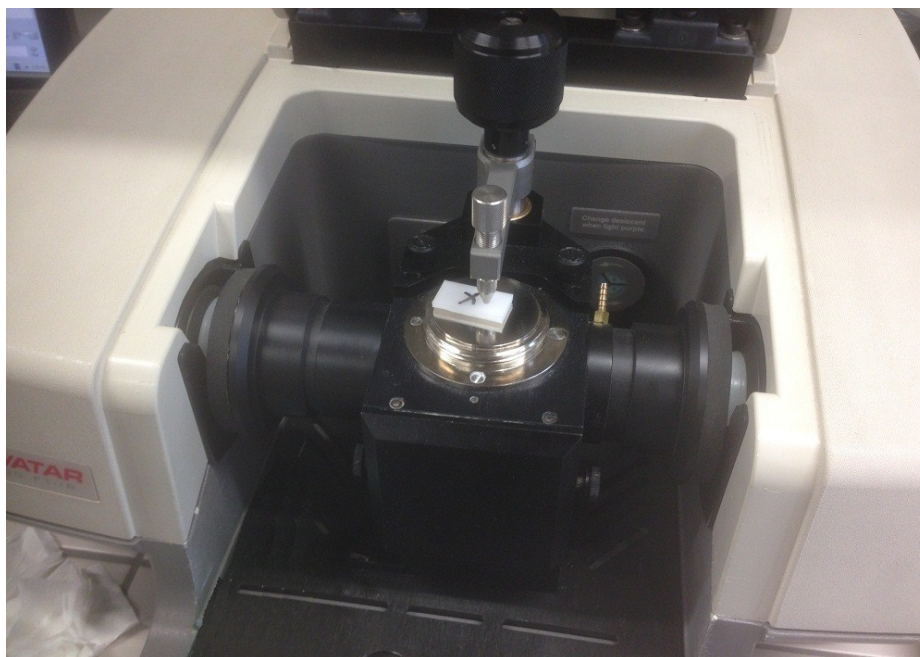
Dalšími předpoklady je, že veškerá energie laserového paprsku se v materiálu ihned mění v teplo a také, že největší možná teplota, kterou je materiál ohraničen, je teplota tepelného rozkladu. Tato teplota se liší od teploty tání a je výrazně vyšší (lze ji vyhledat všeobecně pod označením TGA). V rámci distribuce hustoty energie je také zanedbáno tzv. gaussovské distribuce energie paprsku, načež je pro zjednodušení předpokládáno konstantního rozložení hustoty energie po celém jeho průměru. Tedy tepelný tok, jenž je do programu, resp. v rámci uvažovaných bodů zadáván, je v těchto bodech, resp. v rozsahu působení paprsku všude stejný, stejně jako teplotní profil, jež se šíří ve všech směrech stejně. Posledním předpokladem, resp. faktem pak je, že počáteční teplota simulace reálného stavu je 20°C. [31]

## **6.7 Infračervená vibrační spektroskopie – Nicolet Avatar 320 ATR**

Tato analytická metoda je nedestruktivní a umožňuje na základě různé interakce infračerveného záření identifikovat a strukturně charakterizovat organické sloučeniny v dané látce. Zároveň se díky této metodě dá stanovit a identifikovat též anorganických látek. Je při tom všeobecně možné analyzovat jak plynné, tak pevné i kapalné látky. Princip této metody spočívá ve zkoumání absorpce IR záření při průchodu materiálem, při kterém do-

cháží 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 jednak hmotou zúčastněných částic, ale také silou vazeb. Frekvence záření tak může v jistých frekvencích rezonovat s molekulárními vibracemi a energie tohoto záření se tak může zároveň absorbovat. V rámci omezení je pak nemožnost analyzovat ty látky, jež neabsorbují IR záření, což je např. kyslík, dusík, vodík, grafit, či síra.

V rámci použitého přístroje Nicolet Avatar 320 ATR FT-IR, jež je součástí vybavení laboratoře Ústavu výrobního inženýrství se jedná o označení přístroje, jež pracuje s Fourierovou transformací, přičemž označení ATR je zkratka anglického Attenuated Total Reflectance, což znamená „zeslabený totální odraz“, přičemž hloubka průniku záření do materiálu bývá v rozsahu desetin až jednotek mikrometrů. Díky těmto vlastnostem a principu snímání je tento přístroj vhodný zejména pro měření past, kapalin, či gelů, polymerních vrstev, či měkkých práškovitých vzorků.



*Obr. 38 – Nicolet Avatar 320 ATR*

Výsledkem měření je grafické zobrazení funkční závislosti energie vyjádřené jako absorbance na vlnové délce dopadajícího záření. Popis intenzity absorpce se obvykle uvádí v procentech, přičemž pro IR záření se ustálila jednotka tzv. reciprokého centimentu, tj.  $\text{cm}^{-1}$ . Platí, že každá zkoumaná látka má unikátní spektrum, přičemž pro detailní a přesný výzkum bývá zpravidla využito knihoven spekter, ke kterým není veřejný přístup.

Často, což platí i opačně, může být této metody využito pro potvrzení některých struktur zjištěných jinou metodou. Proto i zde v této práci dostane prostor metoda rentgenu, která je popsána jako následující a poslední měřicí operace.

## 6.8 Rentgenová difrakční analýza – PANalytical X'Pert PRO

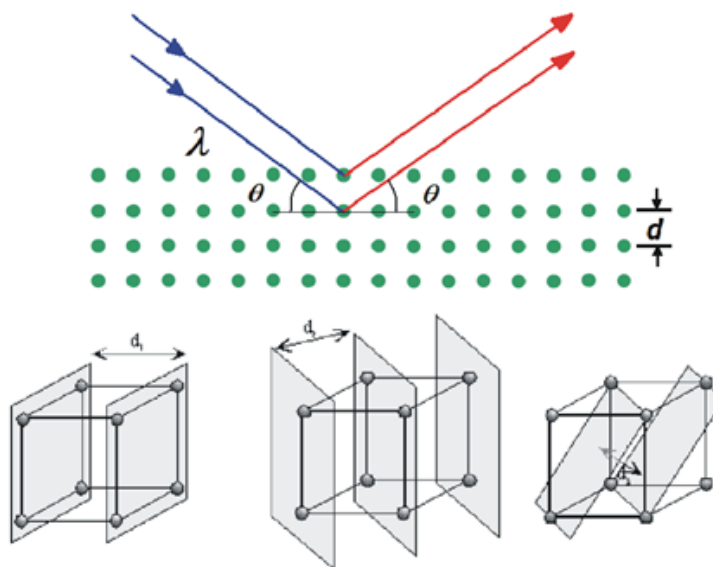
Pro posouzení vlivu laserového paprsku na strukturu materiálů a zkoumání krystalické struktury bylo do měření vzorků zařazeno též měření na difraktometru PANalytical X'Pert PRO. Tento difraktometr využívá rentgenového záření, díky němuž je schopen zaznamenat rozptyl na elektronech krystalické látky v maximální možné kvalitě. Zařízení využívá vysoce monochromatický paprsek s velmi přesně definovanou vlnovou délkou. Geometrie uspořádání je tzv. Bragg-Brentanovo, kdy vzorek je uprostřed kruhu, po jehož obvodu se plynule pohybuje jak zdroj RTG záření, tak jeho detektor. [29] [30]



*Obr. 39 – Difraktometr PANalytical X'Pert PRO*

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 začínají být zdrojem sekundárního záření. Tento rozptyl se nazývá koherentní, resp. pružný. Dále v procesu dochází ke skládání vln, tj. k interferenci vln vyzářovanými jednotlivými elektrony, přičemž ty mohou být od sebe fázově posunuty. Výsledkem tohoto skládání je difrakce, neboli soubor vln, které jsou ší-

řeny od krystalu, a to pouze v daných směrech. Vlnová délka RTG záření je srovnatelná se vzdáleností jednotlivých mřížkových rovin, a proto dochází k difrakci. [29] [30]



Obr. 40 – Znáornění difrakce na rovinách v rámci otočného krystalu

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. [29] [30]

### 6.8.1 Morfologie

Dá se říci, že zatímco se molekulární architektura soustředí na popis jednotlivých makromolekul, morfologie se zabývá nadmolekulární úrovní strukturní hierarchie. V tavenině polymerních materiálů je potřeba rozlišit homogenní nukleaci a heterogenní nukleaci. V případě homogenního typu platí, že v tavenině nejsou přítomny žádné cizí částice, přičemž vytvoření stabilního zárodku vyžaduje výrazné podchlazení, což je případ, jenž se u reálných materiálů nevyskytuje. Proti tomu heterogenní způsob nukleace je založen na podmíněnosti všech cizích částic a povrchů. Zde patří všechny nečistoty, vyztužující vlákna, zbytky katalyzátorů, částice plniv, ale také úmyslně dodaná nukleační činidla. Platí, že právě tato nukleační činidla jsou jednou z hlavních možností, jak ovlivnit a zajistit morfologii semikrystalických polymerů, a tím zřejmě jejich vlastnosti. [1]

Detailní způsob krystalizace polymerních řetězců, resp. strukturní model pro semikrystalické polymery není dodnes nijak přesně definován. Mezi jasnou a známou před-

stavu struktury spadá snad jen struktura monokrystalů polymerů, přičemž tyto vznikají výhradně v laboratorním prostředí a podmínkách. Molekulární řetězce jsou v krystalických lamelách uspořádány zpravidla kolmo k jejich bazální rovině, tj. k jejich největší ploše. [1]

Tuto skutečnost potvrzuje obecně jak elektronová, tak právě rentgenová difrakční analýza, přičemž tloušťka lamel nabývá hodnot desítek nanometrů, a je tedy přibližně stokrát až tisíckrát menší než průměrná délka napřimených makromolekul. Ta dosahuje délky přibližně v řádu jednotek až desítek mikrometrů. [1]

## 7 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

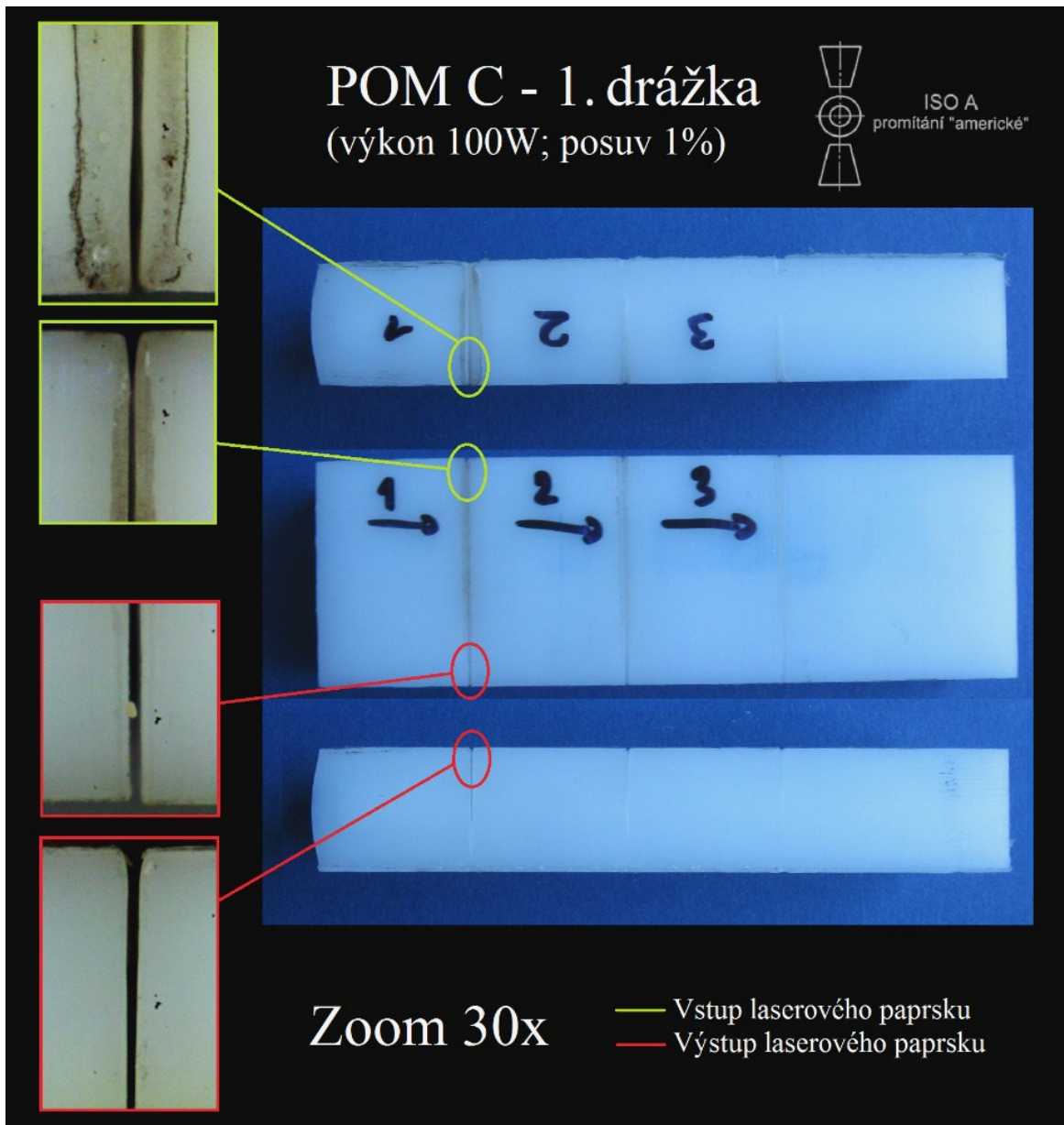
V této diplomové práci bylo zvoleno vybraných měření a metod, které měly především komplexně posoudit hlediska změn, a to nejen strukturálních. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.2.4, do seznamu zkoumaných vzorků bylo vybráno především materiálů POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP. Důvodem pro volbu těchto materiálů byl především kompromis mezi všemi faktory, které tyto materiály vykazovaly, a to počínaje samotným řezáním na laseru, které u těchto materiálu nečinilo nikterak závažný problém ani nebezpečí. Materiály, které při řezání hořely, či vykazovaly obrobené povrchy neslučitelné s jakýmkoli využitím v praxi, byly proto ze seznamu dodaných vzorků vyřazeny. Co se týče strukturálních změn, možná by tyto materiály vykazovaly nejzajímavější výsledky, kdo ví. Nicméně – v této práci bylo řešeno i uvažováno výzkumu na takových materiálech, kde byla prioritou též jakost obrobené plochy, stejně jako její kvalita. Proto je většina měření směřována na výběr zmíněných 5 materiálů – ačkoli však ani zde nebylo vždy jednoduché veškerá měření dle představy a z určitých důvodů provést.

### 7.1 Zobrazení řezů digitální mikroskopem

K tomuto zobrazení bylo využito digitálního mikroskopu ProScope HR s přiblížením čočky 30x. V rámci vyobrazeného schéma, kde jsou tyto řezy ve složených fotografiích vyobrazeny, byly vzorky promítány tzv. americkým promítáním. Toto schéma promítání mělo svůj význam a je pro jistotu pochopení zobrazeno vždy v každém přiloženém obrázku. Materiály, u nichž této vizualizace bylo použito, jsou POM C, POM H, PMMA a PE 1000, přičemž jako názorný příklad materiálu nevhodného pro laserové obrábění za použitých vstupních parametrů je zde vyobrazeno též materiálu PET.



### 7.1.1 POM C – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)

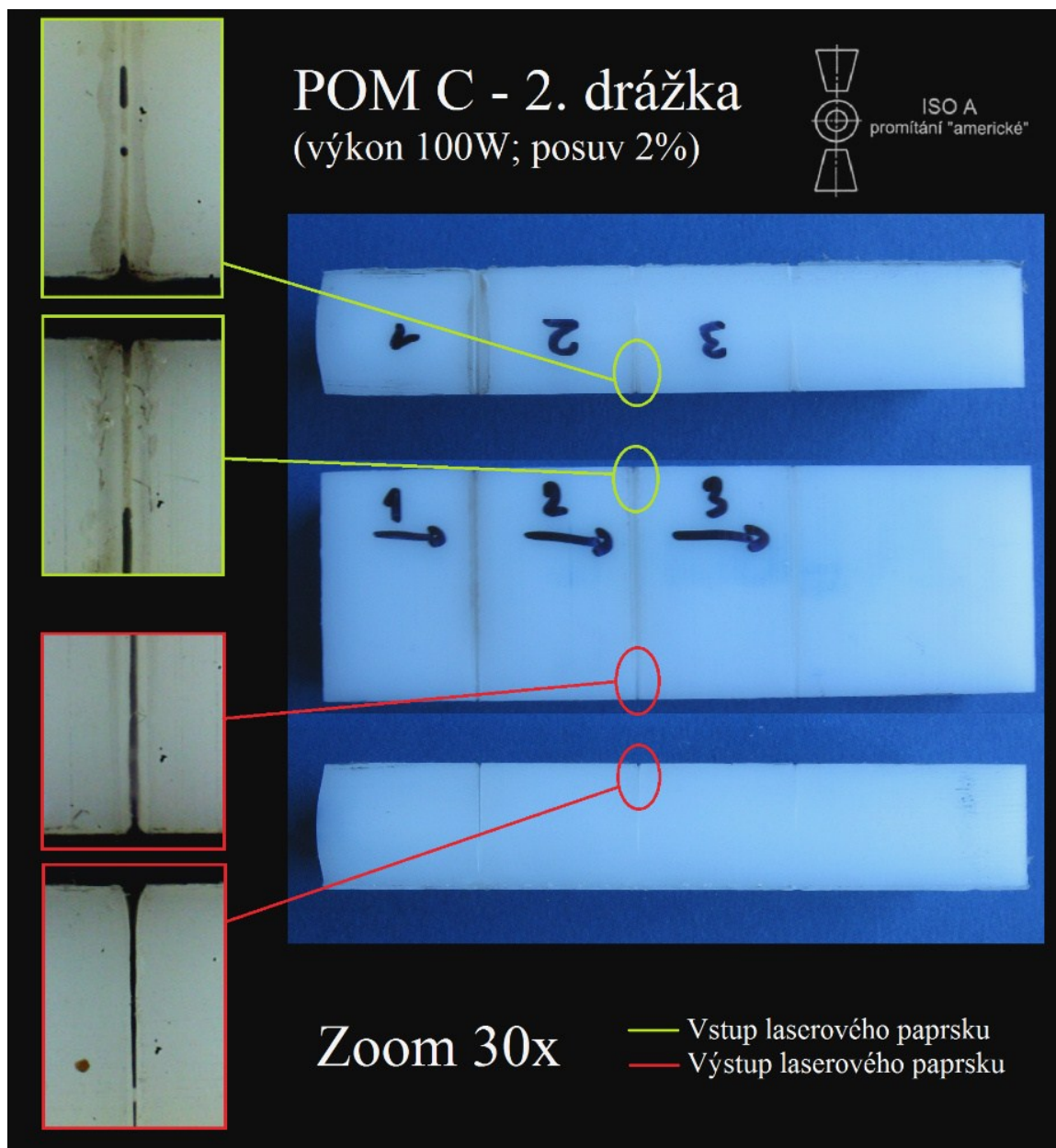


Obr. 41 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky

Na fotografiích 1. drážky materiálu POM C lze vidět velmi kvalitně vedený a čitelný řez. Na boční straně vstupu laserového paprsku lze spatřit tmavé skvrny, jež jsou způsobeny zřejmě nejvyšším rozdílem teplot (jedná se o 1% posuv, čili síla laseru je u drážky 1 maximální). Tím, jak laserový paprsek postupuje směrem k výstupu (červené označení), vytváří teplotní pole, díky kterému je již výstupní boční strana řezu zcela jasná a čitelná. Jedná se o jinak velmi kvalitní řez bez významnějších degradací.



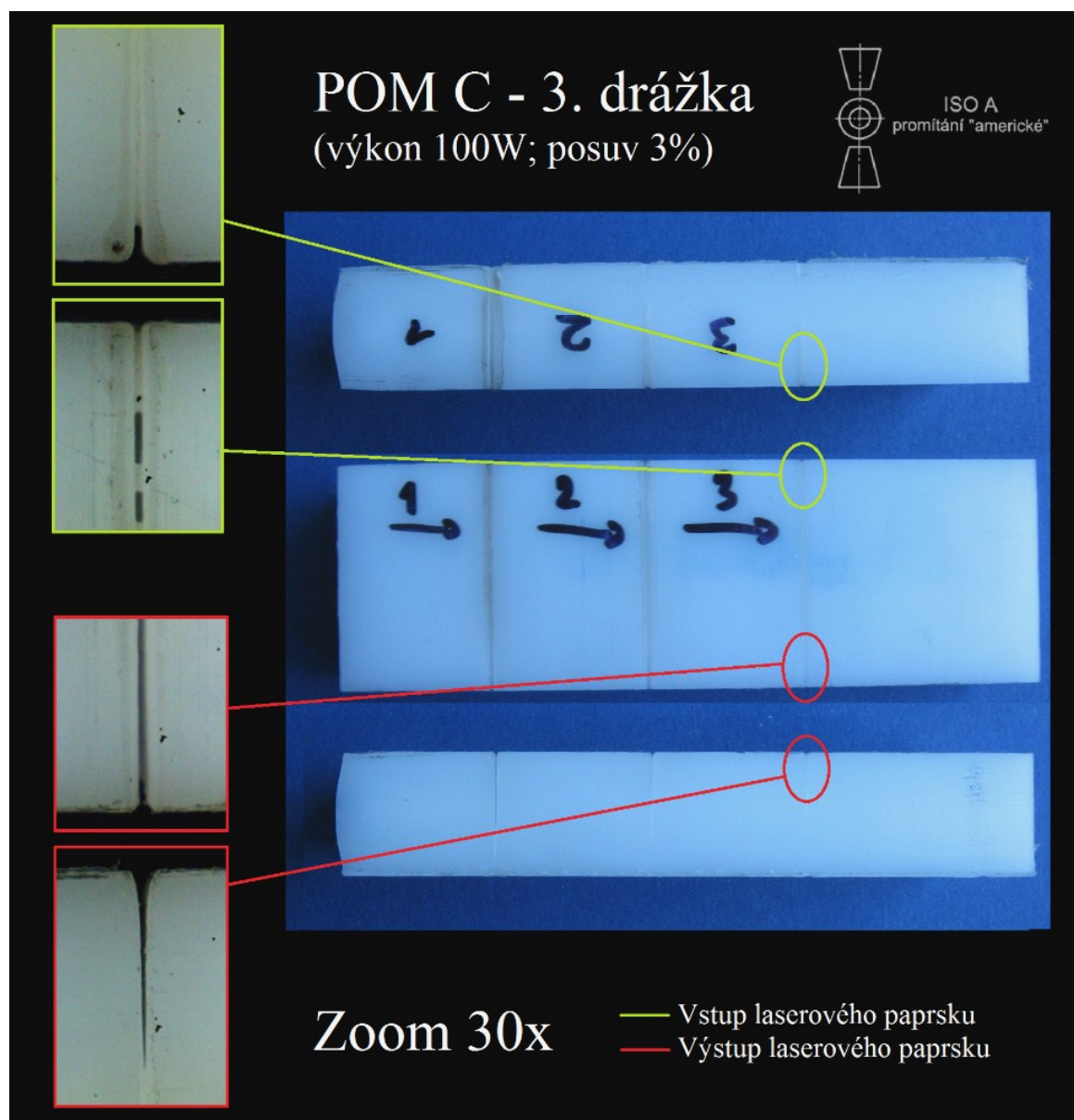
### 7.1.2 POM C – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%)



Obr. 42 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky

Na fotografiích 2. drážky materiálu POM C lze vidět zatavené lokální oblasti, a to zejména na straně vstupu laserového paprsku (zelené označení), takže se dá ihned konstatovat, že již při 2% posuvu (tedy dvojnásobném vůči 1. drážce) se materiál nestíhá odpařit a tuhne. Výstupní část vykazuje již lepší průběh této problematiky. Lze nicméně konstatovat, že s úběrem síly laseru (zvýšením hodnoty posuvu při zachování výkonu) dochází k nežádoucí degradaci vlivem nedostatečného odpaření materiálu a následného zatuhnutí.

### 7.1.3 POM C – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)

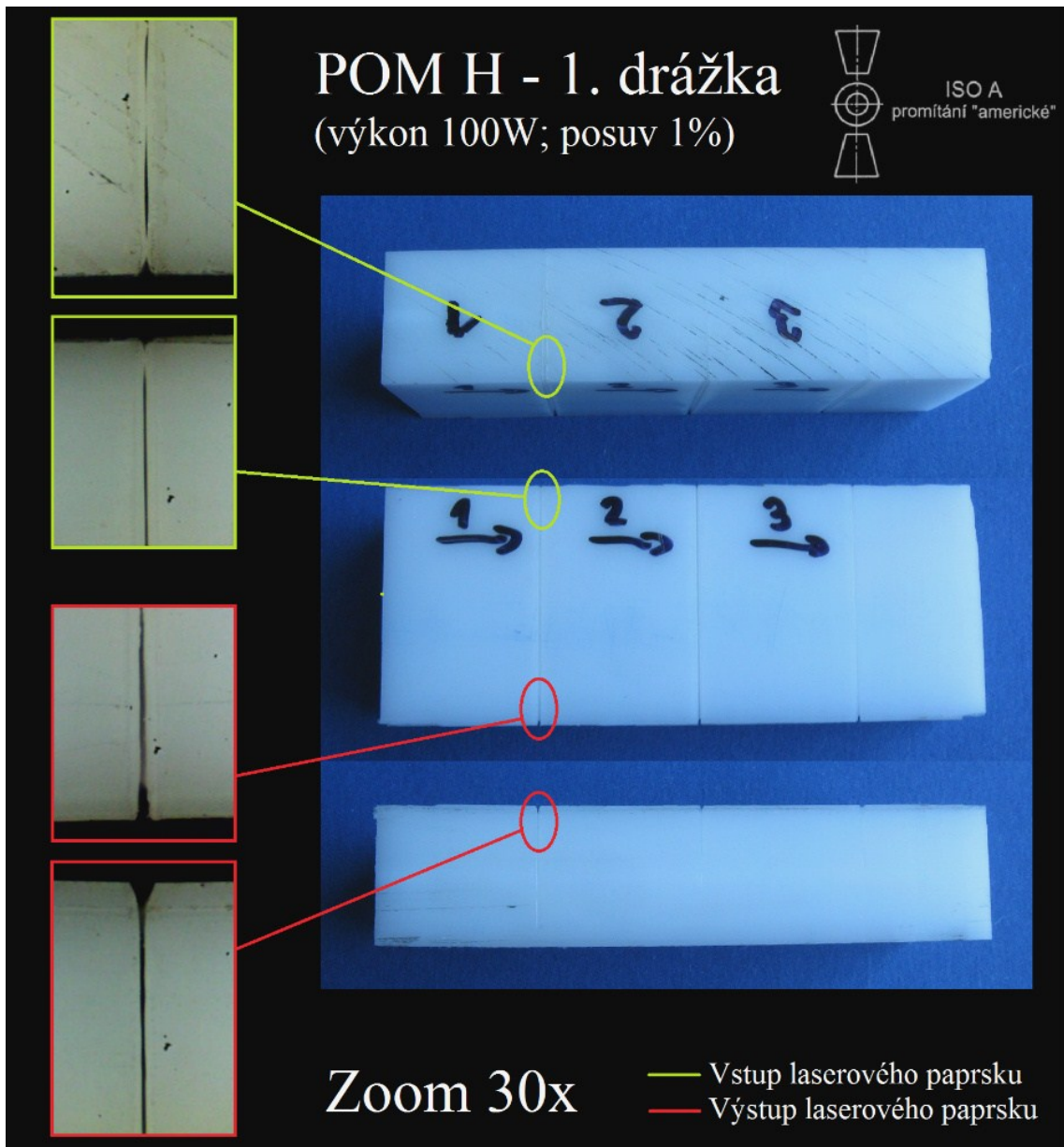


Obr. 43 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. Drážky

Na fotografiích 3. drážky materiálu POM C lze vidět již zřejmý úkaz, a sice, že zde opět dochází (stejně jako u 2. drážky), avšak zde ještě výraznější k nedostatečnému odpaření materiálu, který tak uvnitř obrobene oblasti tuhne.

Celkově tak lze v rámci zhotovených drážek u POM C při třech různých parametrech konstatovat, že nejkvalitnější vlastnosti řezu pohledem digitálního mikroskopu byly u parametrů 1. drážky. V rámci výkonu laserového zařízení se jednalo o konstantních 100W, avšak posuvem se jednalo o hodnotu 1%, tj. přepočtem  $15,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 7.1.4 POM H – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)

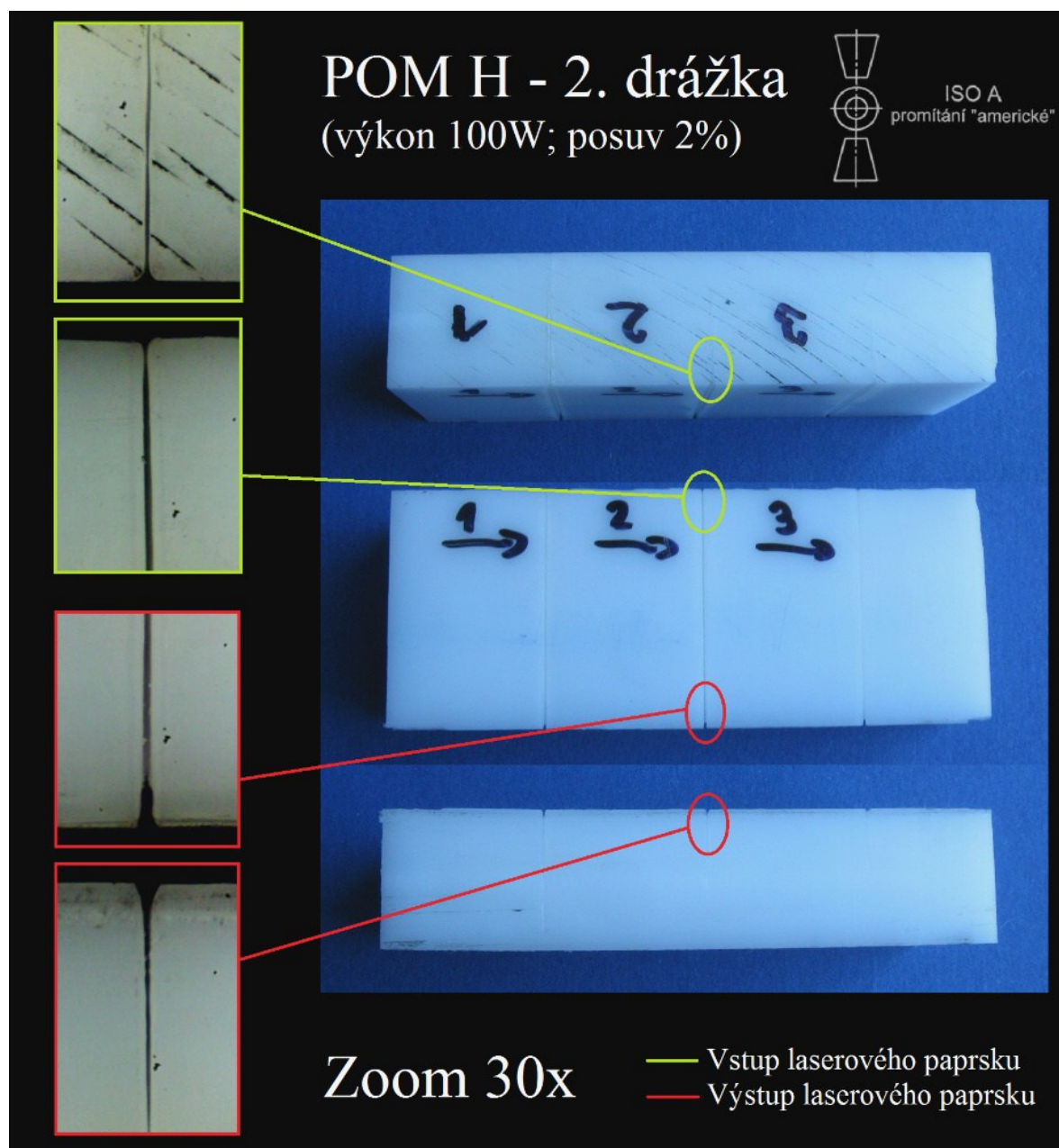


Obr. 44 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky

Na fotografiích 1. drážky materiálu POM H lze vidět velmi úzký, avšak převážně čitelný řez bez spálených míst. Na boční straně u vstupu lze v drážce vidět náznaky zatavené vrstvy materiálu, avšak na výstupní straně této drážky je již, řez zcela čistý, bez náznaku zatavených míst. Jedná se o jinak velmi kvalitní řez bez významnějších, touto metodou spatřitelných degradací. Nedošlo zde např. ke zčernání boční strany drážky. Svou úzkou charakteristikou však vzniká předpoklad o menší hloubce řezu. Oproti materiálu POM C.



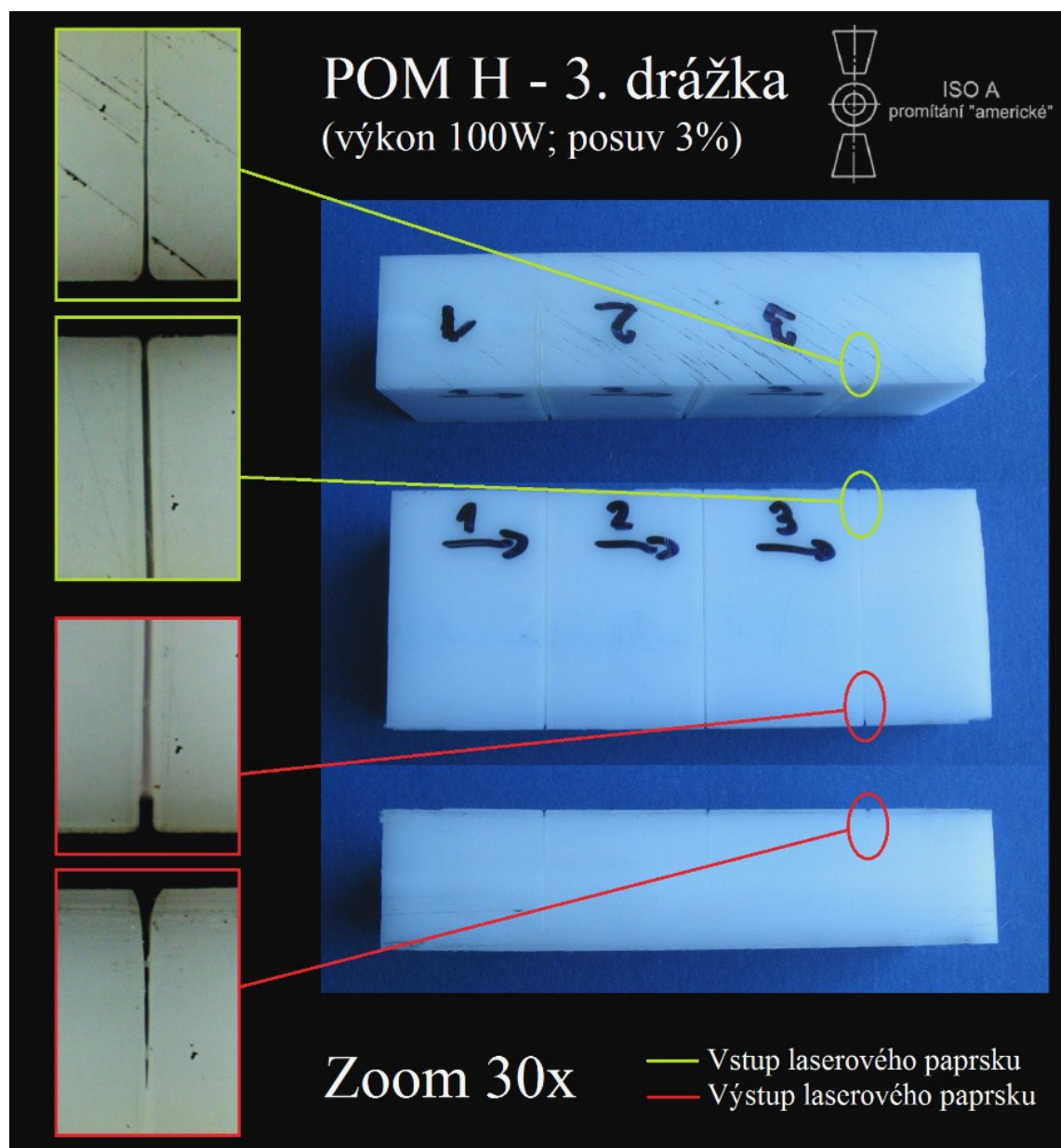
### 7.1.5 POM H – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%)



Obr. 45 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky

Na fotografiích 2. drážky materiálu POM H lze vidět opět relativně úzké provedení řezu bez znatelných, mikroskopem spatřitelných degradací. Na pohledu shora na výstupní části laserového paprsku lze spatřit kdesi hlouběji v řezu náznak zatuhnutí materiálu, tedy je zde zřejmý vliv zvětšení posuvu, a sice formou následného nedostatečného odpaření základního materiálu.

### 7.1.6 POM H – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)

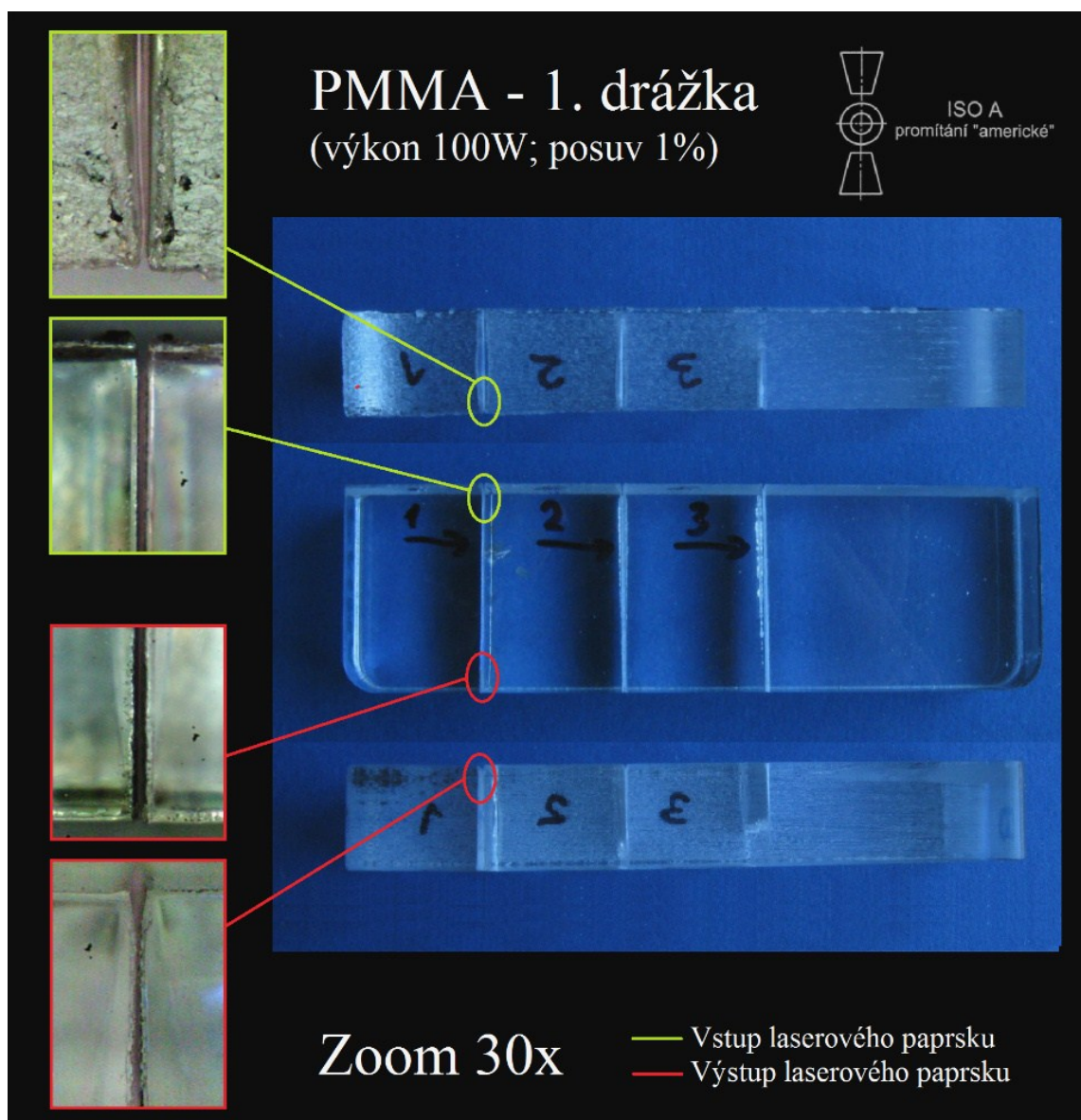


Obr. 46 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky

Na fotografiích 3. drážky materiálu POM H lze vidět již zcela zřetelný vliv zvýšení posuvu, tj. snížení síly laserového zařízení, a sice ve formě zatuhnutí materiálu v drážce, neboť se nestíhá úspěšně odpařit. Tento jev lze nejvíce spatřit na výstupní straně paprsku (stejně jako u 2. drážky).

Celkově tak lze v rámci zhotovených drážek u POM H při třech různých parametrech konstatovat, že nejkvalitnější vlastnosti řezu pohledem digitálního mikroskopu byly opět u 1. drážky, tj. u zvolení 1% posuvu  $15,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 7.1.7 PMMA – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)

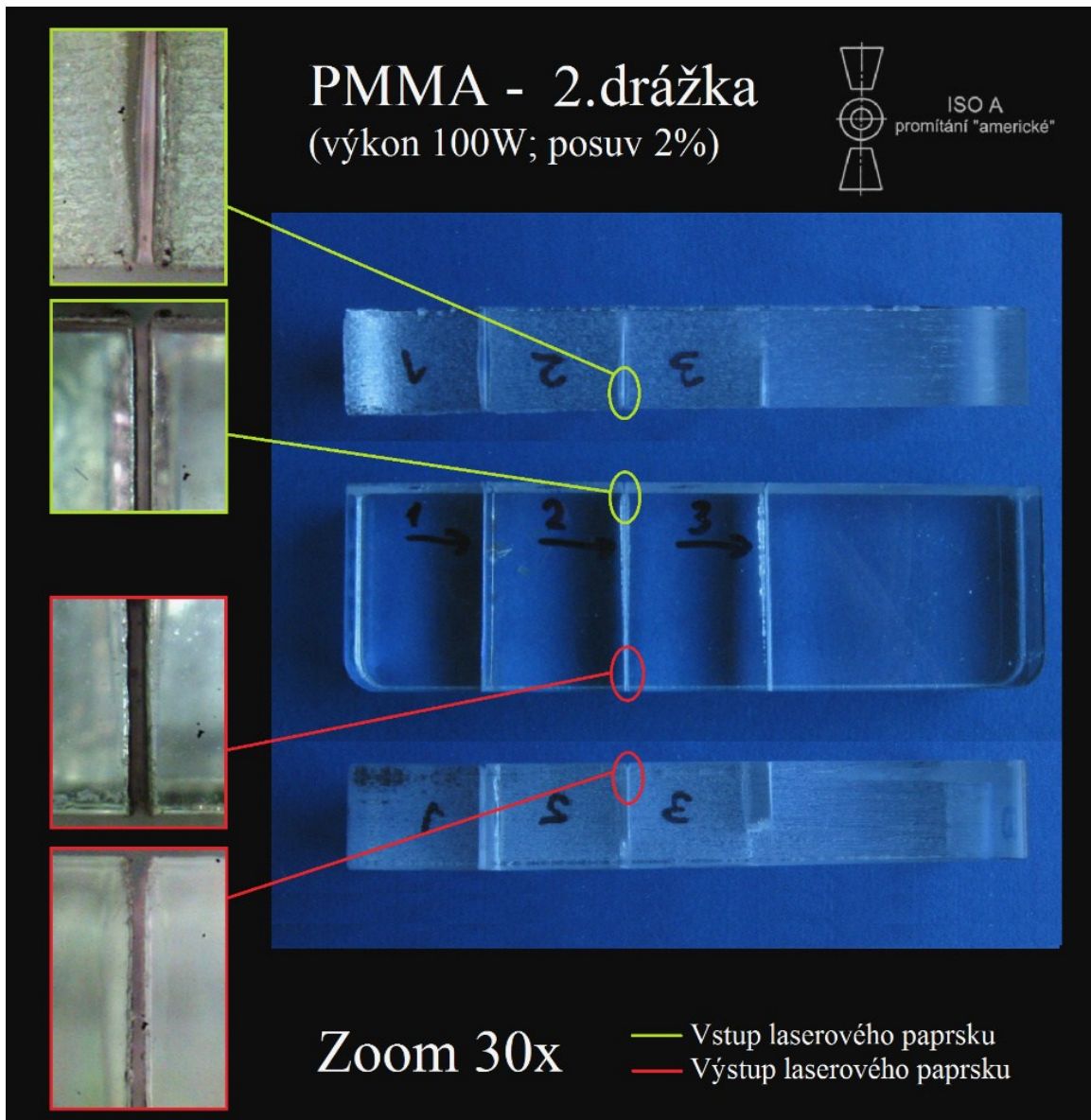


Obr. 47 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky

Na fotografiích 1. drážky materiálu PMMA (100W) lze vidět zejména na vstupní části načernalá místa, která jsou způsobená patrně silou laserového paprsku. Ta je zde v rámci PMMA a našeho výzkumu maximální. Na výstupní části lze rovněž vidět vystouplé okraje. Co se týče dalších parametrů, lze očekávat eliminaci těchto okem spatřitelných defektů.



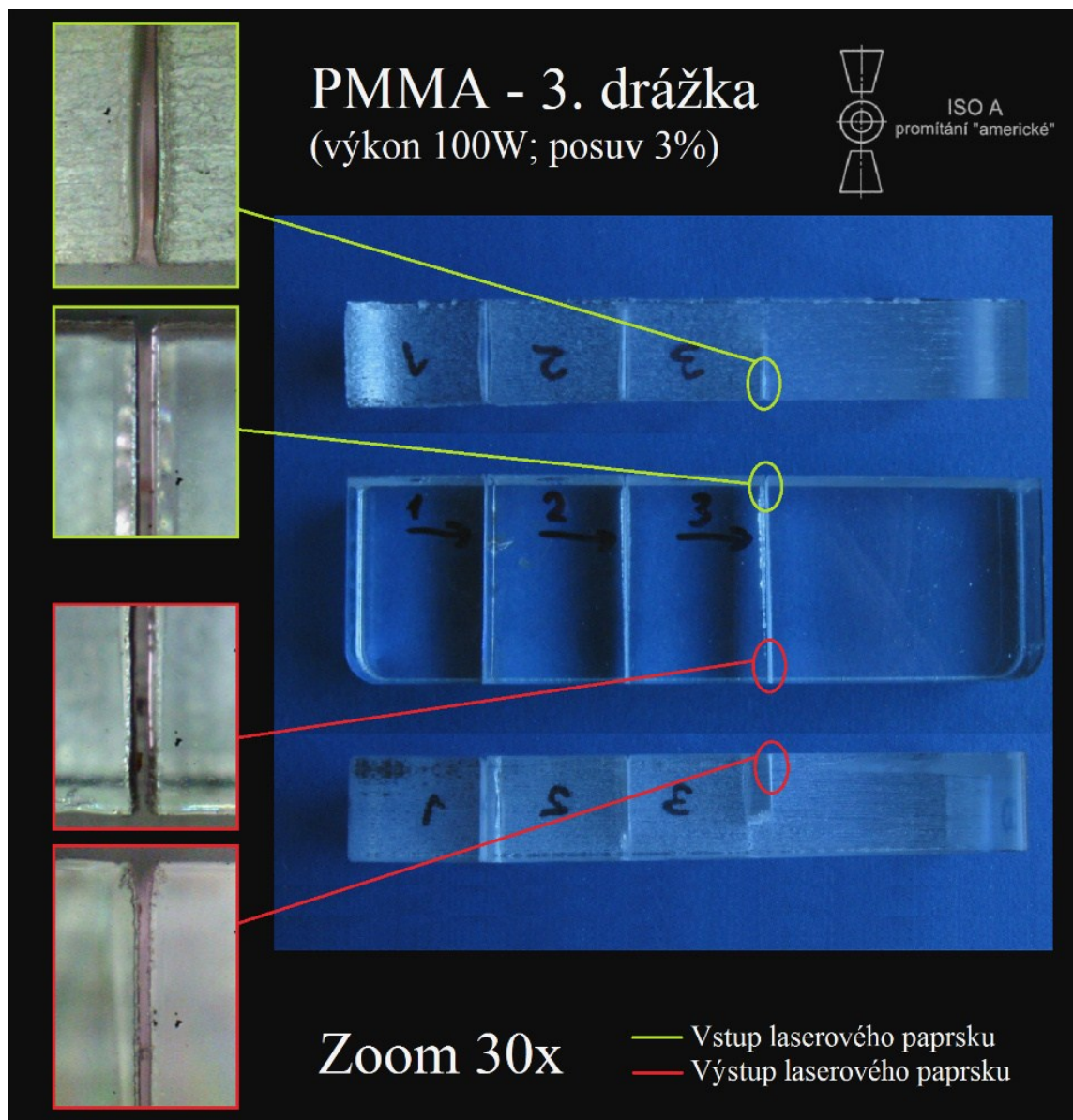
### 7.1.8 PMMA – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%)



Obr. 48 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky

Na fotografiích 2. drážky materiálu PMMA (100W) lze vidět, že se oproti 1. drážce nikterak významně charakteristiky řezu nezměnilo, resp. jsou zde ve stejných lokacích místa s náznakem lehkého spálení, a to zejména na vstupní straně laserového paprsku. Jelikož je PMMA jediný amorfní materiál z dodané škály vzorků, je možné, že je výkon 100W pro tento materiál příliš velký, neboť obrobiteľnosť je dosud nejsnazší.

### 7.1.9 PMMA – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



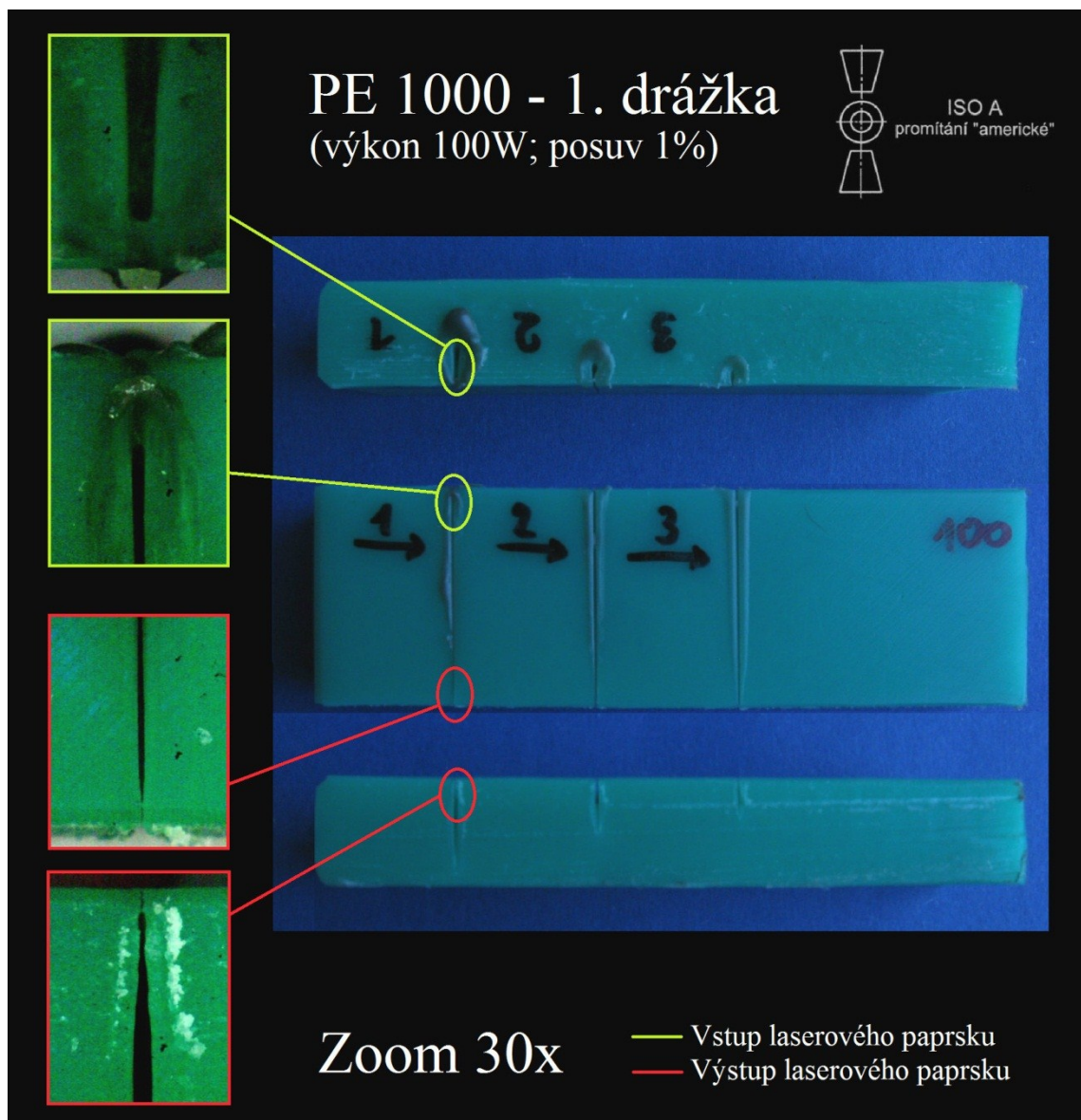
Obr. 49 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky

Na fotografiích 3. drážky materiálu PMMA (100W) lze vidět (stejně jako v případě 1. i 2. drážky) stejné úkazy, což potvrzuje domněnku, že je výkon hodnoty 100W pro dodaný vzorek z PMMA příliš velký. Místa vstupu laserového paprsku jsou načernalá a na výstupní části drážky lze spatřit (stejně jako v případě 1. i 2. drážky) náznak vystouplých okrajů vlivem velké síly paprsku.

Celkově tak lze v rámci zhotovených drážek u PMMA při 100W říci, že u tohoto materiálu bude nutno podstoupit variantu snížení výkonu, neboť se u všech tří parametrů v rámci zkušebního zkoumání digitálním mikroskopem projevilo podobných degradací a defektů na příslušných stranách daného vzorku.



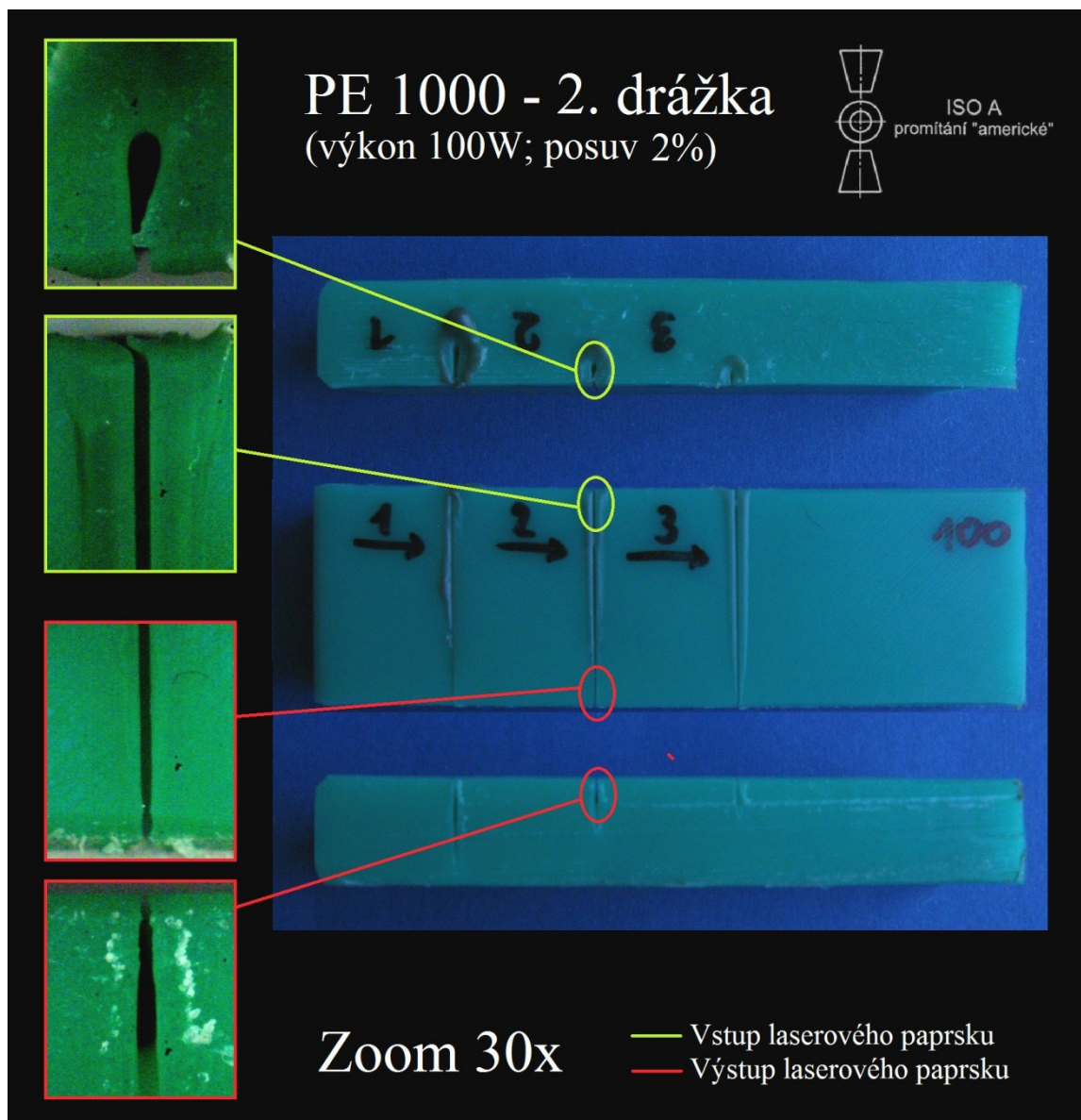
### 7.1.10 PE 1000 – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 50 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky

Na fotografiích 1. drážky materiálu PE 1000 lze vidět převážně na vstupu laserového paprsku velmi širokou drážku, která při pohledu z vrchu vykazuje načernalá místa, tedy jistou degradaci spatřitelnou pouhým okem. Zároveň je zde vidět nárůstek vrstvy, která opět především na vstupu je velmi zřetelná. Řez se zdá být směrem k výstupu užší, avšak na boční straně u výstupu lze vidět opět velmi široký průřez materiálem. Tento průběh drážky je velmi zajímavý.

### 7.1.11 PE 1000 – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%)

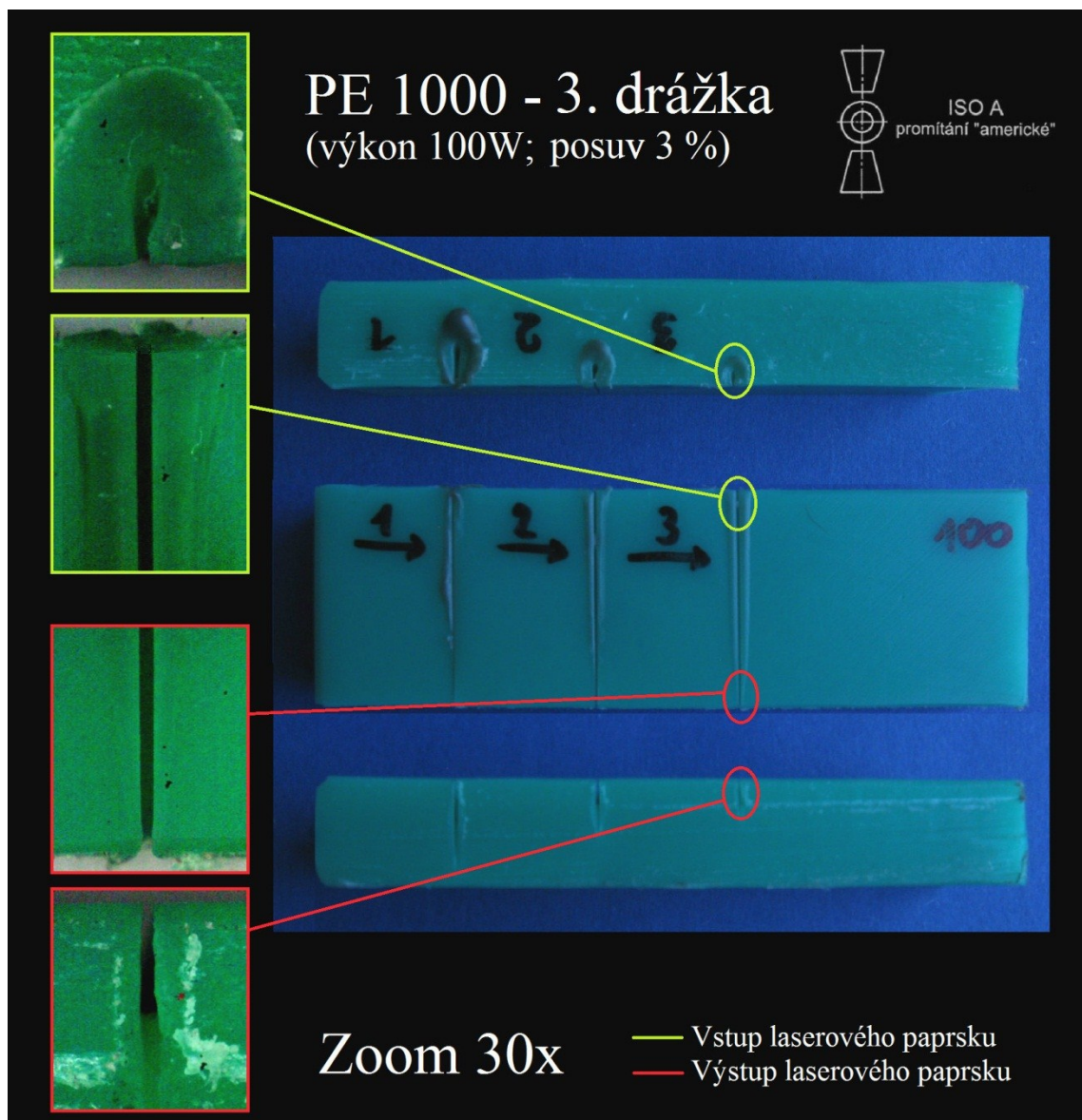


Obr. 51 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky

Na fotografiích 2. drážky materiálu PE 1000 lze vidět opět výstupky materiálu, jež se zdají být u vstupu laserového paprsku mnohem výraznější než směrem k jeho výstupu. I zde dochází k načernalým místům, avšak zrychlením posuvu na hodnotu 2% se tento jev lehce eliminoval. S tím společně však také zřejmě a zcela logicky klesl průřez, co se hloubky týče.



### 7.1.12 PE 1000 – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)

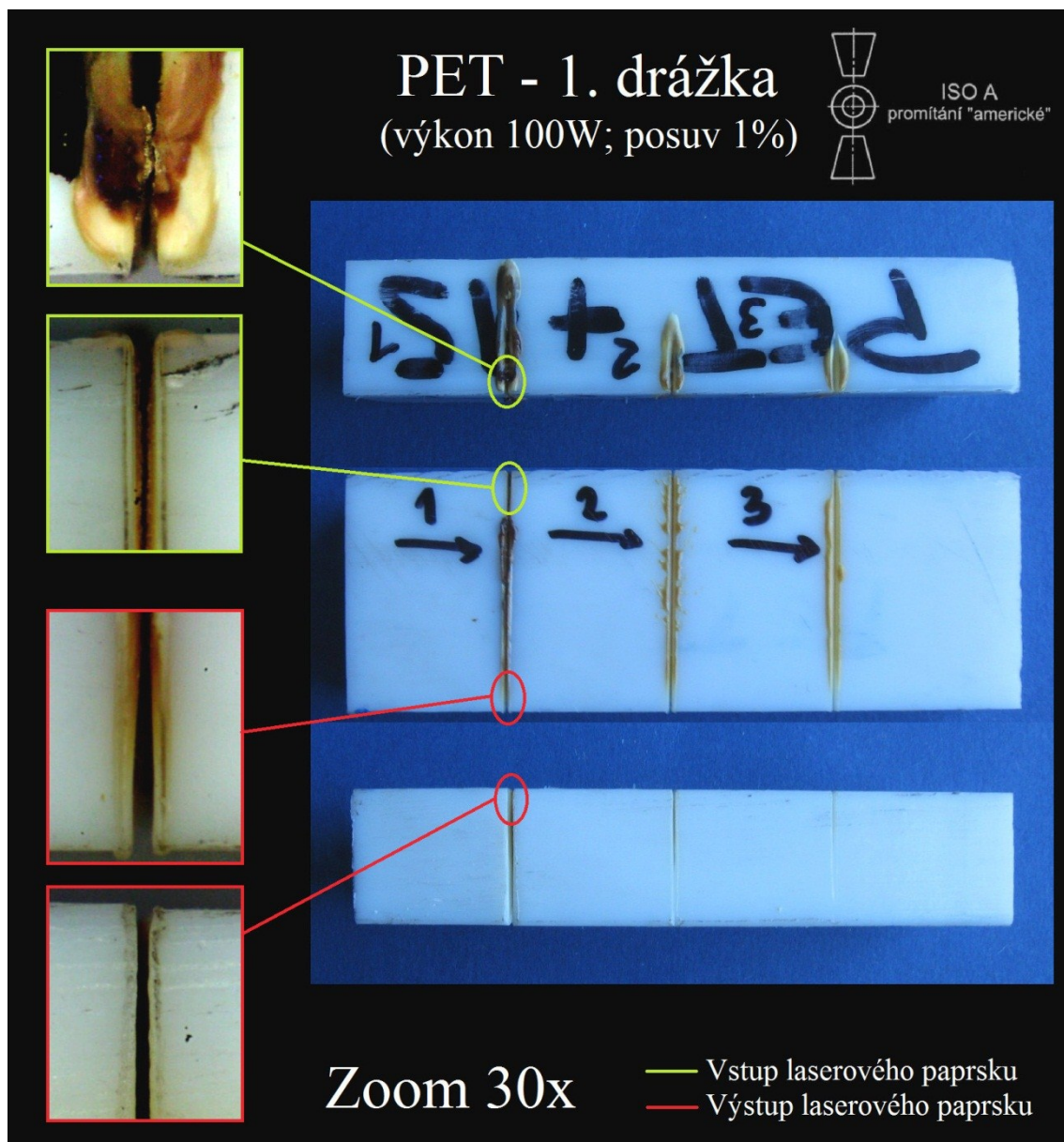


Obr. 52 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky

Na fotografiích 3. drážky materiálu PE 1000 lze vidět rovněž výstupky nataveného materiálu, přičemž načernalých míst je zde minimum, skoro až žádné. Zvýšením posuvu na hodnotu 3% je řez v rámci předchozích řezů velice čitelný a kontinuální, avšak hloubka je zde již při tomto posuzování zřejmě nejmenší.

Celkově tak lze v rámci zhotovených drážek u PE 1000 říct, že materiál zcela jistě degraduje a největší okem spatřitelné degradace jsou u plného výkonu, tedy u nejpomalejšího 1 % posuvu o hodnotě  $15,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 7.1.13 PET – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)

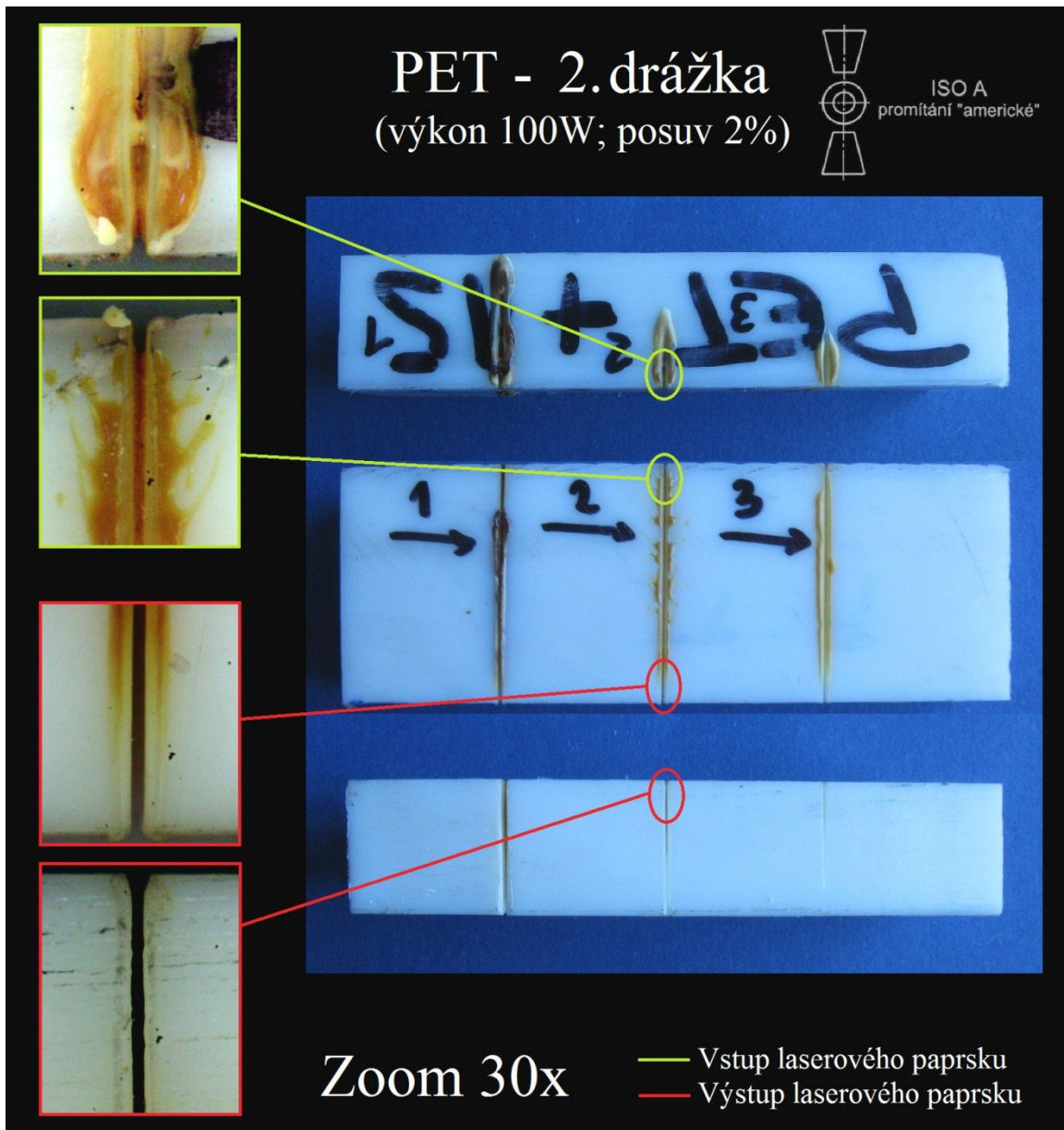


Obr. 53 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky

Na fotografiích 1. drážky materiálu PET lze vidět silně spálená místa, a to převážně na vstupní boční straně vzorku. Při řezání materiál vykazoval štiplavý nepříjemný zápach, který je pro tento polymer typický. Degradace, která se na vzorku projevila, je na základě myšlenky této diplomové práce důvodná pro zamítnutí tohoto materiálu pro další zkoumání. Všeobecně je však zajímavé, jak se tento materiál při řezání choval a chová – totiž – došlo zde k velmi hlubokému řezu, který na výstupně straně již vypadá poněkud lépe.



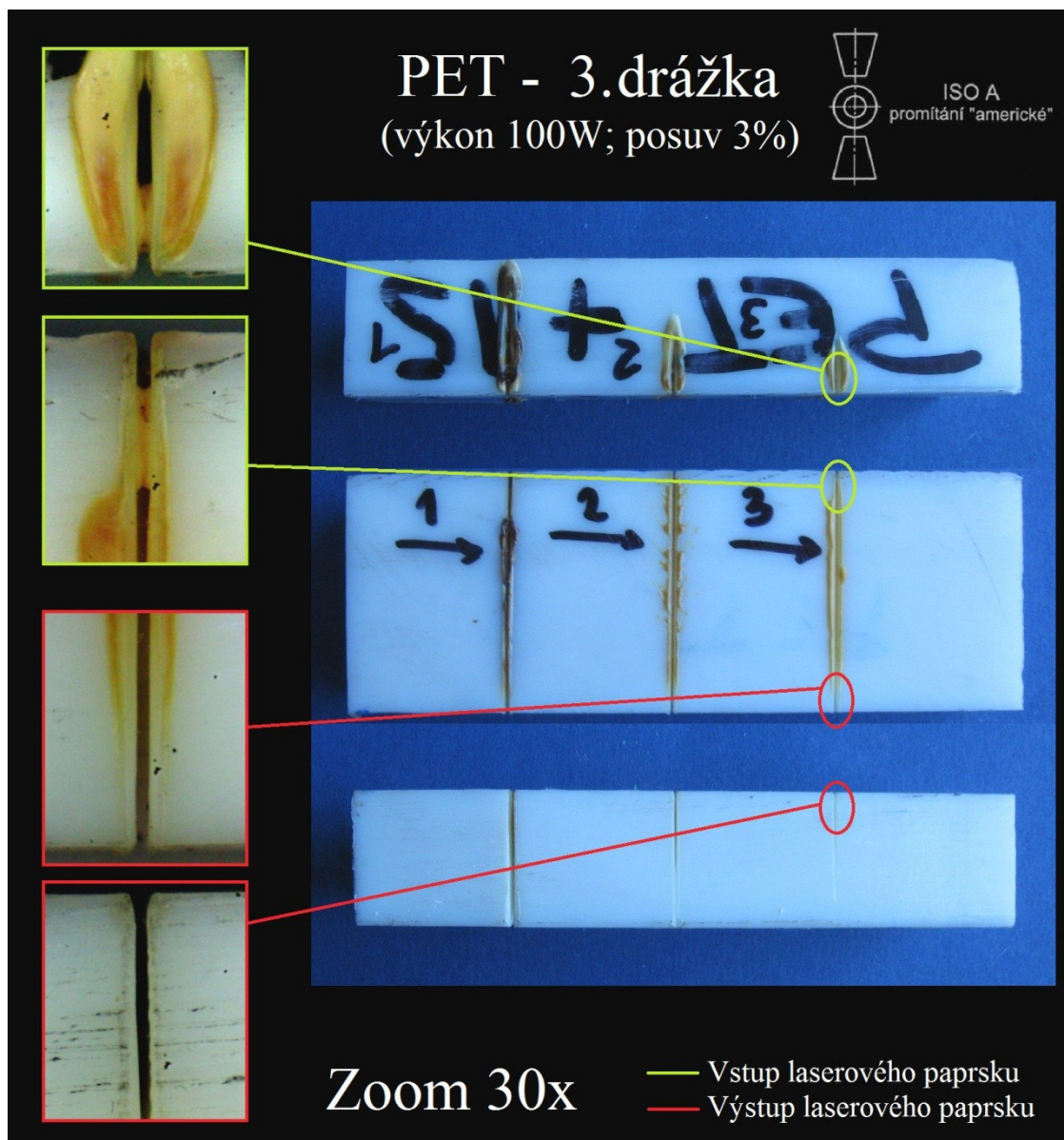
#### 7.1.14 PET – 2. drážka (výkon 100W; posuv 2%)



Obr. 54 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky

Na fotografiích 2. drážky materiálu PET lze vidět stejně degradovaný materiál, a to opět převážně na vstupní straně laserového paprsku do materiálu. Tato degradace je zřejmá při všech nastaveních vstupních parametrů. Je zřejmé, že se zrychlením posuvu jsou spálená místa méně výrazná, avšak přesto zde je degradace neslučitelná s označením řezu, resp. materiálu za čitelný a použitelný.

### 7.1.15 PET – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



Obr. 55 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky

Na fotografiích 3. drážky materiálu PET se vyskytují stejná místa jako u 2. a 1. drážky. Změna parametrů zde nehraje příliš velkou roli, přestože, zdá se, jsou místa spálená méně – stejně tak se ovšem snížila hloubka řezu.

Celkově tak lze v rámci zhotovených drážek u PET říci, že za žádných vstupních parametrů nebylo docíleno potřebného řezu, čímž se myslí především čitelného a měřitelného. Stejně tak je pochyb o využití laserového dělení, resp. obrábění tohoto materiálu v praxi.



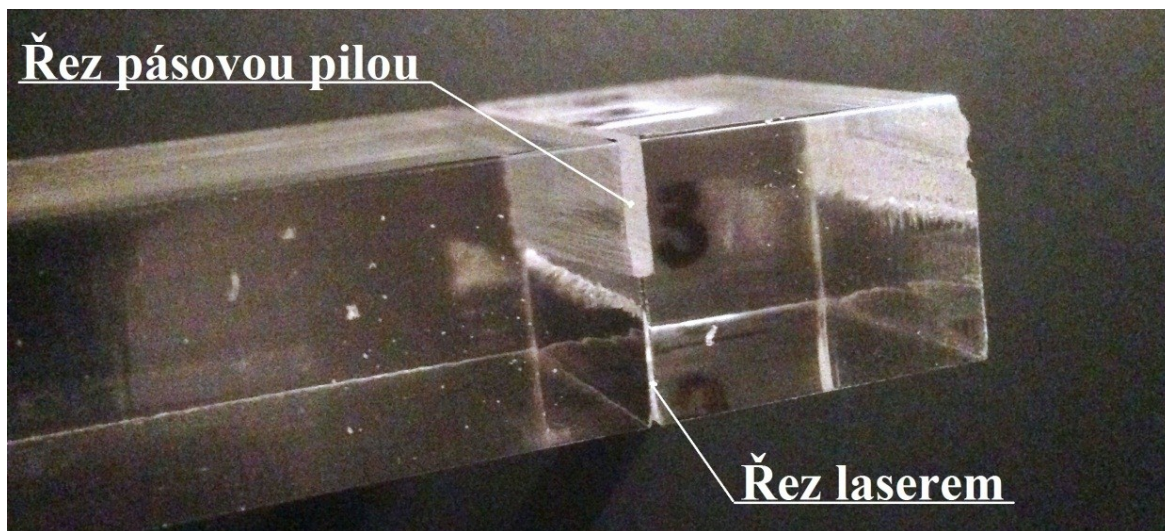
## 7.2 Měření hloubek jednotlivých řezů

Grafické zobrazení hloubek řezů je zobrazeno v obrázku 51, přičemž toto měření probíhalo vždy třikrát, a to na počátku vstupu paprsku, dále uprostřed a také na výstupní straně řezu. Tedy pro grafické zhodnocení bylo použito aritmetických průměrů z těchto hodnot. Měření probíhalo digitálním posuvným měřidlem. Zde stojí za zmínku, že byly použity i hodnoty hloubek drážek u těch materiálů, jež nebudou nadále zkoumány. Jsou zde tedy zobrazeny a zhodnoceny materiály PMMA, PP, PE 1000, POM C, POM H, PA 66, PET a LFX (neboli PA 6 G + olej).

Pro zpřístupnění řezu pro toto, ale i veškerá následující měření tak bylo potřeba rozřezat vzorky tak, aby bylo možno zpřístupnit obrobenou plochu. K tomuto úkonu bylo využito pásové pily PPK 90U. Tímto se vzorky rozpadly na jednotlivé kostky.

### 7.2.1 Zpřístupnění řezů jednotlivých drážek

V rámci zpřístupnění řezu bylo nutno tyto plochy z druhé strany naříznout pásovou pilou. Tento zásah pro zpřístupnění řezů je pro následné laboratorní zkoušky nezbytný. Ukázka provedení řezu je vyobrazena na vzorku z materiálu PMMA, kde lze díky jeho transparentnosti spatřit zřejmý postup, tedy průběh uvolnění jednotlivých ploch, resp. laserem vedené řezy.

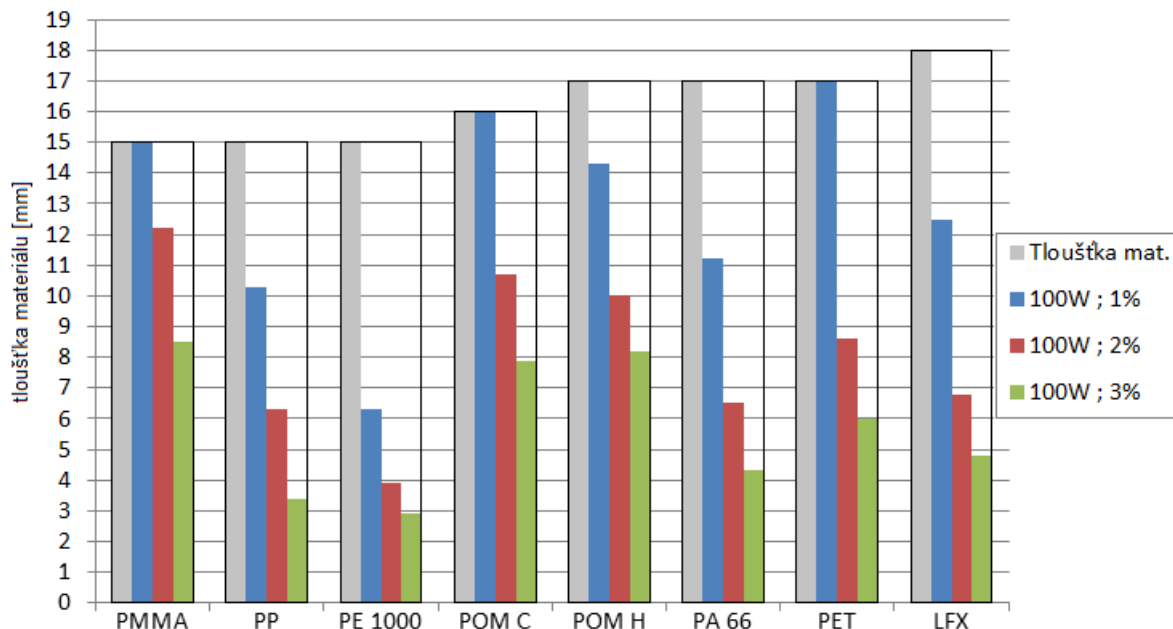


Obr. 56 – Zpřístupnění obrobené plochy pomocí nařezání pásovou pilou

### 7.2.2 Hloubky řezů pro jednotlivé materiály

Lze vidět, že materiály, jež byly nastavenými parametry laserového zařízení prořezány skrz celou tloušťku, jsou pouze PMMA, POM C a PET, přičemž u všech těchto se jedná

pouze o 1. drážku, resp. výkon paprsku s nastavením nejpomalejšího posuvu, tedy 1% hodnoty (tj. hodnoty 15,2 mm/s). Z důvodu nestejně tloušťky vzorků je zde zakresleno též jednotlivých rozměrů této tloušťky vůči hloubkám těchto řezů.



Obr. 57 – Grafické zobrazení hloubek řezů a tloušťky základního materiálu

### 7.3 3D snímání a vyhodnocení povrchů

Tato operace byla provedena na přístroji Talysurf CLI 500, aby bylo možno zobrazit povrch obrobené plochy příslušného vzorku v prostorovém zobrazení, tj. ve 3D prostoru a pokud možno tak sejmout i drsnost dané obrobené plochy.

Pro vzorky bylo využito měření konfokální sondou, tedy bezkontaktním způsobem měření povrchů. V příložených obrázcích, které jsou získány z prostředí programu Taly-map, lze vidět barevně rozlišený průběh povrchů. Tyto průběhy jsou zde uvedeny jak ve dvouosém, tak tříosém, tj. prostorovém zobrazení, přičemž je zde dále vyhodnoceno grafu profilu. Materiály, které touto metodou byly zkoumány, jsou POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž u všech těchto bylo měřeno vždy jen 1. a 3. drážky. Vzorky byly zkoumány vždy v rozsahu šířky 5 mm, přičemž počet interních měření dosahoval vždy počtu závislého na hloubce řezu, neboť měření sondy probíhá kolmo na směr působení laserového paprsku a zároveň rovnoběžně s čelem obráběné plochy.

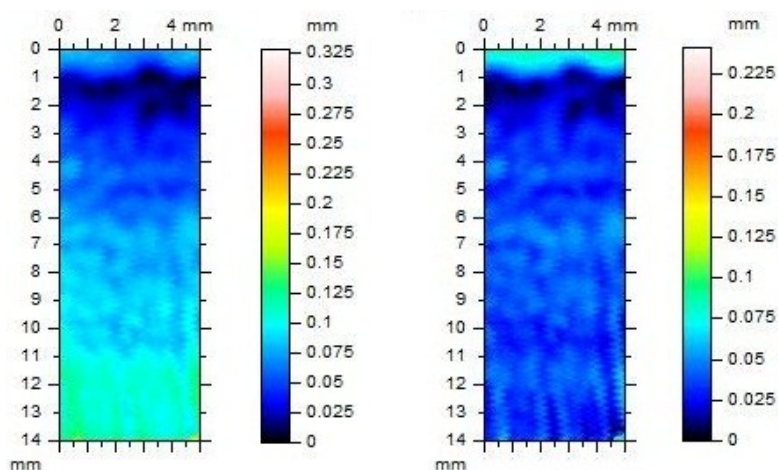
Prvně příloženým obrázkem je vždy dvojice naskenovaných povrchů ve 2D, kde u levého je obsažena a zobrazena též vlnitost povrchu, která je součástí skutečného povrchu.



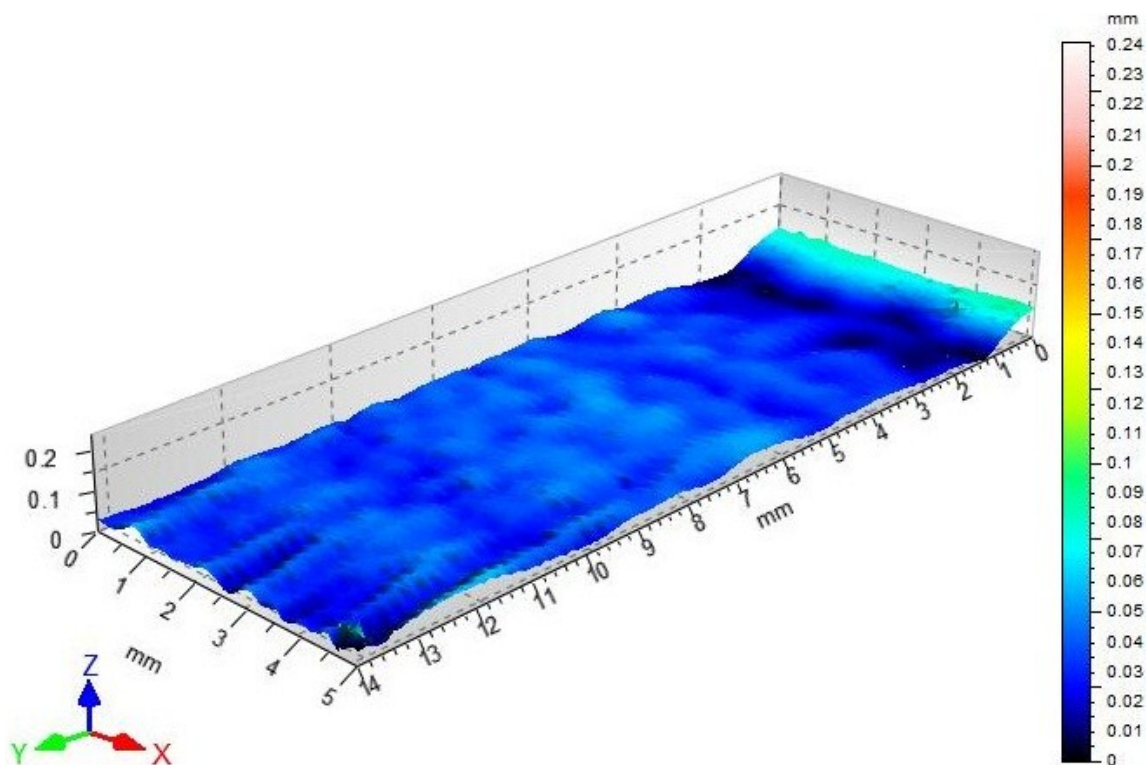
Tento faktor je však doporučeno zanedbat – proto je zde zobrazeno vždy i povrchu po vyrovnání vlnitosti, tedy zařazení příslušné korekce v prostředí programu Talysurf. Pro tento povrch ve 2D je pak následně vždy zobrazeno pohledu ve 3D, kde lze velmi čitelně vidět průběh povrchu obrobeneé plochy pro příslušný řez.

Blíže je tato metoda včetně popisu zařízení popsána v kapitole 6.4.

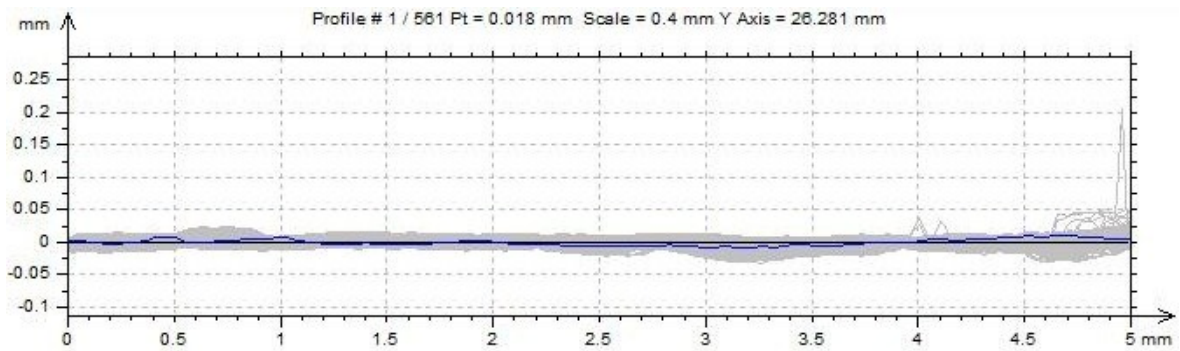
### 7.3.1 POM C – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 58 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 59 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu POM C při výkonu řezání 100W

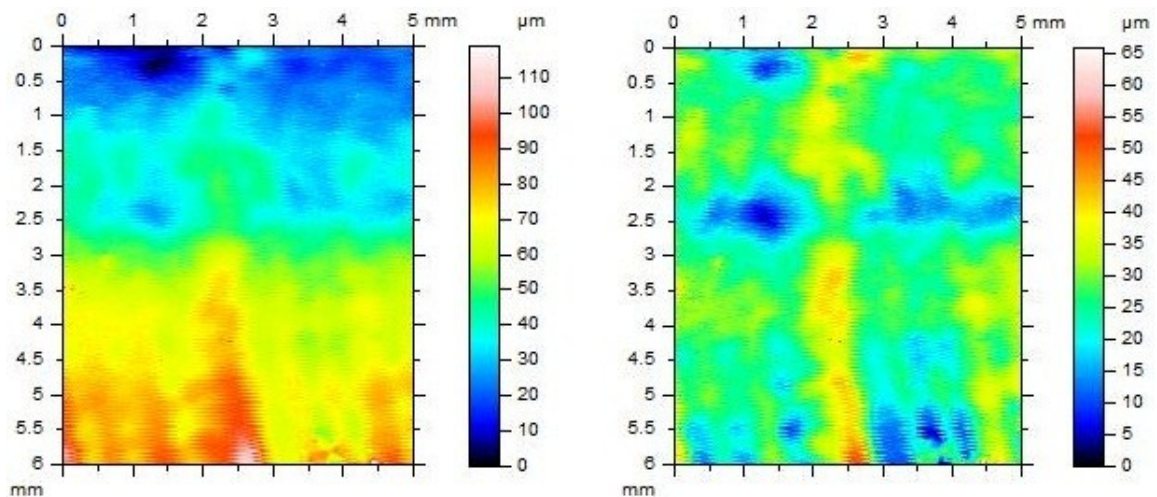


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	mm	0.005	0.002	0.002	0.016
Ra	mm	0.001	0.001	0.001	0.003

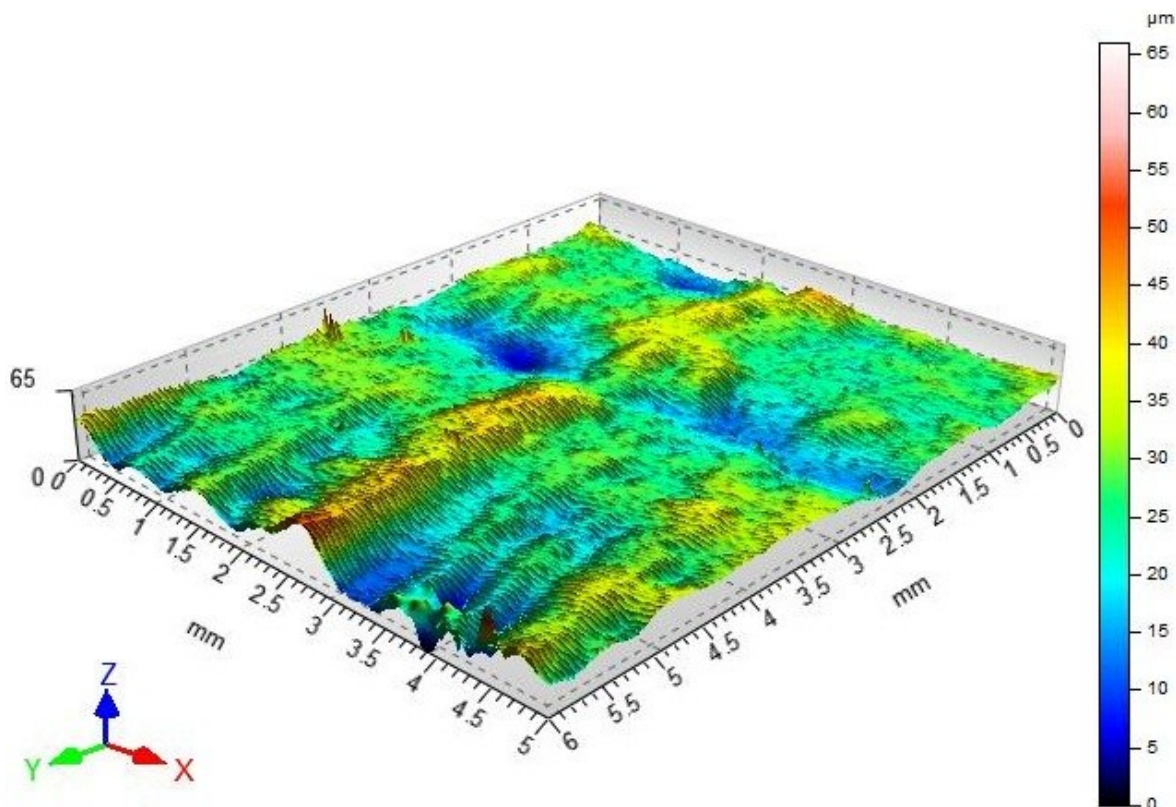
*Obr. 60 – Zobrazení drsnosti povrchu*

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímání 560. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 1  $\mu\text{m}$ .

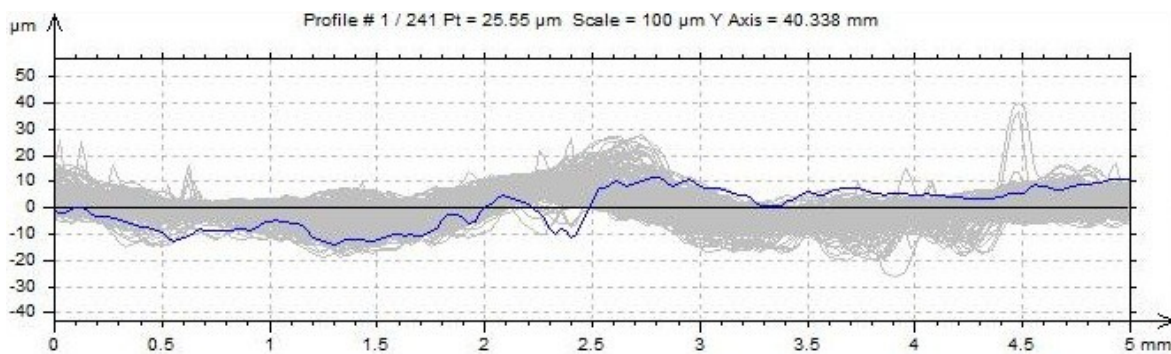
### 7.3.2 POM C – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



*Obr. 61 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení*



Obr. 62 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu POM C při výkonu řezání 100W



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

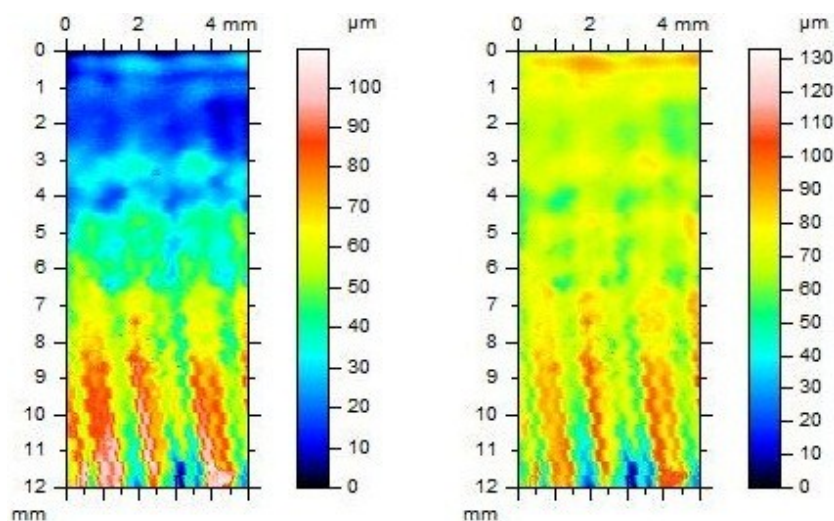
Obr. 63 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímaní 240. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 1,343 µm. To je hodnota nepatrně horší, což je zřejmý

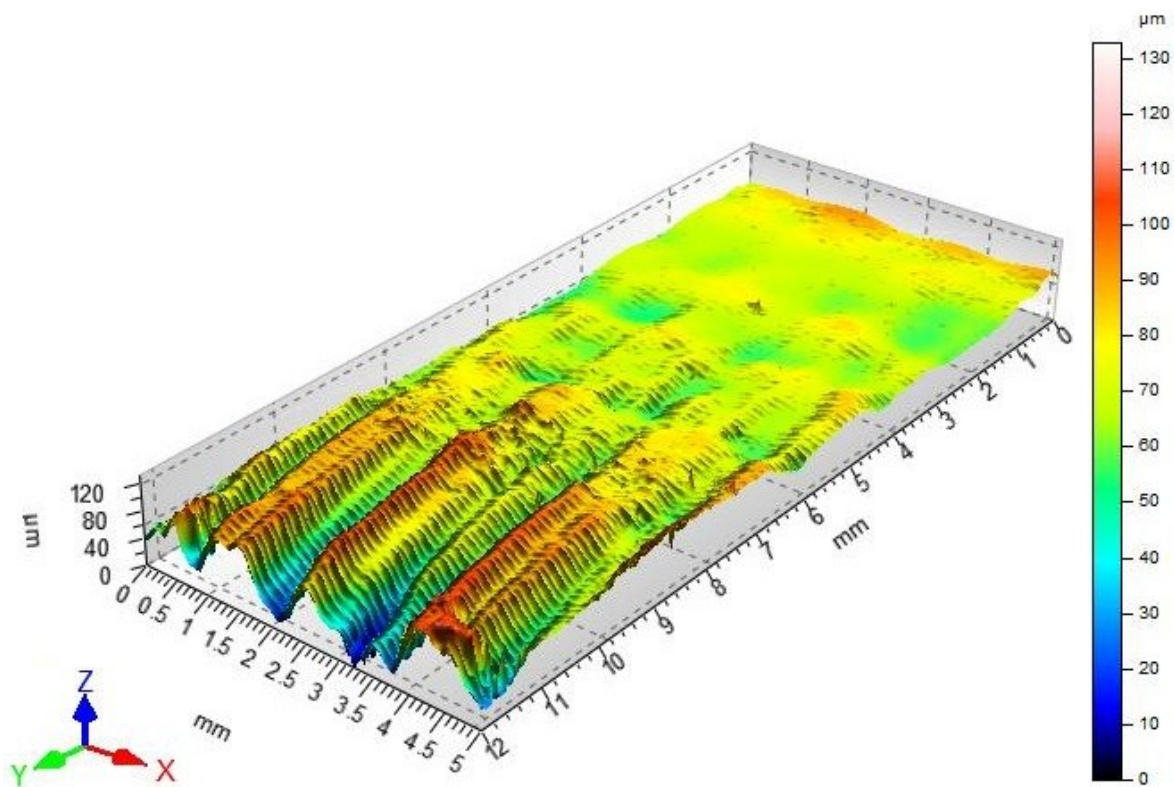


důkaz o vlivu posuvu na drsnost povrchu tohoto materiálu. Tedy lepší drsnosti bylo dosaženo při pomalejším posuvu o hodnotě 1%.

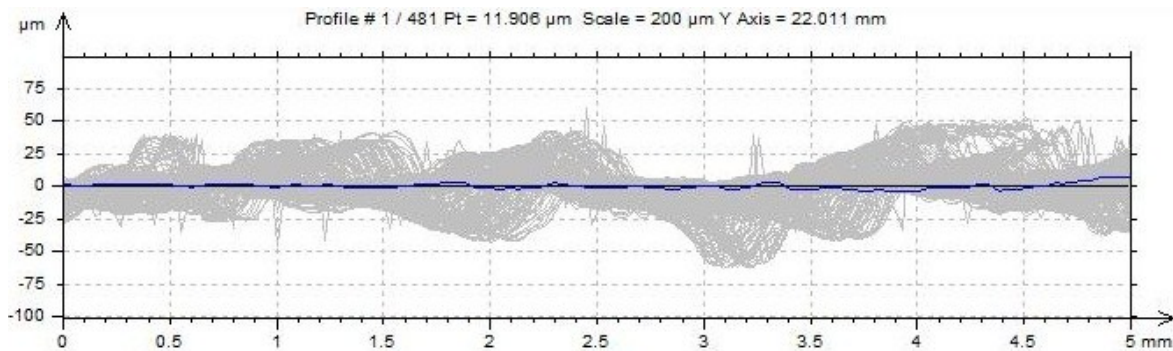
### 7.3.3 POM H – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 64 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 65 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu POM H při výkonu řezání 100W

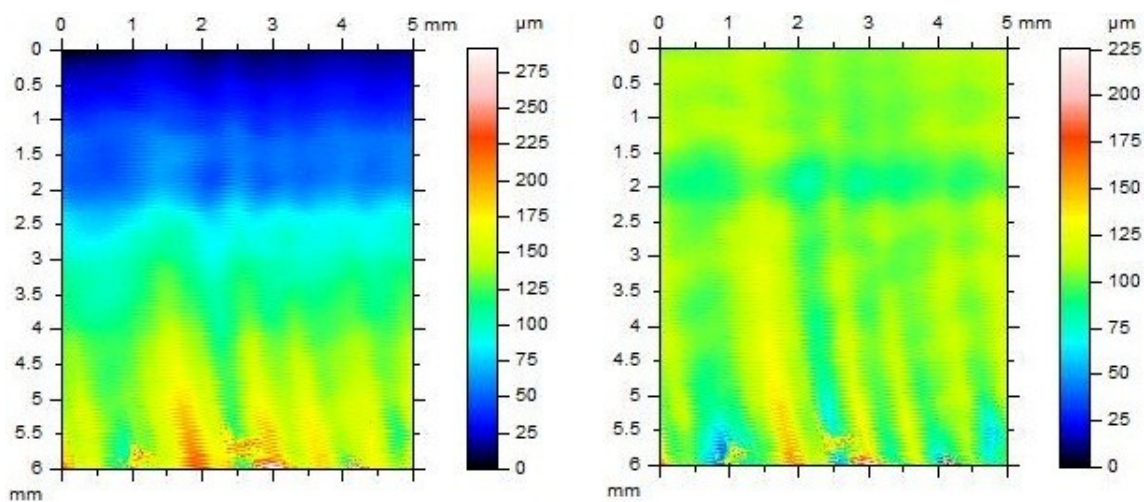


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	µm	10.555	9.234	1.936	35.778
Ra	µm	2.645	2.46	0.42	9.313

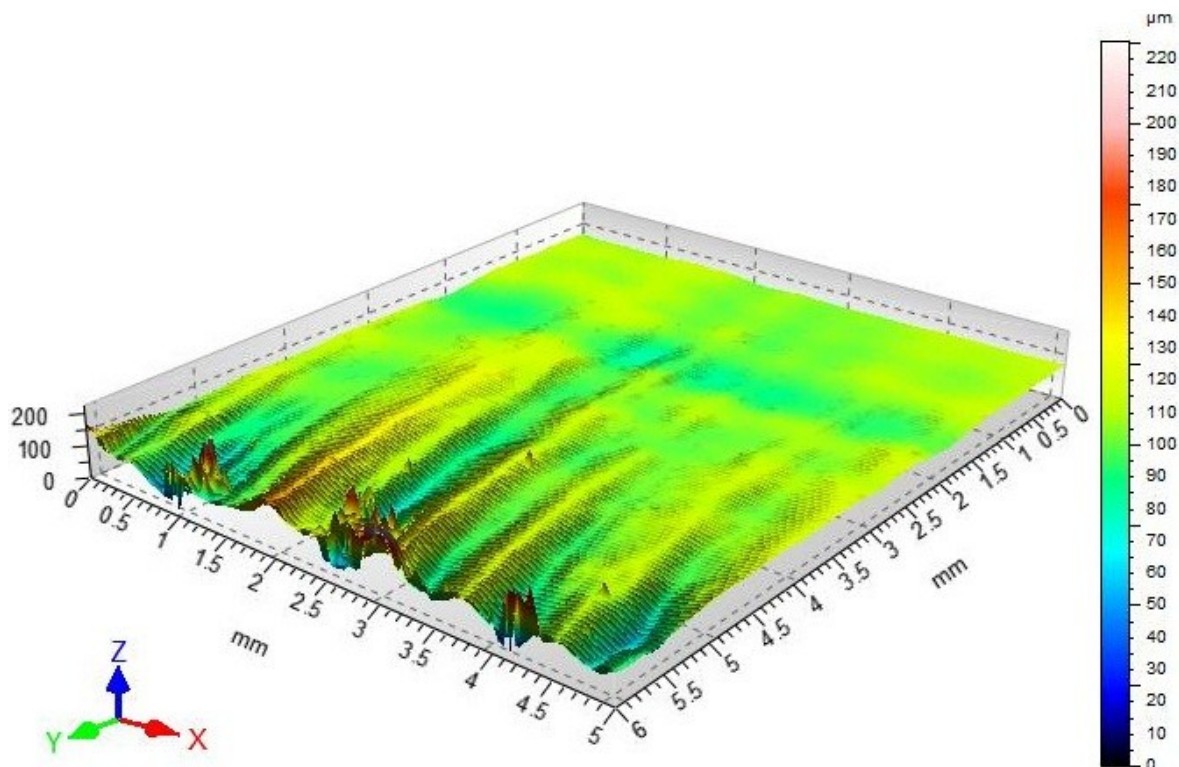
Obr. 66 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snížení 480. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 2,645 µm.

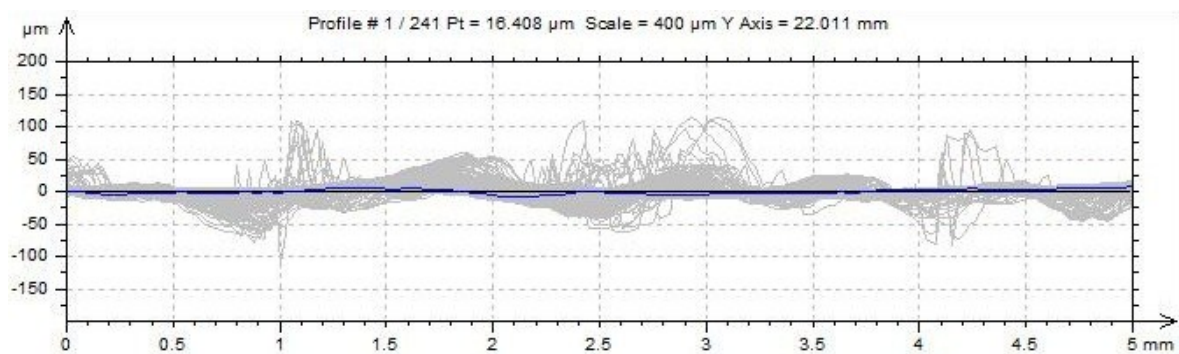
### 7.3.4 POM H – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



Obr. 67 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 68 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu POM H při výkonu řezání 100W



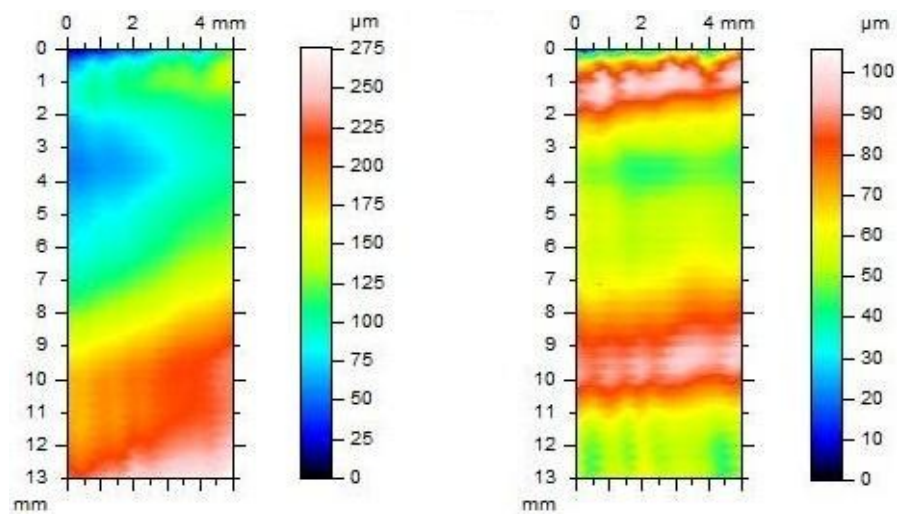
ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	µm	11.609	15.637	2.145	90.44
Ra	µm	2.694	3.054	0.513	17.898

Obr. 69 – Zobrazení drsnosti povrchu

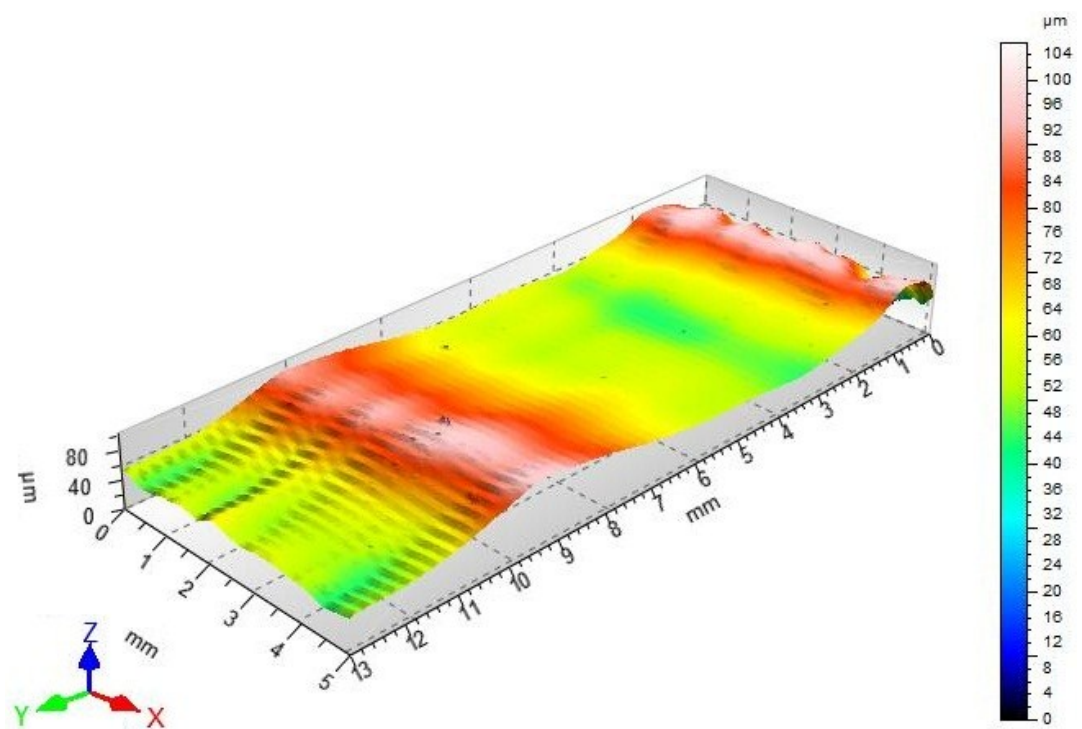
Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímaní 240. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 2,694 µm. Zde jest hodnota drsnosti vůči hodnotě při posuvu 1% hodnoty takřka stejná. Tedy zdá se, že při rozptylu vstupních parametrů, tento materiál nenese důkaz změny na drsnosti povrchu.



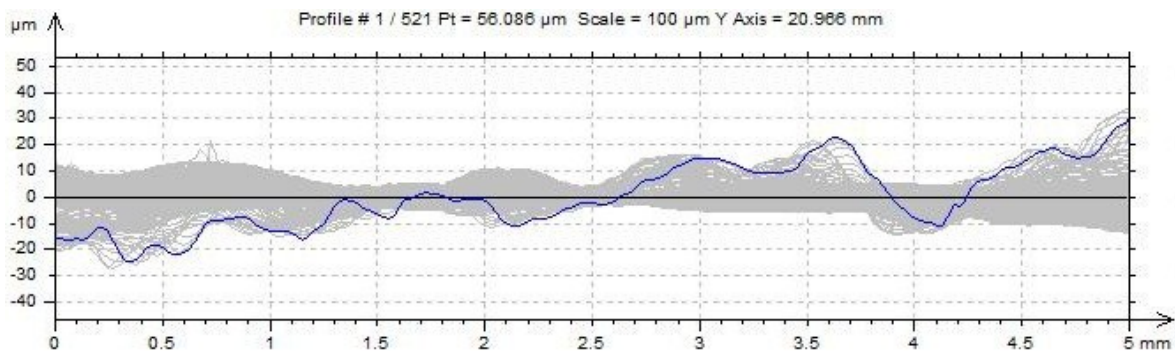
### 7.3.5 PMMA – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 70 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 71 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PMMA při výkonu řezání 100W

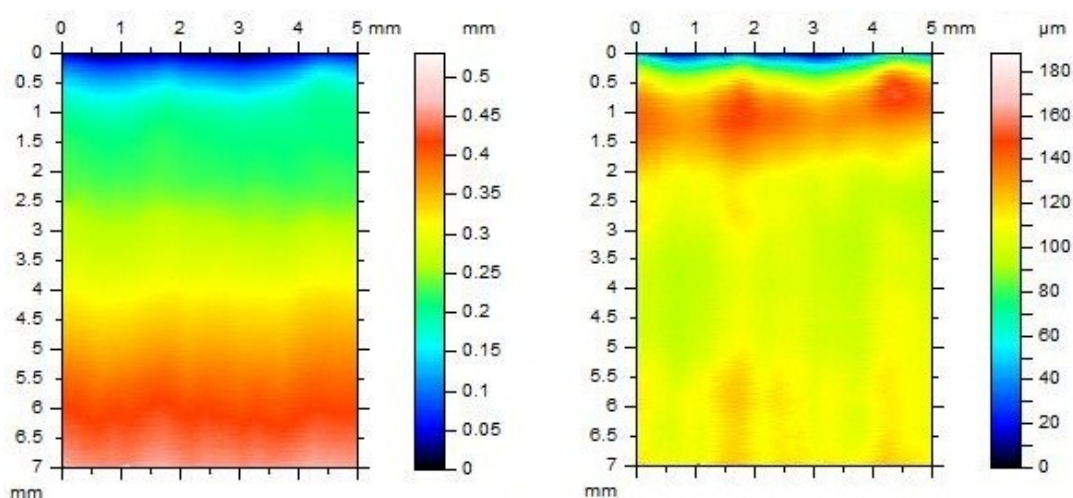


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	µm	1.61	1.53	0.497	9.865
Ra	µm	0.414	0.398	0.122	2.38

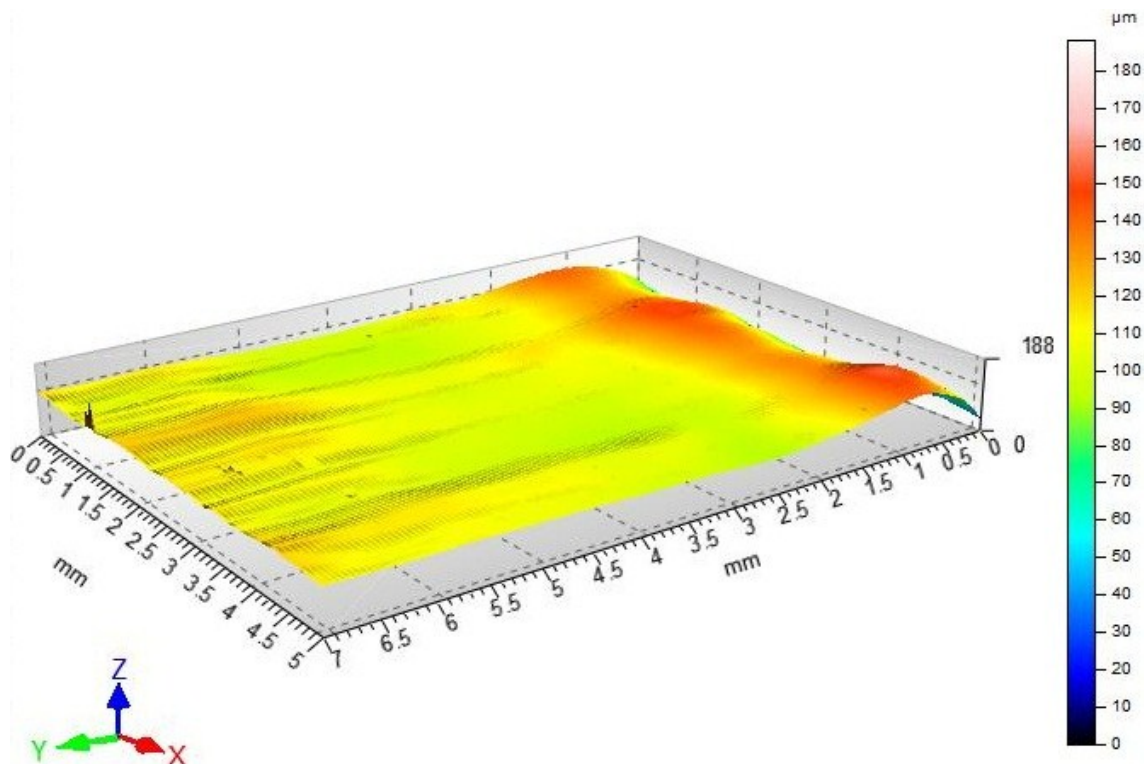
Obr. 72 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímání 520. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 0,414 µm. Na 3D vyobrazení se materiál PMMA chová velmi zajímavě, neboť je zvláště vlnitý. Hodnota drsnosti je však důkazem o čistotě a výborném průběhu řezu. Tedy zde řečená „vlnitost“ je dosti irelevantní pojem, neboť se při 3D vizualizaci pohybujeme v řádech mikrometrů a drsnost tohoto materiálu je dosud nejlepší.

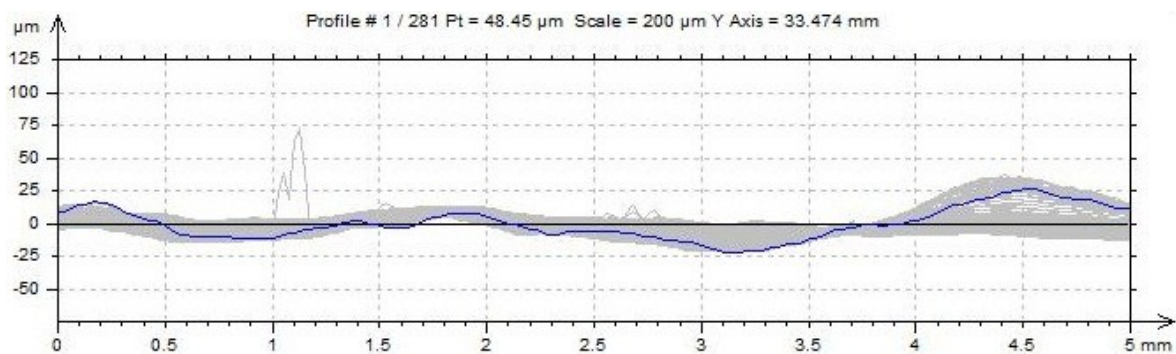
### 7.3.6 PMMA – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



Obr. 73 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 74 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PMMA při výkonu řezání 100W



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

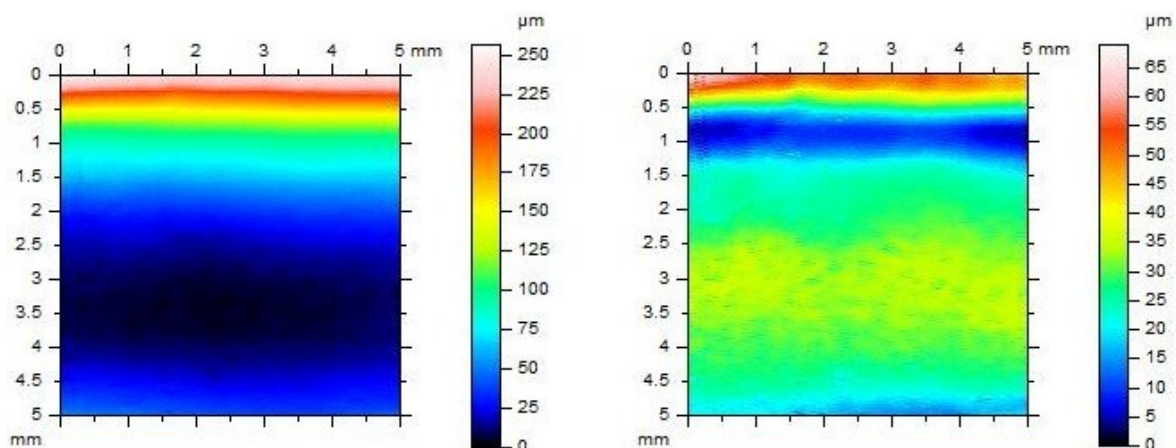
Obr. 75 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímaní 280. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 0,777 µm. Zde je vidět, že zvýšení posuvu na hodnotu 3% se projevilo jako negativním pro hodnotu drsnosti povrchu. Přestože je tato hodnota velmi dobrá, vůči srovnání s pomalejším řezem (1% posuvem při zachování stejného vý-

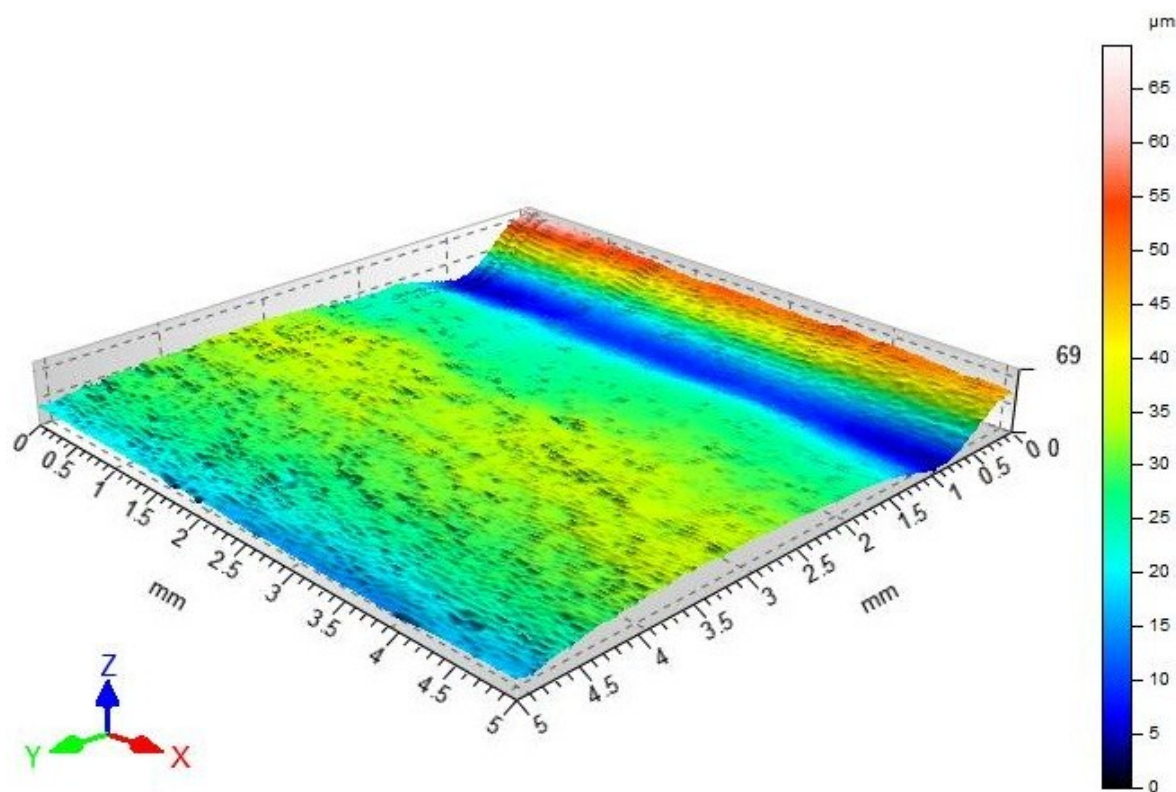


konu) je horší a svědčí o zřejmé úměře mezi rychlostí řezu a drsností plochy. Materiál PMMA je všeobecně známý svou výbornou obrobitelností. Hodnoty v obou případech jsou velmi kvalitní.

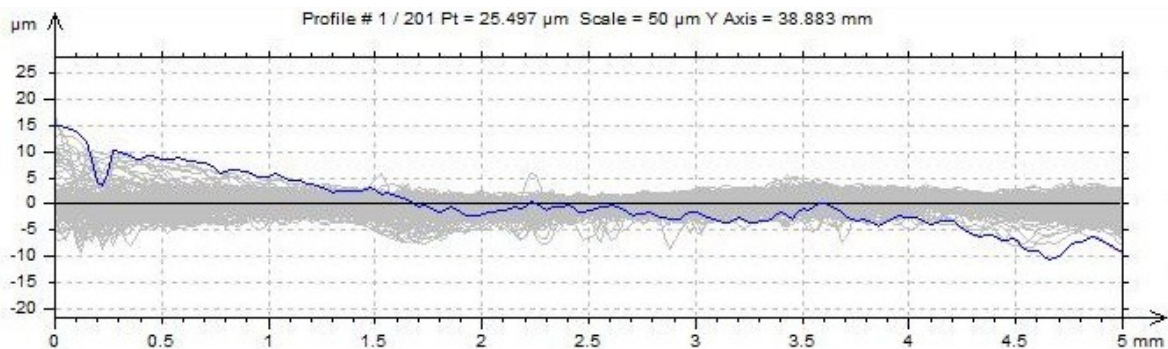
### 7.3.7 PE 1000 – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 76 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 77 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PE1000 při výkonu řezání 100W

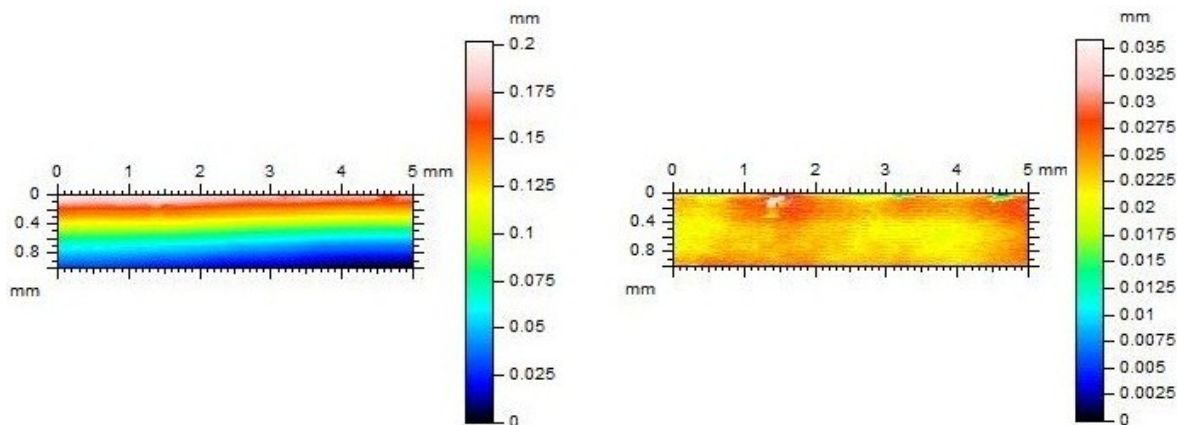


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rz	µm	2.489	0.664	1.227	4.522
Ra	µm	0.501	0.125	0.275	0.907

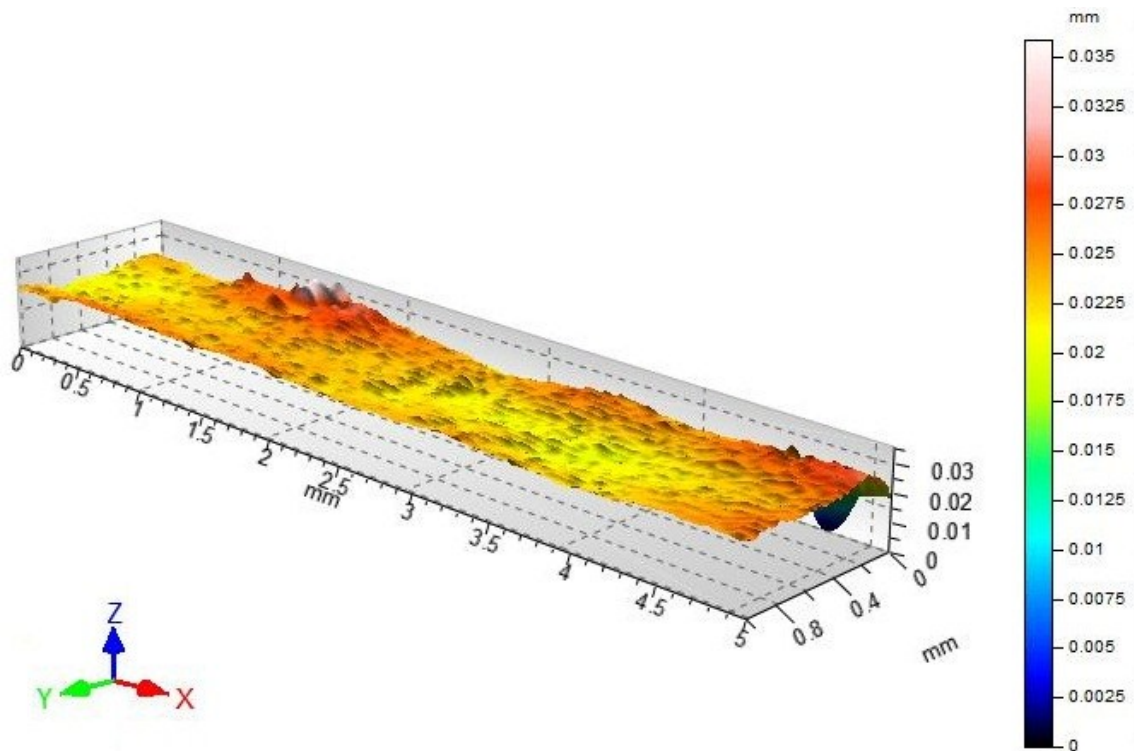
Obr. 78 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímání 200. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 0,501 µm. Tato hodnota je až podezřele dobrá. Vůči průvodním problémům u obrábění tohoto materiálu je tak zřejmá chyba měření. Otázkou zůstává řez 3. drážky, jehož popis a vizualizace je popsána a vyobrazena jako následující.

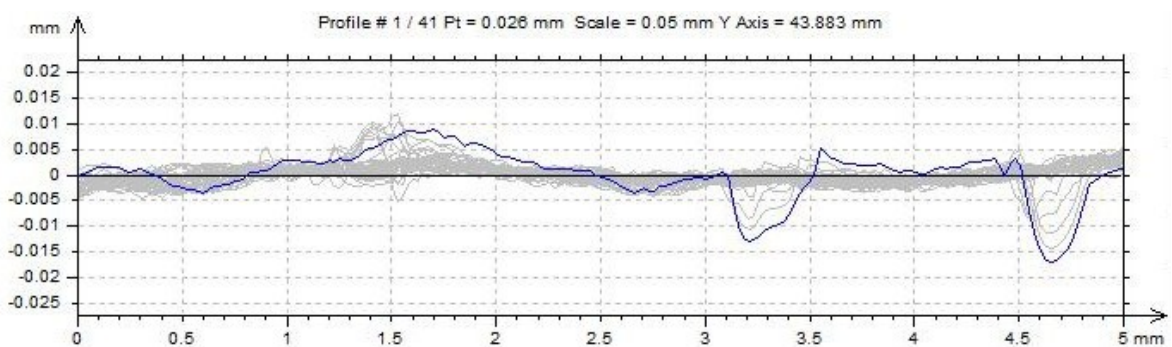
### 7.3.8 PE 1000 – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



Obr. 79 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění



Obr. 80 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PE1000 při výkonu řezání 100W



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

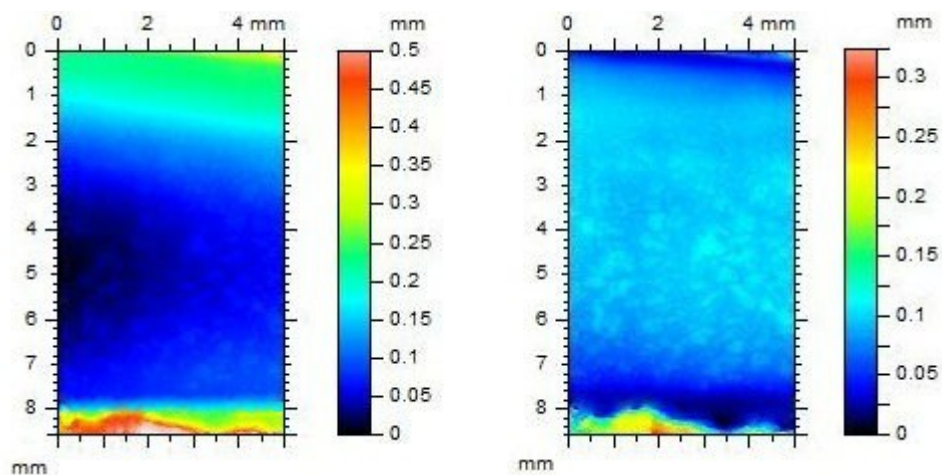
Obr. 81 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět a jak šlo na základě posouzení s jinými materiály vidět i u předchozí drážky, pro vykreslení tohoto profilu byl počet snímání pouhých 40. U materiálu PE 1000 celkově docházelo k velmi nepříznivému průběhu řezu o všeobecně malých hloubkách, což by zřejmě nevalilo. Výsledná hodnota Ra je však rovna nule, což dokazuje chybu měření. Již z předchozího posuzování je zřejmé, že povrch PE 1000 byl zalitý materiálem, který se

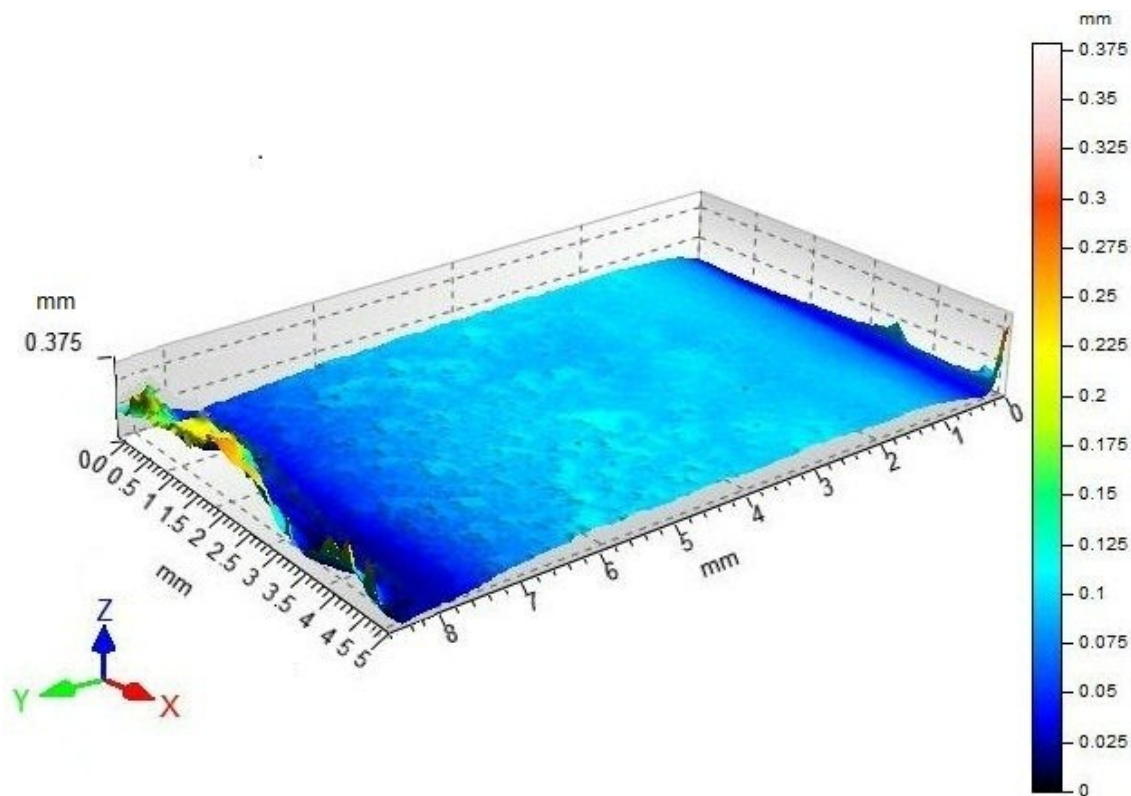


nestihl odpařit a proto v řezu i částečně zatuhl. Oproti jiným materiálům má tento materiál zcela jiný povrch a tato číselná chyba je toho zřejmým důkazem. Lze tedy říci, že obrobebný povrch není vhodný pro posuzování faktorů, jako je drsnost povrchu.

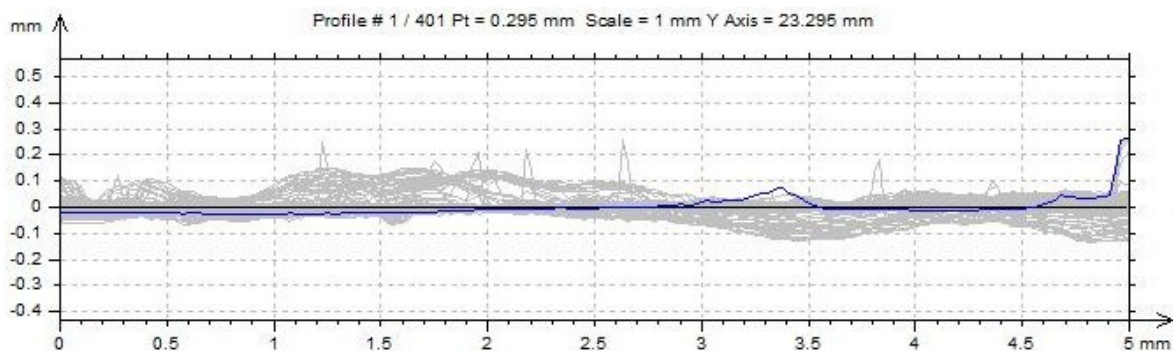
### 7.3.9 PP – 1. drážka (výkon 100W; posuv 1%)



Obr. 82 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 83 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PP při výkonu řezání 100W

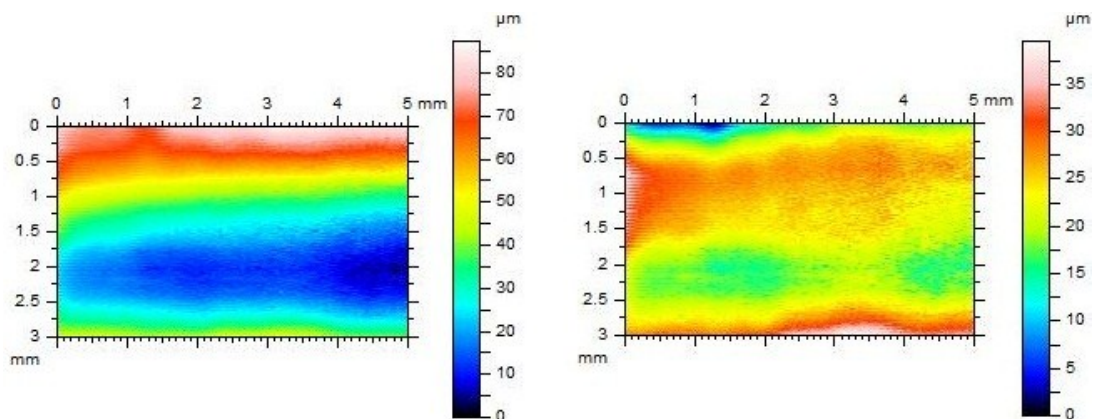


ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
<b>Rz</b>	mm	0.011	0.012	0.002	0.109
<b>Ra</b>	mm	0.002	0.002	0	0.016

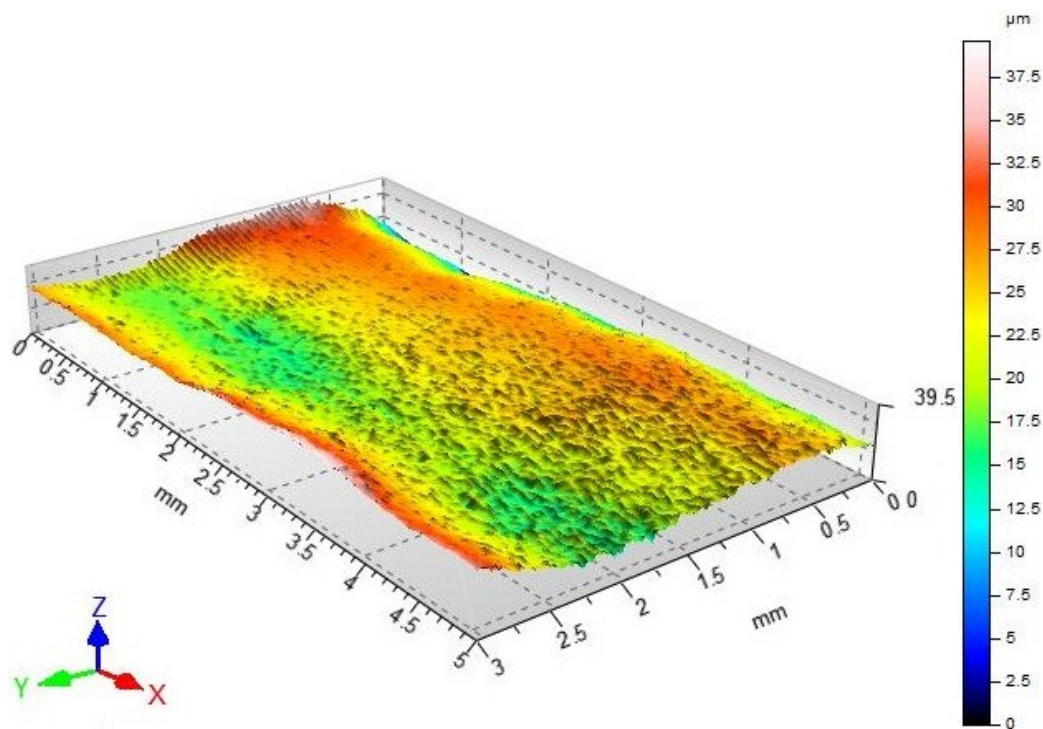
Obr. 84 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímání 400. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 0,002 mm, resp. 2  $\mu\text{m}$ . Tato hodnota prozatím nic nevykazuje, neboť Polypropylen byl stejně jako PE 1000 jeden z těch materiálů, kde příliš čitelný řez nenastal. Lze tedy očekávat stejný problém jako u zmíněného PE 1000.

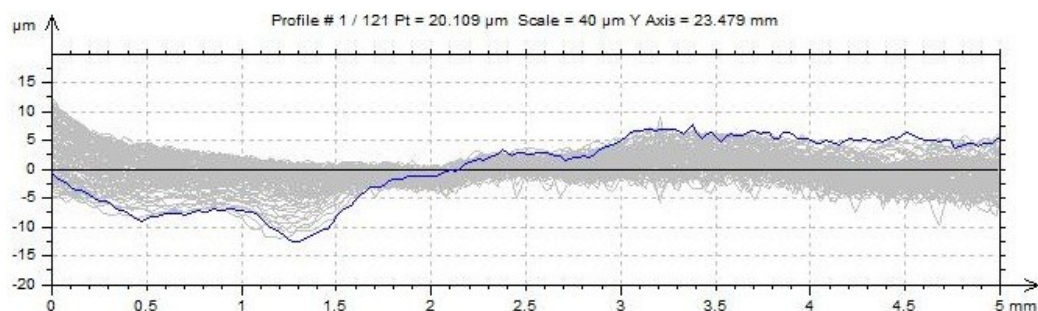
### 7.3.10 PP – 3. drážka (výkon 100W; posuv 3%)



Obr. 85 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímení



Obr. 86 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PP při výkonu řezání 100W



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. 87 – Zobrazení drsnosti povrchu

Jak lze vidět, pro vykreslení profilu byl počet snímaní 120. Průměrnou hodnotou drsnosti Ra pro tuto drážku je hodnota 0,49 µm. U materiálu PP celkově docházelo k malému průřezu vůči jiným materiálům. Povrch řezu byl zalitý materiálem a má oproti jiným materiálům zcela jiný povrch. Výsledná hodnota zde je velmi dobrá, avšak zároveň 4x lepší než u 1. drážky, což se vymyká pravidlům povrchů, jež byly obrobena čitelným způsobem. Tento materiál je tedy pro posouzení celkového vlivu posuvu na drsnost povrchu (stejně jako PE 1000) vyřazen – samozřejmě pouze v rámci tohoto posouzení.

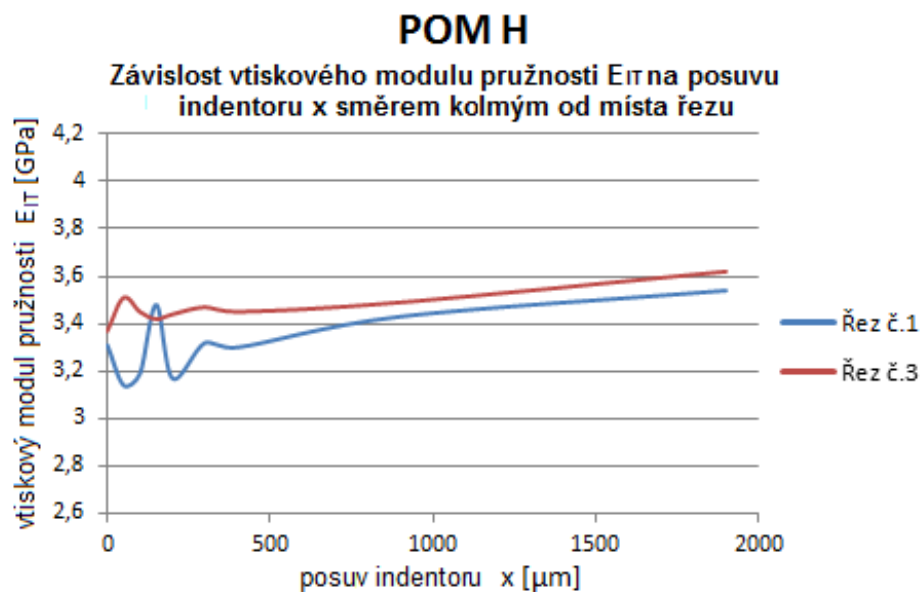
## 7.4 Měření vtiskového modulu pružnosti a mikrotvrlosti dle Vickerse

Toto měření proběhlo na mikrotvrdoměru Micro Combi Tester od švýcarské firmy CSM Instruments, a to dle normy ČSN EN ISO 6507-1, přičemž samotné měření bylo realizováno metodou DSI (z anglického Depth Sensing Indentation – tedy metoda založená na snímání hloubky vtisku). Touto metodou lze získat řadu údajů pro posouzení komplexního mechanického chování materiálu. Pro posouzení vybraných vzorků této zkoušky je zvoleno vtiskového modulu pružnosti  $E_{IT}$  a hodnot mikrotvrlosti  $H_{VIT}$  dle Vickerse.

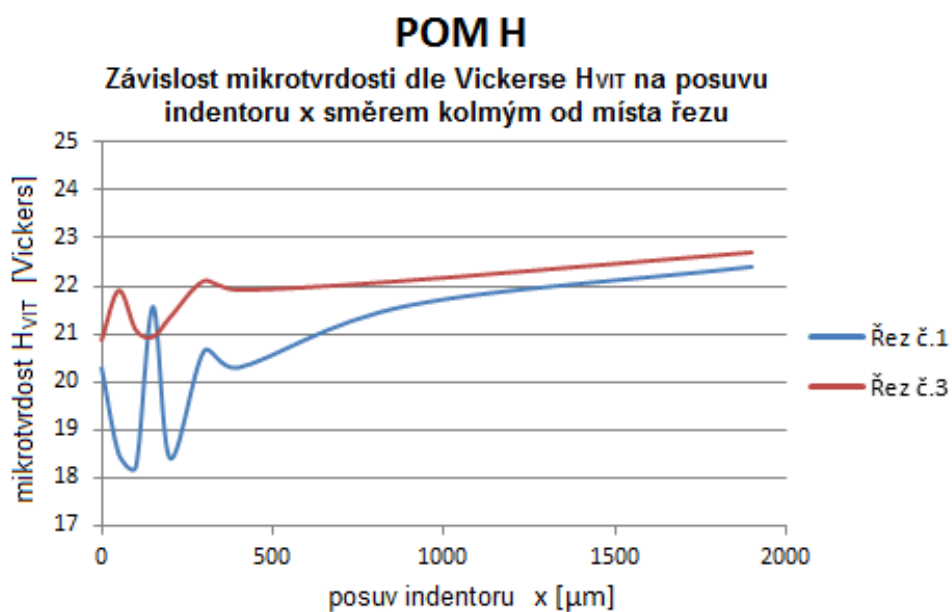
Zkušební zatížení zde bylo zvoleno 1 N a doba výdrže 10 s. Aby se dalo posoudit případného vlivu laserového zásahu na vliv mikrotvrlosti, jsou indentace (vtisky tělíska) provedeny vždy v posloupnosti 0 – 50 – 100 – 150 – 200 – 300 – 400 – 900 – 1900  $\mu\text{m}$  od místa řezu, přičemž v některých případech bylo dosaženo nejzazší hodnoty pouze 900  $\mu\text{m}$  od místa řezu. Ve všech případech však i tato vzdálenost zřejmě stačí pro posouzení tzv. základního, tj. neozářeného materiálu. Důraz u tohoto měření je kladen na oblast co nejbližší řezu, tj. oblast největšího ozáření laserem tak, aby bylo možno posoudit vliv tohoto ozáření na měřené veličiny. Stejně jako u předchozích metod, i zde bylo vybráno omezeného množství posuzovaných vzorků, a sice POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž u všech těchto bylo zkoumáno vždy jen 1. a 3. drážky. Zhodnocení je uvedeno a popsáno v souhrnném grafickém zobrazení všech materiálů. Proto jsou zde uvedeny grafy jednotlivých materiálů, a to z hlediska vždy daných dvou veličin.

Blíže je tato metoda včetně popisu zařízení popsána v kapitole 6.5.

## 7.4.1 POM H



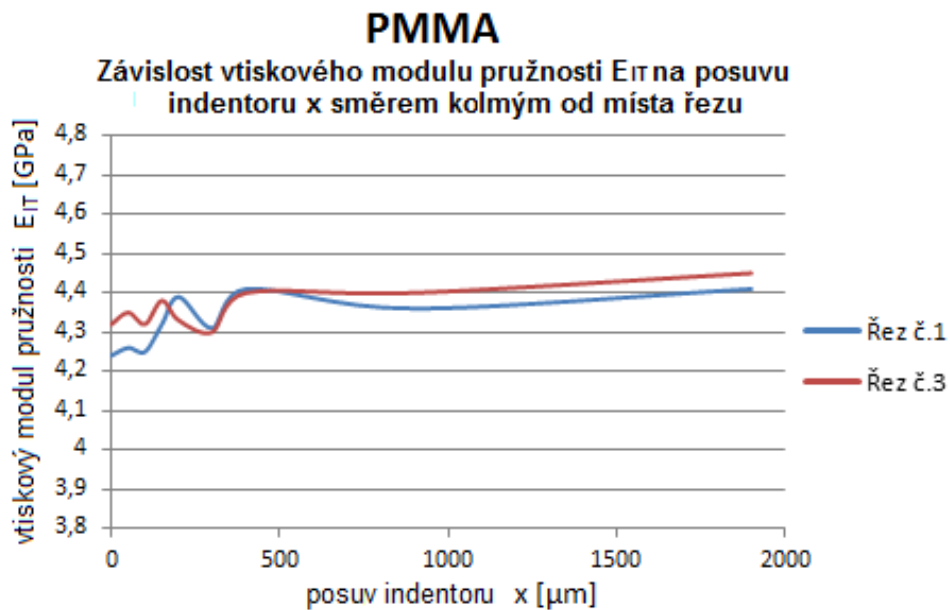
Obr. 88 – Vtiskový modul pružnosti



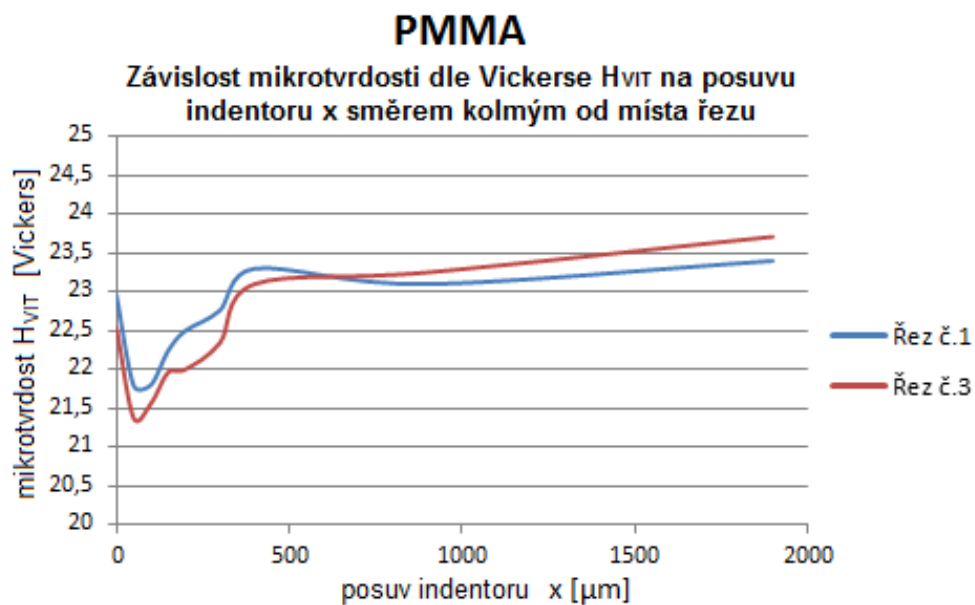
Obr. 89 – Vtisková mikrotvrдость dle Vickerse



## 7.4.2 PMMA

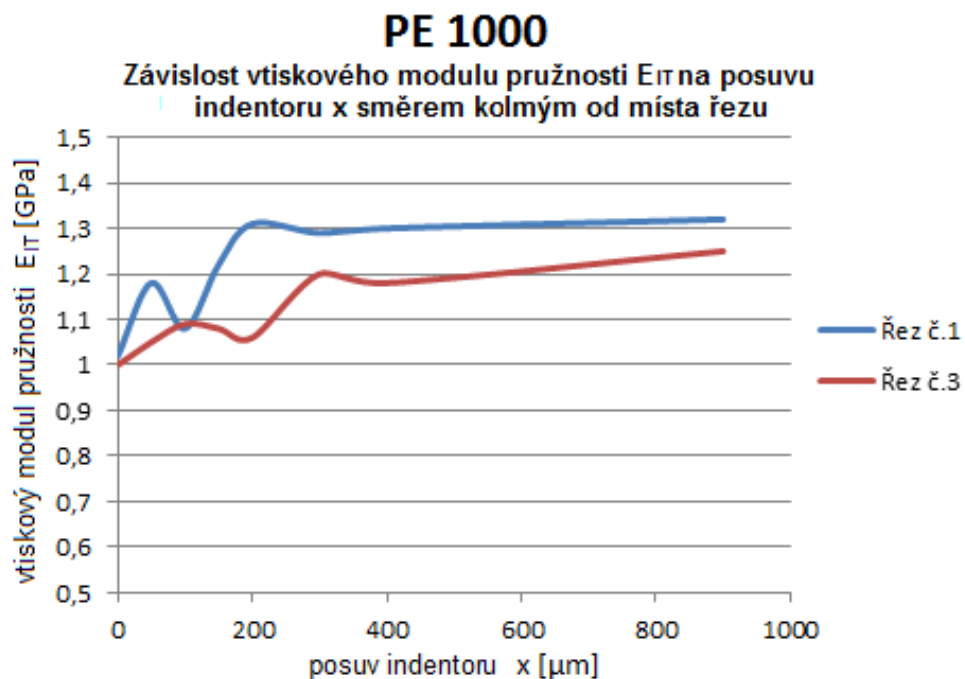


Obr. 90 – Vtiskový modul pružnosti

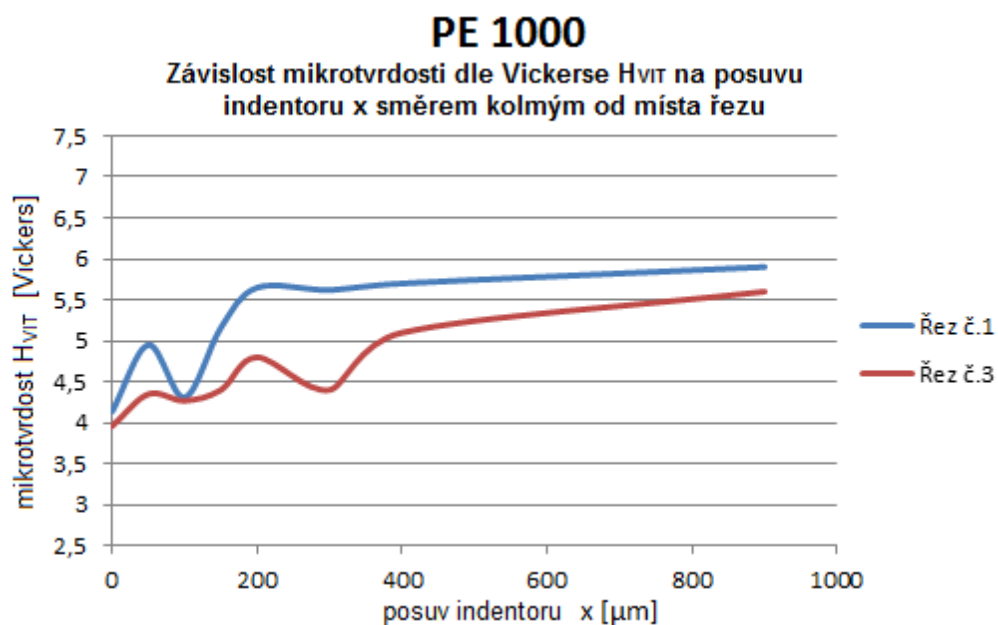


Obr. 91 – Vtisková mikrotvrlost dle Vickerse

### 7.4.3 PE 1000

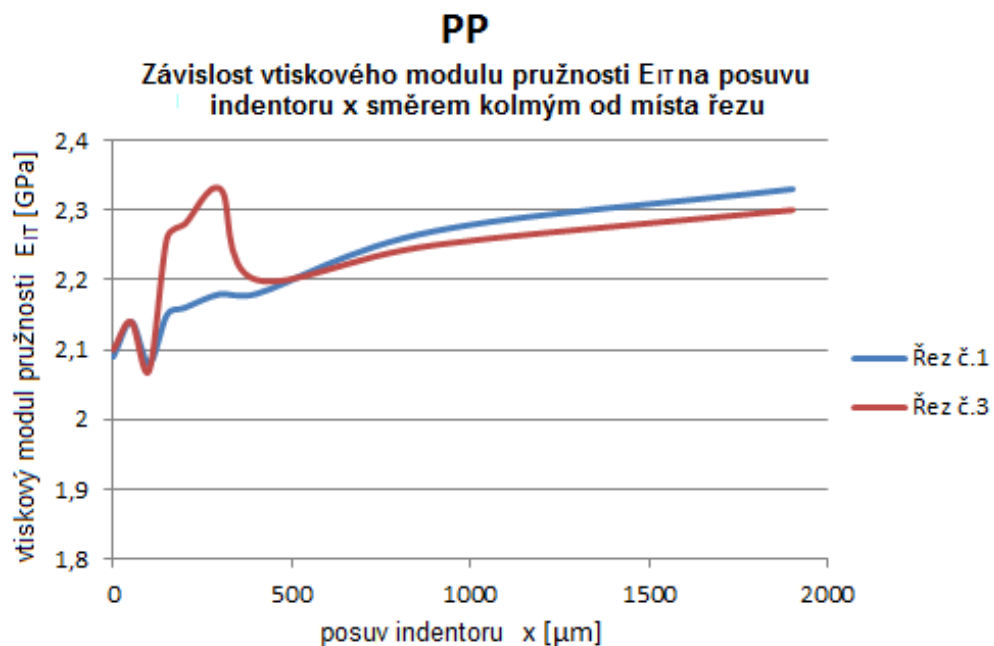


Obr. 92 – Vtiskový modul pružnosti

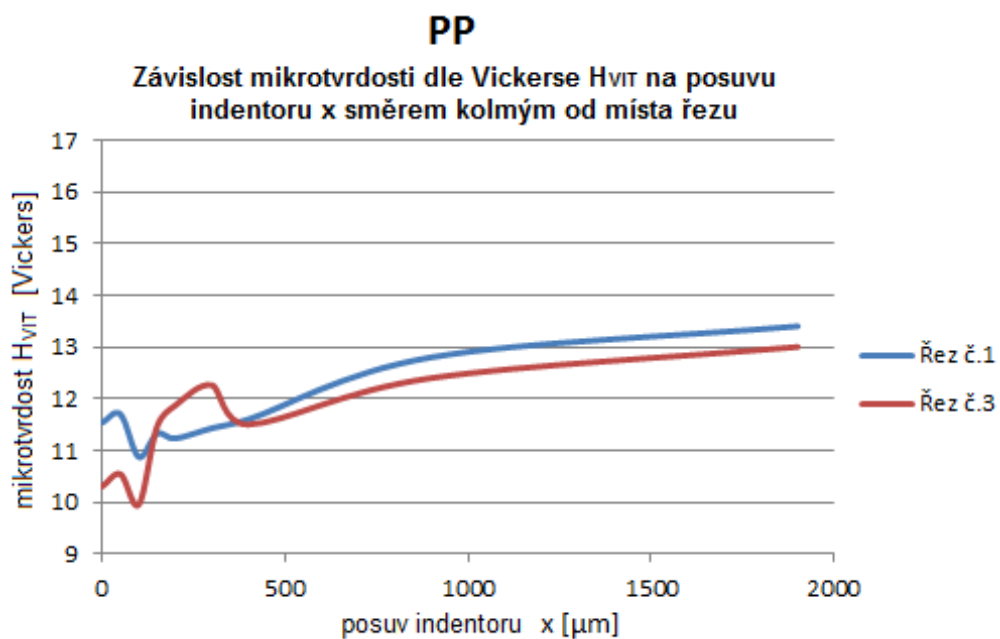


Obr. 93 – Vtisková mikrotvrlost dle Vickerse

#### 7.4.4 PP



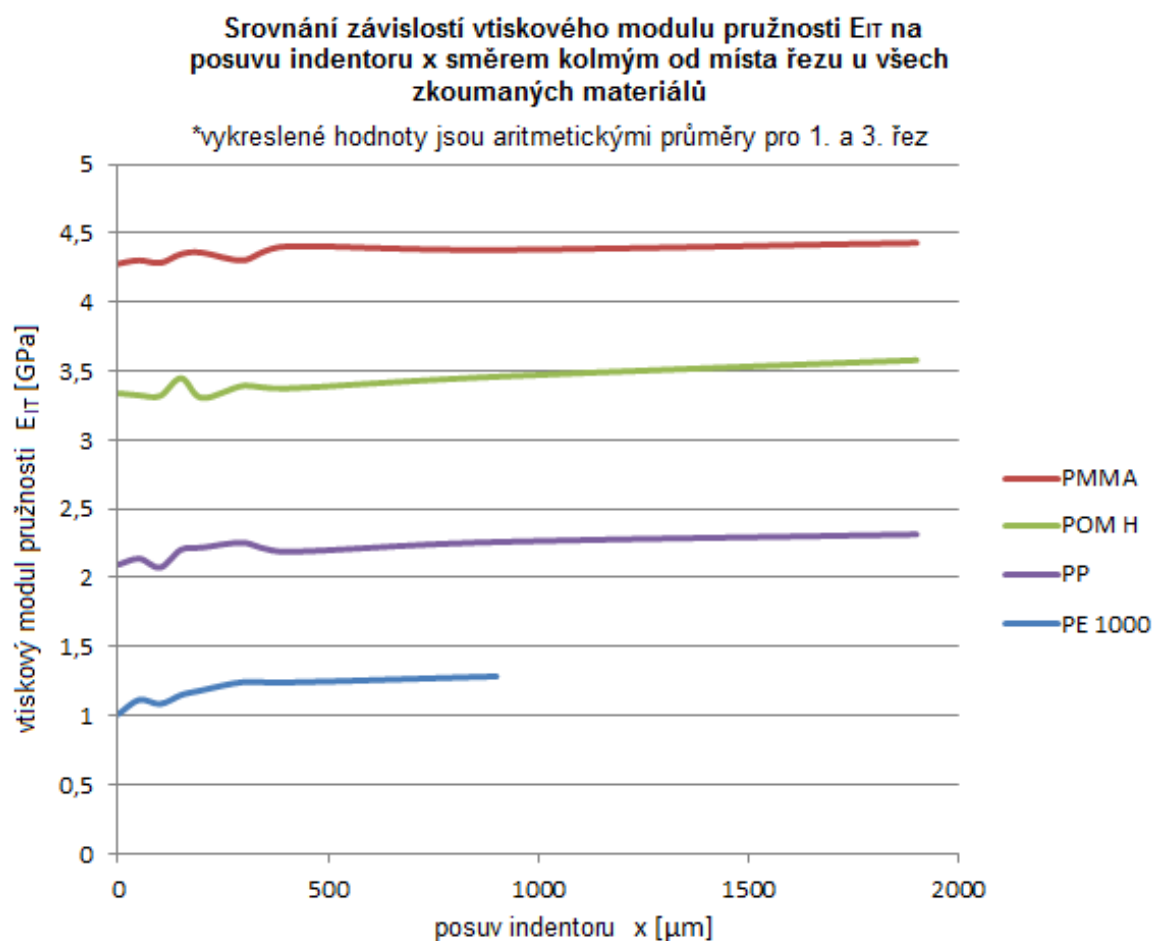
Obr. 94 – Vtiskový modul pružnosti



Obr. 95 – Vtisková mikrotvrdość dle Vickerse

#### 7.4.5 Souhrnné zobrazení modulu pružnosti

Zde je souhrnně znázorněno vtiskového modulu pružnosti pro všechny zúčastněné materiály. Hodnoty vykreslené v tomto grafu jsou aritmetickým průměrem z hodnot modulů pružnosti pro 1. a 3. řez. Takto lze nyní srovnat v jednotném měřítku jednotlivé materiály, jež byly pro tento výzkum vybrány a posuzovány.



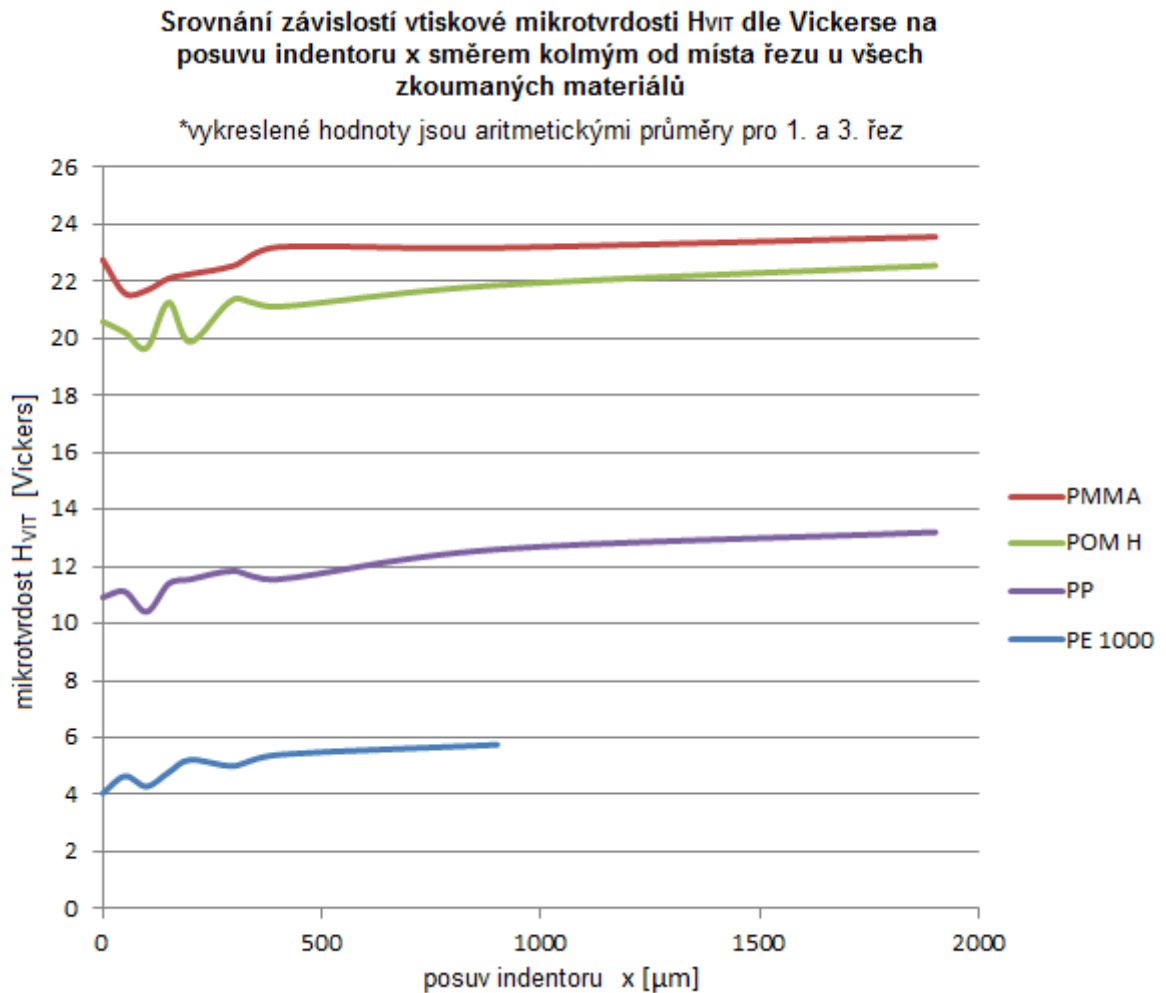
Obr. 96 – Vtiskový modul pružnosti všech zkoumaných materiálů

U jednotlivých materiálů lze spatřit oblast ovlivněnou laserovým paprskem a také oblast neovlivněnou, tedy takovou, kde jsou již hodnoty tzv. ustálené. U všech materiálů však lze vzhledem k počátečnímu průběhu hovořit o zcela jasném ovlivnění základního materiálu laserovým paprskem.

Lze tedy říci, že laserový paprsek ovlivňuje základní materiál v oblasti řezu tím, že se jeho modul pružnosti v této oblasti snížil, zatímco s posunem od místa řezu tyto hodnoty rostou, resp. se ustálí. Největší hodnoty vtiskového modulu pružnosti při tom vykazuje materiál PMMA, dále je to POM H, PP a nakonec PE 1000.

#### 7.4.6 Souhrnné zobrazení vtiskové mikrotvrdości

Stejně jako u srovnání pro vtiskový modul pružnosti jsou i zde hodnoty pro jednotlivé křivky průměrnou hodnotou z hodnot pro 1. a 3. řez. Jedná se tak o souhrnné zobrazení v jednotném měřítku a srovnání vlastností jednotlivých materiálů.



Obr. 97 – Vtisková mikrotvrdość všech zkoumaných materiálů

I zde u jednotlivých materiálů lze spatřit oblast tzv. ustálení, tedy oblast, kdy již materiál nevykazuje další významný nárůst vtiskové mikrotvrdości, přičemž lze jasně spatřit oblast ovlivněnou laserovým paprskem. Je zde zřejmý pokles měřené veličiny.

Lze tedy říci, že laserový paprsek ovlivňuje materiál v oblasti řezu tím, že se v této oblasti jeho tvrdost snížila. Zároveň se s posuvem a měřením od místa řezu tato hodnota zpětně zvětšuje, přičemž se v jisté oblasti ustálí do základní a materiálu vlastní hodnoty.



Zároveň lze konstatovat, že na rozdíl od ocelí, kde se důsledkem působení laserového paprsku tvrdost zpravidla zvyšuje, se u polymerních materiálů vyskytuje jev opačný. Samotné změny nejsou nikterak výrazné, ale pro důkaz tohoto konstatování uvedená měření bohatě dostačují, neboť je u všech měření daných materiálů možno spatřit snížení zkoumaných vlastností. Zároveň je nutno podotknout, že polymerní materiály mají oproti ocelím výrazně nižší charakteristické veličiny. Tedy průběh a změny jsou opravdu velmi odlišné.

## 7.5 Simulace teplotního pole

Modelování teplotních polí je řešeno pomocí softwaru COSMOS/M, který pracuje na principu konečných prvků, přičemž je zde simulováno jak teploty uvnitř materiálu po průchodu laserového paprsku, tak průběhu teploty na povrchu materiálu.

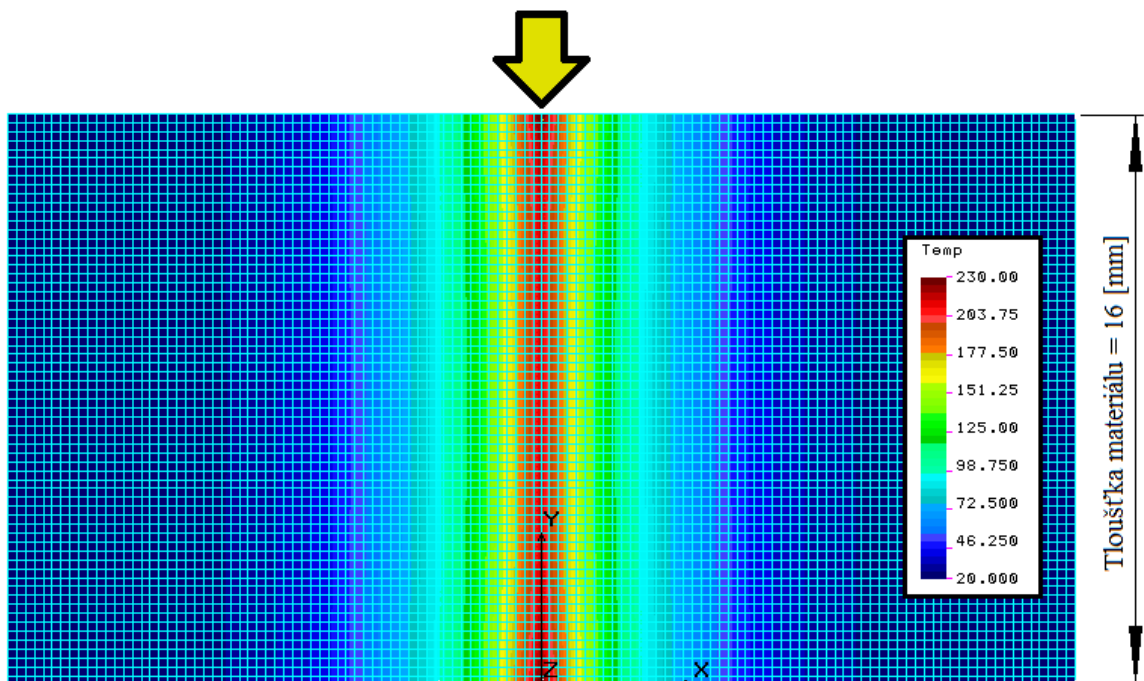
Pro zkoumání a vytvoření teplotních simulací bylo vybráno materiálů POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž byly do programu zadávány veličiny, jako jsou: hustota materiálu, tepelná vodivost materiálu, měrná tepelná kapacita materiálu a teplota rozkladu materiálu, přičemž všechny tyto veličiny byly uvažovány konstantně, tj. jako neměnné v závislosti na teplotě. Předpoklady, které k tomuto zjednodušení vedly, jsou blíže popsány v kapitole 6.6. Zároveň je teplotní pole vytvořeno pouze pro 1. drážku vzorku, tj. pro řez při výkonu laseru 100 W a posuvu 1 %, resp.  $15,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , což je varianta maximálního výkonu, jež zvolený CO<sub>2</sub> laser nabízel. V příložených výsledných simulacích (obrázcích) jsou zobrazena teplotní pásma uvnitř materiálu po průchodu paprsku a schematicky je v každém uvedeno též směru působení laserového paprsku. V druhém příloženém modelovém obrázku je zobrazeno průběhu teploty na povrchu. Je zde vidět různých průběhů pro tyto vybrané materiály. Těmto výsledkům předchází tabulky s jednotlivými veličinami.

Blíže je tato metoda včetně uvedení potřebných předpokladů a okrajových podmínek popsána v kapitole 6.6.

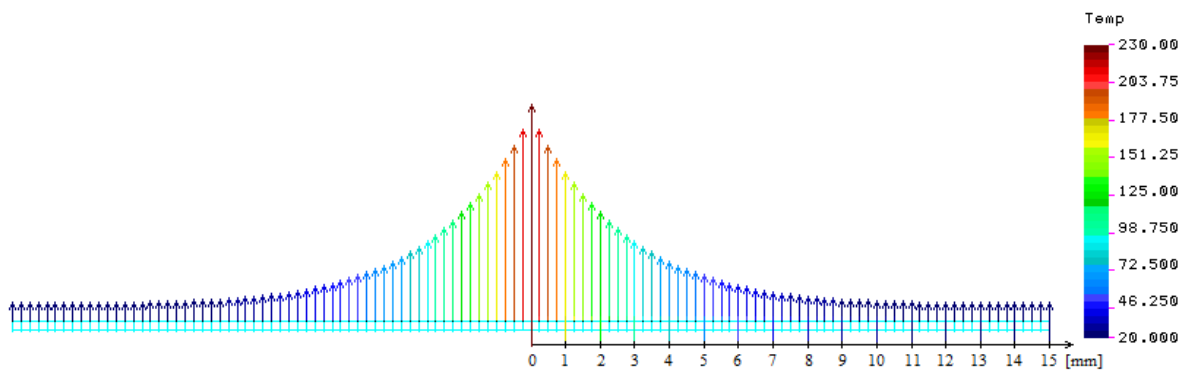
## 7.5.1 POM C

Tab. 4. Vlastnosti materiálu POM C

Materiál	Veličina	Hodnota
POM C	Teplota rozkladu $T_p$ [°C]	> 230
	Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1410
	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	1370
	Tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,31
	Hloubka posuzované drážky / tloušťka mat. [mm]	16 / 16



Obr. 98 – Teplotní pole materiálu POM C

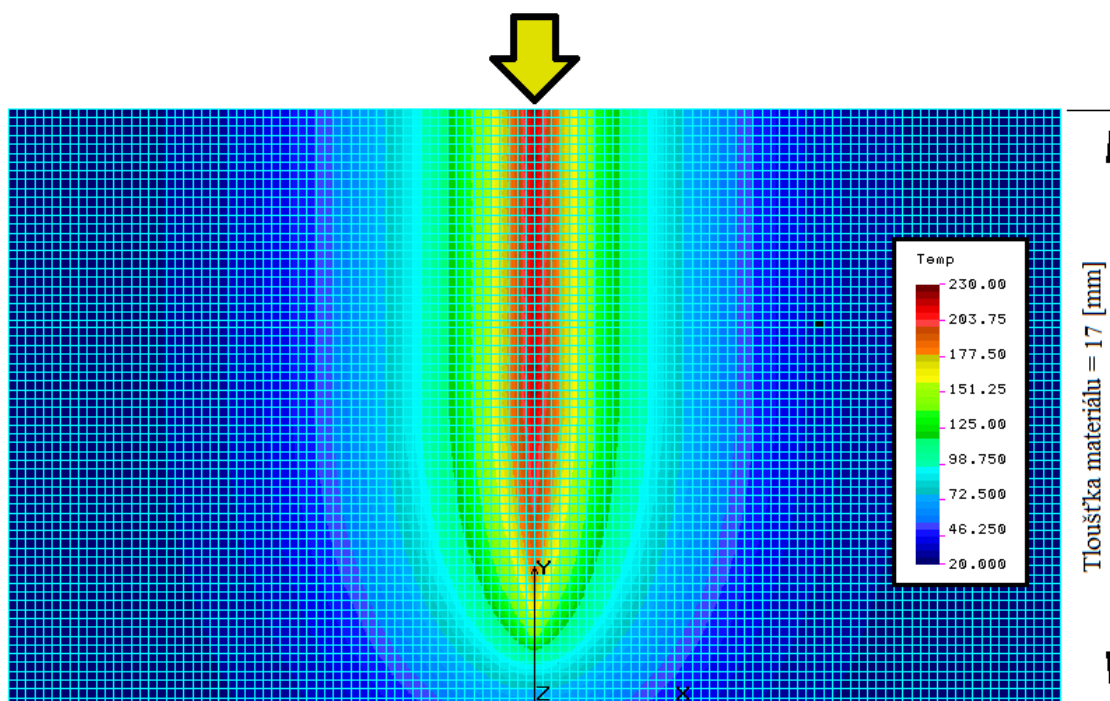


Obr. 99 – Průběh teploty na povrchu materiálu POM C

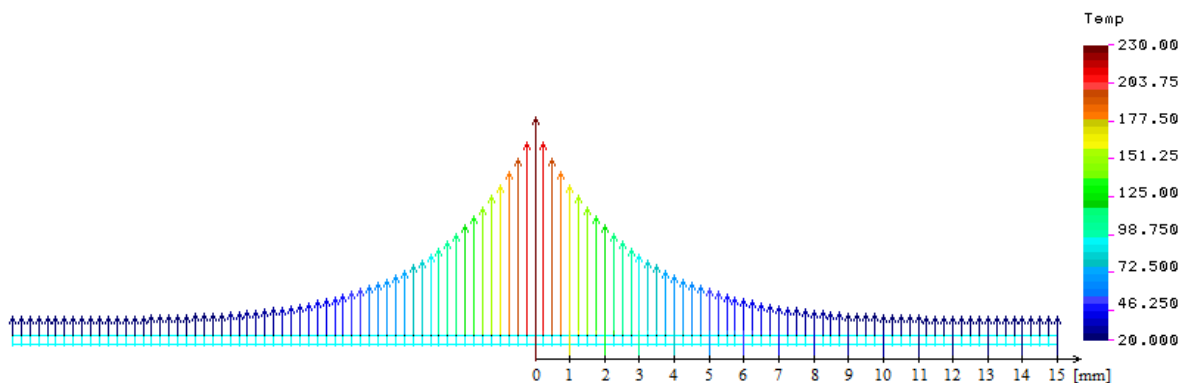
## 7.5.2 POM H

Tab. 5. Vlastnosti materiálu POM H

Materiál	Veličina	Hodnota
POM H	Teplota rozkladu $T_p$ [°C]	> 230
	Hustota $\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	1430
	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	1465
	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	0,31
	Hloubka posuzované drážky / tloušťka mat. [mm]	14,3 / 17



Obr. 100 – Teplotní pole materiálu POM H

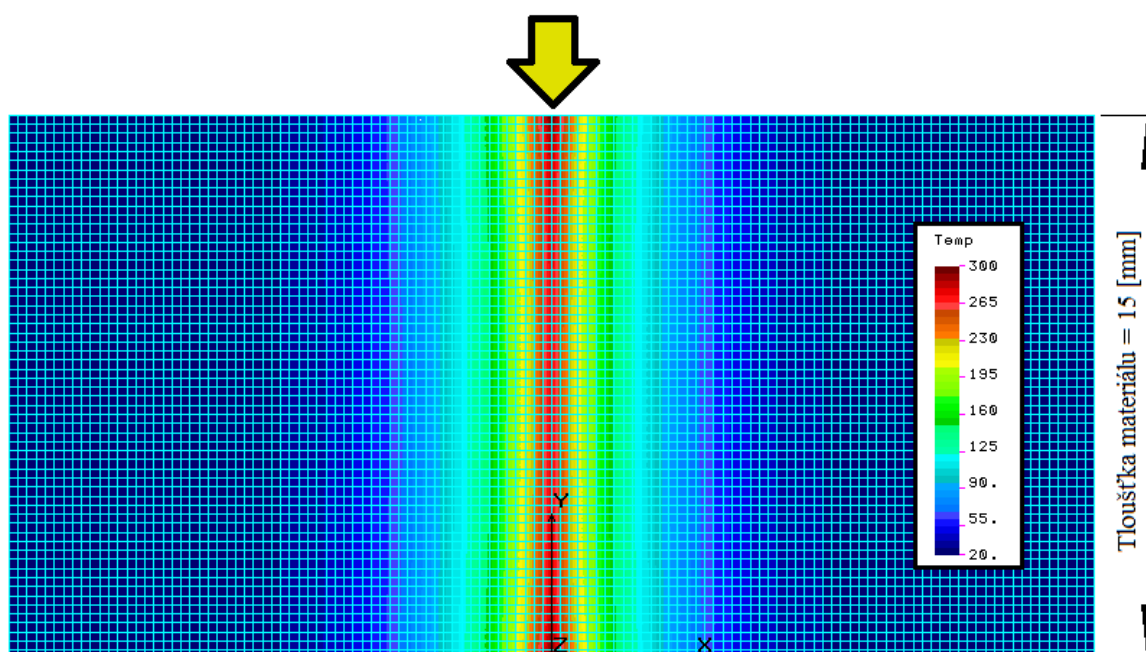


Obr. 101 – Průběh teploty na povrchu materiálu POM H

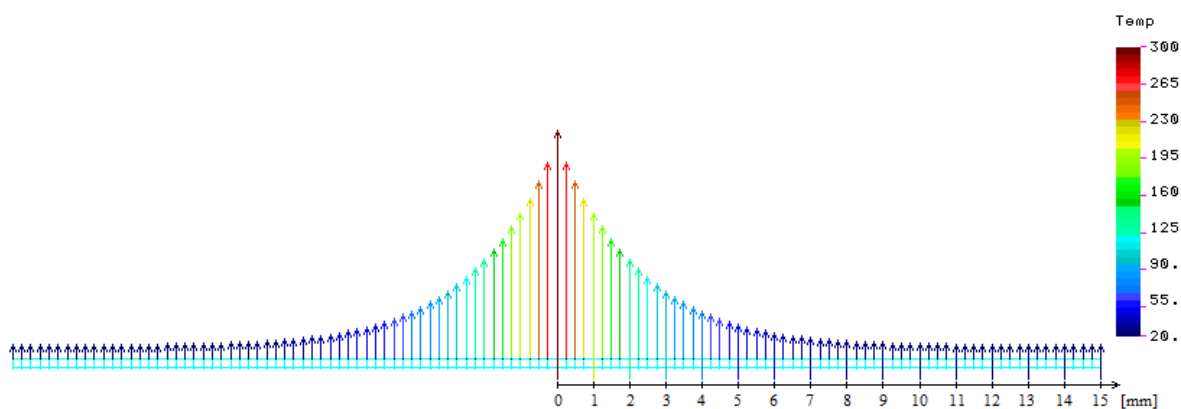
### 7.5.3 PMMA

Tab. 6. Vlastnosti materiálu PMMA

Materiál	Veličina	Hodnota
PMMA	Teplota rozkladu $T_p$ [°C]	> 300
	Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	1180
	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	1465
	Tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,2
	Hloubka posuzované drážky / tloušťka mat. [mm]	15 / 15



Obr. 102 – Teplotní pole materiálu PMMA

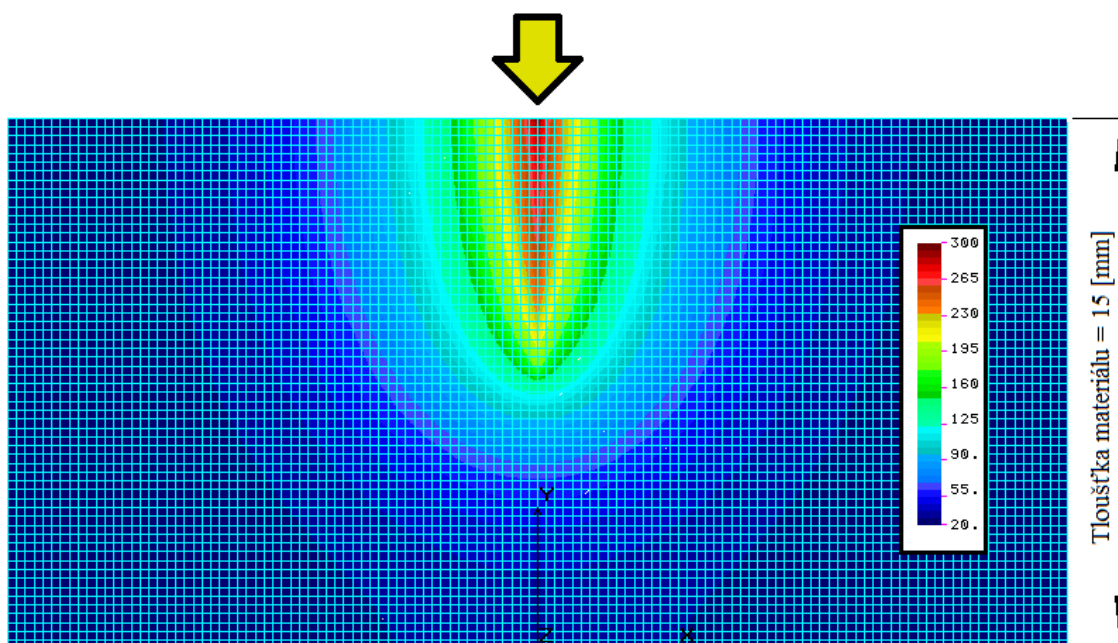


Obr. 103 – Průběh teploty na povrchu materiálu PMMA

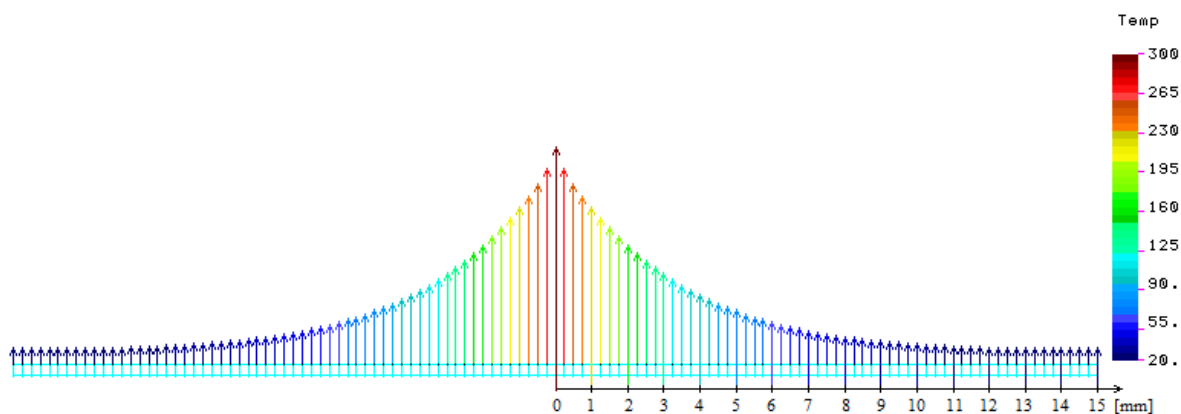
## 7.5.4 PE 1000

Tab. 7. Vlastnosti materiálu PE 1000

Materiál	Veličina	Hodnota
PE 1000	Teplota rozkladu $T_p$ [°C]	> 300
	Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	930
	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	1750
	Tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,4
	Hloubka posuzované drážky / tloušťka mat. [mm]	6,3 / 15



Obr. 104 – Teplotní pole materiálu PE 1000

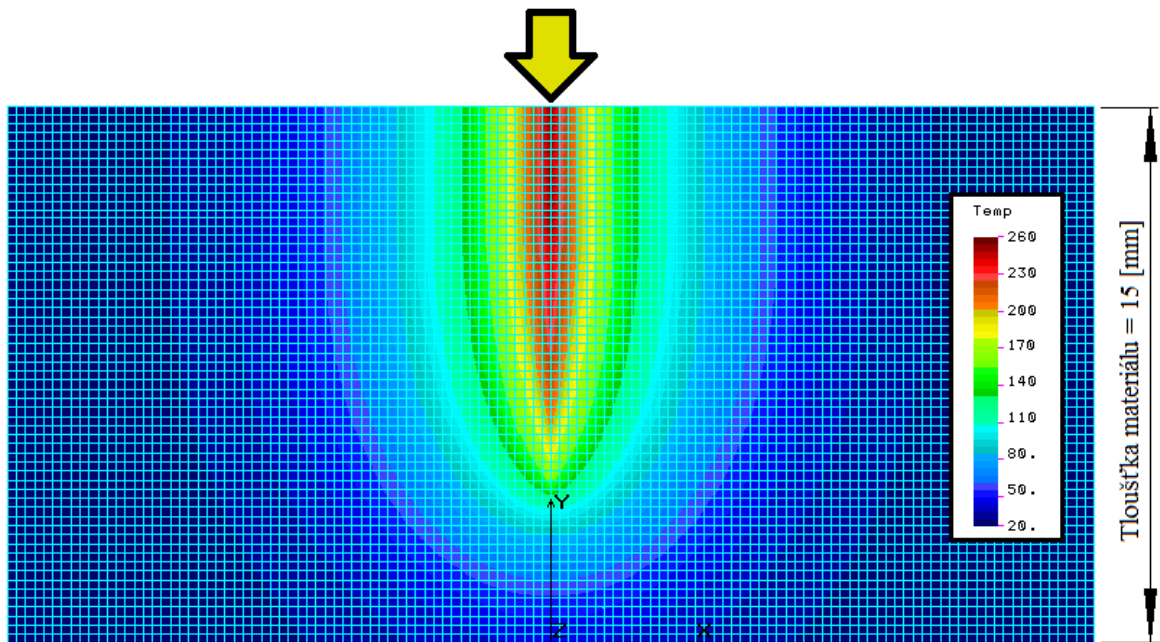


Obr. 105 – Průběh teploty na povrchu materiálu PE 1000

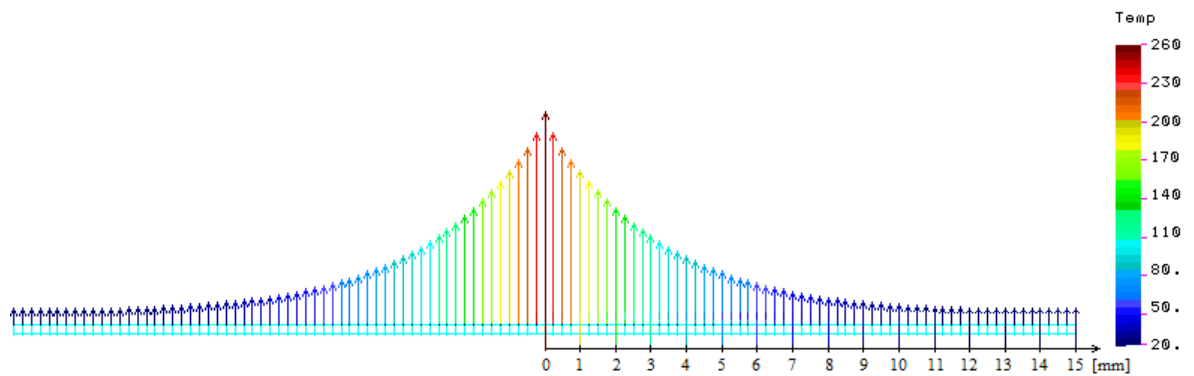
### 7.5.5 PP

Tab. 8. Vlastnosti materiálu PP

Materiál	Veličina	Hodnota
PP	Teplota rozkladu $T_p$ [°C]	> 260
	Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	940
	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	1500
	Tepelná vodivost $\lambda$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	0,4
	Hloubka posuzované drážky / tloušťka mat. [mm]	10,3 / 15



Obr. 106 – Teplotní pole materiálu PP



Obr. 107 – Průběh teploty na povrchu materiálu PP



Na základě provedených a vyobrazených simulací teplotních polí uvnitř materiálů a teplot na povrchu těchto materiálů lze konstatovat, že je tento způsob vizualizace velmi pomocný a názorný, neboť skvěle znázorňuje průběhy teplot, které si lze jen těžko představit. Zároveň je třeba podotknout, resp. zopakovat, že žádná simulace není nikdy zcela sto procentní vůči reálnému průběhu daného děje. V rámci této simulace se však jedná o jakousi doplněnou metodu vůči metodě předchozí, kdy je potřeba znázornit především oblasti, které lze považovat za teplotně ovlivněné, resp. degradované, a taky oblasti materiálu, kde je již teplota tzv. bezpečná, a kde již nehrozí negativní ovlivnění laserovým paprskem.

Jak lze vidět na všech doložených obrázcích, zpravidla již ve vzdálenosti 2 mm od místa řezu, je teplota relativně nízká a jelikož tato metoda jistým způsobem doplňuje metodu měření mikrotvrdosti, dá se říci, že tím potvrzuje průběhy křivek v tzv. ustálených oblastech, resp. vzdálenostech od místa řezů, kde již materiál nevykazuje teplotně degradované vlastnosti a kde jsou jeho vlastnosti zpravidla již vybalancovány do původních, tzv. laserem neozářených oblastí.

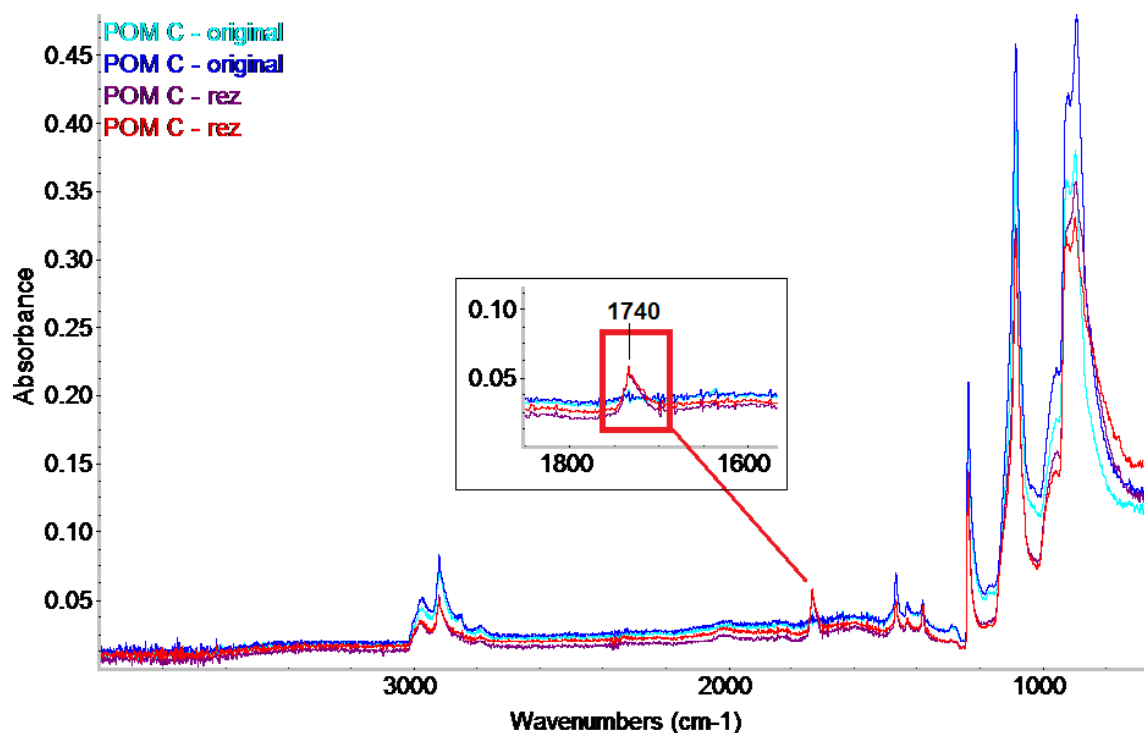
## **7.6 FTIR – Infračervená vibrační spektroskopie**

Tato metoda umožňuje na základě různé absorpce záření rozlišit molekulovou stavbu látek a využívá se tak právě pro identifikaci organických sloučenin. Každý atom obsažený v molekule vykazuje vibraci kolem své rovnovážné pozice, přičemž frekvence této vibrace je dána jednak hmotou zúčastněných částic, ale také silou vazeb. Frekvence záření tak může v jistých frekvencích rezonovat s molekulárními vibracemi a energie tohoto záření se tak může zároveň absorbovat.

Toto měření probíhalo na přístroji Nicolet Avatar 320 FT-IR ATR a bylo realizováno u materiálůvých vzorků POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž každý zúčastněný materiál v grafickém znázornění vykresluje celkem 4 křivky, přičemž vždy dvě náleží originálu, tj. neozářenému materiálu a další dvě náleží zkoumání na ploše řezu, tj. na přímo ozářené části materiálu (zde bylo bráno v potaz také a pouze obrobených drážek při parametrech výkonu laseru 100W a hodnotách posuvu 1%, tedy maximálního možného výkonu, jež byl na vzorky aplikován).

Bližší je tato metoda včetně popisu zařízení popsána v kapitole 6.7.

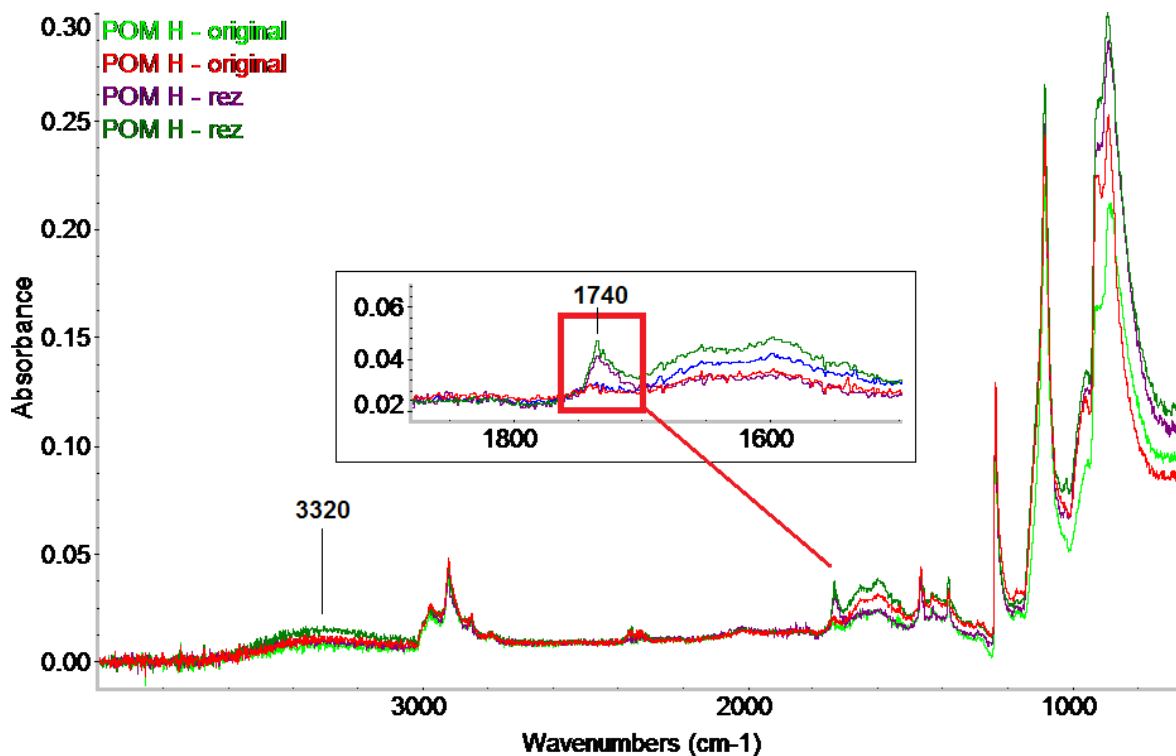
## 7.6.1 POM C



Obr. 108 – FTIR spektrum materiálu POM C

V rámci grafického vykreslení ozářeného a neozářeného materiálu POM C lze hovořit všeobecně o velmi malých změnách, co se týče strukturálních změn v průběhu křivek. Detailně je však vyobrazena oblast, kde je na vlnové délce  $1740\text{ cm}^{-1}$  vidět v případech ozářeného materiálu prudký, avšak ne již tak příliš intenzivní nárůst absorbance, což je způsobeno výskytem C=O vazeb, které ve struktuře ozářeného materiálu vznikly. Tato vlnová délka je pro tuto funkční skupinu typická. Tento projev strukturálních změn je v rámci zkoumaného materiálu jediný. [34] [35] [36] [37] [39]

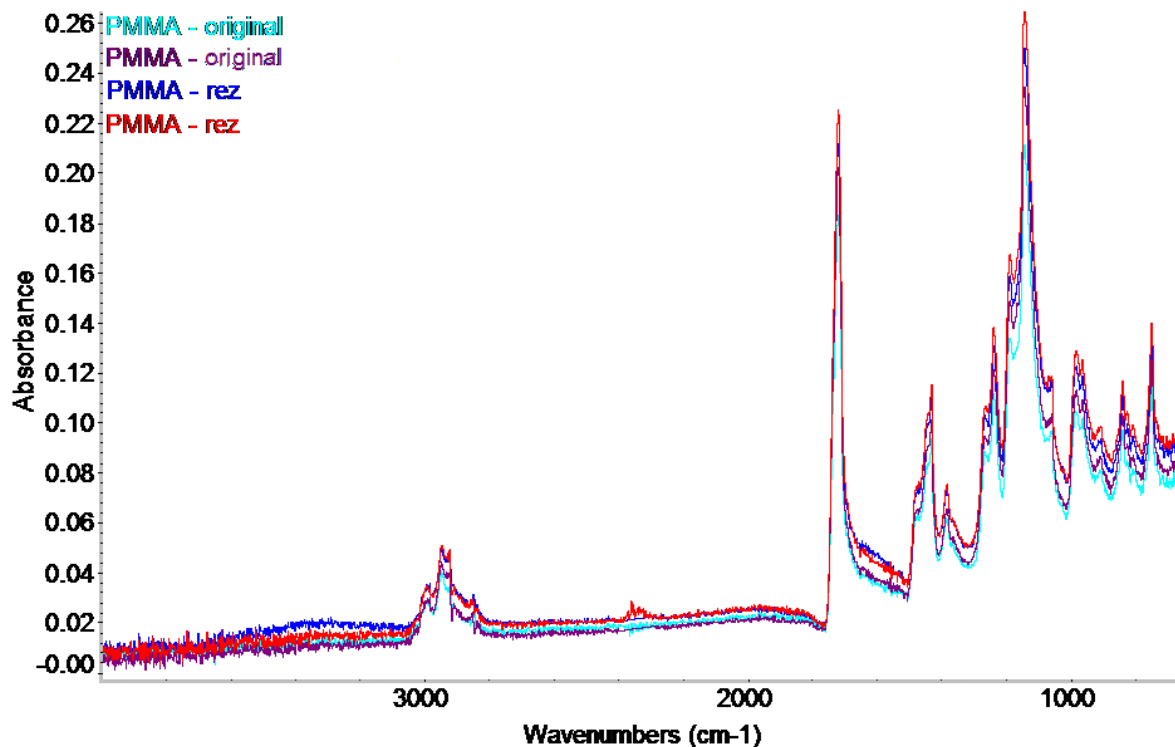
## 7.6.2 POM H



Obr. 109 – FTIR spektrum materiálu POM H

V rámci grafického vykreslení ozářeného a neozářeného materiálu POM H lze hovořit všeobecně o změnách lehce výraznějších (vůči POM C). Detailně je zde vyobrazena oblast, kde je na vlnové délce 1740 cm<sup>-1</sup> vidět v případech ozářeného materiálu prudký, avšak ne již tak výrazný nárůst absorbance, což je způsobeno výskytem C=O vazeb, které ve struktuře ozářeného materiálu vznikly. Na vlnové délce okolo 1600 cm<sup>-1</sup> je pak možno vidět v detailním zobrazení širší nárůst absorbance IR záření, což vykazuje nárůst a vznik esterových vazeb. Dále je možno pozorovat již velmi slabý nárůst široké absorbance na úrovni peaku 3320 cm<sup>-1</sup>, což je spojeno se vznikem O-H vazeb, což dokazuje, že se do materiálu dostal při řezání laserem malou měrou kyslík. [34] [35] [36] [37] [39]

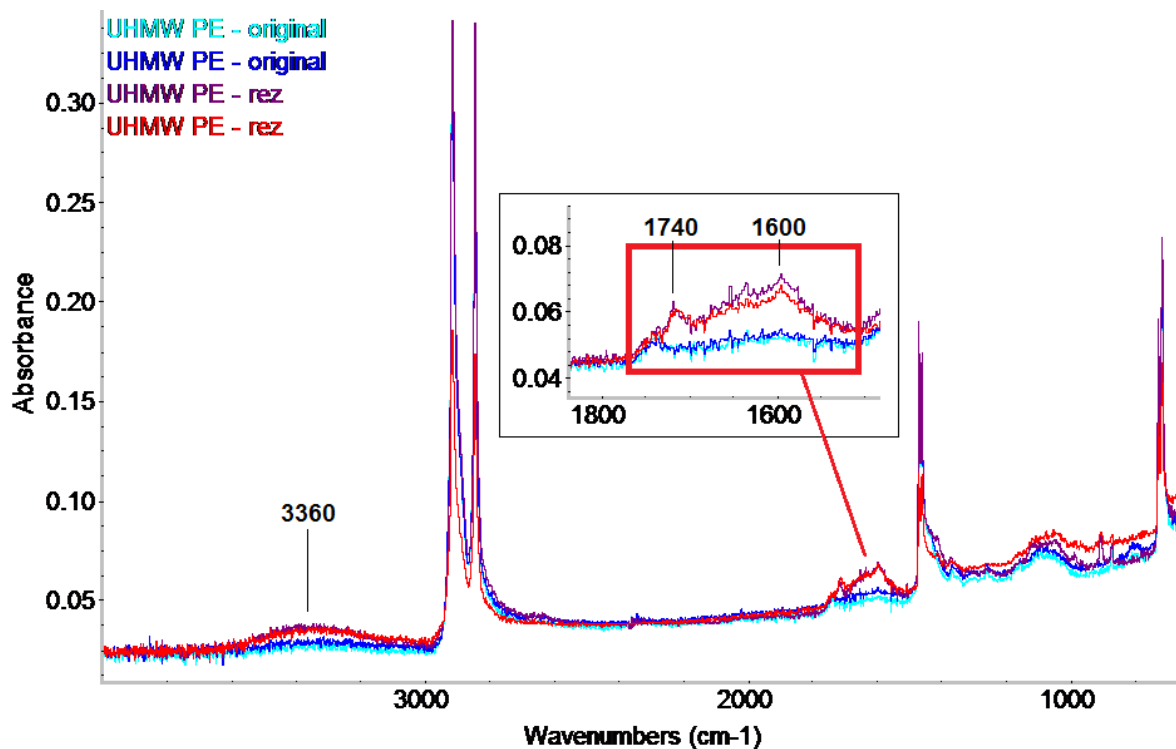
### 7.6.3 PMMA



Obr. 110 – FTIR spektrum materiálu PMMA

V rámci grafického vykreslení ozářeného a neozářeného materiálu PMMA se dá hovořit o téměř nulových strukturálních změnách. Tento materiál, jelikož je amorfní, těmto změnám podléhá zcela minimálně, což se všeobecně předem i očekávalo. Co se týče jediného slabého nárůstu červené a modré křivky, tj. materiálu ozářeného, a to na vlnových délkách kolem  $3400 \div 3200 \text{ cm}^{-1}$ , jedná se patrně o lehký nárůst O-H vazeb, které zřejmě vznikly při obrábění laserem, které probíhalo za běžných atmosférických podmínek, tj. do materiálu se tak dostalo nepatrné množství kyslíku, což o sobě tímto nepatrným nárůstem dalo lehce znát. [34] [35] [36] [37] [39]

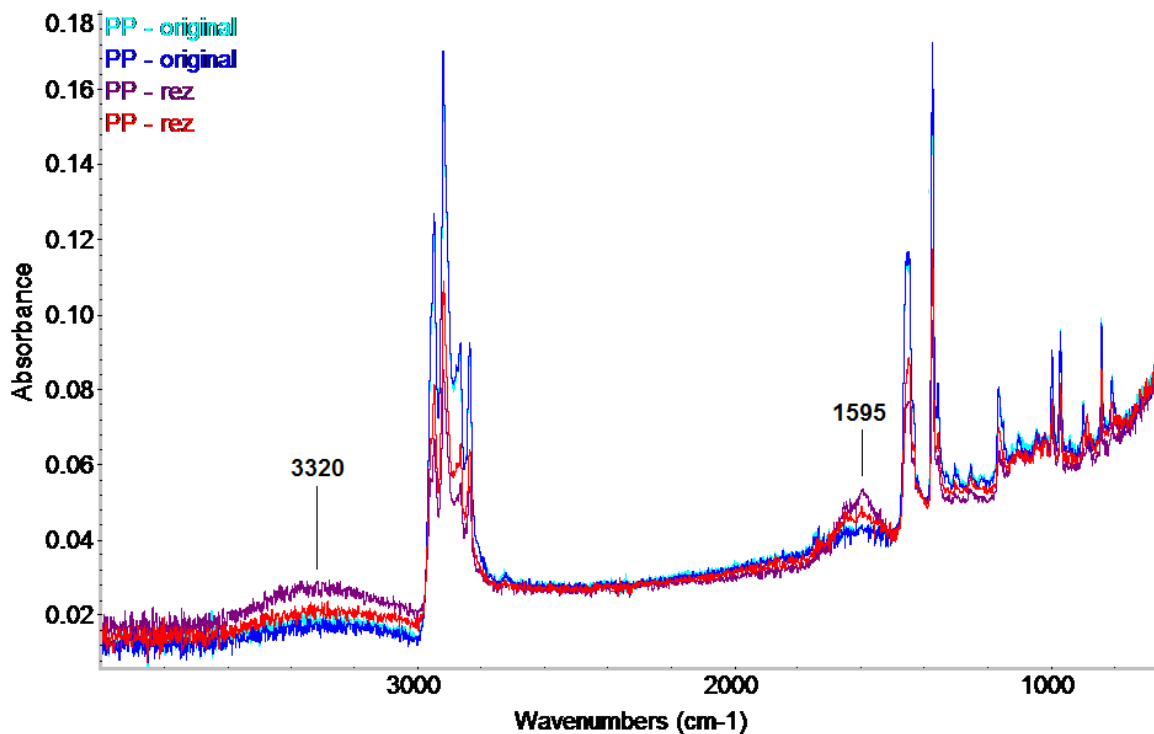
#### 7.6.4 PE 1000



Obr. 111 – FTIR spektrum materiálu PE 1000 (UHMW-PE)

V rámci grafického vykreslení ozářeného a neozářeného materiálu PE 1000 je zde vyobrazena oblast, kde je na vlnové délce 1740 cm<sup>-1</sup> vidět v případech ozářeného materiálu nárůst absorbance, což je způsobeno výskytem C=O vazeb, jejichž množství se tak evidentně zvýšilo. Na vlnové délce okolo peaku 1600 cm<sup>-1</sup> je pak možno vidět v detailním zobrazení širší nárůst absorbance IR záření, což vykazuje nárůst a vznik esterových vazeb, pro něž je tato vlnová délka typická. Dále je možno pozorovat nárůst široké absorbance na úrovni peaku 3360 cm<sup>-1</sup>, což je jako v předešlých případech spojeno se vznikem O-H vazeb. Co se týče dvojice nejvyšších peaků v oblasti pod 3000 cm<sup>-1</sup>, je toto zjevně spojeno s CH<sub>2</sub> vazbami, přičemž lze spatřit pokles těchto vazeb vůči neozářenému materiálu. [34] [35] [36] [37] [39]

### 7.6.5 PP



Obr. 112 – FTIR spektrum materiálu PP

V rámci grafického vykreslení ozářeného a neozářeného materiálu PP lze hovořit o jistých strukturálních změnách. Co se týče nárůstu absorbance na široké úrovni vlnové délky kolem peaku  $3320\text{ cm}^{-1}$ , je toto projevem nárůstu O-H vazeb, přičemž oblast okolo peaku na vlnové délce  $1595\text{ cm}^{-1}$ , je důkazem o nárůstu ketonových vazeb. Pod úrovní vlnové délky  $3000\text{ cm}^{-1}$ , jsou vidět velmi úzké, čtyři intenzivní peaky, přičemž první dvojice nejvyšších je dle literatury zjevně spojena s  $\text{CH}_3$  vazbami, konkrétně pak s poklesem těchto vazeb. Druhá dvojice výrazných (velmi blízko dvojici již zmíněných, avšak ve směru nižší vlnové délky a nižší intenzity absorbance záření) je zjevně spojena s  $\text{CH}_2$  vazbami, kde rovněž došlo k jistému snížení jejich výskytu. [34] [35] [36] [37] [39]

Souhrnně lze říci, že v rámci infračervené vibrační spektroskopie, která byla jako metoda zařazena na zkoumání vlivu laserového paprsku na strukturální změny u vybraných vzorků, se projevíly jisté změny ve struktuře. Lze taky říci, že byly potvrzeny různé a odlišné strukturální změny v laserem řezaných materiálech, přičemž tyto byly popsány výše v této podkapitole. Tato metoda a její výsledky jsou vzhledem k primárnímu cíli této diplomové práce velmi důležité (stejně jako následující, ale i předchozí, neboť na sebe navazují), avšak specializovaný rozbor všech vlnových délek by mohl být podrobněji zpracován a řešen formou navazujících, důkladněji zaměřených ať už diplomových, či jiných závěrečných prací.



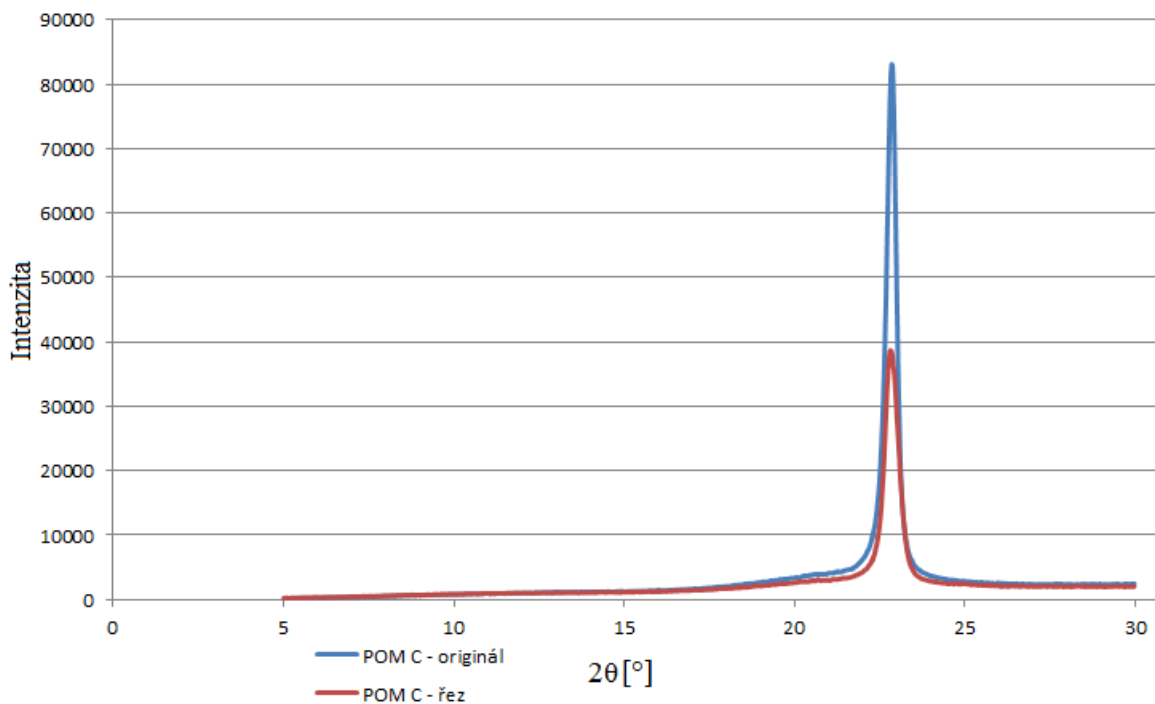
## 7.7 Rentgenová difrakční analýza

Pro posouzení vlivu laserového paprsku na strukturu materiálů a zkoumání krystalické struktury bylo do měření vzorků zařazeno též měření na difraktometru PANalytical X'Pert PRO. Všechna měření byla realizována při napětí 40 kV a proudu 30 mA a byla užitá pro materiály POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž na grafickém znázornění lze vidět jednotlivé barevné křivky, jež náleží vždy příslušné drážce dle označení. Na ose x jsou hodnoty úhlů natočení sensorů  $2\theta$  a na ose y jsou pak hodnoty intenzity absorpce záření. Díky těmto grafům bylo možno ze zařízení získat rozbor krystalického zastoupení, resp. případných změn v této strukturální záležitosti.

Každý materiál byl zkoumán vždy v přímém místě 1. drážky, tj. v místě maximálně ozářeného materiálu, přičemž byly vybrané materiály zkoumány dále ve srovnání s plochou základního materiálu, tedy neozářeného původního složení. Pro tuto metodu bylo potřeba vzorky nařezat na velmi tenké kousky tak, aby nedošlo k ovlivnění. Tyto řezy byly realizovány pilou PPK-90U. [29] [30]

Blíže je tato metoda včetně popisu zařízení popsána v kapitole 6.8.

### 7.7.1 POM C

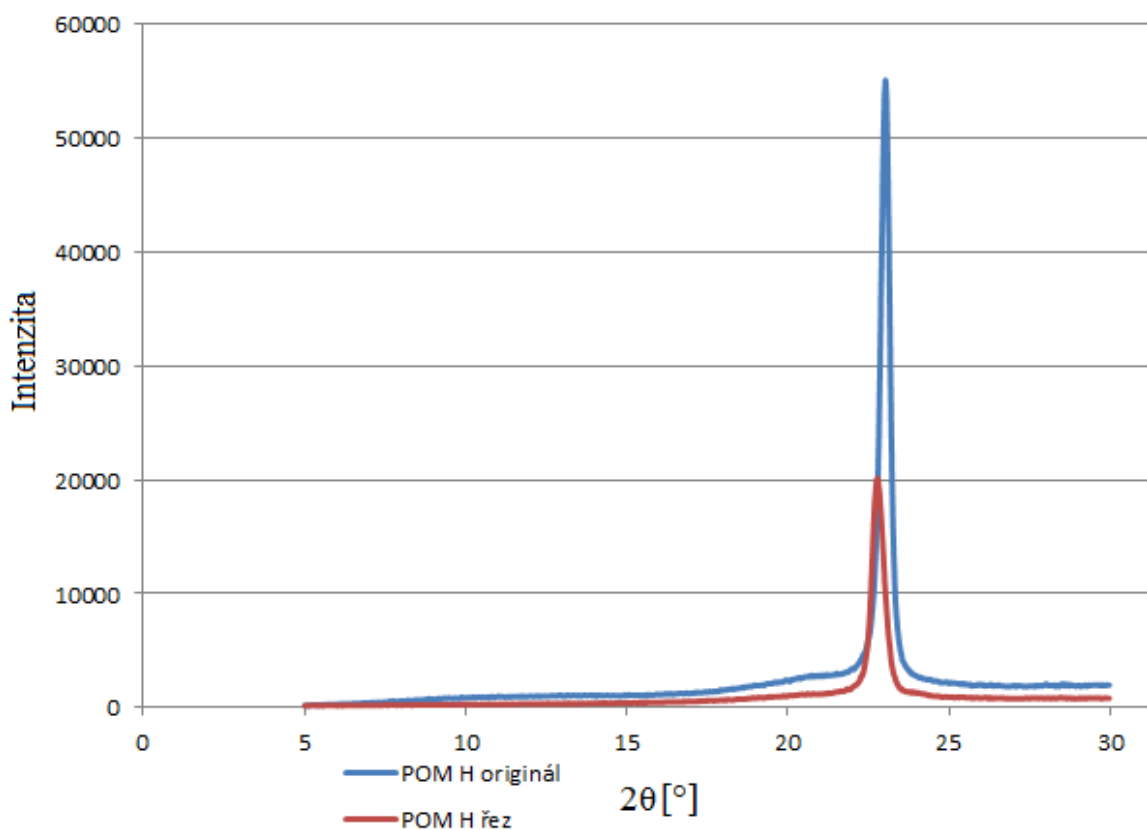


Obr. 113 – Difraktogram materiálu POM C

Z měření vyplynulo, že neozářený materiál POM C, tj. základní originální materiál je krystalický ze 73,02 %. Oproti tomu část materiálu vystavená přímému ozáření, tj. přímá plocha řezu vykazuje pokles na hodnotu 65,56 % podílu krystalické složky.

Na difraktometru se tedy u ozářeného vzorku vůči původnímu zjistil pokles krystalinity o zhruba 7,5 %. Materiál tak prodělal v místě řezu strukturální změnu ve prospěch nárůstu amorfní, tj. neuspořádané struktury, a to o zmíněných 7,5 %.

### 7.7.2 POM H

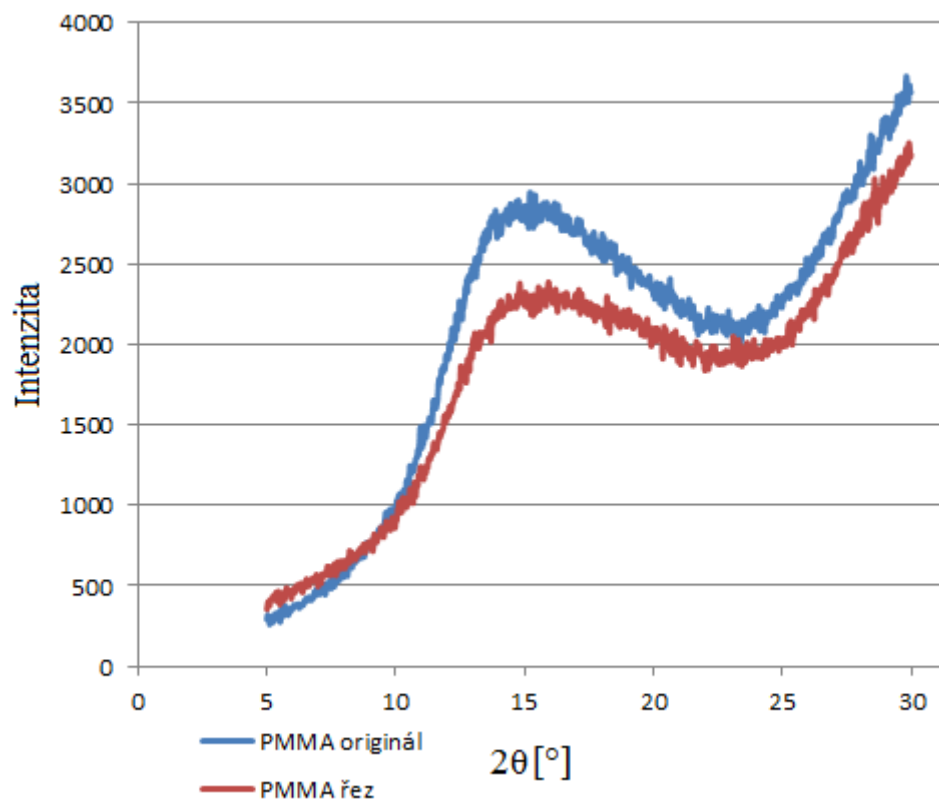


Obr. 114 – Difraktogram materiálu POM H

Z měření vyplynulo, že neozářený materiál POM H, tj. základní materiál je krystalický z 68,74 %. Oproti tomu část materiálu vystavená přímému ozáření, tj. přímá plocha řezu vykazuje nárůst na hodnotu 77,12 % podílu krystalické složky.

Na difraktometru se tedy u ozářeného materiálu vůči původnímu zjistil nárůst krystalinity o zhruba 8,4 %.

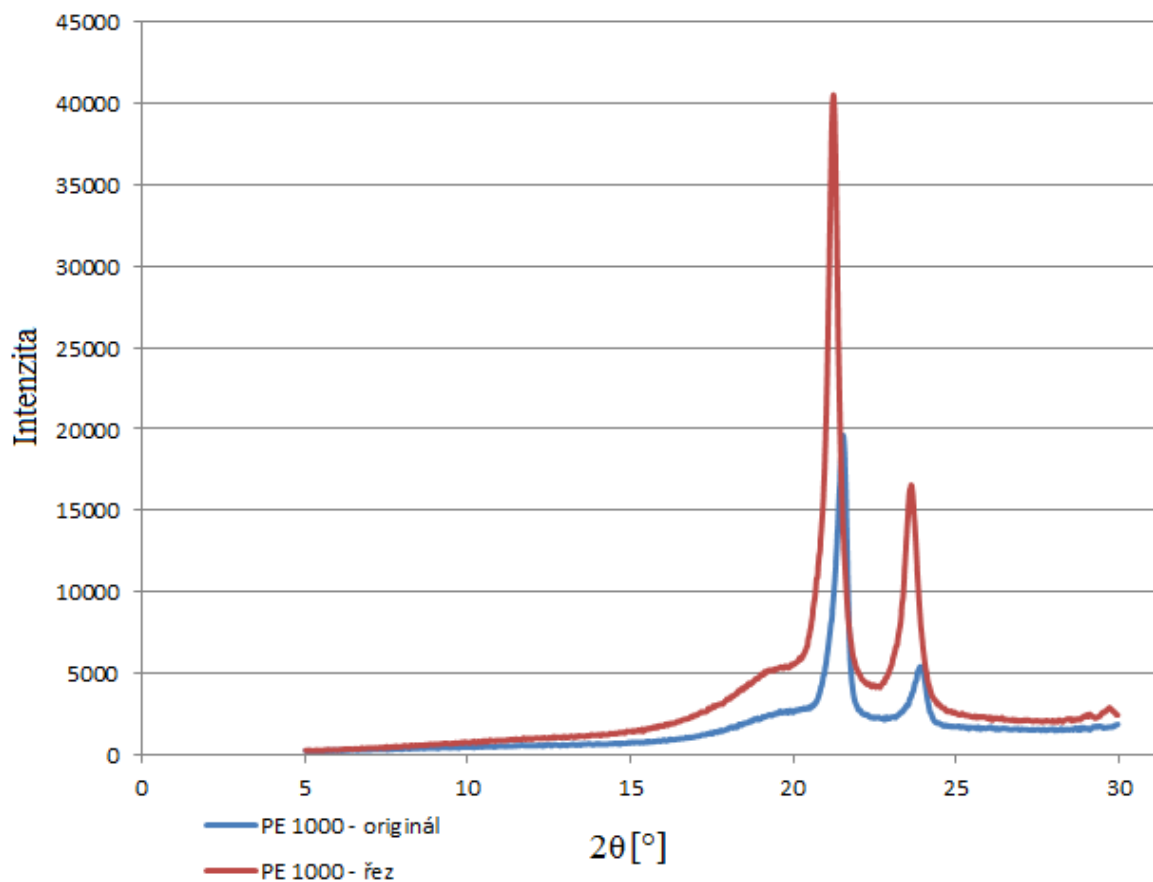
### 7.7.3 PMMA



Obr. 115 – Difraktogram materiálu PMMA

Z měření vyplynulo, že původní materiál PMMA, tj. neozářený materiál je zcela amorfní, přičemž stejného zjištění dokazuje i materiál ozářený. Zde tedy nedošlo ke změně struktury, přičemž grafické znázornění difraktogramu rovněž nevykazuje příliš výraznou změnu křivek. Je nutno podotknout, že oproti předchozím materiálům zde maximální intenzita dosahuje hodnot zhruba desetinových a nižších.

#### 7.7.4 PE 1000

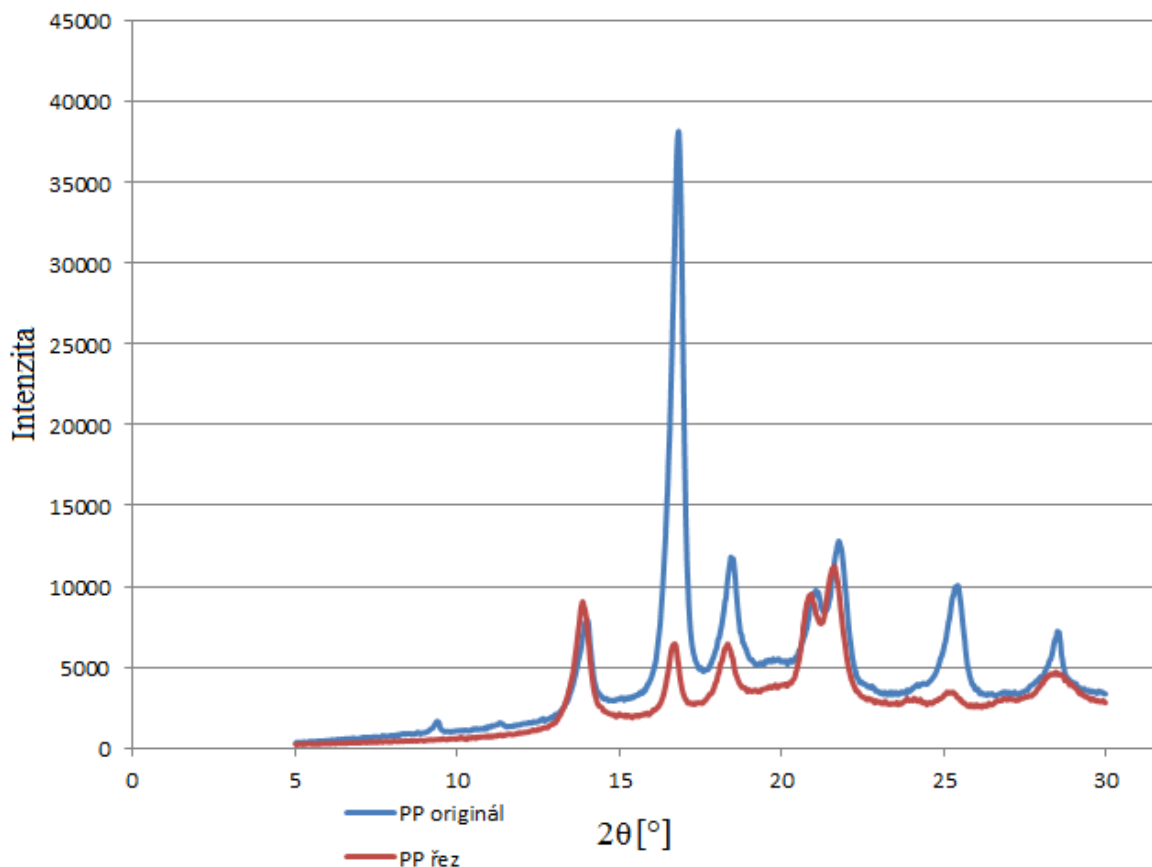


Obr. 116 – Difraktogram materiálu PE 1000

Z měření vyplynulo, že neozářený materiál vysoko-hustotního PE 1000, tj. základní materiál je krystalický ze 75,52 %. Oproti tomu část materiálu vystavená přímému ozáření, tj. přímá plocha řezu vykazuje pouze malý pokles, a to na hodnotu 73,03 % podílu krystalické složky.

Na difraktometru se tedy u ozářeného vzorku vůči původnímu zjistil pokles krystalinity o zhruba 2,5 %. Tím lze tedy říci, že v místě obrobené plochy tak došlo k nepatrnému nárůstu amorfního podílu struktury vůči základnímu materiálu.

### 7.7.5 PP



Obr. 117 – Difraktogram materiálu PP

Z měření vyplynulo, že neozařený materiál PP, tj. základní materiál je krystalický z 69,32 %. Oproti tomu část materiálu vystavená přímému ozáření, tj. přímá plocha řezu vykazuje nepatrný pokles na hodnotu 68,44 % podílu krystalické složky. Na difraktometru se tedy u ozářeného vzorku vůči původnímu zjistil pokles krystalinity o zhruba 0,9 %.

U Polypropylenu se podařilo zjistit, že se jedná o tzv. izotaktický typ, přičemž se na základě difrakční rentgenové analýzy projevila jeho schopnost polymorfie. Obecně je známo, že je důležité, aby byl podíl izotaktické složky u polypropylenu alespoň 95%. [1]

Co se týče polymorfie (což je popsáno blíže v podkapitole 6.8.1) – izotaktický polypropylen může krystalizovat ve třech krystalografických modifikacích, a sice ve fázi  $\alpha$  (monoklinická),  $\beta$  (hexagonální) a  $\gamma$  (triklinická). [1]

Co se týče polypropylenu, jež byl v této práci zkoumán, bylo zjištěno, že v původním, resp. originálním stavu byla fáze převážně  $\beta$ , tedy hexagonální, avšak po ozáření došlo k

silnému ovlivnění této fáze, resp. došlo ke snížení zaujímání této fáze ve prospěch fáze  $\alpha$ . Následné tabulky tak vystihují tuto skutečnost lépe.

U „modré“ tabulky lze vidět hodnoty získané jako vyčíslení obsahu ploch pod křivkou (Area). Na základě rozboru bylo zjištěno, které hodnoty úhlů odpovídají právě fázi  $\beta$ , a které naopak fázi  $\alpha$ . Následně je zde na základě zastoupení těchto fází v závislosti na zaujímání plochy pod danou křivkou procentuálně vyhodnoceno, že PP neozářený, resp. dodaný, byl ve fázi  $\beta$ , a to v rozsahu takřka 65%. Tato fáze je pro PP zcela běžná, není-li při výrobě záměrně použito např. nukleačních činidel, která nabízejí jednu z možností, jak tuto modifikaci ovlivnit. [1]

Tab. 9. Vyhodnocení zastoupení fází u PP

PP originál	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\alpha$	$\alpha$
Pozice $2\theta$ [°]	13,8	16,8	18,4	21,2	21,7	25,4	28,5
Max. intenzita	4739	33472	6975	4822	9743	6453	3069
Area	4692	19761	8319	8360	7234	4816	1471

PP originál			
fáze	$\alpha$	$\beta$	celkem
Area	19298	35355	54653
%	35,31	64,69	100

U „červené“ tabulky lze vidět konkrétní hodnoty ploch pod křivkou (Area). Na základě rozboru grafů a získaných hodnot bylo zjištěno, které hodnoty úhlů odpovídají právě fázi  $\beta$ , a které naopak fázi  $\alpha$  (stejně jako v případě PP originálu). Následně je zde procentuálně vyhodnoceno, že PP ozářený, je ve fázi  $\beta$  již pouze z 55%. Tedy lze konstatovat, že na základě rentgenové difrakce bylo zjištěno, že Polypropylen ozářený projevil snížení hodnoty modifikace  $\beta$  o 10 %, resp. že došlo k 10 % snížení zaujímání této fáze ve prospěch fáze  $\alpha$ .

Tab. 10. Vyhodnocení zastoupení fází u PP

PP řez	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\beta$	$\alpha$	$\alpha$	$\alpha$
Pozice $2\theta$ [°]	13,9	16,7	18,3	22	21,6	24	25,2	28,5
Max. intenzita	6966	3866	3675	7467	4658	359	813	1687
Area	5475	3206	5139	10817	2215	540	517	1752

PP řez			
fáze	$\alpha$	$\beta$	celkem
Area	13423	16238	29661
%	45,25	54,75	100



## 8 ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo úkolem jednak potvrdit a zkoumat vliv laserového paprsku na změnu struktury ve vybraných polymerních materiálech (metoda FTIR a RTG), ale také zkoumat vliv laserového paprsku na další změny v oblasti materiálových vlastností těchto polymerních materiálů.

Zde, do dalších, a jistě ne méně důležitých metod, patří například měření a posouzení hloubek jednotlivých obrobených drážek, dále zkoumání těchto drážek pod digitálním mikroskopem, měření mikrotvrlosti v oblasti řezů, snímání drsností obrobených ploch a měření 3D povrchů, přičemž jako doplňující metody bylo zařazeno též softwarové simulace teplotních polí při interakci daných materiálů s laserovým paprskem. Součástí práce bylo také zjistit, zda jsou dodané materiály vůbec vhodné pro interakci s laserovým paprskem, což se ukázalo, že i při změnách výkonu a posuvu laserového zařízení zdaleka neplatí pro všechny. Celkově bylo přitom dodáno přesně deset polymerních materiálů (PMMA, POM C, POM H, PE 1000, PA 6 G + olej, PP, PA 6, PA 66, PET a PVC).

Co se týče vypracování a zahájení prací, nejprve bylo nutno z dodaných materiálu zhotovit vzorky o jednotných rozměrech, což proběhlo dělením na pásové pile, načež tyto vzorky putovaly na pult CO<sub>2</sub> laseru, kde se realizovalo obrábění třech drážek, a to při třech různých parametrech nastavení. Na vybraných a předem ověřených materiálových vzorcích, tak vznikly tři různě hluboké a charakteristické drážky.

V rámci vybraných materiálů se míní ta skutečnost, že ne všechny dodané polymerní materiály vykazovaly při obrábění na CO<sub>2</sub> laseru vyhovující povrch a bezpečný průběh při obrábění – jak již bylo nastíněno. Vyřazeny byly proto takové materiály, které buď při obrábění hořely, nebo měly tuto tendenci, případně měly povrch po obrobení neslučitelný s jakýmkoli jeho zkoumáním, nebo v jednom případě k obrábění vůbec nedošlo, neboť by došlo k uvolnění toxických zplodin. Postupně tedy bylo z celkového počtu desíti dodaných materiálů některých materiálu z výše uvedených důvodů zamítnuto. Jinými slovy – při výběru jednotlivých materiálových vzorků šlo především o kompromis mezi všemi faktory, a to počínaje samotným řezem na zvoleném CO<sub>2</sub> laseru. Do užšího výběru se tak dostala polovina ze všech materiálů, a to zejména ty, které nečinilo problém, či nebezpečí obrobit. Tímto se tedy vyjasnil první cíl této práce, neboť bylo rozhodnuto, které materiály při parametrech a vlastnostech zvoleného typu laseru jsou, resp. nejsou obrobitelné.

Materiály, které odtud byly nadále zkoumány, byly POM C, POM H, PMMA, PE 1000 a PP, přičemž u všech těchto vybraných materiálů, resp. vzorků z nich získaných, proběhlo téměř všech zařazených metod pro posouzení zkoumaných vlivů, a to nejen pro zjištění změn strukturálních, přičemž se posuzovalo jak samotných obrobených ploch, tak oblastí blízkých řezům. Postupně tak bylo ve všech testech a měřeních zjišťováno, že zvolený CO<sub>2</sub> laser různě ovlivnil materiálové vlastnosti všech vzorků, přičemž souhlasně bylo zjištěno, že s rostoucí rychlostí posuvu (při zachování hodnoty výkonu laseru) došlo ke snížení hloubek příslušných řezů. Tímto prvotním konstatováním bylo zjištěno, že maximální ovlivnění a vlivy interakce mezi laserem a materiálem, jsou tak jednoznačně nejměřitelnější a nejviditelnější právě u řezů drážek 1, kde byl nejvyšší možný výkon, resp. nejpomalejší posuv laserové hlavičky. Proto bylo u některých měření z důvodu časové náročnosti bráno v potaz právě této 1. drážky vůči neobrobené (neozářené) části příslušného materiálu. Jedná se však vždy o uvedenou skutečnost a jen ojedinělé případy metod.

Na základě měření bylo souhlasně zjištěno, že vlivem interakce laserového paprsku s vybranými materiály dochází k ovlivnění tvrdostí těchto materiálů, a to negativním způsobem. Tím je myšleno, že u všech vzorků bylo dokázáno snížení zkoumané vtiskové mikrotvrdosti směrem k vedenému řezu, přičemž od místa řezu se tyto hodnoty ustavovaly zpět, což dokazuje opačný efekt než např. u interakce laseru s ocelmi. Co se týče simulací teplotních polí – tato metoda byla zařazena pro možnost ideální představy o tomto tepelném ovlivnění materiálu, které je u polymerů obecně velmi malé. V rámci zobrazení 3D povrchů bylo využito bezkontaktní sondy, která vykreslila reálný průběh obrobené plochy a bylo tak možno z výsledků zjistit velmi snadno i drsnost dané plochy.

V rámci měření vlivu laserového paprsku na strukturální změny bylo zařazeno metody infračervené vibrační spektroskopie (FTIR), přičemž pohled na jiné strukturální vlastnosti ukázalo využití metody rentgenové difrakční analýzy (RTG). Na základě těchto metod bylo zjištěno různých strukturálních změn. Většina výrazných změn přitom proběhla u materiálů PP a PE 1000, přičemž bylo posouzeno i materiálů POM C a POM H, kde se rovněž získalo mnoho informací. Zároveň nejméně strukturálních změn projevil materiál PMMA. Samotné výsledky jsou pak diskutovány a vyobrazeny vždy v příslušné podkapitole v rámci kapitoly nesoucí název Hlavní výsledky práce.

## SEZNAM LITERATURY

- [1] LAPČÍK, L., RAAB, M. *Nauka o materiálech II*. Vyd. 2., rozšířené. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004. ISBN 80-7318-229-7.
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 1., dotisk. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 1995. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [3] HORÁČEK, Lukáš. *Využití nekonvenčních paprskových technologií (laser/vodní paprsek) ve strojírenství* : diplomová práce. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 69 s. Vedoucí diplomové práce: Karel Osička. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5663](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5663)
- [4] KAVAN, Petr. *Analýza a využití laseru při obrábění* : bakalářská práce. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 88 s. Vedoucí diplomové práce: Oskar Zemčík. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=18069](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18069)
- [5] *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. Průmyslové spektrum*. [online]. 6.12.2016 [cit. 2016-12-6]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
- [6] RAK, Stanislav. *Vliv technologických parametrů na strukturu povrchu při obrábění ocelí výkonným laserem*: diplomová práce. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2015. 125 s. Vedoucí diplomové práce: Libuše Sýkorová. Dostupné z: <http://docplayer.cz/11209148-Vliv-technologickych-parametru-na-strukturu-povrchu-pri-obrabeni-oceli-vykonnym-laserem-bc-stanislav-rak.html>
- [7] *Tepelné zpracování laserem. Welding.cz*. [online]. 12.12.2016 [cit. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/tepelne.htm>
- [8] *Podstata, význam a historie polymerů. Publi.cz*. [online]. 4.1.2017 [cit. 2017-1-4]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [9] *Laserové technologie v praxi. Fyzika.upol.cz*. [online]. 21.11.2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [10] TONKOVIČ, Miroslav. *Analýza materiálu pro laserové řezání* : diplomová práce. Brno : VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 66 s., 36 p. Vedoucí diplomové práce: Karel Osička. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85924](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85924)
- [11] MAŇAS, M., VLČEK, J. *Aplikovaná reologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2001. ISBN 80-7318-039-1.
- [12] *Branching and crosslinking. Learning, made joyful - Memrise*. [online]. 6.2.2017 [cit. 2017-2-6]. Dostupné z: <http://www.memrise.com/mem/4177250/branching-and-crosslinking/>

- [13] *Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti. Publi.cz.* [online]. 6.2.2017 [cit. 2017-2-6]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [14] *Termoplasty – základní druhy. Publi.cz.* [online]. 7.2.2017 [cit. 2017-2-7]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [15] *Technické plasty. TechPlasty.* [online]. 10.2.2017 [cit. 2017-2-10]. Dostupné z: <http://www.techplasty.cz/technicke-plasty>
- [16] *Specifikace materiálu. Odetka.* [online]. 12.2.2017 [cit. 2017-2-12]. Dostupné z: [http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_dyneema.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_dyneema.aspx)
- [17] *Sortiment. EPP Plasty.* [online]. 18.2.2017 [cit. 2017-2-18]. Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/sortiment.php>
- [18] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal.* Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [19] *Ruční nářadí, elektrické nářadí, aku nářadí. NAKO Pardubice.* [online]. 20.2.2017 [cit. 2017-2-20]. Dostupné z: <https://www.nako.cz/4307-proma-ppk-90u-pasova-pila-na-kov-25330745.html>
- [20] *ILS – Laser Tools and Technics Corp. LTT.* [online]. 20.2.2017 [cit. 2017-2-20]. Dostupné z: [http://www.lttcorp.com/product\\_ILS.html](http://www.lttcorp.com/product_ILS.html)
- [21] *Lasery a moderní fyzika. Katedra fyziky – Fakulta stavební ČVUT.* [online]. 20.2.2017 [cit. 2017-2-20]. Dostupné z: <http://departments.fsv.cvut.cz/k102/vyuka/lasery-moderni-fyzika?prezentace>
- [22] *Zelené a UV lasery. Megablog.* [online]. 28.2.2017 [cit. 2017-2-28]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [23] *Laser (pracovní list). S fyzikou do světa.* [online]. 4.3.2017 [cit. 2017-3-4]. Dostupné z: [http://fyzika.web2001.cz/fyzika\\_II/FYZ2-20\\_laser.pdf](http://fyzika.web2001.cz/fyzika_II/FYZ2-20_laser.pdf)
- [24] *Bezpečnost laserů třídy 1 až 4. Leonardo technology – automatizace průmyslového značení.* [online]. 6.3.2017 [cit. 2017-3-6]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
- [25] *Povrchové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson. Kvalita a geometrické specifikace produktů.* [online]. 14.3.2017 [cit. 2017-3-14]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2\\_Novak\\_3D\\_mereni\\_textury.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf)
- [26] OVSÍK, Martin. *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](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/25609/ovs%C3%ADk_2013_dp.pdf?sequence=1)

- [27] Aktuální údaje o plastech a využití plastových odpadů. *TZB-info*. [online]. 21.3.2017 [cit. 2017-3-21]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/11996-aktualni-udaje-o-plastech-a-vyuziti-plastovych-odpadu>
- [28] Auta budoucnosti budou z plastů. *Hybrid.cz*. [online]. 24.3.2017 [cit. 2017-3-24]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/auta-budoucnosti-budou-z-plastu>
- [29] GRYGAR, Tomáš. 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>
- [30] ČAPKOVÁ, Pavla. 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](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf)
- [31] BRIMUS, Jan. Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály: diplomová práce. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2007. 197 s. Vedoucí diplomové práce: Libuše Sýkorová. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/4374/brimus\\_2007\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/4374/brimus_2007_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [32] KOENIG, Jack L. *Infrared and Raman spectroscopy of polymers*. Shawbury, Shrewsbury: Rapra Technology, 2001. ISBN 1859572847. [online]. 8.4.2017 [cit. 2017-4-8]. Dostupné z: <http://jdem.cz/c739t8>
- [33] NISHIKIDA, Koichi., Etsuo. NISHIO a R. W. HANNAH. *Selected applications of modern FT-IR techniques*. United States: Gordon and Breach Publishers, 1995. ISBN 2-88449-073-6. [online]. 9.4.2017 [cit. 2017-4-9]. Dostupné z: <http://jdem.cz/c739u6>
- [34] 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>
- [35] IR Lecture. *University of Delaware*. [online]. 16.4.2017 [cit. 2017-4-16]. Dostupné z: [https://www1.udel.edu/chem/fox/Chem333/Fall2013/Chem333Fall2013/Welcome\\_files/IR%20handout.pdf](https://www1.udel.edu/chem/fox/Chem333/Fall2013/Chem333Fall2013/Welcome_files/IR%20handout.pdf)
- [36] HRADILOVÁ, Pavla. Porovnání nízkoteplotního a vysokoteplotního kontaktního svařování plastů horkým elementem: diplomová práce. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2015. 103 s. Vedoucí diplomové práce: Eva Hnátková. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33743/hradilov%C3%A1\\_2015\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33743/hradilov%C3%A1_2015_dp.pdf?sequence=1)
- [37] 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>

- [38] ATR-FTIR Spectrometry characterization of polymeric materials. *Romanian Reports in Physics*. [online]. 25.4.2017 [cit. 2017-4-25]. Dostupné z: [http://www.rrp.infim.ro/2014\\_66\\_3/A17.pdf](http://www.rrp.infim.ro/2014_66_3/A17.pdf)
- [39] LIV-VIEN, Daimay. *The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules*. Boston: Academic Press, 1991. ISBN 0-12-451160-0.



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Monomer vs. polymer [8]</i> .....	3
<i>Obr. 2 – Makromolekulární struktury polymerů [12]</i> .....	4
<i>Obr. 3 – Nadmolekulární struktura polymerů [13]</i> .....	6
<i>Obr. 4 – Dělení polymerů dle postavení na trhu [1]</i> .....	7
<i>Obr. 5 – Vývoj materiálů z hlediska objemu výroby v časové ose 20. století [1]</i> .....	8
<i>Obr. 6 – Vývoj produkce polymerů mezi lety 1950 – 2012 [8]</i> .....	9
<i>Obr. 7 – Průměrná evropská spotřeba polymeů [8]</i> .....	10
<i>Obr. 8 – Rozdělení progresivních technologií [18]</i> .....	12
<i>Obr. 9 – Komplexní spektrum záření [22]</i> .....	13
<i>Obr. 10 – Elektrické a magnetické vektorové pole el.mag. záření [4]</i> .....	14
<i>Obr. 11 – Spektrum viditelného záření</i> .....	15
<i>Obr. 12 – Schéma normální a inverzní populace</i> .....	16
<i>Obr. 13 – Schéma stimulované emise záření [1]</i> .....	17
<i>Obr. 14 – Schéma optického rezonátoru [1]</i> .....	18
<i>Obr. 15 – Označení laserového zařízení třídy 1 [24]</i> .....	23
<i>Obr. 16 – Označení laserového zařízení třídy 1M [24]</i> .....	24
<i>Obr. 17 – Označení laserového zařízení třídy 1C [24]</i> .....	24
<i>Obr. 18 – Označení laserového zařízení třídy 2 [24]</i> .....	24
<i>Obr. 19 – Označení laserového zařízení třídy 2M [24]</i> .....	25
<i>Obr. 20 – Označení laserového zařízení třídy 3R [24]</i> .....	25
<i>Obr. 21 – Označení laserového zařízení třídy 3B [24]</i> .....	25
<i>Obr. 22 – Označení laserového zařízení třídy 4 [24]</i> .....	26
<i>Obr. 23 – Natavení materiálu při průchodu laserového paprsku [31]</i> .....	27
<i>Obr. 24 – Strukturní vzorec POM C a POM H [15]</i> .....	32
<i>Obr. 25 – Strukturní vzorec PE 1000 [15]</i> .....	34
<i>Obr. 26 – Strukturní vzorec PP [15]</i> .....	36
<i>Obr. 27 – Pásová pila PROMA PPK - 90U [19]</i> .....	38
<i>Obr. 28 – Laser ILS 3 NM [20]</i> .....	39
<i>Obr. 29 – Schéma řezů na vzorku</i> .....	40
<i>Obr. 30 – Nastavení laseru při výkonu 50 W a hodnoty posuvů 1%; 2% a 3%</i> .....	41
<i>Obr. 31 – Nastavení laseru na výkon 100 W a hodnoty posuvů 1%; 2% a 3%</i> .....	41
<i>Obr. 32 – Fotografie vzorků</i> .....	42

<i>Obr. 33 – Mikroskope ProScope HR [20]</i> .....	43
<i>Obr. 34 – Talysurf CLI 500</i> .....	44
<i>Obr. 35 – Schéma snímání 3D povrchu</i> .....	45
<i>Obr. 36 – CSM Micro Combi Tester</i> .....	46
<i>Obr. 37 – Zobrazení deformace typu Pile-up a Sink-in</i> .....	47
<i>Obr. 38 – Nicolet Avatar 320 ATR</i> .....	49
<i>Obr. 39 – Difraktometr PANalytical X'Pert PRO</i> .....	50
<i>Obr. 40 – Znázornění difrakce na rovinách v rámci otočného krystalu</i> .....	51
<i>Obr. 41 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky</i> .....	54
<i>Obr. 42 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky</i> .....	55
<i>Obr. 43 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. Drážky</i> .....	56
<i>Obr. 44 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky</i> .....	57
<i>Obr. 45 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky</i> .....	58
<i>Obr. 46 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky</i> .....	59
<i>Obr. 47 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky</i> .....	60
<i>Obr. 48 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky</i> .....	61
<i>Obr. 49 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky</i> .....	62
<i>Obr. 50 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky</i> .....	63
<i>Obr. 51 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky</i> .....	64
<i>Obr. 52 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky</i> .....	65
<i>Obr. 53 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 1. drážky</i> .....	66
<i>Obr. 54 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 2. drážky</i> .....	67
<i>Obr. 55 – Složená fotografie jednotlivých pohledů 3. drážky</i> .....	68
<i>Obr. 56 – Zpřístupnění obrobenej plochy pomocí nařezání pásovou pilou</i> .....	69
<i>Obr. 57 – Grafické zobrazení hloubek řezů a tloušťky základního materiálu</i> .....	70
<i>Obr. 58 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřimení</i> .....	71
<i>Obr. 59 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu POM C při výkonu řezání 100W</i> .....	71
<i>Obr. 60 – Zobrazení drsnosti povrchu</i> .....	72
<i>Obr. 61 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřimení</i> .....	72
<i>Obr. 62 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu POM C při výkonu řezání 100W</i> .....	73
<i>Obr. 63 – Zobrazení drsnosti povrchu</i> .....	73
<i>Obr. 64 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřimení</i> .....	74

<i>Obr. 65 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu POM H při výkonu řezání 100W</i>	74
<i>Obr. 66 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	75
<i>Obr. 67 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	75
<i>Obr. 68 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu POM H při výkonu řezání 100W</i>	76
<i>Obr. 69 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	76
<i>Obr. 70 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	77
<i>Obr. 71 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PMMA při výkonu řezání 100W</i>	77
<i>Obr. 72 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	78
<i>Obr. 73 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	78
<i>Obr. 74 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PMMA při výkonu řezání 100W</i>	79
<i>Obr. 75 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	79
<i>Obr. 76 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	80
<i>Obr. 77 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PE1000 při výkonu řezání 100W</i>	80
<i>Obr. 78 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	81
<i>Obr. 79 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	81
<i>Obr. 80 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PE1000 při výkonu řezání 100W</i>	82
<i>Obr. 81 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	82
<i>Obr. 82 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	83
<i>Obr. 83 – Zobrazení 3D povrchu 1. drážky materiálu PP při výkonu řezání 100W</i>	83
<i>Obr. 84 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	84
<i>Obr. 85 – Zobrazení 2D povrchu – vlevo včetně vlnitosti; vpravo po napřímění</i>	84
<i>Obr. 86 – Zobrazení 3D povrchu 3. drážky materiálu PP při výkonu řezání 100W</i>	85
<i>Obr. 87 – Zobrazení drsnosti povrchu</i>	85
<i>Obr. 88 – Vtiskový modul pružnosti</i>	87
<i>Obr. 89 – Vtisková mikrotvrdost dle Vickerse</i>	87
<i>Obr. 90 – Vtiskový modul pružnosti</i>	88
<i>Obr. 91 – Vtisková mikrotvrdost dle Vickerse</i>	88
<i>Obr. 92 – Vtiskový modul pružnosti</i>	89
<i>Obr. 93 – Vtisková mikrotvrdost dle Vickerse</i>	89
<i>Obr. 94 – Vtiskový modul pružnosti</i>	90

<i>Obr. 95 – Vtisková mikrotvrdost dle Vickerse .....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 96 – Vtiskový modul pružnosti všech zkoumaných materiálů .....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 97 – Vtisková mikrotvrdost všech zkoumaných materiálů.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 98 – Teplotní pole materiálu POM C .....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 99 – Průběh teploty na povrchu materiálu POM C .....</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 100 – Teplotní pole materiálu POM H.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 101 – Průběh teploty na povrchu materiálu POM H .....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 102 – Teplotní pole materiálu PMMA.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 103 – Průběh teploty na povrchu materiálu PMMA .....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 101 – Teplotní pole materiálu PE 1000 .....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 105 – Průběh teploty na povrchu materiálu PE 1000.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 106 – Teplotní pole materiálu PP .....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 107 – Průběh teploty na povrchu materiálu PP .....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 108 – FTIR spektrum materiálu POM C .....</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 109 – FTIR spektrum materiálu POM H.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 110 – FTIR spektrum materiálu PMMA.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 111 – FTIR spektrum materiálu PE 1000 (UHMW-PE) .....</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 112 – FTIR spektrum materiálu PP .....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 113 – Difraktogram materiálu POM C .....</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 114 – Difraktogram materiálu POM H.....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 115 – Difraktogram materiálu PMMA.....</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 116 – Difraktogram materiálu PE 1000.....</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 117 – Difraktogram materiálu PP.....</i>	<i>109</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Přehled vlnových délek nejpoužívanějších aktivních prostředí .....</i>	19
<i>Tab. 2. Přepočet hodnot posuvů .....</i>	41
<i>Tab. 3. Rozsah zatěžující síly <math>F</math> při různých zkouškách tvrdosti dle Vickerse .....</i>	46
<i>Tab. 4. Vlastnosti materiálu POM C .....</i>	94
<i>Tab. 5. Vlastnosti materiálu POM H .....</i>	95
<i>Tab. 6. Vlastnosti materiálu PMMA .....</i>	96
<i>Tab. 7. Vlastnosti materiálu PE 1000 .....</i>	97
<i>Tab. 8. Vlastnosti materiálu PP .....</i>	98
<i>Tab. 9. Vyhodnocení zastoupení fází u PP .....</i>	110
<i>Tab. 10. Vyhodnocení zastoupení fází u PP .....</i>	110

## SEZNAM ZKRATEK

PMMA	Polymethylmetakrylát
POM C	Polyoxymetylen kopolymer
POM H	Polyoxymetylen homopolymer
PE 1000	Polyetylén 1000
PA 6 G + olej	Polyamid 6 G plněný olejem
PP	Polypropylén
PA 6	Polyamid 6
PA 66	Polyamid 66
PET	Polyethyltereftalát
PVC	Polyvinylchlorid