

Vliv technologických parametrů na strukturu povrchu při obrábění polymerů výkonným laserem

Bc. Jan Káňa



nascannované zadání s. 1

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 ¹⁾;
- 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/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 13.5.2016

.....

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

(1) Vysoká škola 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.

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou vlivu technologických parametrů na strukturu obráběného materiálu laserovým paprskem. V teoretické části je popsána funkce laseru a jeho rozdělení. Dále jsou zde zmíněny metody zkoumání vlastností povrchu po průchodu laserovým paprskem.

V praktické části jsou vybrané metody aplikovány přímo na polymerním vzorku a využitím zmíněných metod je vytvořeno zhodnocení zkoumaného povrchu materiálu.

Klíčová slova:

Laser, metody zkoumání povrchu, polymerní materiály

ABSTRACT

This diploma thesis contains an issue of the influence of the technological parameters on the material machining by the laser ray. In the theoretical part there are the function of laser as well as his classification described. Furthermore, there are also mentioned the methods of examination of the surface qualities after passing through of the laser ray.

In the practical part of thesis the particular methods are applied on the polymer sample and, by using these methods, an evaluation of the classified material surface is created.

Keywords:

Laser, methods of studying the surface, polymer material

Na tomto místě bych chtěl poděkovat těm, kteří se jakýmkoli způsobem zasloužili o vytvoření této diplomové práce. V první řadě patří velké díky doc. Ing. Libuši Sýkorové, Ph.D., která byla zároveň vedoucí práce, za její vedení, užitečné rady a ochotu, se kterou k práci přistupovala. Také bych poděkoval doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za spolupráci a profesionální přístup při zkoumání výsledků v laboratořích Fakulty technologické. Poděkování směřuje i k Ing. Pavlu Urbánkovi, Ph.D. a k doc. Ing. et Ing. Ivo Kuřítkovi, Ph.D., et Ph.D., kteří věnovali svůj čas a cenné zkušenosti při tvorbě experimentální části práce. Je třeba zmínit i firmu MRB Sazovice s.r.o., která poskytla materiál pro použité vzorky a také umožnila samotnou výrobu.

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

Ve Zlíně 5.5.2016

.....

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ.....	13
1.1 CHARAKTERISTIKA NEKONVENČNÍCH METOD	13
1.2 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD	13
2 LASER.....	17
2.1 PRINCIP LASERU	17
2.2 OPTICKÝ REZONÁTOR.....	20
2.3 VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU	21
2.4 CHARAKTERISTIKA LASERŮ PRO TECHNOLOGICKÉ OPERACE.....	23
2.5 VÝHODY A NEVÝHODY LASERŮ.....	24
2.6 VYUŽITÍ LASERU V PRAXI – OBLASTI POUŽITÍ.....	25
2.7 METODY LASEROVÉHO DĚLENÍ (ŘEZÁNÍ) MATERIÁLU	26
2.7.1 Protavování	27
2.7.2 Laserové sublimační řezání.....	27
2.7.3 Laserové pálení	28
3 PLYNOVÝ CO₂ LASER.....	29
4 VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE.....	32
4.1 MOLEKULÁRNÍ VIBRACE	32
4.1.1 Biatomická molekula	32
4.1.2 Víceatomová molekula.....	33
4.2 AKTIVITA VIBRACE	34
4.3 UŽITÍ VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE	34
4.4 INFRAČERVENÁ VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE FTIR.....	34
4.5 RAMANOVA SPEKTROSKOPIE.....	36
4.6 METODY MĚŘENÍ INFRAČERVENÝCH SPEKTER LÁTEK	37
4.6.1 Transmisní techniky	37
4.7 RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA.....	38
4.7.1 Princip metody	38
5 INTERAKCE LASER-MATERIÁL	40
5.1 INTERAKCE.....	40
5.2 VLIV DRSNOSTI MATERIÁLU	41
5.3 VLIV HUSTOTY VÝKONU.....	41
5.4 VLIV VLNOVÉ DÉLKY	42
6 POLYMERY	43
6.1 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	43
6.2 ELASTOMERY	43
6.2.1 Přírodní kaučuk	44
6.2.2 Syntetický kaučuk	44
6.2.3 Vulkanizace.....	45

6.3	TERMOPLASTY	45
6.4	REAKTOPLASTY.....	45
6.5	ZPRACOVÁNÍ POLYMERŮ	47
6.5.1	Lisování.....	47
6.5.2	Válcování	47
6.5.3	Vytlačování	48
6.5.4	Vyfukování.....	48
6.6	SPOTŘEBA POLYMERŮ	49
7	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	51
II	PRAKTICKÁ ČÁST	52
8	MATERIÁLY VZORKŮ A JEJICH VÝROBA	53
8.1	VZORKY	53
8.2	POLYMETHYLMETHAKRYLÁT – PMMA	54
8.2.1	Výroba.....	54
8.2.2	Vlastnosti.....	55
8.2.3	Zpracování a využití.....	55
8.3	POLYPROPYLEN PP.....	56
8.3.1	Výroba.....	56
8.3.2	Zpracování a využití.....	57
8.4	HOUŽEVNATÝ POLYSTYREN HPS	57
9	CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH STROJŮ A PŘÍSTROJŮ	59
9.1	LASEROVÉ ZAŘÍZENÍ	59
9.1.1	Parametry stroje	60
9.1.2	Vhodné materiály pro řezání na EUROLASERU LCS XL-1600.....	60
9.2	TALYSURF CLI 500	60
9.2.1	Parametry stroje	60
10	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	62
10.1	OBRÁBĚNÍ VZORKU Z POLYMETHYLMETHAKRYLÁTU (PMMA)	63
	<i>Vstupní parametry stroje</i>	<i>63</i>
10.2	OBRÁBĚNÍ VZORKU Z POLYPROPYLENU (PP)	64
10.3	OBRÁBĚNÍ VZORKU Z HOUŽEVNATÉHO POLYSTYRENU (HPS).....	66
10.4	DISKUZE K VÝSLEDKŮM VYPÁLENÝCH VZORKŮ.....	68
11	LABORATORNÍ ZKOUMÁNÍ PMMA PO PRŮCHODU LASEROVÝM PAPEREM.....	69
11.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	69
11.2	MĚŘENÍ HLOUBKY	71
11.2.1	Diskuze výsledků k měření hloubky	72
11.3	SEZNÁMENÍ S PŘÍSTROJEM.....	73
11.4	NASNÍMÁNÍ POVRCHŮ	75
11.5	SNÍMÁNÍ POVRCHŮ DRÁŽEK	77
11.5.1	1. Drážka	77
11.5.2	2. Drážka	79
11.5.3	3. Drážka	81

11.5.4	4. Drážka	83
11.6	POPIS GRAFŮ A ZHODNOCENÍ.....	85
11.7	SNÍMÁNÍ POVRCHU KOSTKY	86
12	POSOUZENÍ KVALITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM.....	90
12.1	POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	91
12.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ A POPIS MATERIÁLU	94
12.3	ZKOUMÁNÍ POVRCHU POMOCÍ FTIR INFRAČERVENÉ SPEKTROSKOPIE.....	94
12.4	ZKOUMÁNÍ POVRCHU POMOCÍ RAMANOVY SPEKTROSKOPIE	97
12.5	ROENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA	100
	ZÁVĚR	102
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	104
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	106
	SEZNAM OBRÁZKŮ	108
	SEZNAM TABULEK.....	110
	SEZNAM GRAFŮ	111
	SEZNAM PŘÍLOH.....	113

ÚVOD

Laserový paprsek a jeho využití byl jedním z největších objevů minulého století. V dnešní době se stále více využívá a díky jeho jedinečným vlastnostem jsou dosahovány velmi zajímavé výsledky v mnoha odvětvích, ať už se jedná o strojírenství, medicínu, výzkum a další. Patří mezi nekonvenční metody obrábění, což je v současnosti velmi moderní trend a mnohé firmy jim dávají přednost před jinými konvenčními metodami, které jsou se svými výsledky pro některé požadavky nedostačující. Nekonvenčními metodami jsou nazývány ty, které pro úběr materiálu nevyužívají mechanické práce, ale využívají fyzikální a mechanické postupy, které nejsou tak často v tomto odvětví využívány, ale dosahují velmi dobrých výsledků. Pomocí laserového paprsku lze dosáhnout velmi produktivní, automatizované a velmi přesné výroby. V dnešní době jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu výrobků. Nekonvenční metody v této oblasti kvality dosahují velmi dobrých výsledků. Obrobené povrchy laserovou metodou jsou taky vysoce kvalitní. Abychom tyto povrchy mohli hodnotit, dále zlepšovat a porovnávat, existuje celá řada různých metod zkoumající kvalitu povrchů. V diplomové práci byly vybrány konkrétní metody zkoumání povrchů. Jejich aplikace na vyrobených vzorcích bude popsána v kapitolách praktické části práce.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ

Nekonvenční metody obrábění hrají v dnešní době významnou roli v rozvoji strojírenství a patří mezi moderní metody. U těchto metod je většinou vyloučen standardní řezný nástroj a k úběru materiálu dojde vlivem teplených, chemických nebo abrazivních účinků. Lze tyto také kombinovat. Nejčastěji se využívají, když není možno použít jedno z klasických metod obrábění nebo by byl klasický způsob náročný, ať už technologicky nebo finančně.

Výhodou je též obrábění součástí a materiálů s vysokou pevností a tvrdostí, dále pak tvarově složité díly, které by jinak nebylo možno vyrobit.

1.1 Charakteristika nekonvenčních metod

Tyto technologie jsou charakteristické hlavně:

- Možností obrábění složitých tvarů
- Procesy lze plně automatizovat
- Materiál nástroje nemusí být tvrdší a pevnější, než je obráběný materiál
- Rychlost a výkonnost nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu

1.2 Rozdělení nekonvenčních metod

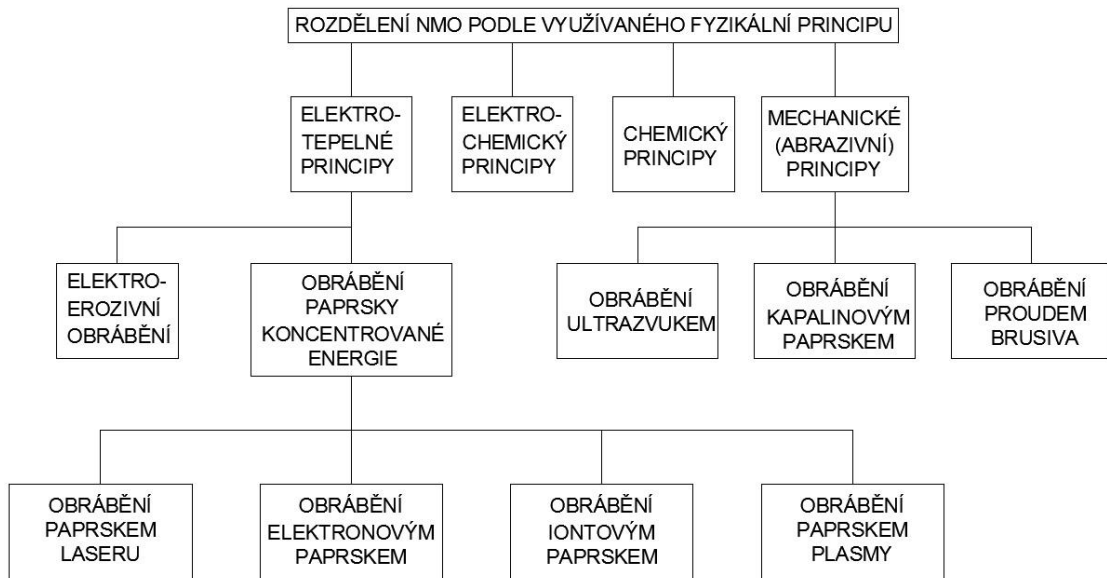
Způsob úběru materiálu nekonvenčními metodami se dělí:

- a) **Úběr materiálu tepelným účinkem** - Využívá se tepla pro řízené odtavování materiálů:
 - *Obrábění paprskem laseru*
 - Obrábění paprskem plazmy
 - Elektroerozivní metody
- b) **Úběr chemickým nebo elektrochemickým účinkem** – elektrochemické využívá intenzivní elektrolýzy a podstatou chemického obrábění jsou přímo chemické reakce, které působí na materiál.
 - Chemické obrábění
 - Elektrochemické obrábění

c) Úběr mechanickým účinkem:

- Obrábění paprskem vody
- Ultrazvukové obrábění
- Obrábění proudem brusiva

[1]



Obr. 1 – Rozdělení laserů podle využívaného fyz. principu

V následující tabulce jsou srovnány nekonvenční metody s klasickými konvenčními (třískové obrábění) z hlediska měrných objemových úběrů obráběného materiálu a energetické náročnosti.

Způsob obrábění	Úběr [mm ³ *s ⁻¹]	Měrná práce [J*mm ³]	Příkon stroje [kW]
Soustružení, frézování	až 15000	1 - 10	5 - 50
Broušení	80 - 1500	5 - 200	5 - 150
Elektroerozivní obrábění	5 - 120	100 - 1000	až 15
Elektrochemické obrábění	30 - 1000	1000 - 2000	80 - 2000
Ultrazvukové obrábění	3 - 30	150 - 300	1 - 5
Plasmové obrábění	1500	500 - 1000	50 - 150

Obrábění laserem	30 - 500	80 - 150	5 - 40
Obrábění vodním paprskem	80 - 600	15 - 100	5 - 20
Obrábění elektron. Paprskem	3	1500	5

Tab. 1 – Srovnání vybraných druhů obrábění

Další dělení je podle:

- 1) Aktivního prostředí (skupenství materiálu, které se používá na generování záření):**
 - a) Pevné
 - b) Plynové
 - c) Kapalinové
 - d) Polovodičové

- 2) Vlnové délky:**
 - a) Infračervené záření
 - b) Optozáření
 - c) Ultrafialové záření (UV)
 - d) Rentgenové RTG a gama záření

- 3) Druhu paprsku:**
 - a) Kontinuální režim
 - b) Pulzní režim
 - c) Q-switched (Qs) režim

- 4) Způsobu čerpání energie:**
 - a) Opticky
 - b) Elektricky
 - c) Chemicky
 - d) Tepelné
 - e) Jadernou energií

5) Výkonu:

- a) Nízkovýkonové – desetiny až stovky W
- b) Vysokovýkonové - 1÷30 kW

6) Konstrukce laserového záření:

- a) Systém pevného laseru a pohyblivého stolu
- b) Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý stůl s obrobkem
- c) Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečen zrcadly (laserová hlavice a obrobek jsou stacionární)

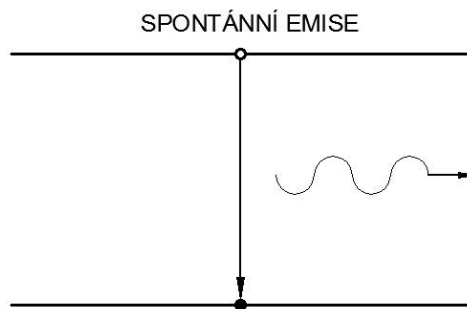
2 LASER

Výzkum a vývoj fyziky a techniky ve druhé polovině dvacátého století je mimo jiné charakterizován získáním nových druhů energií a jejich využitím v praxi. Významným zdrojem energie je laser, který patří k největším objevům našeho století. [2]

Počáteční teorie stimulované emise záření byla rozpracována v padesátých letech minulého století a pod názvem MASER (Mikrowave Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesílení mikrovln s využitím stimulované emise záření) byl postaven první zesilovač pracující v oboru mikrovln. O několik let později bylo zkonstruováno zařízení zesilující a generující na obdobném principu zařízení z optické spektrální oblasti. Proto se pro něj nejprve používal název optický maser, ale záhy se ustálil na LASER, kdy v akronymu MASER bylo M zaměněno za písmeno L podle anglického Light (světlo) – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tento název se pak používá pro všechna zařízení pracující na principu stimulované emise záření, ačkoli generují záření v širokém spektrálním oboru od daleké infračervené do daleké ultrafialové oblasti spektra, existují i projekty rentgenových laserů a laserů gama. [3]

2.1 Princip laseru

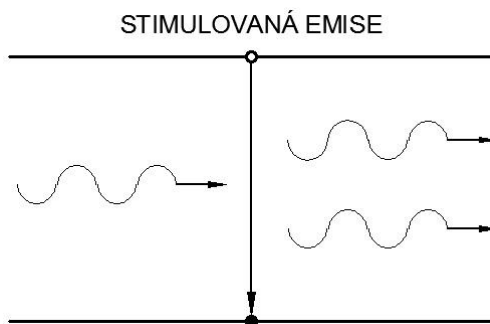
Spontánní emise – samovolné vyzařování elektromagnetického pole vzbuzenými kvantovými částicemi (atomy, ionty, molekulami apod.). Vzbuzená částice přechází z vyšší energetické hladiny E_2 na hladinu s nižší energií E_1 samovolně a při tom vyzařuje elektromagnetické záření s frekvencí. [2]



Obr. 2 – Spontánní emise

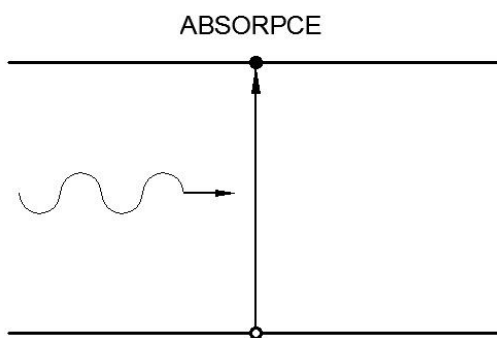
Stimulovaná emise – pokud je atom nebo iont ve vzbuzeném stavu, může se po určité době samovolně vrátit na nižší energetickou hladinu, energie se uvolní ve formě fotonu, který se vydává náhodným prostorovým směrem (spontánní emise). Je však možné, že foton emise je povzbuzen příchozím fotonem, pokud mají vhodnou energii nebo frekvenci

– stimulovaná emise. Příchozí foton dopadá na atom a přinutí jej přejít na nižší energetickou hladinu, přičemž vyzáří foton. Původní foton se ovšem nepohlí a pokračuje dále stejným směrem jako foton, který emisi vyvolal.



Obr. 3 – Stimulovaná emise

Absorpce – je v podstatě opačný proces spontánní emise, při němž atom (molekula) v nižším energetickém stavu pohltí foton o požadované frekvenci a přejde do vyššího energetického stavu. Spontánní emise a absorpce jsou opačné a stejně pravděpodobné procesy. O převládajícím ději rozhodne až počet atomů v buď vyšší energetické hladině (probíhá spontánní emise) nebo na nižší energetické hladině (probíhá absorpce). [19]



Obr. 4 – Absorpce

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

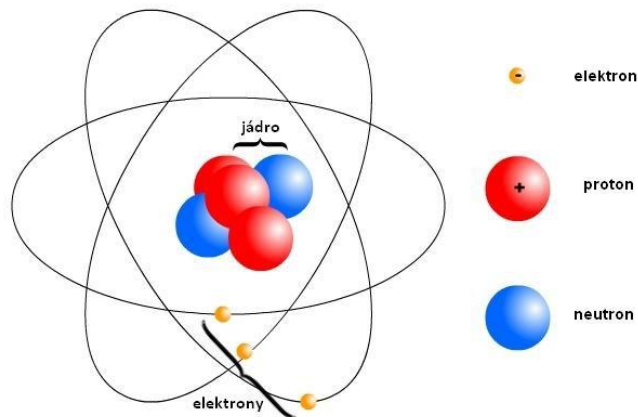
$$E = h \cdot f = E_2 - E_1, \quad [\text{J}] \quad [1]$$

kde:

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

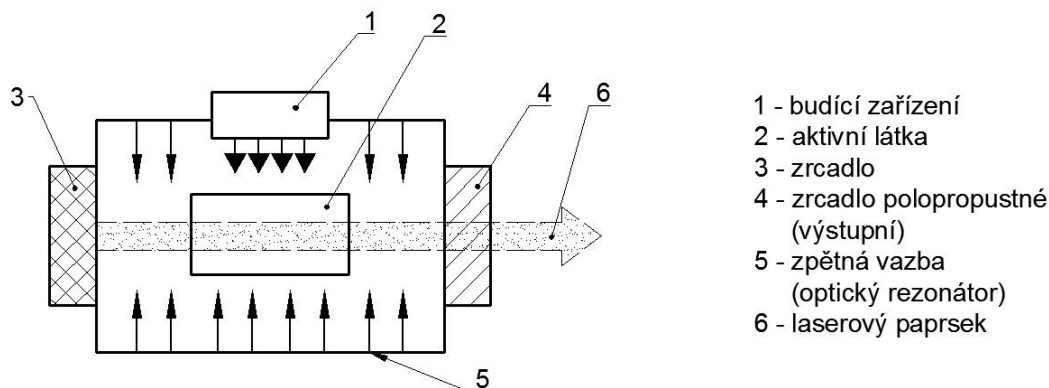
E_2, E_1 – rozdíl energií hladin, mezi kterými nastal přechod [5]

Laser je generátorem elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek při využití stimulovaného záření. Podstatu laseru je možno objasnit na základě pojmů kvantové fyziky a zjednodušeného planetového modelu (viz. obr. 5)



Obr. 5 – Planetový model

V tomto modelu okolo kladně nabitého jádra obíhají, na uzavřených drahách, elektrony podléhající elektrostatickým silám. Každé dráze přísluší určité množství energie (energetická hladina). Čím je dráha elektronu bližší jádru, tím je jeho energie menší. U atomu v základním stavu zaujímají všechny elektrony nejnižší energetické hladiny příslušné drahám o nejmenších poloměrech. Přechod elektronu ze základní energetické hladiny na vyšší vyžaduje absorpci a přechod v opačném směru emise určité hodnoty energie. Znamená to, že atom, kterému bylo dodáno určité množství energie, se vrátí do základního stavu.

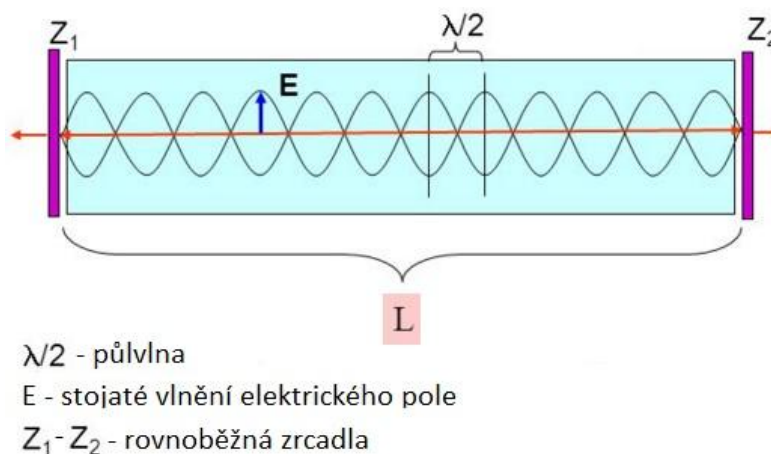


Obr. 6 – Schéma laserového zařízení

Energi ve formě elektromagnetického vlnění, elektronového záření nebo intového záření existuje (budí) atomy tuhé, kapalné nebo plynné aktivní látky, ve které nastane inverzní stav. Přechodem atomů této látky do základního stavu vznikne stimulovanou emisí monochromatické koherentní záření, jednoduše ovládané optickými čočkami a zrcadly. Světelný paprsek (svazek paprsků) při dopadu na překážku přemění svoji energii na tepelnou. [6]

2.2 Optický rezonátor

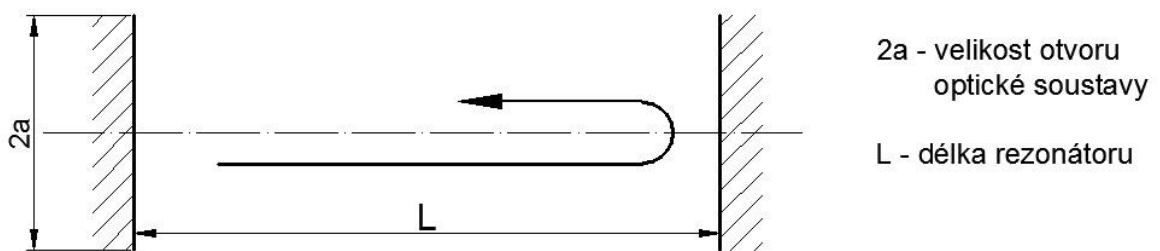
Optický rezonátor je součástí každého laserového zařízení. Je to dutina obklopená odrazovými plochami – dvě zrcadla, rovnoběžně zbroušené (dielektrické zrcadlo, leštěný kov, např. zlato). První zrcadlo je nepropustné, druhé je částečně propustné a osy zrcadel musí být rovnoběžné. Toto je nejjednodušší příklad optického rezonátoru, tzv. Fabriův-Perotův rezonátor. Odrazů záření, které vznikají uvnitř rezonátoru, se využívá k dosažení inverzní populace. [5]



Obr. 7 – Optický rezonátor

Generace elektronických kmitů probíhá analogicky přes zesílení napětového nebo proudového signálu zesilovačem s kladnou zpětnou vazbou. Kladná zpětná vazba je realizována obvodem, který zavádí část zesíleného výstupního signálu zpět na vstup zesilovače ve fázi se vstupním signálem. Tím dojde k opakovanému zesílení, kdy zisk zesilovače teoreticky roste nade všechny meze. Výsledkem je tedy rozkmitání obvodu na frekvenci rezonančního kmitočtu elektronického obvodu. Podobná realizace takového kmitavého pohybu je například mikrofon se zesilovačem a reproduktorem. Přiložíme-li mikrofon k reproduktoru, je využita akustická vazba k zesílení šumu zesilovače a taková soustava se rozkmitá na akustickém kmitočtu.

Z aktivního prostředí jsou vyzařovány fotony spontánního záření bez vzájemného vztahu mezi směrem a fází, náhodně kmitají. Za pomoci zrcadel s velkou odrazivostí, umístěných na okrajích aktivního prostředí, vrátíme část fotonů, které se šíří v podélné ose z aktivního prostředí (nejčastěji válcovitý tvar) zpět do aktivního prostředí k dalšímu zesílení. Spontánně vyzařované fotony budou zesilovány stimulovanou emisí a po průchodu bude část fotonů sdílet stejný směr i fázi.



Obr. 8 – Rezonátor

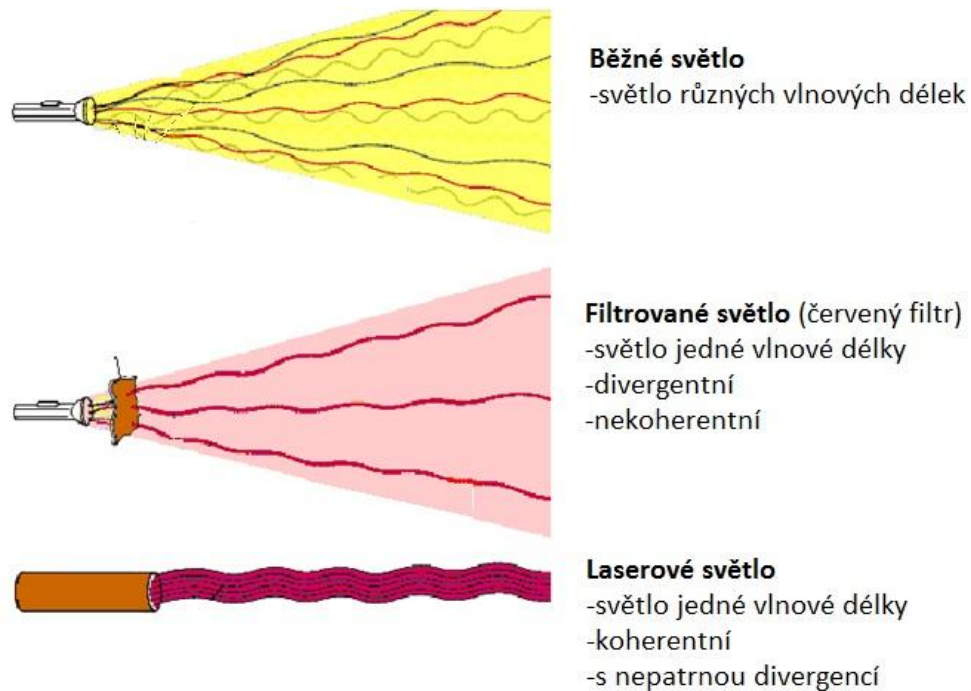
Zrcadla musí být na jedné i na druhé straně aktivního prostředí dobře nastavena. Pokud jejich osy nebudou totožné, nedojde k dostatečnému zesílení. Přesné nastavení zrcadel vede k vytvoření stojatého optického vlnění uvnitř prostoru mezi zrcadly. [2]

2.3 Vlastnosti laserového paprsku

Monochromatické – jednobarevné, tj. záření s jedinou vlnovou délkou

Koherentní – vzájemně související světelné paprsky se společným původem v jediném zdroji, spojitě

Divergence - rozbíhavost



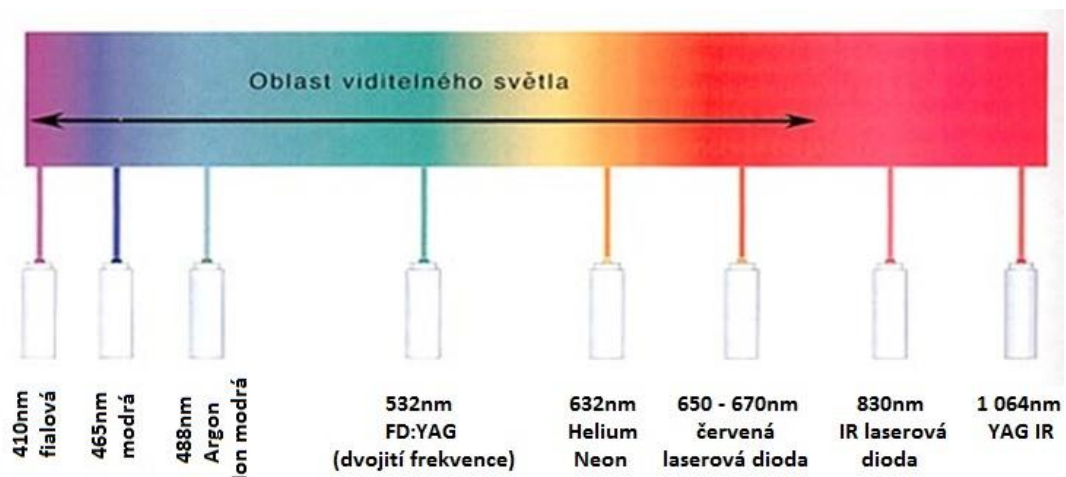
Obr. 9 – Druhy světel

Jak je patrné z obrázku výše, laserové světlo je vysoce monochromatické, má jednu vlnovou délku a ta nám určuje, v jaké oblasti spektra se bude laserový paprsek vyskytovat. Vlnová délka nám lasery rozděluje na tři skupiny:

- Vlnová délka $> 630 \text{ nm}$ → termální
- Vlnová délka $380 - 630 \text{ nm}$ → lasery pracující na viditelném světle
- Vlnová délka $< 380 \text{ nm}$ → lasery vyskytující se v UV oblasti

Laser a jeho světelný paprsek má v podstatě jednu vlnovou délku a je také vysoce monochromatický. Oblast spektra je ukazatelem, v jaké části spektra se bude laserový paprsek vyskytovat.

V oblasti viditelného spektra se vyskytuje fialový laser (viz. obr. 10), který má nejmenší vlnovou délku. Energetická náročnost této diody je velmi nízká. Druhá nejmenší vlnová délka patří modrému laseru, který má téměř stejnou energetickou náročnost. Argonový laser má v oblasti plynových laserů nejmenší vlnovou délku. Další vlnové délky laserů jsou zobrazeny na obrázku 10. Nd:YAG krystalový je jedním z nejčastěji používaných laserů.



Obr. 10 – Vlnové délky pro jednotlivé typy laserů

2.4 Charakteristika laserů pro technologické operace

Charakteristika laserů pro technologické operace lze určit podle používaného aktivního prostředí – **aktivní látky**. Dle té se lasery rozdělují na:

- Plynové
- V pevné fázi
- Kapalinové

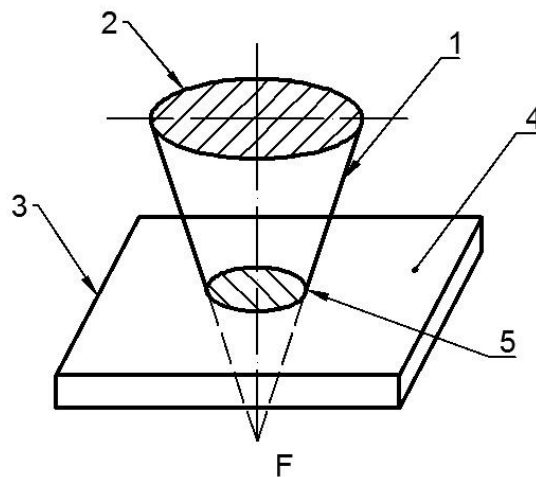
Nejčastěji se vyskytujícími typy jsou v současné době lasery, které používají plynné prostředí jako aktivní, tedy plynové lasery. Toto aktivní prostředí se skládá ze směsi plynů CO_2 , N_2 a He, proto jsou nazývány jako CO_2 lasery.

Z laserů v pevné fázi jsou nejvíce využívány Nd:YAG. V této pevné fázi jsou v aktivním prostředí syntetické krystaly ytrium-hliníkového granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), podporované ionty neodymu (neodym je měkký stříbřitě bílý, vnitřně přechodný kovový prvek, používá se pro výrobu speciálních skel, keramiky a mimořádně silných permanentních magnetů).

Vlnová délka nejpoužívanějších laserů je v intervalu 0,4-10,6 μm . Energie paprsku je soustředěna do průměru 0,05-0,25mm, a proto je hustota energie v tomto místě větší než 10^8W/cm^2 , a v místě, kde paprsek dopadá na materiál, dosahuje teplota hodnoty až $25 \cdot 10^3 \text{C}$.

Na to, jaký bude výsledek působení laseru na materiál, má vliv řada parametrů technických i technologických:

- Laserový paprsek (1)
 - intenzita
 - vlnová délka
 - rozbíhání (divergence)
 - délka pulsu
- Soustava čoček (2)
 - ohnisková vzdálenost
- Materiál (3)
 - hustota
 - měrné teplo
 - tepelná vodivost
 - součinitel absorpce
 - tloušťka materiálu
- Odrazivost povrchu (4)
- Velikost stopy paprsku (5)



Obr. 11 – Soustava laser – materiál

2.5 Výhody a nevýhody laserů

V porovnání s jinými zdroji energie patří mezi hlavní **výhody**:

- vysoká energie a extrémní koncentrace paprsku v místě dopadu, snadné ovládání a regulace výkonu
- nástroj je u drtivé většiny obráběcích strojů neodmyslitelnou součástí, u laserů nástroj v klasickém slova smyslu odpadá, a tím i údržba, která je s ním spojena

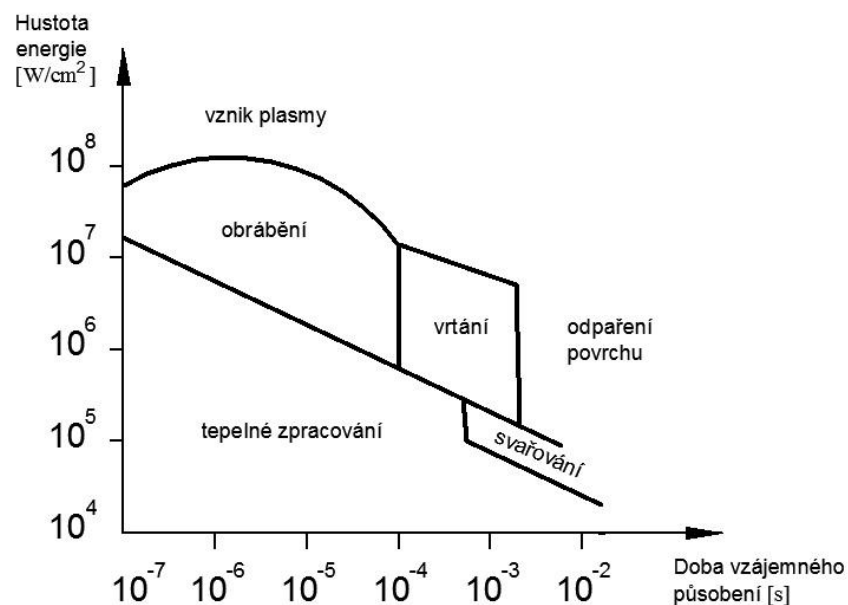
- laser je velmi přesný v oblasti ozáření, a tudíž je tato oblast tepelně ovlivněna jen málo
- práce související s přípravou a seřizováním nejsou časově náročné
- snadná automatizace procesu a výrobní operace lze také robotizovat, zařazení laseru do automatizovaných výrobních systémů.

Nevýhody laseru jsou:

- náklady na zakoupení a zprovoznění laserového zařízení jsou vysoké, jakožto i náhradní díly
- s ohledem na celkový příkon zařízení je účinnost malá (asi 10%)
- při práci s laserem je nutno používat ochranné kryty a prvky, bezpečnostní opatření na vysoké úrovni
- údržba stroje je nákladná a náročná

2.6 Využití laseru v praxi – oblasti použití

Nejčastěji se setkáváme s laserem při dělení materiálu, tedy řezání laserem. Další oblast využití je při obrábění, značení a popisování součástí a materiálů (gravírování) a nanášení povlaků.



Graf 1 - Závislost hustoty energie na době vzájemného působení

Dále se s laserem můžeme setkat při svařování a navařování, přesné měření poloh a rozměrů součástí, při tepelném zpracování a defektoskopii, což je nedestruktivní testování, ať už materiálů nebo součástí (např. po svařování), a je schopno odhalit vady ve výrobku bez jeho porušení nebo poškození.

Nevýhodou některých typů laserů je, že se energie přeměňuje s celkem malou účinností. To je však nahrazeno vysokou kvalitou laserového světla. Laser je jedním nejužitečnějších vynálezů a nástrojů současnosti a používá se v mnoha odvětvích.

Zde jsou uvedeny některé oblasti, kde se laserů využívá:

- Použití v medicíně – dermatologie, plastická chirurgie, operace očí, neurologie, urologie, gynekologie a další.
- Použití v mikroelektronice
- Použití v astronomii, geodézii, geofyzice – na základě odrazů laseru od určitých objektů se měří vzdálenost mezi nimi (poloha družic a stanovení jejich drah, zkoumání zemětřesení atd.).
- Ekologické využití – měření znečištění ovzduší a určování.
- Využití ve výpočetní technice – tiskárny, kopírky.
- Spektroskopie – studium spektra.
- Využití v jaderné fyzice
- Vojenský průmysl – různé druhy zaměřovacích optik na zbraních, zaměření cíle s velkou přesností, laserové navádění.
- Průmyslové lasery – svařování, vrtání, obrábění, řezání, popis, dekorace, laserové značení a kalení.

[3]

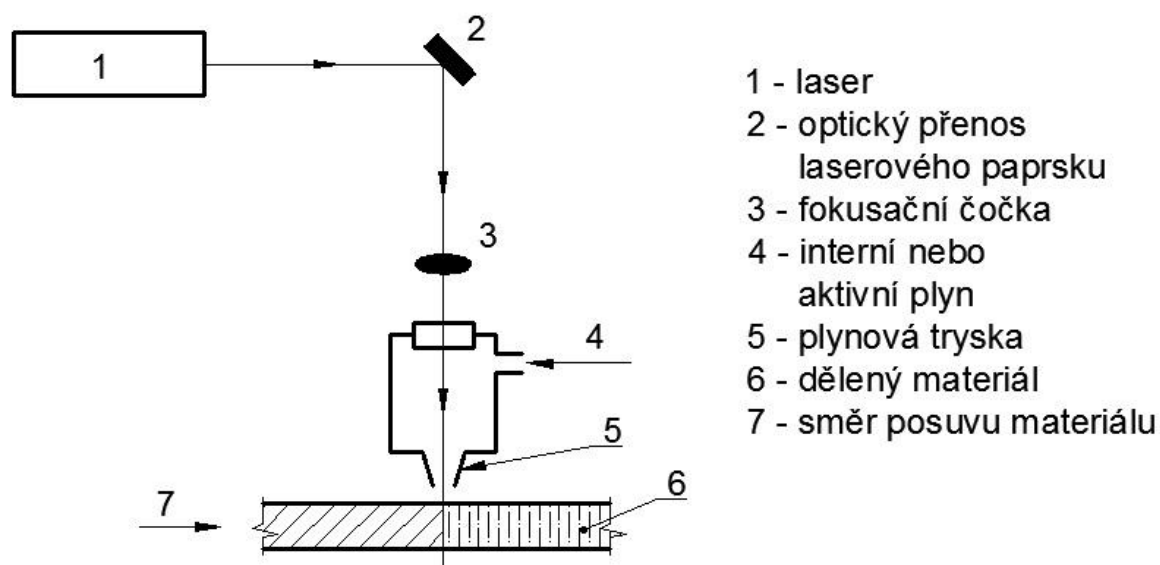
2.7 Metody laserového dělení (řezání) materiálu

Jak už bylo zmíněno výše, nejvíce se využívají lasery CO₂ o výkonu do 3kW a Nd:YAG, které pracují s výkony do 800W. Tyto metody jsou schopny pracovat v kontinuálním provozu i v provozu pulzním.

2.7.1 Protavování

Na ohnisko o průměru 0,05-0,25 mm působí soustředěná energie laserového paprsku a tím dojde k ohřevu materiálu nad **teplotu tavení**. Materiál se roztaví a je ze spáry odstraněn proudem interního plynu, který zaujímá souosý směr s laserovým paprskem.

Při dělení polymerních materiálů, tedy nekovových (např. PP, PVC), které jsou náchylné na hoření interních plynů, jako je např. dusík nebo argon, který má za úkol bránit vznícení nebo opálení řezných hran. Ne všechny polymery jsou vhodné k dělení laserovým paprskem.



Obr. 12 – Schéma principu zařízení pro řezání laserem

Rychlost řezání je pro tuto metodu charakteristická. Je využito poměrně nízké spotřeby energie. Po odřezání materiálu je vidno stopy po průchodu laserového paprsku a je možné se setkat i s kapičkami, které vznikly při tavení kovu a následném ochlazení na vzduchu.

2.7.2 Laserové sublimační řezání

Paprsek laseru působí na materiál a ohřívá jej až na **teplotu odpaření**. Jako u předchozí metody jsou páry, které při tomto procesu vznikají, odstraňovány proudem interního plynu z trysky. Jakost řezu je velice vysoká a vzniká úzká řezná spára. Avšak energie, která je spotřebována, je větší jako u řezání protavováním.

2.7.3 Laserové pálení

Hlavním aspektem je dosažení **zápalné teploty**, která vzniká dopadem vysoce koncentrovaného laserového paprsku. Materiál je doslova spálen v proudu aktivního plynu. Tímto plynem je nejčastěji kyslík.

V praxi se nejčastěji používá řezání laserem do tloušťky cca 20mm.

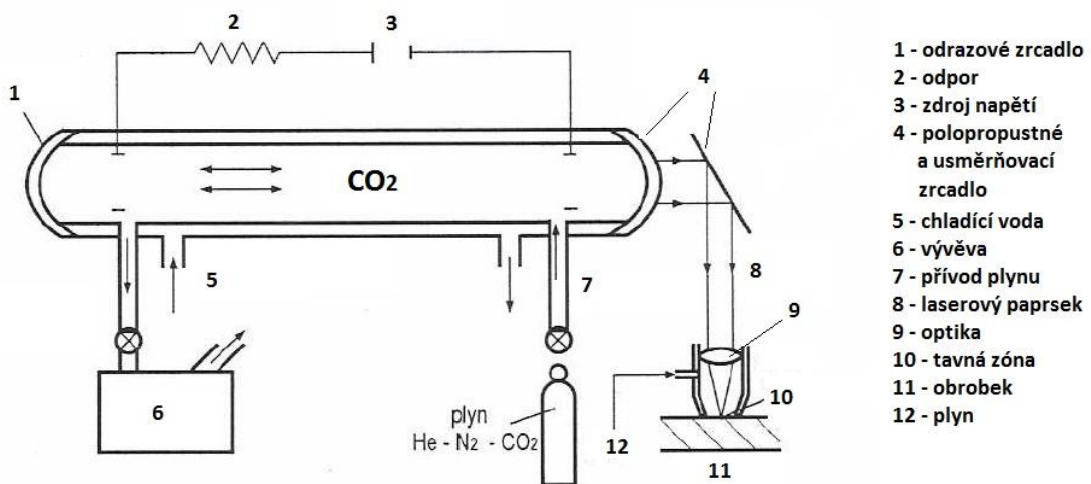
3 PLYNOVÝ CO₂ LASER

CO₂ laser je nejvýkonnější plynový laser s velkou účinností, jehož pracovním plynem je oxid uhličitý. Byl objeven v roce 1964 C. Kumarem M. Patelem. CO₂ je běžnou součástí atmosféry. U tohoto laseru se zesiluje využitím přechodů mezi vibračními hladinami molekuly, takže laser generuje záření v infračervené oblasti spektra. [2]

Parametry, jimiž jsou CO₂ charakteristické:

- Vysoká účinnost (až 50%)
- Kontinuální výkon záření (až 1MW)
- Vyzařování v širokém pásmu ($5 \div 700\mu\text{m}$)
- Stabilita frekvence (až 10^{-13} Hz)

Tyto lasery dokážou získat vysoce monochromatické světlo, což je jejich velká priorita. Mají velmi vysoké využití v oblasti technologických aplikací.



Obr. 13 – Schéma CO₂ laseru

Hlavní součástí tohoto laseru je trubice, ve které je směs plynů CO₂, N₂ a He. Tato směs plynů má nízký tlak, aby došlo snáze k výboji. Trubice o průměru několika centimetrů je zakončena na každé straně zrcadly (odrazové a polopropustné) = vzniká tedy již zmiňovaná rezonanční dutina. Světelné vlny se uvnitř tohoto rezonátoru tak dlouho odrážejí, až vytvoří kontinuální světelnou vlnu, která díky polopropustnosti jednoho ze zrcadel opustí prostor trubice.

Při tomto procesu vzniká velké teplo a je třeba jej dostatečným způsobem z trubice odvézt. Odvod tepla je velmi důležitý faktor, který ovlivňuje výkon u každého laseru. Nejpo-

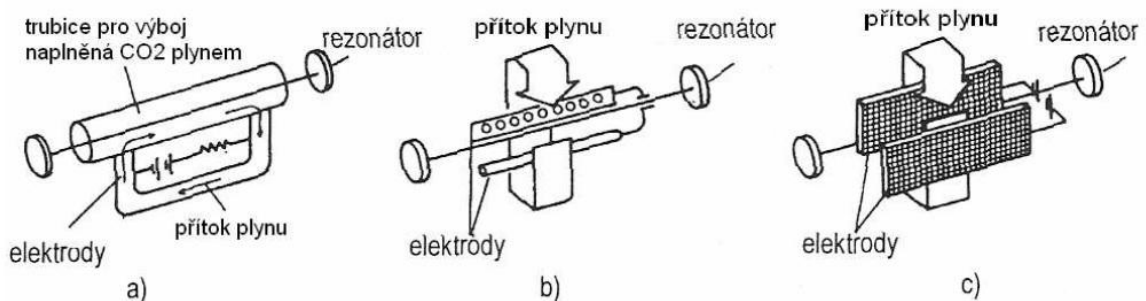
užívanějším médiem pro odvod tohoto tepla bývá voda, v případech, kdy je výkon laseru malý, se můžeme setkat i se vzduchem, jakožto chladícím médiem. Často se využívá i chlazení sekundárním výměníkem voda-olej, které disponují jednodušší údržbou a lepší stabilitou. Tohoto se využívá spíše pro průmyslové lasery.

Plyn, který projde trubicí, je možno přivést k regeneraci a popř. znovu využít v okruhu. Po průchodu plynu trubicí dochází k jeho znehodnocování, a to tak, že se CO_2 částečně rozloží na oxid uhelnatý (CO) a kyslík (O_2). Tento negativní proces vede ke ztrátě výkonu laseru.

Využívá se též pomocného plynu, který se zavádí do laserové hlavice a vystupuje společně s fukusovaným paprskem. Pomocný plyn plní funkci ochrannou, což obnáší ochránit optiku před produkty rozkladu materiálu opracovávaného laserem. Může taky vytvářet, v dopadu laserového paprsku na materiál, ochrannou, anebo naopak oxidační či jinak vhodně agresivní atmosféru. Ohřev vznikající taveninou, nebo též páry pomocný plyn odstraňují, a tím přispívají k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování materiálu.

Dle toku plynu se CO_2 lasery rozdělují:

- Axiální – optická osa laseru je rovnoběžná s proudícím plynem (nejpoužívanější)
- Transverzální – optická osa laseru je kolmá s proudícím plynem a směrem elektrického výboje uvnitř dutiny. Dle vztahu mezi přítokem plynu a výbojem mezi elektrodami se tento dělí ještě na:
 - Dvou osový
 - Troj osový
 - těmito způsoby se dosahují nejvyšší výkonu na jednotku objemu dutiny



Obr. 14 – Typy oscilátorů pro CO_2 laser (a-axiální, b-ortogonální dvoj osový, c-ortogonální troj osový)

Způsoby buzení CO₂ laseru:

- Proudem elektronu – intenzivní inverzní populace
- Optické buzení – za pomoci výkonných infračervených laserů
- Doutnavý výboj – dobře rozložená hustota náboje (nejčastější)
- Adiabatickou expanzí – dosažení inverzní populace za pomoci prudkého ochlazení horkého plynu

[7]

4 VIBRAČNÍ SPEKTROSKOPIE

Vibrační spektroskopie se zabývá studiem pohybů jader v molekulách, tj. molekulárních vibrací, a to prostřednictvím interakce molekuly se zářením, která vede k vibračním přechodům molekuly.

Vibrační spektroskopie má za úkol stanovit vlastní hodnoty energie pro co největší počet vibračních módů. Módy: *valenční vibrace*

deformační vibrace

Jejich znalost nám umožňuje stanovit některé detaily struktury molekuly. Tyto hodnoty se zjišťují interakcí s elektromagnetickým polem. V principu můžeme odlišit dvě metody: metodu infračervené absorpční spektroskopie a metodu *Ramanova* rozptylu.

4.1 Molekulární vibrace

4.1.1 Biatomická molekula

Vibrací biatomické molekuly lze chápat jako periodickou změnu mezijaderné vzdálenosti. Jednoduše řečeno, jde o „oscilátor“ tvořený dvěma hmotnými body na pružině.



Obr. 15 – Oscilátor

Pro jeho frekvenci platí:

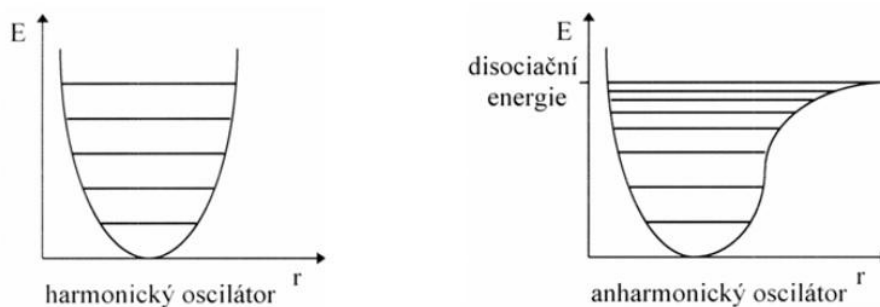
$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad [2]$$

kde μ je redukovaná hmotnost, k je silová konstanta.

$$\mu = \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} \quad [3]$$

Frekvence vibrace biatomické molekuly závisí na síle poutací atomy (tj. na typu chemické vazby), a na druhu (hmotnosti) vibrujících atomů. Při vibraci dochází k vychýlení atomů z rovnovážné polohy. Potenciální energie v případě harmonického oscilátoru je kvadratic-

kou funkcí této výchylky. Grafickým znázorněním této vzdálenosti je parabola s minimem v rovnovážném stavu systému.



Graf 2 - Křivky potenciální energie

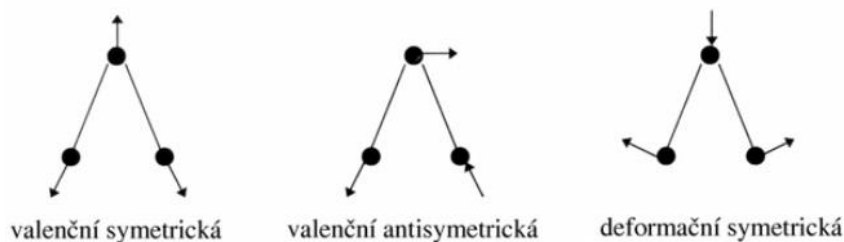
4.1.2 Víceatomová molekula

Víceatomovou molekulu lze popsat (pomocí mechanického modelu molekuly) jako soustavu hmotných bodů (atomů), vázaných silami chemických vazeb. Vibrace této molekuly je složitá forma kmitavého pohybu, kterou lze taky chápat jako součet jednoduchých harmonických pohybů, tzv. normálních vibrací.

Při normální vibraci všechny atomy v molekule vibrují se stejnou frekvencí a se stejnou fází, tzn., že současně procházejí rovnovážnými polohami a současně též dosahují maximálních výchylek, ale s různými amplitudami. Každá normální vibrace molekuly je charakterizována určitou frekvencí, směrem a velikostí výchylky jednotlivých atomů, přičemž těžiště soustavy atomů nevibruje.

Počet normálních vibrací pro danou molekulu je dán počtem jejich vibračních stupňů volnosti. Molekula s N atomy pohybující se v prostoru má $3N$ stupňů volnosti a může konat pohyb translační a rotační, každý se třemi stupni volnosti, má tedy $3N-6$ vibračních stupňů volnosti, tzn. $3N-6$ normálních vibrací.

Například v případě molekuly vody existují tři možné normální vibrace ($3 \times 3 - 6$).



Obr. 16 – Molekula vody

Při prvních dvou se atomy vychylují přibližně ve směru vazby a dochází ke změně její délky → valenční vibrace. Může být symetrická nebo asymetrická. Ke změně valenčního úhlu dochází, když se atomy při vibraci vychylují kolmo na směr chemické vazby a tato vibrace je nazvána vibrací deformační.

4.2 Aktivita vibrace

Absorpcí elektromagnetického záření lze zvýšit (dle zákonů elektrodynamiky a kvantové mechaniky) vibrační energie vazby (popř. celé molekuly), ale jen tehdy, mění-li se při vibraci její dipólový moment. Dipólovým momentem je vektor, jehož velikost závisí na distribuci kladných a záporných nábojů v molekule. Tyto vibrace jsou aktivní v infračerveném spektru.

Obecně lze říci, že infračervené spektrum nese informaci zejména o polárních vazbách v molekule. Vibrace vazeb nepolárních nebo jen slabě polárních neposkytují ve spektru žádné nebo jen slabé absorpční pásy. Tento důsledek aktivity vibrací má zásadní význam pro využití infračervené spektroskopie v kvalitativní analýze.

4.3 Užití vibrační spektroskopie

Za pomoci vibrační spektroskopie lze studovat mnoho chemických a fyzikálních vlastností vzorků: změny struktury molekul, izomerizace, polymerace, vzájemná interakce molekul, chemická reakce, fázové přechody, rozpouštědlový efekt, absorpce molekul na povrch.

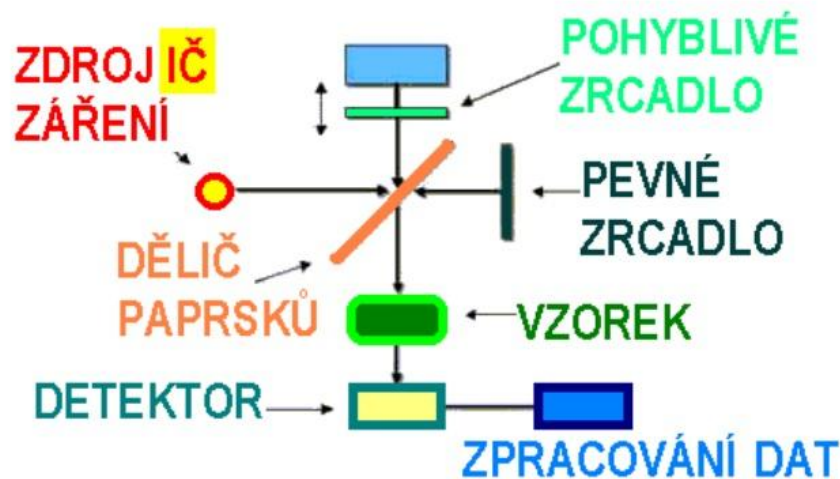
Speciální aplikace má infračervená spektroskopie při studiu polymerů. Jde především o identifikaci polymerních materiálů, a to jak kvalitativní, tak kvantitativní určení jeho chemického složení (větvení řetězců, stanovení koncových skupin, konfigurace a konformace atd.). Dále také slouží k určení koncentrace nečistot, antioxidantů, aditiv a emulgátorů, změkčovadel, plnidel a zbytkových monomerů v polymerním materiálu. Vzhledem k pomalosti procesů lze dále sledovat procesy jako vulkanizace, polymerace nebo degradace. Lze také studovat vliv vnějších podmínek na polymery, jak teploty a tlaku, záření, deformace, vliv stárnutí nebo vlhkosti okolního prostředí.

4.4 Infračervená vibrační spektroskopie FTIR

Infračervená spektroskopie FTIR (Fourier Transform Infrared) je analytická technika určená pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení organických látek.

Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce zkoumaným materiálem. Principem je absorpce infračerveného záření při jeho průchodu vzorkem, během níž dochází ke změnám rotačně-vibračních energetických stavů molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie (většinou vyjádřené v procentech transmitance) nebo jednotkách absorpce na vlnové délce dopadajícího záření.

Transmitance – propustnost – je definována jako poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem, k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje. [10]



Obr. 17 – Princip infračerveného spektroskopu

Části infračerveného spektrometru

- **Zdroj záření** – MIR, FIR – keramická tyčinka žhavená na teplotu 1000 - 1200°C
 FIR – rtuťová výbojka
 NIR – žárovka – wolframová, wolfram-halogenová.
- **Dělič paprsků** – MIR – Ge povlak na KBr, ZnSe, CsI
 NIR – Si povlak na CaF₂, či křemenu
 FIR – kovová síťka, PET-Mylar
- **Detektor záření** - MIR – DTGS (deuteriumtriglycin sulfát)
 - MCT (mercury-cadmium-telurid)
 NIR – PbSe, PbS, InSb
 FIR – DTGS, GaAs-Zn

4.5 Ramanova spektroskopie

Ramanova spektroskopie je jednou z metod vibrační molekulové spektroskopie, která se používá k chemické identifikaci materiálů obsažených ve vzorku. Metoda využívá tzv. Ramanův jev, při kterém dochází k interakci laserového paprsku s elektrony zkoumaného materiálu. [12]

Profesor Raman společně s K.S.Krišnanem popsali v roce 1928 jev neelastického optického rozptylu, který je základem této metody. Napomáhá při analýze pevných látek (krystalické i amorfní materiály, kovy, polovodiče, polymery atd.), kapalin (čisté látky, roztoky vodné i nevodné), plynů, dále též při analýze povrchů či při analýze biologických systémů. Ramanovy spektroskopie se využívá v mnoha odvětvích od mineralogie a geochemie, přes chemický farmaceutický průmysl, až po biologii a lékařství. [13]

Ramanova spektroskopie je založena na neelastickém rozptylu ultrafialového (o vlnové délce přibližně 250 - 400 nm, tj. 25 000 – 40 000 cm⁻¹) nebo též blízkého IČ záření molekulou, přičemž rozdíl mezi energií dopadajícího a rozptýleného fotonu odpovídá vždy některému z vibračních energetických přechodů v molekule:

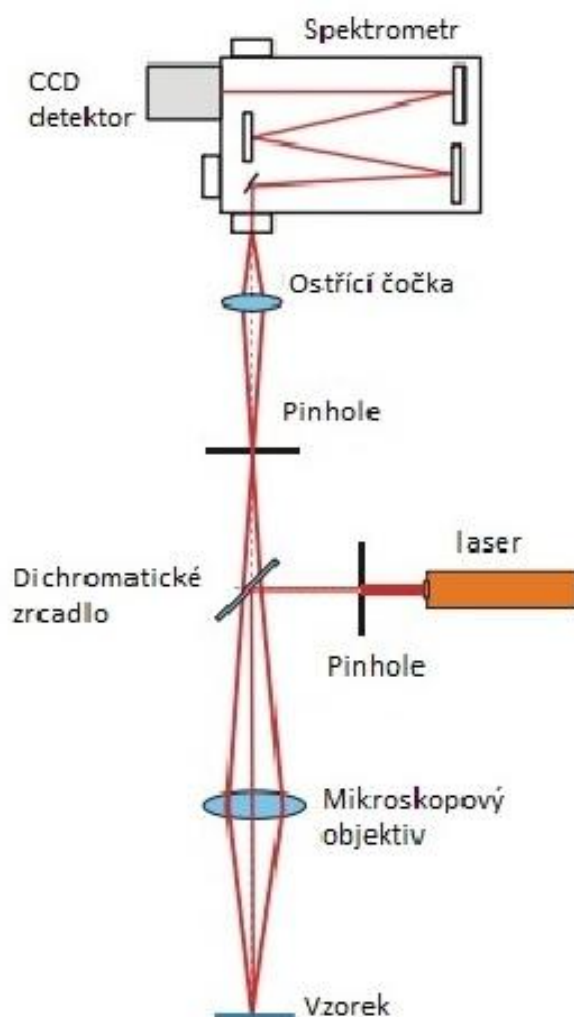
$$\Delta E = h \cdot (\nu_0 - \nu_r) , \quad [4]$$

kde $h\nu_0$ je energie dopadajícího fotonu a $h\nu_r$ je energie rozptýleného fotonu.

Ramanovo spektrum představuje závislost intenzity Ramanova rozptylu (osa y) na vlnočtu Ramanova posuvu (osa x).

Infračervená a Ramanova spektroskopie jsou v důsledku rozdílného fyzikálního principu, na němž se zakládají, z části nebo úplně komplementární. Úplná komplementarita nastává u molekul se středem symetrie: normální vibrace vzhledem ke středu symetrie jsou aktivní pouze v Ramanově rozptylu, zatímco vibrace antisymetrické vzhledem ke středu symetrie jsou aktivní pouze v infračervené absorpci. [10]

Základní schéma Ramanovy spektroskopie je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 18 – Schéma Ramanovy spektroskopie

Obecně musí sestava obsahovat excitační laser, ostřicí a filtrační prvky, spektrometr a detektor. S rostoucími nároky (na rozlišení měření) rostou nároky na monochromaticnost excitačního zdroje, přesnost použitého filtru, rozlišení spektroskopu a citlivost detektoru.

[12]

4.6 Metody měření infračervených spekter látek

4.6.1 Transmisní techniky

Kapalné vzorky

Kapalné vzorky se měří v kyvetě (laboratorní pomůcka pro měření optických vlastností vzorků) o určité tloušťce s okénky z KBr nebo NaCl. Pokud je kapalný vzorek nerozpustný v tradičně používaných rozpouštědlech propustných v infračervené (CHCl_3 , CCl_4 , CS_2),

může být ve velmi malém množství měřen transmisně (přenosem) ve formě kapilární vrstvy mezi dvěma KBr (NaCl) okénky.



Obr. 19 – Kuveta

Pevné vzorky

Vzorky rozpustné v tradičně používaných rozpouštědlech (CHCl_3 , CCl_4) jsou měřeny v běžných kyvetách určených pro kapalně vzorky. Je možno též připravit tenký film vzorku jeho rozpuštěním v určitém rozpouštědle, které se nechá odpařit.

Další variantou je tzv. nulojová technika, ve které je práškový vzorek homogenizován s malým množstvím parafinového oleje a výsledná suspenze je měřena mezi dvěma KBr nebo NaCl okénky ve formě tenké vrstvy.

4.7 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenovo záření se v dnešní době využívá v mnoha odvětvích průmyslu, moderním lékařství atd. Toto záření lze také využít při kontrole materiálu. Má za úkol najít skryté vady uvnitř materiálu, které nelze pozorovat vnějším pohledem. Takové vady mohou znamenat snížení stability výrobku nebo změnu jeho struktury.

Jednou z nejvýznamnějších zkoušek sloužící k analýze materiálu, která využívá Rentgenovo záření, je Rentgenova difrakční analýza. Ta slouží k určení mineralogického složení všech látek majících krystalický charakter.

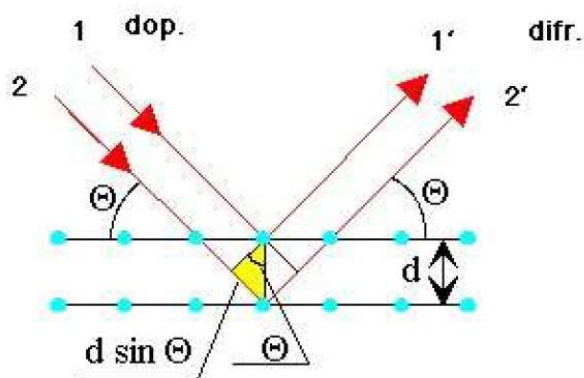
4.7.1 Princip metody

Tato metoda vychází ze dvou principů:

- Krystalografické uspořádání látek

- Interakce Rentgenového záření s částicemi, tvořící krystalickou mřížku látek

Jestliže na krystal dopadá monochromatický svazek rentgenových paprsků (má jen jednu vlnovou délku), na atomech se rozptyluje do všech směrů uvnitř krystalu. Díky tomu, že v krystalu jsou atomy pravidelně uspořádány, interferencí se v některých směrech záření (vybuzené, rozptýlené, sekundární) zesiluje a produkuje tzv. difraktované záření.



Obr. 20 – Difrakce Rentgenového záření na krystalu

Z obr. 20 lze pozorovat roviny, vzdálené od sebe o hodnotu d . Pod úhlem θ dopadá svazek (monochromatický) Rentgenových paprsků na krystal. Zesílení difraktovaných paprsků nastává pouze mezi dvěma sekundárními paprsky, splňující podmínky:

- Paprsky musí být rovnoběžné
- Dráhy paprsků se liší o λ , 2λ , 3λ , atd.

První podmínka udává, že úhel dopadu původního svazku θ musí být roven společnému úhlu rozptylu obou paprsků.

Druhá podmínka popisuje, že musí splňovat tzv. Braggovu rovnici:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \Theta [5]$$

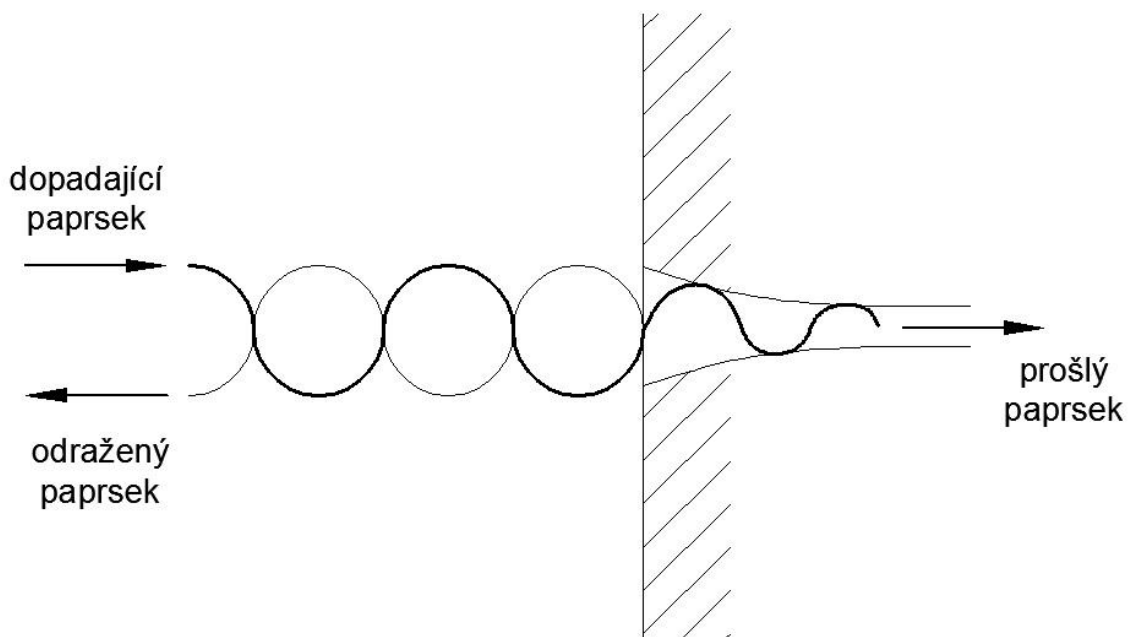
popisuje, že 2. paprsek musí oproti prvnímu paprsku urazit dráhu $n \cdot \lambda$ navíc.

Celý postup metody difrakce Rentgenového záření vyplývá z uvedených podmínek. Volba monochromatického záření při této analýze se volí tak, aby délka jedné vlny řádově odpovídala mezivinným vzdálenostem v krystalech.

5 INTERAKCE LASER-MATERIÁL

5.1 Interakce

Laser při obrábění různých materiálů plní funkci nositele paprsku elektromagnetického vlnění, který je vysoce energetický a intenzivní a který je nasměrován na obráběný povrch obrobku (součásti). Hlavní závislost při působení laseru na materiál je ve vlastnostech a charakteru materiálu, jež je opracován – struktura, fyzikální vlastnosti apod. Dále pak na vlastnostech a parametrech samotného laseru a velmi důležitým faktorem je též doba interakce paprsku laseru s materiálem.



Obr. 21 – Interakce světelného paprsku s materiálem

Jak vlna při dopadání elektromagnetického záření na obráběný materiál postupuje, je znázorněno na obr. 21. Povrch tohoto materiálu část dopadající vlny absorbuje, určitou část odrazí zpět (závisí na tvaru povrchové plochy) a část je přenesena materiálem pryč z místa dopadu.

Materiál, který je opracováván laserovým paprskem se pro vlnění, dopadající na jeho povrch, stává novým laserovým médiem. Podle pravidel absorpce dle Beer-Lamberta je tímto médiem absorbován:

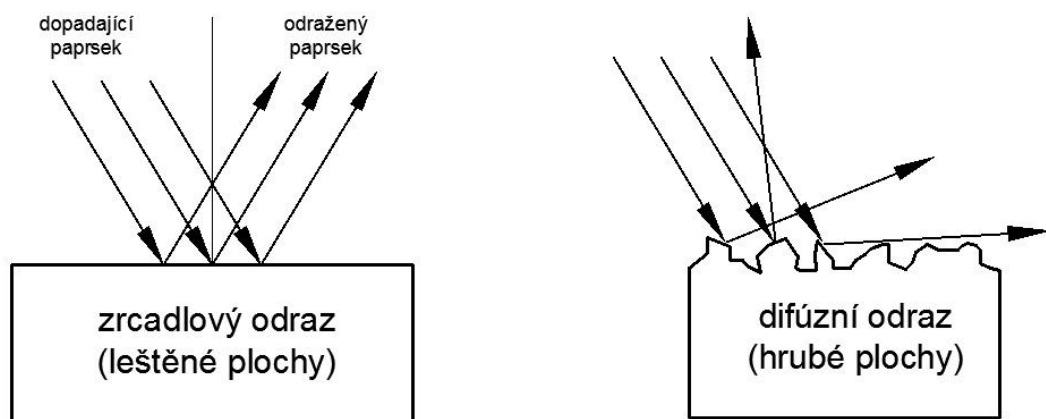
$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha z} , \quad [W.m^{-2}] \quad [6]$$

kde I je intenzita světelného paprsku prošlého médiem, I_0 intenzita před průchodem, α absorpční koeficient, z je tloušťka média.

Významným aspektem je absorpční koeficient, na kterém závisí výsledek interakce laseru s obráběným materiálem. Koeficient α se odvíjí od vlastností materiálu, dále pak na intenzitě paprsku a vlnové délce. Z výše uvedeného obrázku (obr. 21) je nejvýznamnější část paprsku (z hlediska obrábění) ta, která je materiálem absorbována. [14]

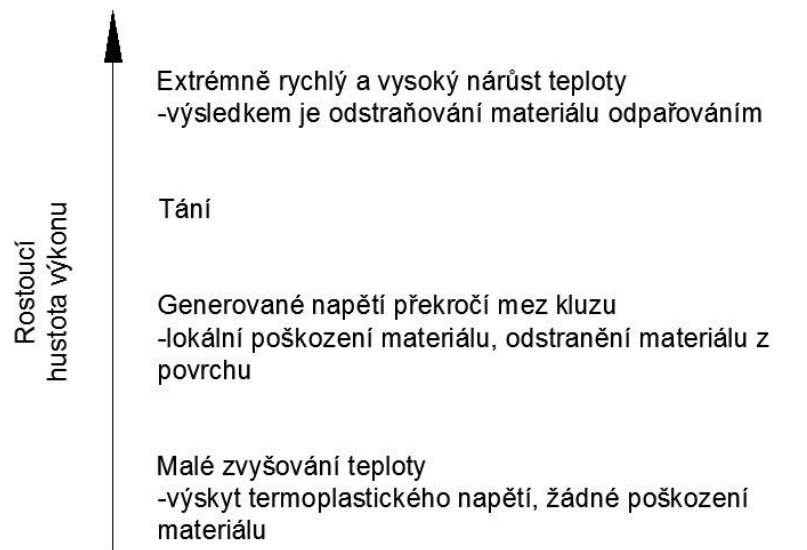
5.2 Vliv drsnosti materiálu

Drsnější povrchy u téhož materiálu absorbují více – větší plocha + interakce v důsledku odrazů od povrchů.



Obr. 22 – Drsnosti povrchu a odraz

5.3 Vliv hustoty výkonu



Graf 3 – Hustota výkonu

5.4 Vliv vlnové délky

Energie fotonu je nepřímo úměrná vlnové délce laserového záření = UV fotony jsou energetičtější než infračervené záření. Energie UV fotonu je vyšší než energie většiny kovalentních vazeb, u infračerveného záření jde o důsledek multifotonové excitace.

6 POLYMERY

Polymery dostávají v obecném jazyce nejrůznější názvy, jako jsou *umělé hmoty*, *makromolekulární látky*, *plastické hmoty*, *plasty*, *igelit atd.* Termín polymery však vyjadřuje, že jsou všechny tyto poměrně nové materiály (přírodní nebo syntetické) založeny na velkých molekulách, ve kterých se pravidelně opakuje základní stavební (monomerní) jednotka nesoucí název *monomer*.

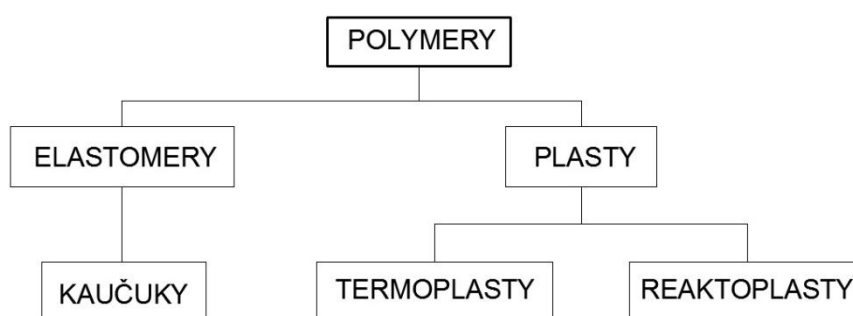
Podle spotřeby materiálu a objemu výroby, na počátku třetího tisíciletí, představují polymerní materiály nejvýznamnější složku. Čím dál více jsou využívány pro různá odvětví výroby (v konkurenci s ostatními materiály jako jsou kovy apod.), a to díky jejich snadné zpracovatelnosti, poměrem cena – vlastnosti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

Tento prudký nárůst spotřeby a výroby polymerních materiálů odstartoval zhruba na přelomu padesátých a šedesátých let. V současnosti však probíhá velmi zajímavý vývoj v této oblasti. Přichází se stále na nové a nečekané využití těchto materiálů a netušené možnosti modifikací jejich vlastností. Zejména v lékařství se dostává těmto materiálům velký obdiv.

[20]

6.1 Rozdělení polymerů

Jak ukazuje obrázek 23, polymery se dělí na *elastomery a plasty*, a tyto se pak dále ještě dělí.



Obr. 23 – Rozdělení polymerů

6.2 Elastomery

Jsou to polymery vysoce elastické, které jsou schopny působením malé síly značné deformace, aniž by došlo k jejich porušení. Vzniklá deformace je u většiny případů vratná. Hlavní skupinou elastomerů jsou kaučuky, které jsou základní surovinou pro výrobu pryží.

Kaučuk patří do skupiny polymerních materiálů přírodního nebo syntetického původu. Jejich hlavní prioritou je vysoká pružnost. [15]

6.2.1 Přírodní kaučuk

Přírodní kaučuk se získává kaučukovníku brazilského (tropická rostlina) nařezáním jeho kůry. Tím se získá surový kaučuk (latex), který je dále upravován a zpracováván srážením, čemuž napomáhá například kyselina mravenčí, následně se pere vodou a suší. Usušený materiál se nazývá *krepa*. Dalšími úpravami jako třeba vulkanizací, přidáním plniv atd. se vyrobí kaučuk přírodní – přírodní pryž.



Obr. 24 – Kaučukovník

6.2.2 Syntetický kaučuk

Získává se polymerací nebo kopolymerací některých z nenasycených uhlovodíků s přidáním plniv, antioxidantů, vulkanizačních činidel a následnou vulkanizací. Nejběžnější syntetické kaučuky jsou *polybutadienové kaučuky*, které se používají v gumárenství a na výrobu pneumatik, přidávají se též do různých směsových pryskyřic a jsou využívány pro výrobu golfových míčů. Dále *kopolymerní butadien-styrenové kaučuky*, *etylen-propylenové a izoprenové kaučuky*, u kterých se izopren (jejich monomer) získává jako vedlejší produkt při krakování ropy nebo nafty a je chemickými vlastnostmi podobný přírodnímu kaučuku.



Obr. 25 – Výrobky ze syntetického kaučuku

6.2.3 Vulkanizace

Pryž se vyrábí z kaučuku pomocí vulkanizace, což je chemická reakce, která má za úkol zesíťovat molekuly přírodních nebo syntetických kaučuků. Čím déle probíhá vulkanizace, tím je pryž tvrdší.

Proces vulkanizace probíhá tak, že se mezi dva proti sobě se točící válce vsune kaučuk, který je díky tlaku rozdrcen a opásán kolem jednoho z válců. Při drcení a opásávání se přidávají saze, olej a síra, které umožňují vznik vulkanizace. Hmota dále putuje do vstříkolisů, kde je vytvořená guma stlačována a vulkanizována, nejčastěji při teplotách 130-160°C. Guma vzniklá vulkanizací již dále nelze vytvarovat a tento proces zvýší její pevnost v tahu, strukturní pevnost, odolnost vůči oděru, rozpustnost. [16]

6.3 Termoplasty

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

6.4 Reaktoplasty

Reaktoplast je polymer, který nevratnou chemickou reakcí, jako je například zahřívání nebo přidání vytvrzovacího prostředku, přechází z lineárního viskózního stavu do stavu

síťovaného. Zesíťováním vytvářejí prostorovou trojrozměrnou síť, která nastává až při tváření plastu vlivem teploty a tlaku. Jakmile dojde k zesíťování, není možné jeho další tváření, protože dodáváním dalšího tepla již nelze hmotu roztavit. Husté příčné zesíťování je nazýváno vytvrzování.

Zkratka	Název polymeru
ABS	Terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu
BR	Butadienový kaučuk
CA	Acetát celulózy
CN	Nitrát celulózy
CR	Chloroprenový kaučuk
EC	Ethylcelulóza
EP	Epoxidové termosety (pryskyřice)
EPM	Kopolymer ethylenu s propylenem (ethylenpropylenový kaučuk)
IIR	Izobutylizoprenový kaučuk (butylkaučuk)
IM	Polyizobutylen
IR	Syntetický izoprenový kaučuk
NBR	Butadienakrylonitrilový kaučuk (nitrilový kaučuk, nitrilkaučuk)
NR	Přírodní izoprenový kaučuk (přírodní kaučuk)
PA	Polyamidy
PAN	Polyakrylonitril
PC	Polykarbonáty
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PF	Fenolformaldehydové pryskyřice
PIB	Polyizobutylen
PMMA	Polymethylmethakrylát
POM	Polyoxymethylen (polyformaldehyd)
PP	Polypropylen
PPO	Polyfenylenoxid
PS	Polystyren
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
PVAC	Polyvinylacetát
PVAL	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
PVDC	Polyvinylidenchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVF	Polyvinylfluorid
SBR	Butadienstyrenový kaučuk

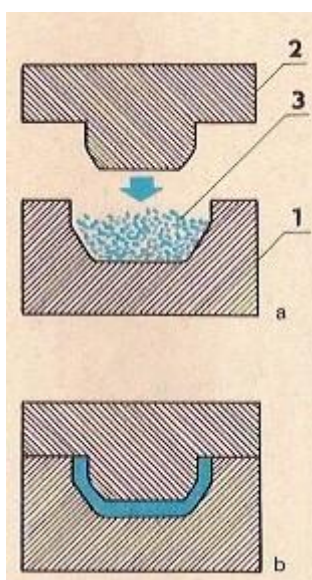
Tab. 2 – Názvosloví polymerů

6.5 Zpracování polymerů

Nejpoužívanějším zpracováním plastických hmot (polymerů) je tváření, kde se uplatňuje působení tlaku, tepla nebo jejich kombinací. Tváření zahrnuje vytlačování, vstřikování, lisování, vyfukování, válcování, tvarování.

6.5.1 Lisování

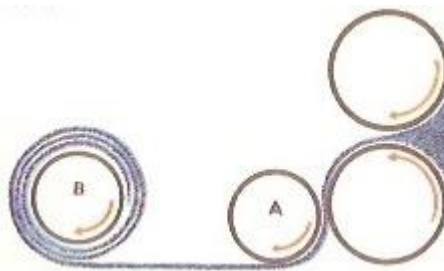
Využívá se kombinace tepla a tlaku. Lisování probíhá v lisovacích formách a nejčastěji se využívá přímé lisování. Forma je celá vyhřátá a tvárnice (1) se naplní plastickou hmotou (3). Následuje zavedení tvárníku (2) do dutiny formy a hmota se zalisuje. K vytvrzení dochází buďto ohřevem, což se využívá u reaktoplastů, nebo ochlazením u termoplastů.



Obr. 26 – Lisování

6.5.2 Válcování

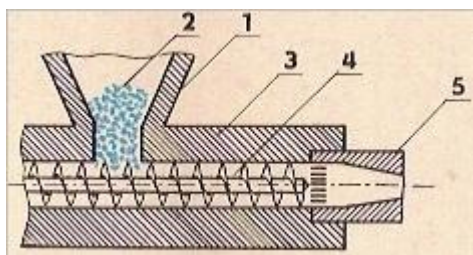
Využívá se hlavně při výrobě fólií, desek, podlahových krytin. Plastická hmota je unášena válci, které jsou většinou zevnitř vyhřívány temperančním médiem. Hmota díky zahřívání měkne, stává se z ní stejnorodá látka. Regulací vzájemné vzdálenosti válců docílíme požadované tloušťky fólie, desky atd.



Obr. 27 – Válcování

6.5.3 Vytlačování

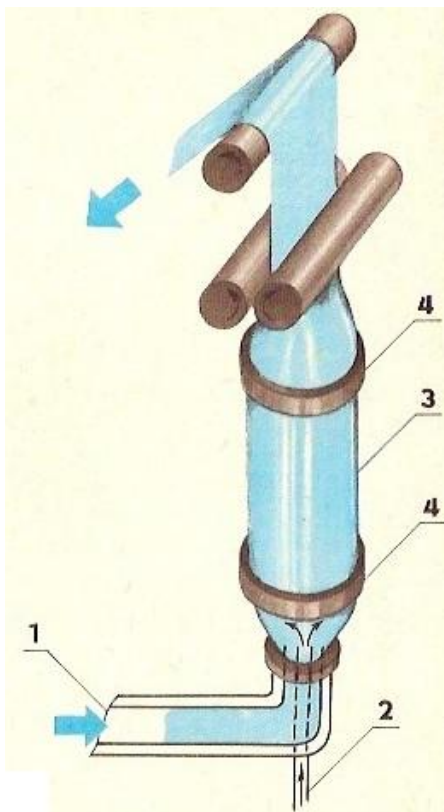
Z násypky (1) je přiváděn termoplast do vyhřívaného pracovního válce (2). O vyhřátí válce se většinou starají tepelné elektrické články, které jsou rozmístěny po celé délce válce. Válec se většinou dělí na tři etapy podle teploty. V pracovním válci je polymer pomalu roztavován, homogenizován a promícháván díky šneku (4), který též roztavenou směs dopravuje k vytláčovací hlavě (5), jejímž otvorem vystupuje do volného prostoru, kde je dále formován do požadovaného tvaru, chladne a tuhne. Touto metodou se vyrábí tyče, trubky, opláštěné vodiče atd.



Obr. 28 – Vytlačování

6.5.4 Vyfukování

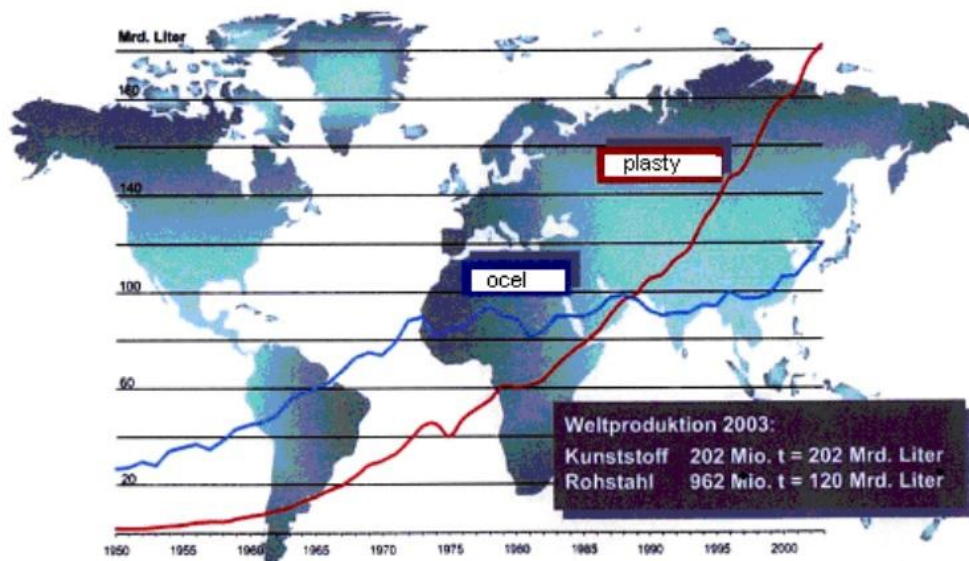
Vyrábí se hlavně fólie. Z vytláčovacího stroje (1) vychází tenkostěnná trubka ústí trubice (2), která je napojena na zdroj tlakového vzduchu. Tlak vzduchu vyfoukne „trubku“ (3), jejíž obvod je omezen kalibračním ústrojím (4). Plastická hmota se dále ochlazuje proudem vzduchu a tuhne. Přes soustavu válečků se fólie odtahuje a navíjí do svitku. [17]



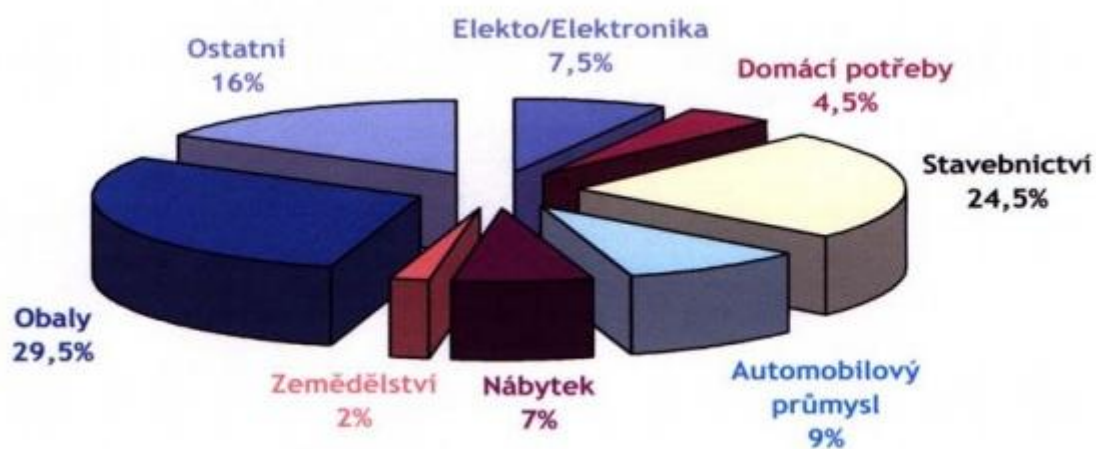
Obr. 29 – Vyfukování

6.6 Spotřeba polymerů

V roce 2000 dosáhla světová průměrná spotřeba polymerů na osobu asi 240kg. Většinu světové produkce polymerů zastávají polymery syntetické.



Graf 4 - Celosvětová objemová produkce oceli a plastu za rok 1950 až 2000



Graf 5 - Světová spotřeba plastu ve vybraných odvětvích za rok 2003

7 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

V předchozích kapitolách teoretické části práce byly popsány funkce laseru, vybrané druhy metod zkoumání povrchů a popis polymerních materiálů. Praktická část na tyto poznatky bude navazovat a vzhledem k zadání diplomové práce budou cíle následující:

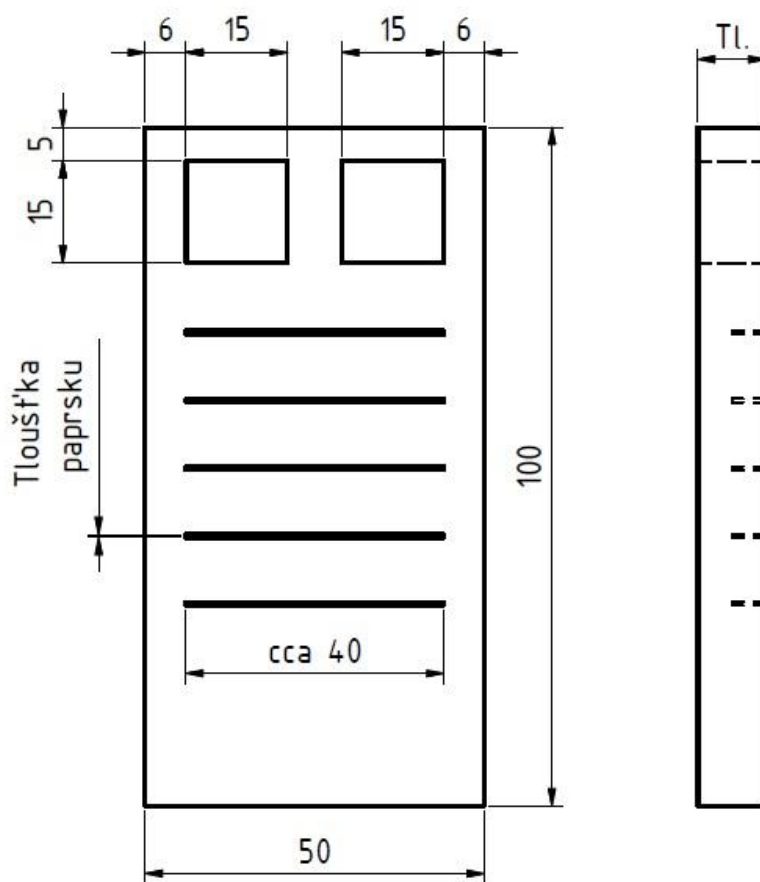
1. Seznámení s materiály vybranými pro výrobu vzorků a uvedení přístrojů, na kterých byly tyto operace prováděny.
2. Výroba vzorků – řezáním laserovým paprskem za podmínek změny vstupních parametrů laserového zařízení
3. Zkoumání a vyhodnocování řezných ploch za pomoci moderních snímacích zařízení
4. Vyhodnocení tepelně ovlivněné vrstvy materiálu po průchodu laserového paprsku a zkoumání strukturálních změn po tomto procesu
5. Závěrečné vyhodnocení a diskuze nad získanými výsledky

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 MATERIÁLY VZORKŮ A JEJICH VÝROBA

8.1 Vzorky

Vzorky z vybraných polymerních materiálů byly vyrobeny ve firmě MRB Sazovice s.r.o., která se zabývá zpracováním plechu a výrobou plechových součástí, a která vlastní i laser na polymerní materiály. Všechny vzorky měly stejný tvar i rozměry. Předlohový výkres, podle kterého byly vzorky vypáleny laserem, je znázorněn níže.



Obr. 30 – Výkres vzorku

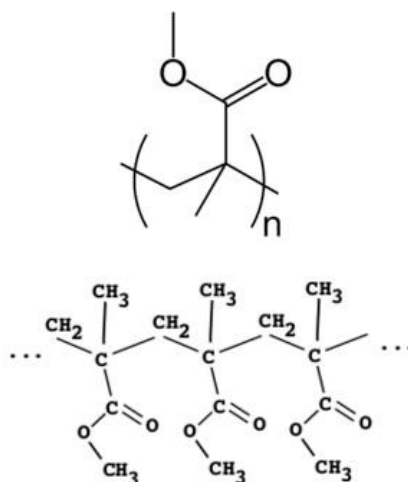
Při výrobě vzorků pomocí laserového paprsku se postupovalo tak, že obvod vzorku a dva čtverečky (15 x 15 mm) se pájily za jiného výkonu a jiné posuvové rychlosti než jednotlivé drážky. U každé z drážek se taktéž měnily vstupní parametry stroje, aby se dosáhlo různých výsledků a daly se jednotlivé řezy drážek mezi sebou porovnávat, popřípadě určit optimální podmínky pro řezání laserem u daného materiálu.

Dle dostupnosti polymerních materiálů, jež měla firma MRB Sazovice s.r.o. skladem, byly pro výrobu vzorků vybrány tyto materiály:

- PMMA – tloušťka desky 20mm
- PP – tloušťka desky 8mm
- HPS – tloušťka desky 5mm

8.2 Polymethylmethakrylát – PMMA

Akrylát PMMA je průhledný, syntetický, vysoce transparentní termoplastický polymer který se získává polymerací methylmethakrylátu, ale i suspenzí (eventuelně v roztoku nebo v emulzi).



Obr. 31 – Vzorec PMMA

8.2.1 Výroba

Většinou se jedná o blokovou nebo suspenzní polymeraci esterů kyseliny methakrylové. Pomocí blokové polymerace je získáván nezesíťovaný produkt nebo částečně zesíťovaný produkt, který vyniká velmi dobrými vlastnostmi.

Při blokové polymeraci dochází k předpolymeraci za teploty od 60°C do 100°C. Poté se provádí chlazení a filtrace. Po těchto procesech přichází na řadu dokončovací polymerace, a to buď diskontinuální (do forem) nebo kontinuální (mezi ocelové pásy). Blokové polymerace se využívá zejména, chceme-li finální výrobek tvarovat do bloků nebo desek. Použitím rotačních forem lze však vyrábět rotační tělesa, jako například trubky.

Suspenzní polymerace se využívá, chceme-li finální termoplastický výrobek dále zpracovávat, například vstřikováním nebo vytlačováním. Proces polymerace probíhá v rozmezí teplot 80°C až 130°C. Následuje chlazení a vzniklé granule se suší a promývají.

8.2.2 Vlastnosti

PMMA je charakteristický svojí číroostí a i při tlustých vrstvách naprostou bezbarvosťou. Je dokonale průhledný, snadno se vybarvuje. Jeho velkou výhodou je odolnost vůči klimatickým podmínkám. I při velkých změnách teplot, povětrnostních podmínek a dalších výkyvů počasí zůstává jeho číroost a zbarvení téměř nezměněny. Touto odolností vyniká mezi ostatními běžnými termoplasty. PMMA je bez zápachu a bez chuti.

Dobře tvarovatelný je při teplotách 130°C až 140°C, což je důležitý poznatek pro jeho další zpracování. Vyrábí se z něj složitější části strojů. Má dobrou tvarovou paměť – po zahřátí na teplotu tání T_m se vrací do původního stavu.

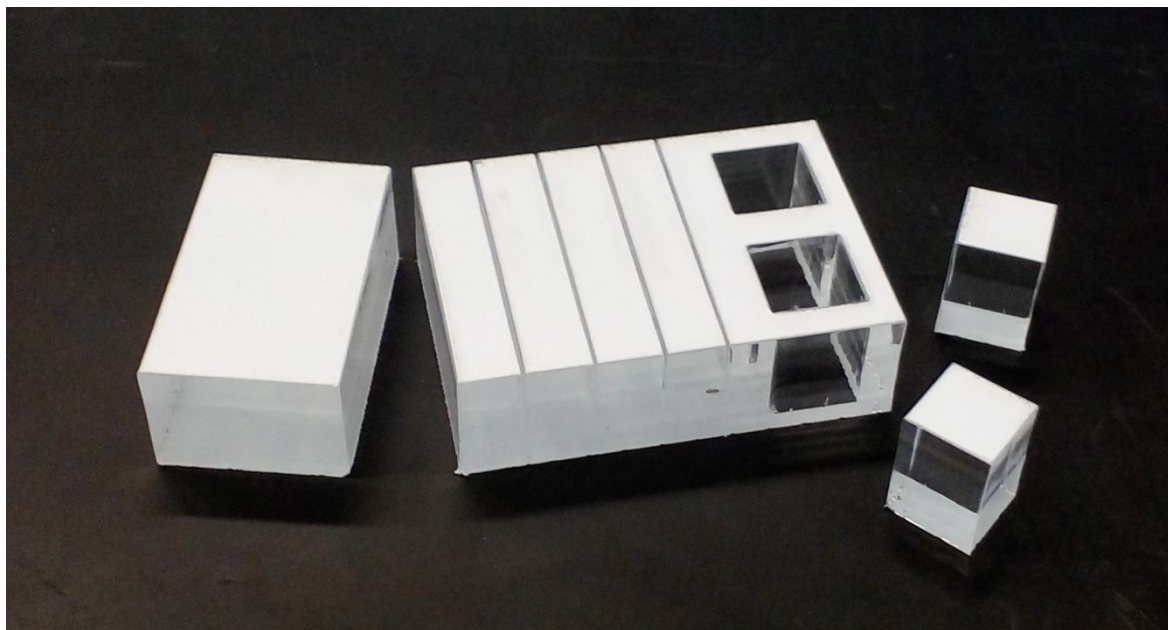
PMMA propouští světlo v 92% v celém rozsahu spektra (zasahuje až do UV oblasti). Vyniká mechanickými vlastnostmi, odolností proti vodě a elektroizolačními vlastnostmi a je zdravotně nezávadný.

Jako nedostatek je považována malá povrchová odolnost, tzn., že lehce dojde k jeho poškrábání.

8.2.3 Zpracování a využití

Hlavními technologiemi pro jeho zpracování jsou vstřikování, vytlačování, lisování - tvarují se do desek a tyčí.

Využívá se při nahrazování skla – „zasklívání“ dopravních prostředků. Jako ochranné kryty přístrojů a strojů, sklíčka na hodinkách, kancelářské potřeby. Dále se ho využívá i při výrobě zubních náhrad (zubní protézy).

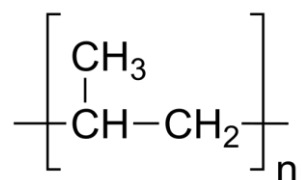


Obr. 32 – Fotografie vzorku z PMMA

8.3 Polypropylen PP

Je to termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů. Semikrystalický, středně pevný, tuhý a houževnatý materiál. Polypropylen se řadí díky svým vlastnostem mezi nejpoužívanější plasty. Polypropylen je neprůhledný, má nízkou hustotu.

S polyetylenem má velmi podobné fyzikálně – chemické vlastnosti. Křehne při poměrně nízkých teplotách, měkne při teplotách mezi 140°C a 150°C a taví se v rozmezí 160°C až 170°C. Krátkodobě může být vystaven teplotám do 135°C, dlouhodobě pak do teploty 100°C. Odolává olejům, alkoholům, také je odolný vůči organickým rozpouštědlům a je to jeden z nejlehčích polymerů.



Obr. 33 – Vzorec PP

8.3.1 Výroba

Postup výroby polypropylenu je u jednotlivých firem různý. Výroba PP vznikla zjištěním, že vlivem některých katalyzátorů přichází možnost polymerovat monomer – propylen,

který byl velmi snadno dostupnou surovinou, získávanou z odpadních plynů rafinérií, zemního plynu nebo kapalných uhlovodíků. Tento monomer se polymeroval na vysokomolekulární polymery, které byly charakteristické pravidelnou strukturou, disponovaly vysokým bodem tání a dobrými mechanickými vlastnostmi. Díky těmto vlastnostem získal rychlé uplatnění na trhu.

8.3.2 Zpracování a využití

Zpracovává se klasickými technologiemi určenými ke zpracování termoplastů, kterými jsou například vytlačování (desky, trubky, profily, fólie), vstřikování, lisování (desky a bloky), obrábění. Před zpracováním je však vhodné přidat tepelné a světelné stabilizátory, a to s cílem zlepšení této zpracovatelnosti.

Lze ho využít pro některé technické výrobky jako třeba lopatky ventilátorů, v automobilovém průmyslu jako přístrojové desky, nárazníky, kryty, fólie, víka zavazadlových prostorů atd. Široká škála využití je též v textilním a potravinářském průmyslu.

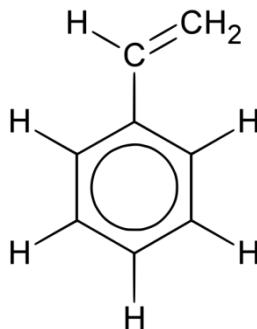


Obr. 34 – Fotografie vzorku z PP

8.4 Houževnatý polystyren HPS

Je to polystyren (PP), který je modifikovaný kaučukem a který má zvýšenou rázovou odolnost a je zpravidla zakalený.

Polystyren (PS) vzniká jak produkt polymerace styrenu. Styren je charakteristicky páchnoucí kapalina. Styren polymerizuje velmi snadno a všemi polymeračními mechanismy. Nejvyžívanější výrobní technologií je bloková a suspenzní polymerace.

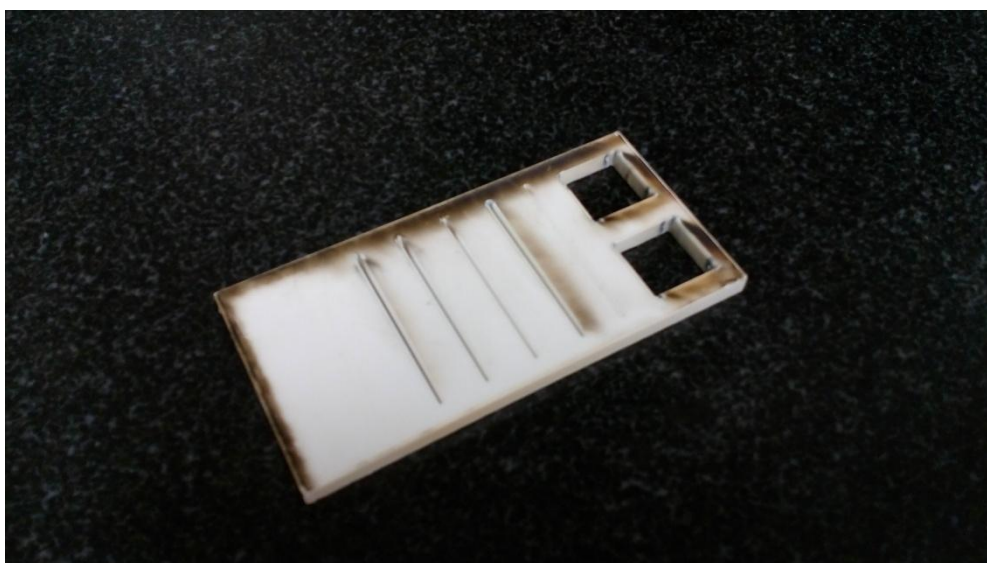


Obr. 35 – Vzorec PS

Je poměrně tvrdý, ale křehký polymer. Odolává kyselinám a zásadám. Je citlivý na UV záření a odolný teplotě pouze do 80°C. Při stárnutí se v něm vytvářejí trhliny a křehne. Uvolňuje nezreagovaný monomer styren, který je toxický.

Podobně jako předchozí polymer PP se zpracovává všemi technologiemi, nejčastěji však vstřikováním a vyfukováním.

Ve velkém množství se využívá jako izolační materiál ve stavebnictví. Jeho vlastností je využíváno při výrobě spotřebních předmětů, hraček, v potravinářství ve formě kelímků, podnosů misek, atd.



Obr. 36 – Fotografie vzorku z PS

9 CHARAKTERISTIKY POUŽITÝCH STROJŮ A PŘÍSTROJŮ

9.1 Laserové zařízení

EUROLASE LCS XL-1600

Jak již bylo zmíněno výše, polymerní vzorky byly páleny CO₂ laserem na plasty, jež vlastní firma MRB Sazovice s.r.o. Laserový stroj LCS XL-1600 nabízí laserové řezání pro nejvyšší nároky. Je možné obrábět širokou škálu nekovových materiálů, při zachování hladkého, čistého a lesklého řezu.



Obr. 37 – EUROLASER LCS XL-1600



Obr. 38 – Eurolaser ve firmě MRB Sazovice s.r.o.

9.1.1 Parametry stroje

- **Maximální výkon:** 300W
- **Rychlost:** 1 až 1000 mm/sec
- **Maximální rozměr vstupního materiálu:** 2200 x 1600 mm
- **Maximální zatížení stolu:** 870 kg
- **Přesnost:** $\pm 0,02$ mm

9.1.2 Vhodné materiály pro řezání na EUROLASERU LCS XL-1600

Akryláty (hlavně PMMA) – používá se pro výrobu reklamních nápisů, Polypropylen (PP), POM, PET, mirelon, HPS, Polystyren (PP), syntetická vlákna, potažený textil, lepenka, těsnění, papír, karton, technické tkaniny, korek, sádkartonové desky.

9.2 Talysurf CLI 500

Přístroj, jež slouží k vyhodnocování profilu povrchu a prostorového měření. Snímá a hodnotí jakost povrchu. Přináší cenné informace o vztahu mezi geometrickou charakteristikou povrchu a jeho funkčními vlastnostmi. Součástí výstupu měření může být 3D graf snímaného povrchu. 3D charakteristika povrchu nabízí nové možnosti pro komplexní hodnocení textury povrchu.

9.2.1 Parametry stroje

- **Prostor měření D x H x V:** 50 x 50 x 50 mm
- **Délka posuvu na osách X – X – Z:** 50 mm
- **Osové rozlišení (datová rozteč):** 0,5 μ m
- **Rozměry D x H x V:** 500 x 310 x 450 mm
- **Nosnost:** 10 kg
- **Hmotnost (základní přístroj):** 55 kg
- **Rychlost měření:** 30; 15; 10; 5; 1; 0,5 mm/sec
- **Rychlost polohování:** 30mm/sec (max)



Obr. 39 – Talisurf CLI 500

10 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Jako první krok bylo provedeno naprogramování laserového zařízení EUROLASER pomocí softwaru, který má firma MRB Sazovice s.r.o. k dispozici. Programování probíhalo dle předlohového výkresu, který je zobrazen na začátku praktické části této práce. Byly nastavovány různé provozní podmínky pro různé materiály vzorků. Měnil se tedy výkon laserového zařízení a také pracovní posuv. Cílem bylo dosažení požadovaného tvaru vzorku a dodržení zadaných rozměrů.

Po naprogramování a nastavení stroje byly jednotlivé materiály podrobeny účinku laserového záření. Díky odpaření částí materiálu a vzniku řezných hran může být provedeno další potřebné měření.

Protože výkon laserového zařízení byl udáván v %, je třeba před uvedením těchto hodnot provést přepočítání jednotek z % na výkon stroje udávaný ve W.

Maximální výkon stroje: 300W

výkon [%]		výkon [W]
10	přepočít	30
20		60
30		90
40		120
50		150
60		180
70		210
75		225
80		240
85		255
90		270
95		285
100		300

Tab. 3 – Přepočítání hodnot výkonu

10.1 Obrábění vzorku z Polymethylmethakrylátu (PMMA)

Vstupní parametry stroje

Řez	výkon [W]	posuv [mm/s]
Obvod a čtverečky	240	45
1. drážka	255	12
2. drážka	255	17
3. drážka	255	35
4. drážka	255	25
5. drážka	225	45

Tab. 4 – Vstupné parametry stroje u PMMA

Jako první byl obráběn vzorek z PMMA o tloušťce 20 mm, u kterého, dle očekávání, bylo dosaženo velmi uspokojivého výsledku i pouhým vizuálním kontaktem. Řezy byly poměrně hladké a díky průhlednosti polymethylmethakrylátu bylo možné pozorovat strukturu řezu u jednotlivých drážek „uvnitř“ vzorku. Bylo jasně viditelné (i bez měření), jaký má vliv, hlavně na hloubky řezu, nastavení odlišných provozních podmínek stroje. Akrylový PMMA je svými vlastnostmi velmi vhodný pro tento typ obrábění.



Obr. 40 – Fotografie z procesu řezání laserem u PMMA



Obr. 41 – Fotografie vzorku z PMMA po řezání laserem

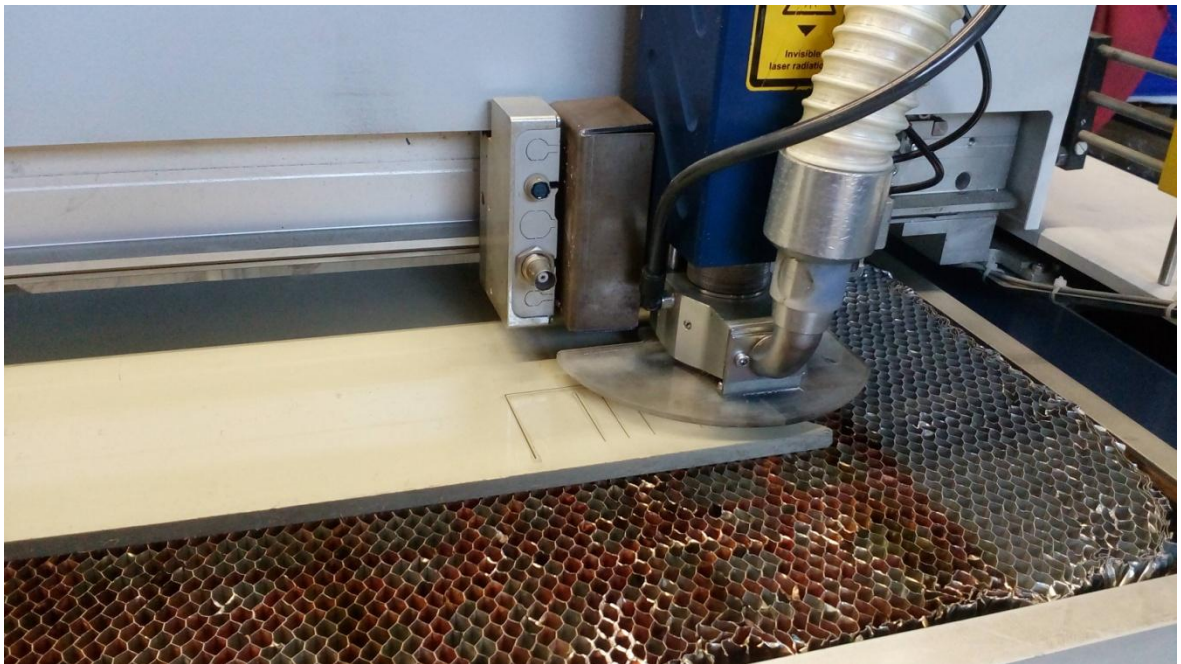
10.2 Obrábění vzorku z Polypropylenu (PP)

Vstupní parametry stroje

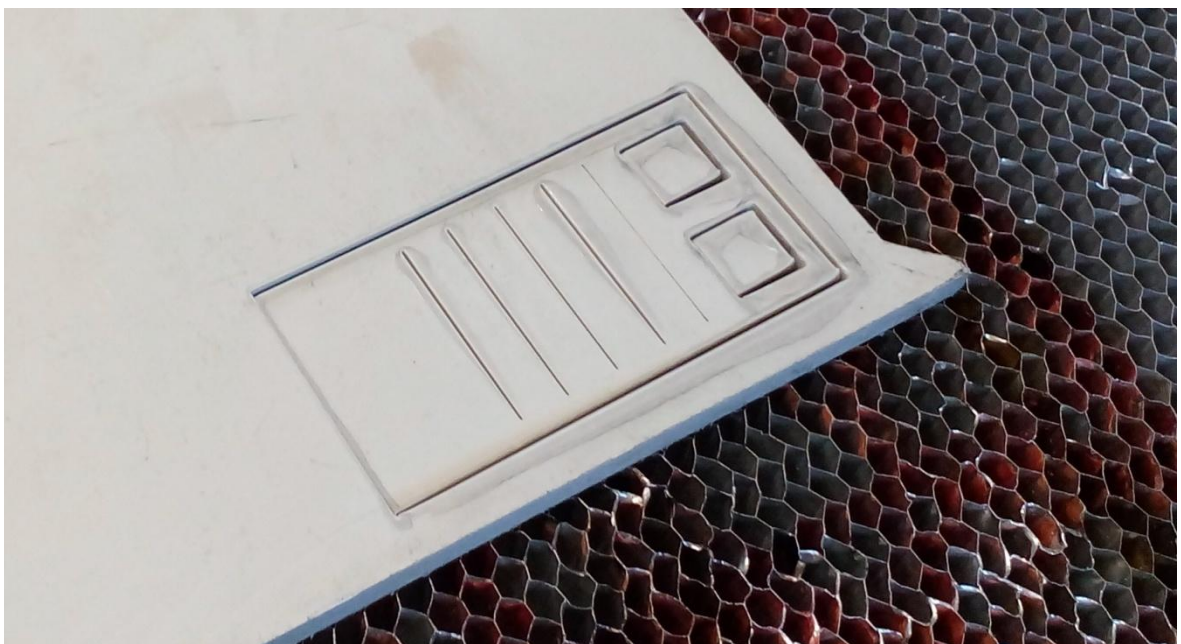
Řez	výkon [W]	posuv [mm/s]
Obvod a čtverečky	285	10
1. drážka	255	45
2. drážka	240	70
3. drážka	225	100
4. drážka	270	30
5. drážka	210	350

Tab. 5 – Vstupní parametry u PP

Dalším materiálem, jež firma poskytla pro výrobu vzorků, byl termoplastický polypropylen o tloušťce 8mm. I tento polymerní materiál byl vystaven účinkům laserového záření za různých provozních podmínek stroje. Již po započetí obráběcího procesu byl patrné, že materiál nebude vhodný pro další zkoumání a měření. Po průchodu laserového paprsku zůstávala řezná plocha „roztečená“, stěny se bořily a povrch řezu byl pro další měření prakticky nepoužitelný. Ani dalšími změnami provozních podmínek nebylo dosaženo uspokojivého výsledku, účinek laserového paprsku zanechával neustále stejné, nekvalitní řezné plochy, se kterými se nebylo možno dále pracovat. Proto byl tento vzorek z polypropylenu vyloučen a nebude použit k dalšímu zkoumání a měření.



Obr. 42 – Fotografie z procesu řezání laserem u PP



Obr. 43 – Fotografie vzorku z PP po řezání laserem

10.3 Obrábění vzorku z houževnatého polystyrenu (HPS)

Vstupní parametry stroje

Řez	výkon [W]	posuv [mm/s]
Obvod a čtverečky	285	20
1. drážka	255	45
2. drážka	240	70
3. drážka	225	100
4. drážka	270	30
5. drážka	210	350

Tab. 6 – Vstupní parametry u HPS

Deska z polymerního HPS určená k výrobě posledního vzorku byla zároveň nejmenší tloušťky, a to 5mm. Výsledek byl velice podobný jako u předchozího případu, v některých ohledech i daleko nepříznivější. Laserový paprsek po sobě zanechával povrchy, které byly pro další zpracování výsledku neměřitelné. Stejně jako u PP, tak i u vzorku z HPS docházelo k „boření“ a „roztečení“ obvodových stěn, čtverců a jednotlivých drážek. I po vybroušení vzorku by bylo měření nereálné nebo velmi obtížné. Kvůli nepoužitelnosti vypálené vzorku z HPS byl i tento materiál z měření vyloučen.



Obr. 44 – Fotografie z procesu řezání laserem HPS



Obr. 45 – Fotografie vzorku z HPS po řezání laserem

Ohořelá místa po průchodu laserového paprsku jsou způsobena tavením a hořením fólie, která chrání povrch HPS desky. Fólie postupně uhořívala a vzniklé spaliny zanechávaly černá místa po stranách řezu.

10.4 Diskuze k výsledkům vypálených vzorků

Již z předchozího textu je patrné, že nejvhodnějším materiálem, pro další zkoumání povrchu obrobku, je vzorek z akrylátu PMMA. Jeho řezy jsou jasně viditelné i „uvnitř“ vzorku, především díky jeho optickým vlastnostem jako jsou čírost a průhlednost.

Díky změnám vstupních parametrů stroje mají jednotlivé drážky různou hloubku řezu i kvalitu této obrobené plochy. Z výše uvedených tabulek pro vstupní hodnoty stroje (tab. 4, tab. 5, tab. 6) je patrné, že čím je posuvová rychlost stroje nižší, tím je hloubka drážky větší. Tzn., že při obrábění obvodového tvaru a čtvercových výřezů (15x15mm) byla posuvová rychlost nejnižší, a to z důvodu, aby došlo k úplnému oddělení tvaru vzorku (dosažení požadovaných geometrických rozměrů) od zbytkového materiálu desky. Při tvorbě drážek se již rychlost zvyšovala, aby nedošlo k úplnému průchodu laserového paprsku celou tloušťkou materiálu. Výkon tedy neměl tak razantní vliv na hloubku řezu jako pracovní rychlost.

Vzorky polymerních materiálů z polypropylenu (PP) a houževnatého polystyrenu (HPS) byly tedy po vizuální kontrole z dalšího měření vyloučeny z důvodů popsaných výše. Pro další laboratorní zkoušky tedy obstál pouze materiál PMMA, který je známý svými vlastnostmi jako velmi vhodný pro tento typ obrábění. Proto se jej hojně využívá v různých odvětvích, například jako náhrada skla při „zasklívání“ dopravních prostředků, atd.

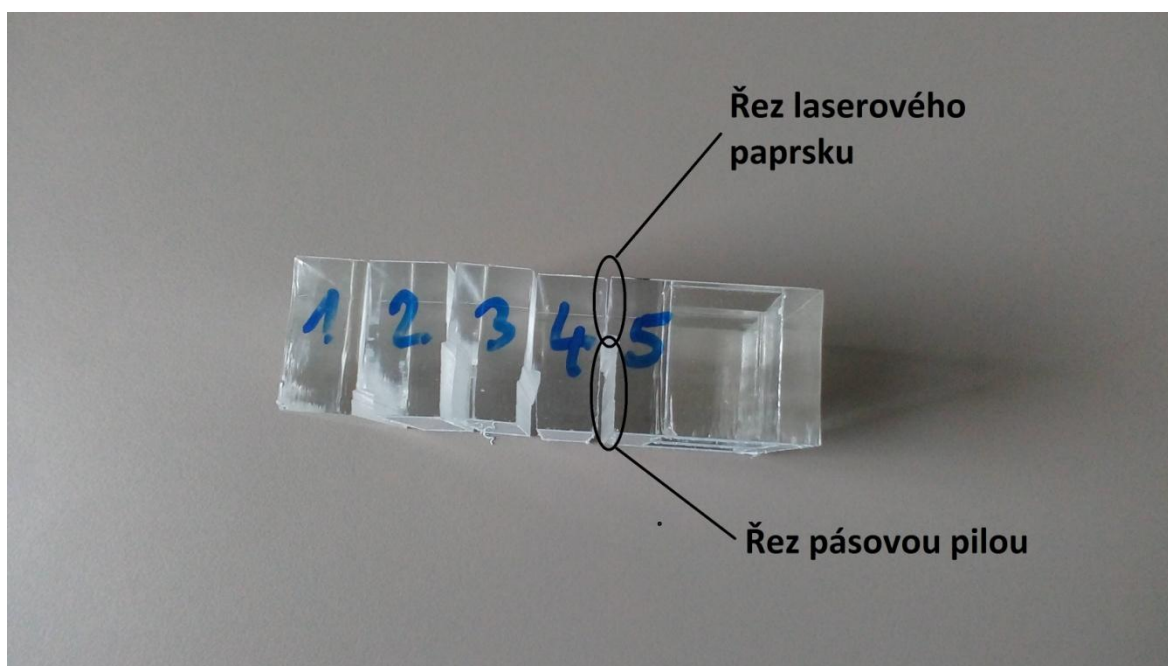
11 LABORATORNÍ ZKOUMÁNÍ PMMA PO PRŮCHODU LASEROVÝM PAPERSEM

11.1 Příprava vzorků

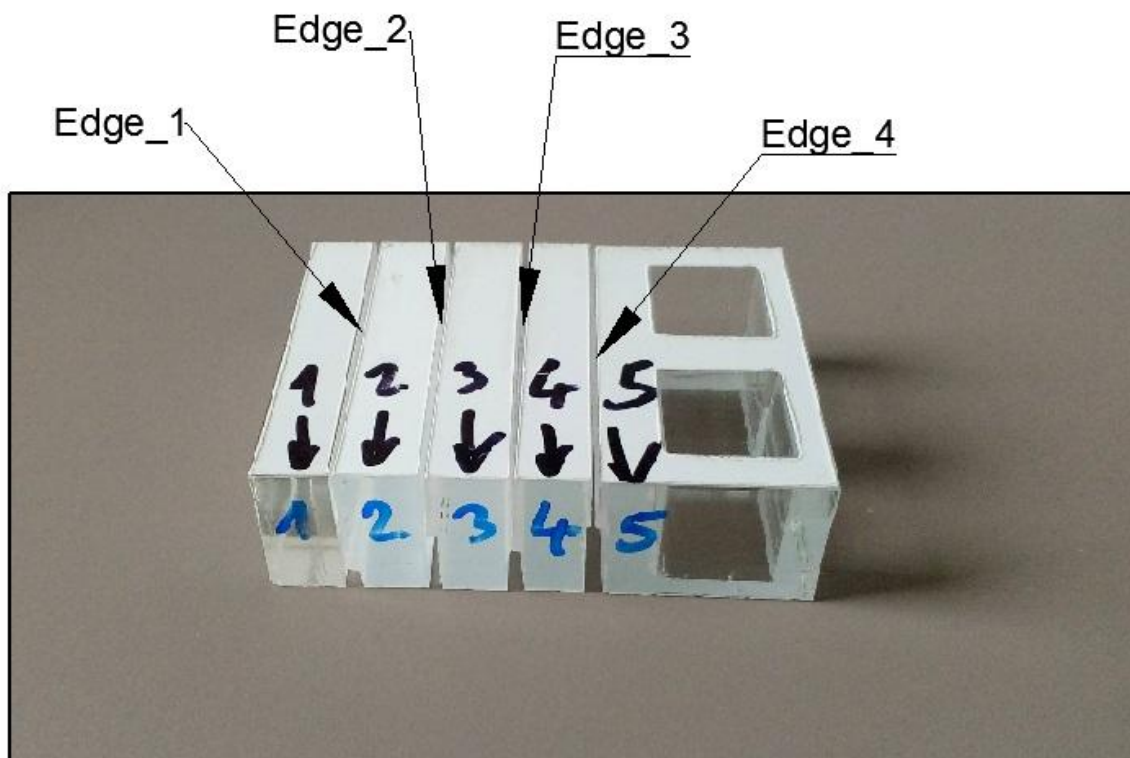
Po výrobě vzorků a jejich klasifikaci byly tyto přemístěny do laboratorních prostor fakulty Technologické UTB Zlín, kde byly podrobeny dalšímu zkoumání, které bude popsáno v dalších kapitolách.

Nejprve bylo třeba zpřístupnit místa řezu v drážkách. To se provedlo pomocí pásové pily tak, aby nedošlo k poškození budoucího zkoumaného řezu. Ty musely být následně zbaveny okrajového přebytku materiálu pomocí jemného broušení, aby nedošlo k poškození zkoumané plochy. Obvodové plochy nebylo dále třeba nijak upravovat a mohlo se přejít k samotnému nasnímání a naměření povrchu. Je třeba připomenout, že tloušťka vzorku z PMMA byla 20 mm.

Vzorek byl rozdělen na šest dílů, a to vždy v místech řezu tak, abychom se dostali ke každé z čtyř řezů, jak je znázorněno na následujícím obrázku. Poslední kousek vzorku se zkoumal zvlášť, je znázorněn na obr. 48. U každého z šesti dílů byla zkoumána pouze část řezu, konkrétně v délce 4 mm.



Obr. 46 – Vzorek PMMA po rozřezání pásovou pilou



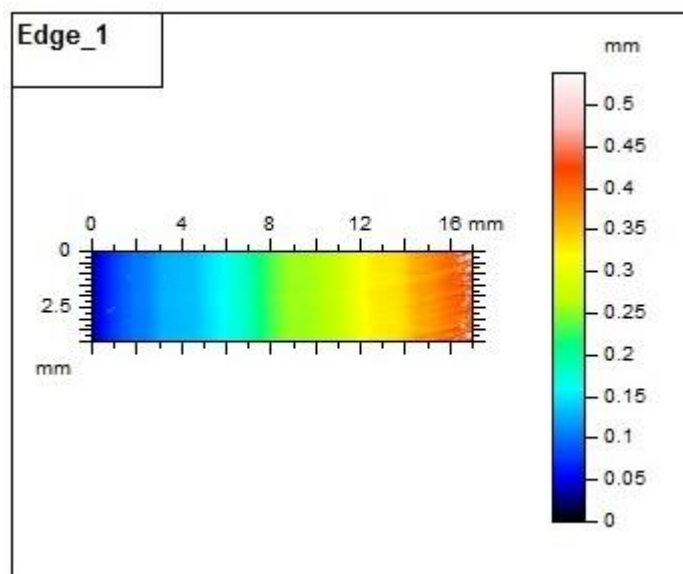
Obr. 47 – Fotografie rozdělení vzorku PMMA na jednotlivé drážky



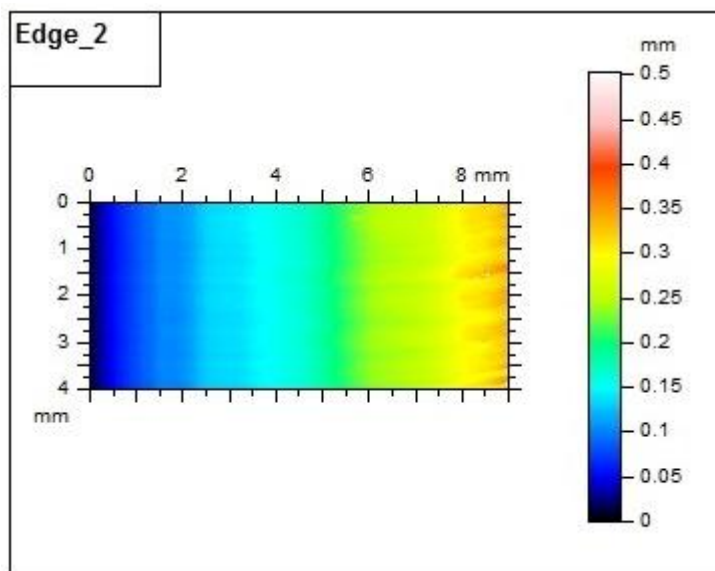
Obr. 48 – Fotografie zkoumané kostky z PMMA

11.2 Měření hloubky

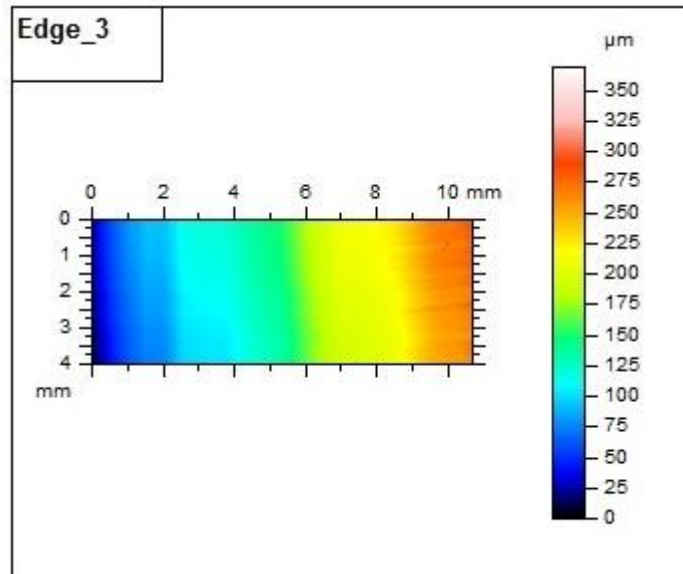
Nejprve byla měřena hloubka řezu laserové paprsku u všech čtyř drážek. Jednotlivé výsledky lze porovnat na následujících grafech. Měření hloubky se provádělo na přístroji Talysurf CLI 500.



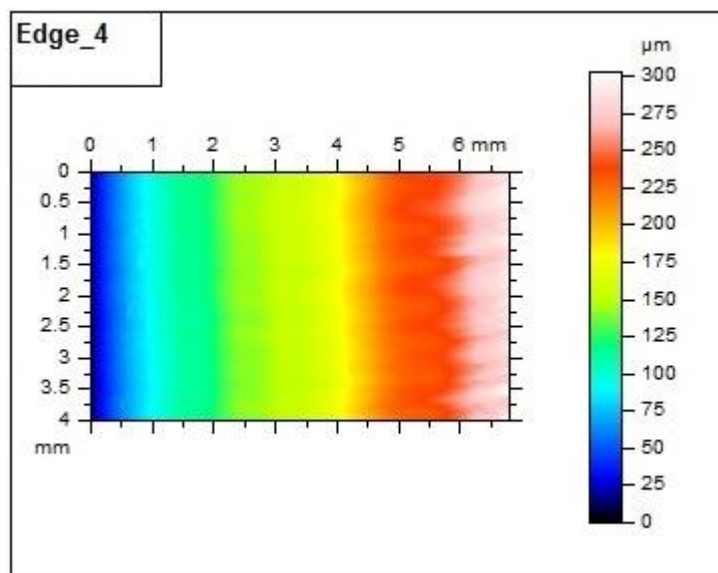
Graf 6 – Scan Edge_1



Graf 7 – Scan Edge_2



Graf 8 – Scan Edge_3



Graf 9 – Scan Edge_4

11.2.1 Diskuze výsledků k měření hloubky

Z uvedených grafů jsou velmi zřetelně vidět různé hloubky řezů. Osa X znázorňuje přímo hloubku, kam až paprsek laserového záření pronikl, osa Y pak uvádí šířku měřené plochy, u všech tělísek se jedná o 4mm.

Při porovnání hloubek drážek v závislosti na výkonu a posuvové rychlosti (tab. 6, tab. 7, tab. 8) jsme došli k závěru, že čím je posuvová rychlost stroje nižší, tím dochází k odpaření

většího množství materiálu, koncentrace laserového paprsku na materiál je delší, má tedy více času odpařit co nejvíce materiálu a vzniká tak hlubší drážka.

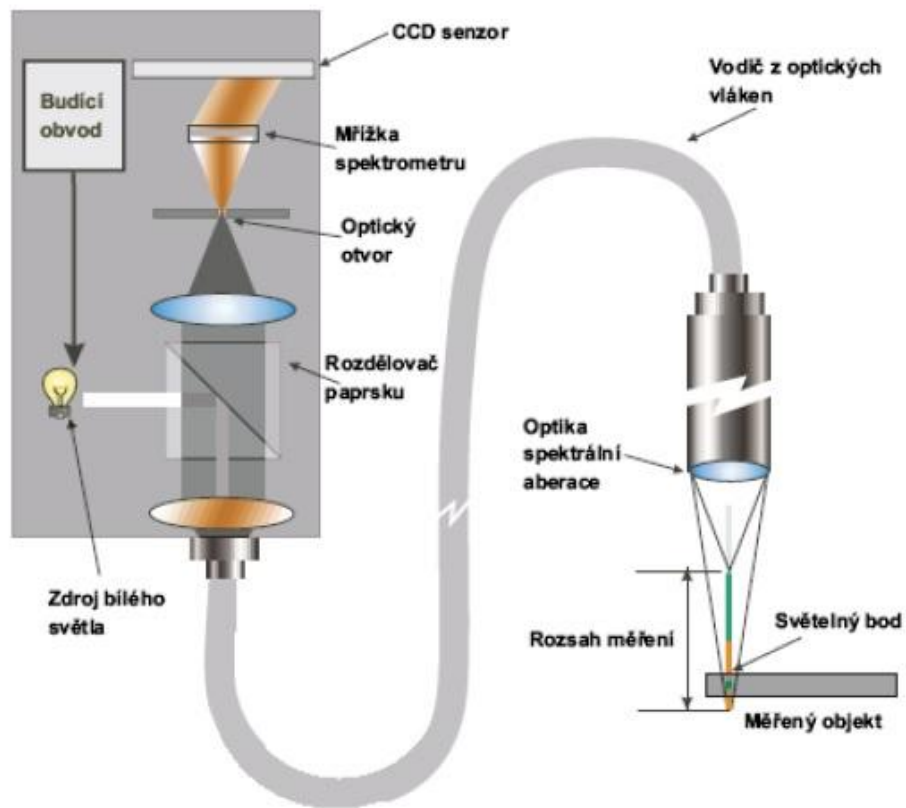
V našem případě se nejvíce materiálu odpařilo u drážky číslo 1 (Edge_1) - přesně 17mm. Může za to již zmíněná pracovní rychlost, která v tomto případě měla hodnotu 17mm/s. Při řezání obvodu vzorku a čtvercových výřezů (15x15mm) bylo nastavení rychlosti 8mm/s. Dále bylo zjištěno, že již při rychlosti 12mm/s dojde k úplnému odpaření materiálu v celé hloubce (20mm), z toho plyne, že pro úplné „prořezání“ tloušťky 20 mm a pro řezání obvodu u PMMA by postačila tato posuvová rychlost.

Druhou nejhlubší drážkou byla ta, která je označena jako Edge_3. U této bylo nastavení rychlosti 25mm/s, tedy jen o něco vyšší, než u předchozího případu. Následuje drážka s označením Edge_2 – rychlost 35mm/s. Nejmenší hloubku drážky měla Edge_4, kde vstupní parametr rychlosti měl hodnotu 45mm/s, tedy nejvyšší hodnotu posuvové rychlosti ze všech zkoumaných drážek.

Dalším krokem při zkoumání povrchu materiálu po průchodu laserového paprsku je klasifikace drsností a vlnitosti u nasnímaných povrchů.

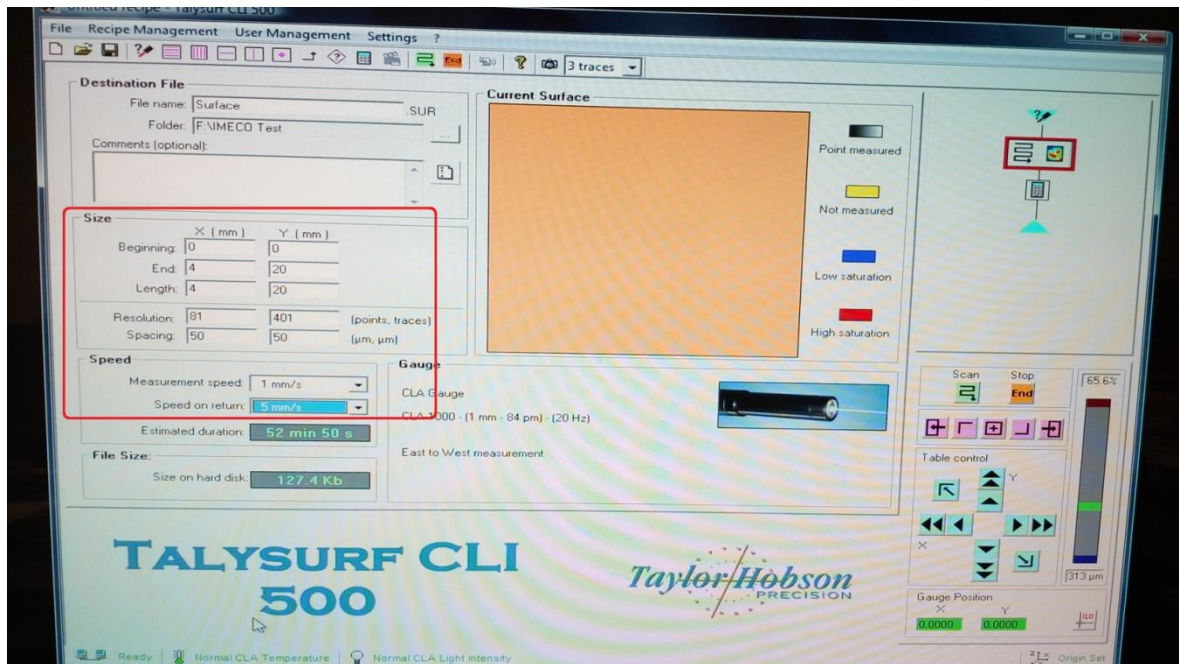
11.3 Seznámení s přístrojem

Tato operace byla provedena na laboratorním přístroji Talysurf CLI 500, který využívá konfokální sondy pro bezkontaktní nasnímaní zkoumaného povrchu, měření ve 3D. Tento přístroj je velice účinný a slouží k provádění rychlého prostorového měření a hodnotí povrch s vysokým rozlišením. CLA (Chromatic Length Aberration) je bezdotykový způsob reprezentovaný laserovou triangulační sondou a konfokálním snímačem. Přístroj je též vybaven automatickým posuvem, který umožňuje pohyb ve všech osách X, Y, Z s rychlostí do 30mm/s. Velikost měřícího prostoru je max. 200 x 200 x 200 mm.



Obr. 49 – Schéma snímání konfokální sondou

K vyhodnocování získaných dat byl využit software Talymap. Ten zpracovává prostorovou charakteristiku povrchu z dat, které byly získány bezdotykovým měřením. Několika možnými způsoby dokáže znázornit sledovaný povrch, barevně rozlišit výšky, zvětšit celek nebo vybrané části povrchu. Lze provádět rozměrová měření ve třech osách, inverzi povrchu profilu. Práce s tímto programem je velice jednoduchá a rychlá.



Obr. 50 – Pracovní prostředí programu Talymap

Parametry softwaru Talymap:

- Zkoumaná plocha: 4 x 20 mm
- Rozlišení: 81 x 401 (bod, palec)
- Měřicí rychlost: 1 mm/s
- Rychlost návratu: 5mm/s

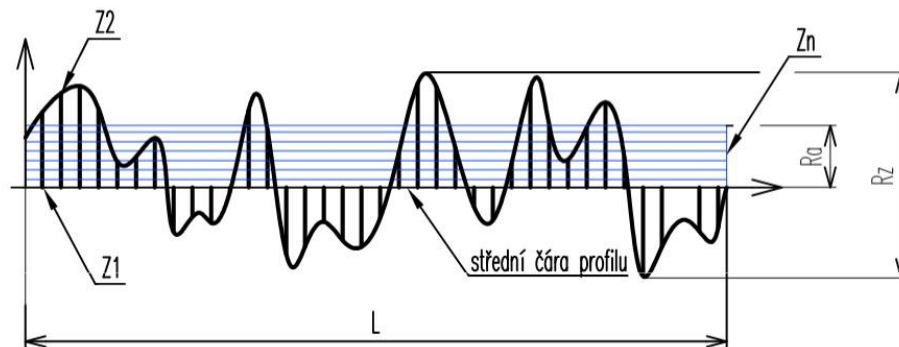
11.4 Nasnímání povrchů

Drsnost je vlastně souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností. Nerovnosti vznikají při výrobě. Skutečný profil povrchu je definován jako profil vzniklý jako průsečnice skutečného profilu a dané roviny.

Přístroj nám vyhodnocoval drsnost R_a , což je průměrná aritmetická odchylka měřeného profilu, tedy aritmetický průměr absolutních souřadnic v rozsahu základní délky. Tato hodnota bude pro naše měření dostačující. Další amplitudové parametry jsou:

- R_p – největší výška výstupku profilu
- R_v – největší hloubka prohlubně profilu
- R_z – nejvyšší výška profilu (v rozsahu základní délky)
- R_c – průměrná výška prvku profilu

- R_t – celková výška profilu (v rozsahu vyhodnocované délky)
- R_q – průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
- R_{sk} – šikmost profilu
- R_{ku} – špičatost profilu



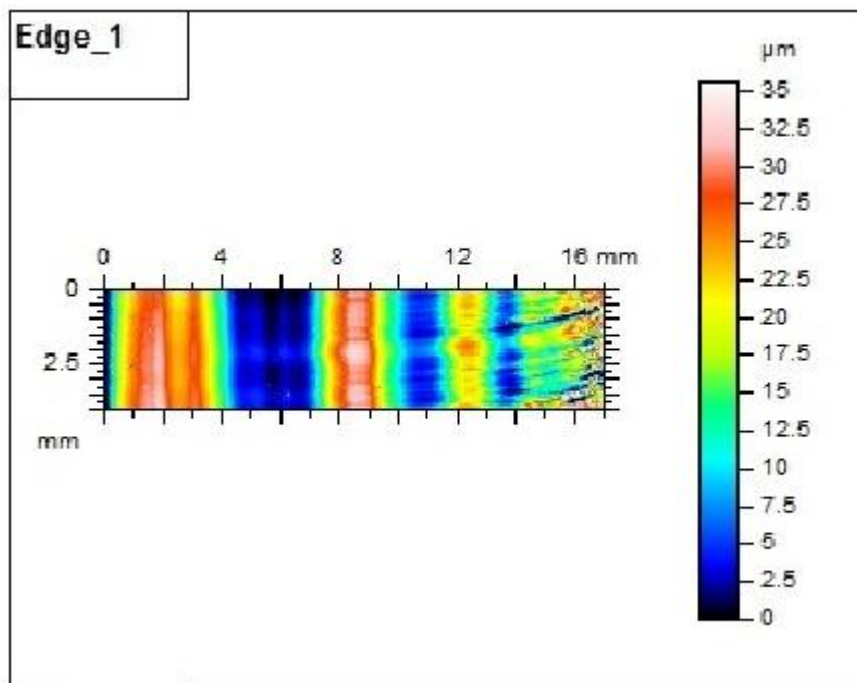
Obr. 51 – Drsnost R_a a R_z

Analýza byla provedena na základě hodnot získaných bezkontaktním nasnímáním povrchu všech čtyř drážek. Pro jednotlivé drážky byly nastaveny stejné měřicí hodnoty, aby bylo možné s výsledky dále pracovat a mezi sebou je porovnávat. Jak u měření hloubky drážek, tak i u měření drsnosti byla využita plocha o šířce 4 mm. Délka, která byla zjištěna předchozím měřením, pak závisela na každé z měřené drážky.

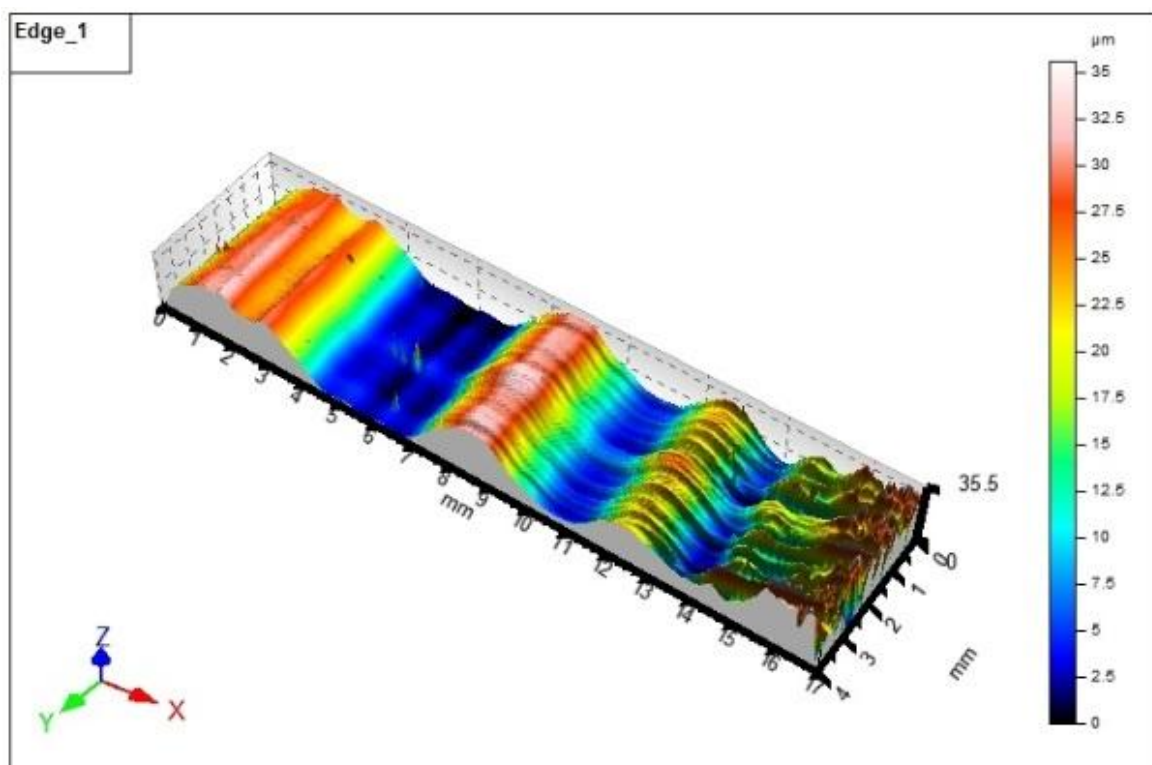
Při grafickém znázornění nasnímaných povrchů jsme využili funkce programu využívajícího prostorové hodnocení, tedy 3D grafů, kde jsou jednotlivé drsnosti povrchů zřetelně a jasně viditelné. Pro názornost drsnosti R_a byly programem Talymap vytvořeny také 2D grafy u každé z drážek. Software umožňuje další zajímavou funkci, takovou, že na 3D zobrazený povrch lze v libovolném směru vyznačit jeden profil (čáru), který je následně vyhodnocen funkcemi 2D. Tyto funkce bude využívat k přehlednému odečtení parametrů drsnosti.

11.5 Snímání povrchů drážek

11.5.1 1. Drážka

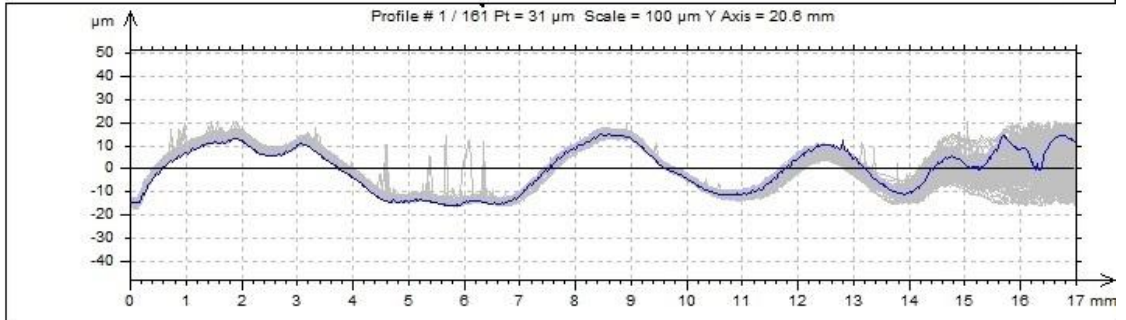


Graf 10 – Leveling Edge_1



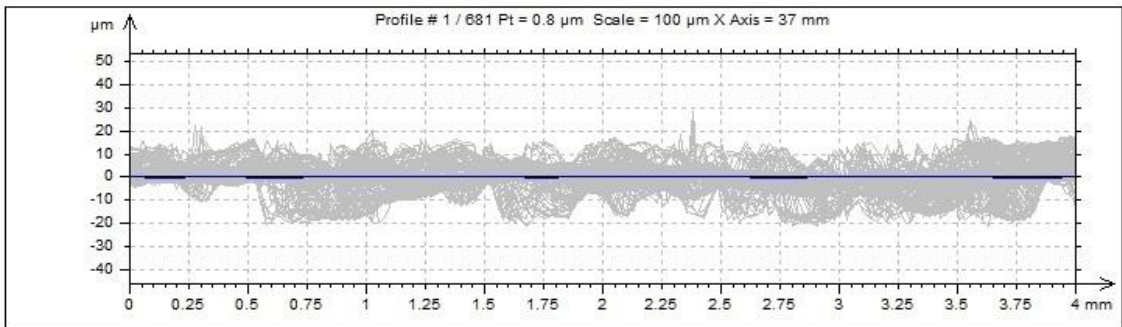
Graf 11 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_1

Edge_1



ISO 4287

		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	1.1	0.8	2.4
Rv	µm	1	0.8	1.6
Rz	µm	2.1	1.6	4
Rc	µm	2.1	1.1	4.2
Rt	µm	17.6	7	35.7
Ra	µm	0.5	0.4	0.8
Rq	µm	0.6	0.5	1.1
Rsk		1	-10	29.3
Rku		74.7	9.7	601.5



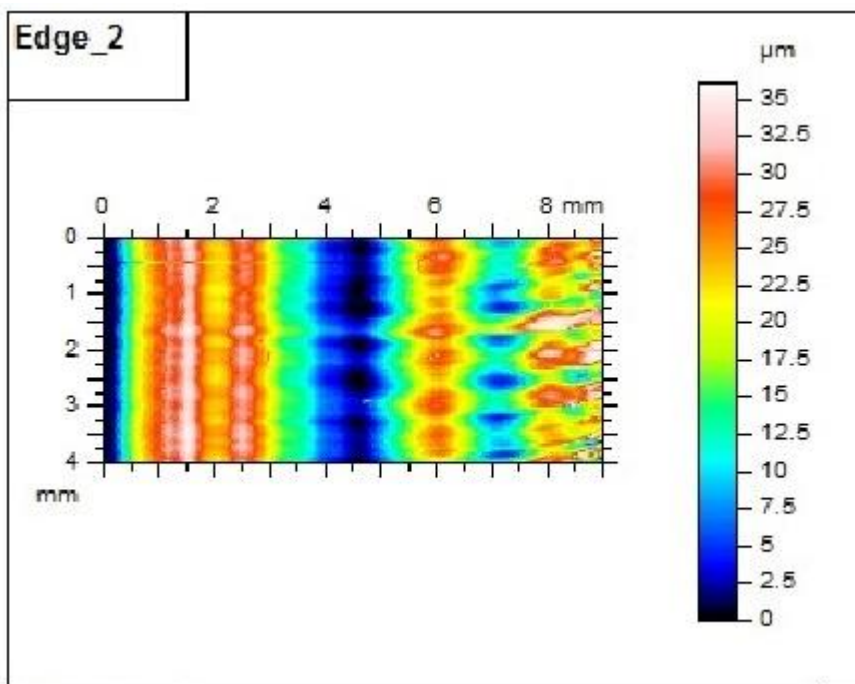
ISO 4287

		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	2	0.1	14.5
Rv	µm	2.1	0.1	15.2
Rz	µm	4.1	0.2	27.6
Rc	µm	3.1	0.1	23.3
Rt	µm	6.7	0.3	36.3
Ra	µm	0.9	0.1	6.7
Rq	µm	1.1	0.1	7.8
Rsk		1.3	-4.6	55.5
Rku		24.8	1.9	1082.4

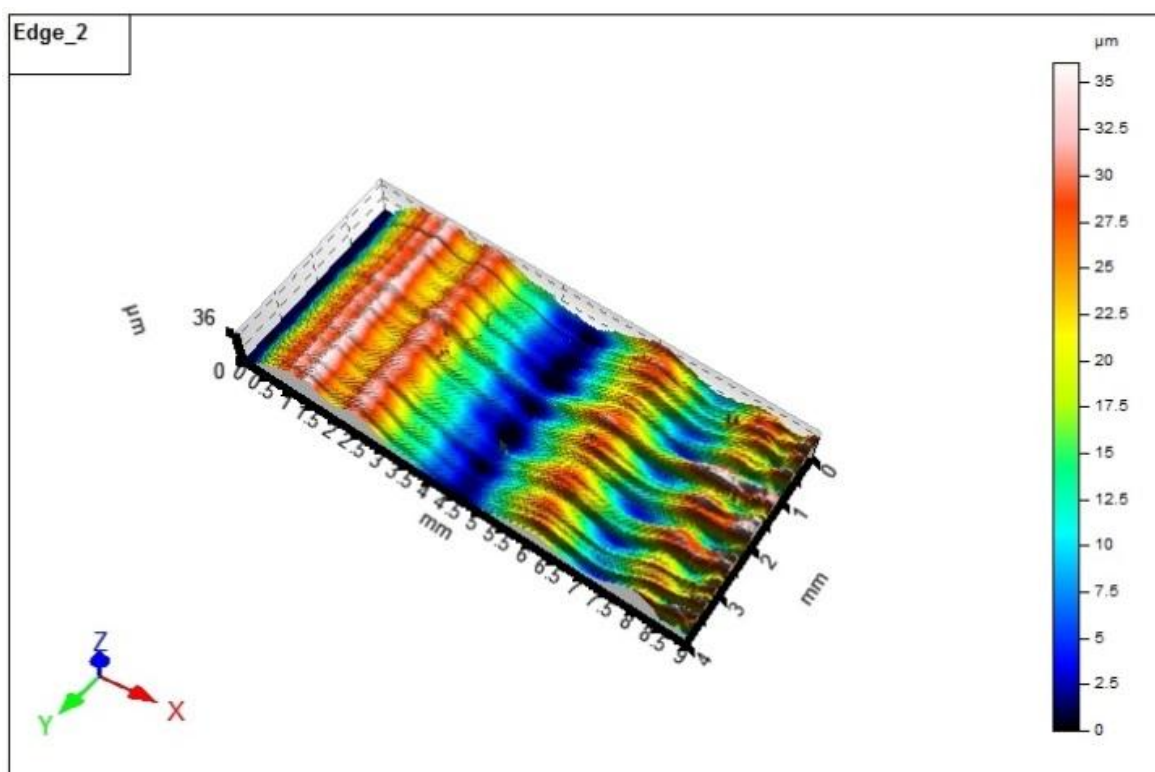
TalyMap Gold 5.1.1.5374

Graf 12 – Drsnost Edge_1 v podélném a příčném řezu

11.5.2 2. Drážka

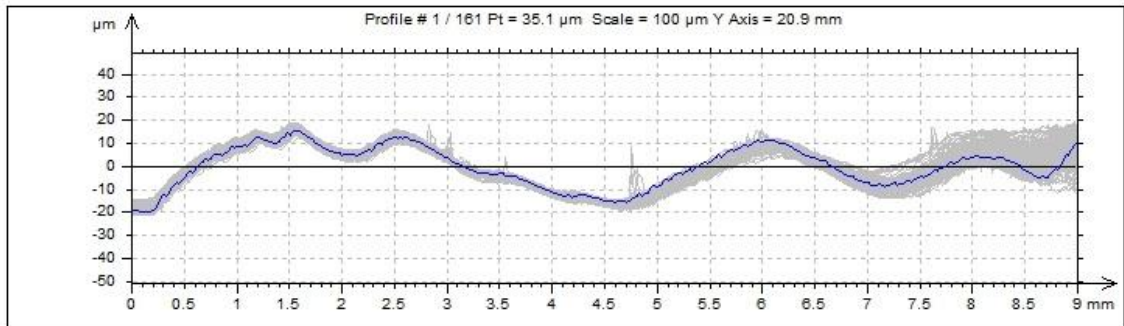


Graf 13 – Leveling Edge_2

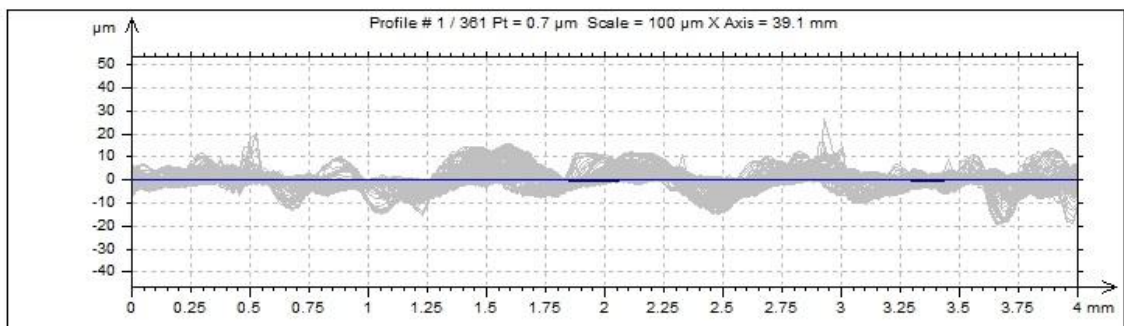


Graf 14 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_2

Edge_2



ISO 4287				
		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	1.4	1.2	2.7
Rv	µm	1.3	1.2	1.8
Rz	µm	2.7	2.4	4.3
Rc	µm	2.1	1.6	3.8
Rt	µm	7.4	5.3	18
Ra	µm	0.7	0.6	0.9
Rq	µm	0.8	0.8	1.2
Rsk		0.6	-0	8.7
Rku		7.3	3.9	98.7

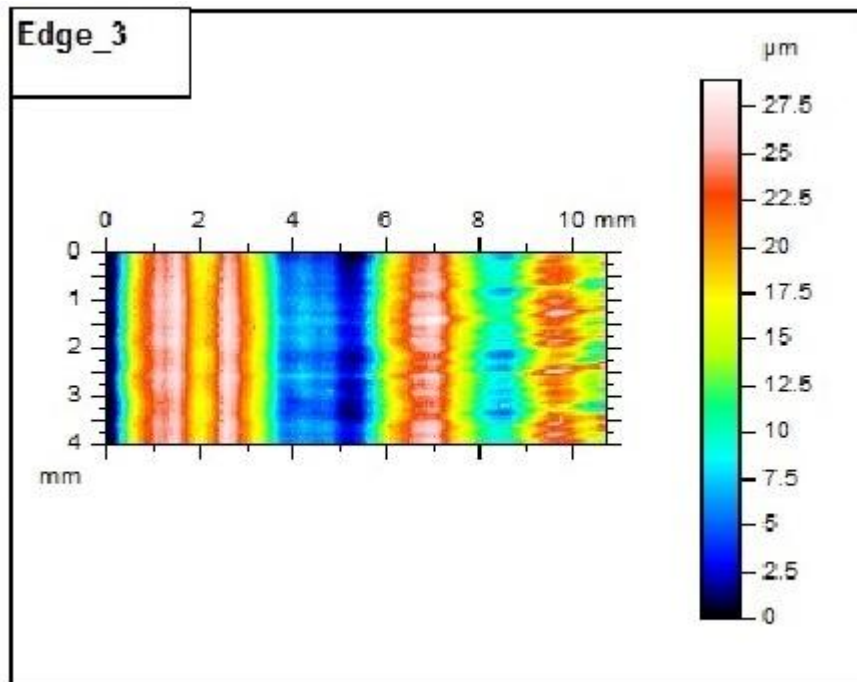


ISO 4287				
		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	2.7	0.1	9.1
Rv	µm	2.7	0.1	9.2
Rz	µm	5.5	0.2	16.8
Rc	µm	3.9	0.2	16.6
Rt	µm	7.8	0.4	26.5
Ra	µm	1.2	0	4.4
Rq	µm	1.5	0.1	5
Rsk		-0.1	-2.5	10.7
Rku		4.9	1.8	98.9

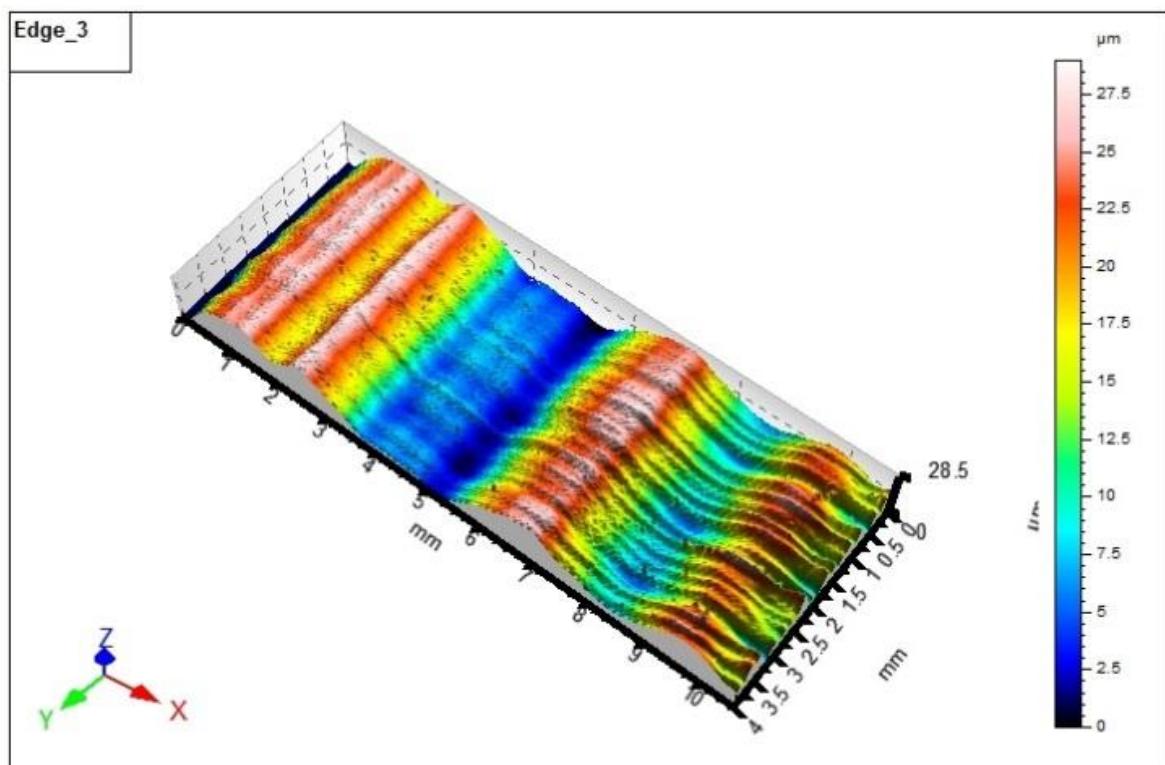
TalyMap Gold 5.1.1.5374

Graf 15 – Drsnost Edge_2 v podélném a příčném řezu

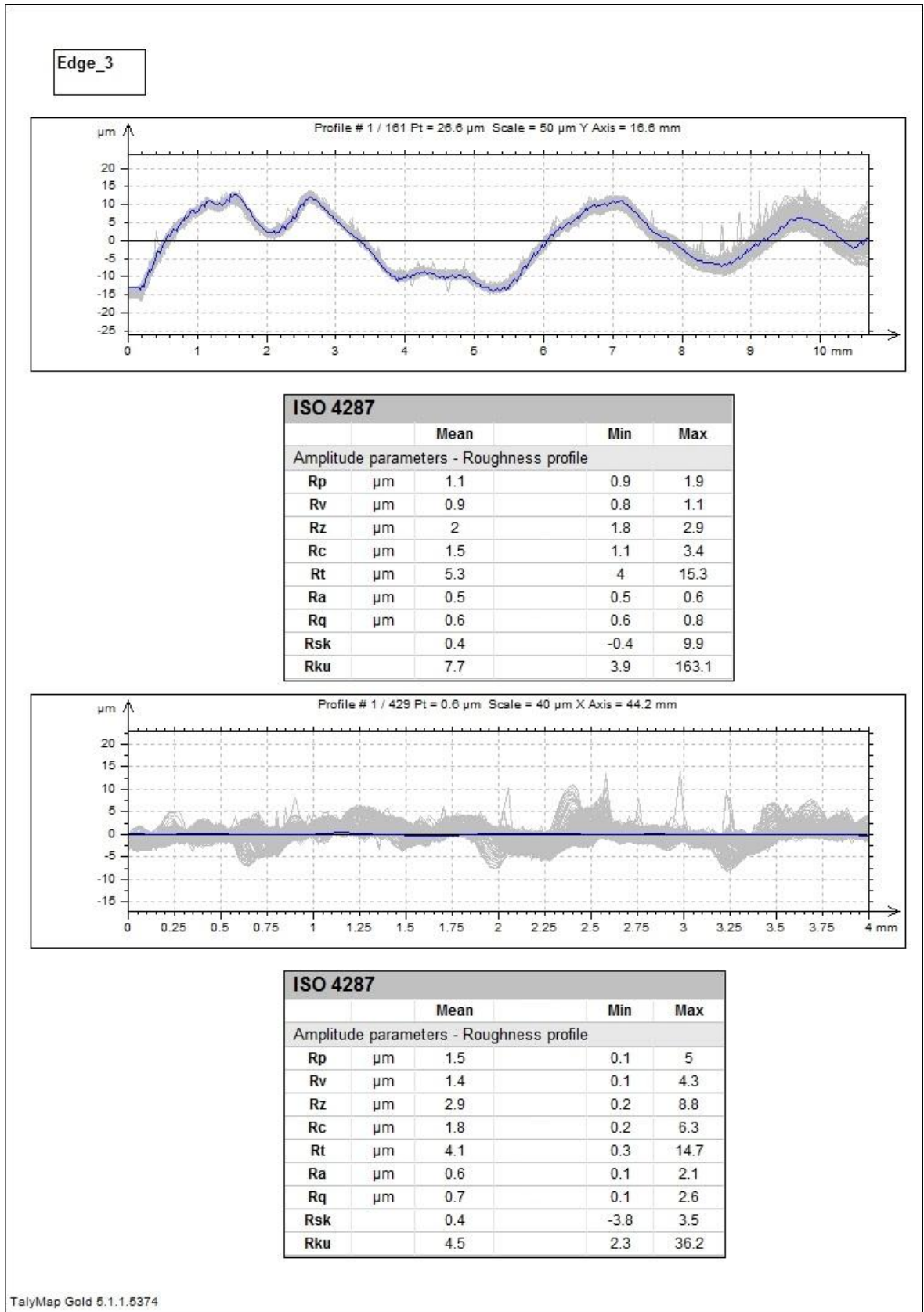
11.5.3 3. Drážka



Graf 16 – Leveling Edge_3

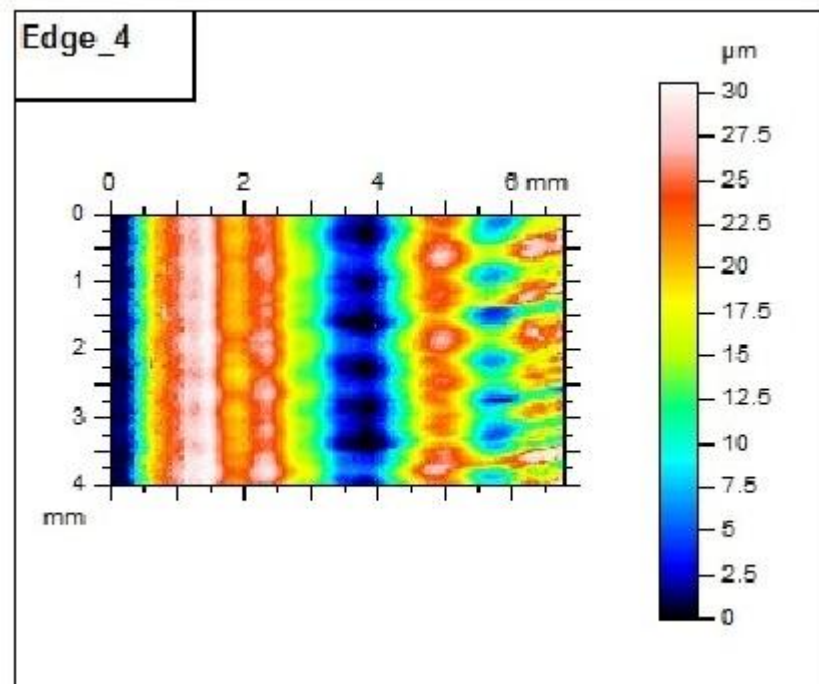


Graf 17 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_3

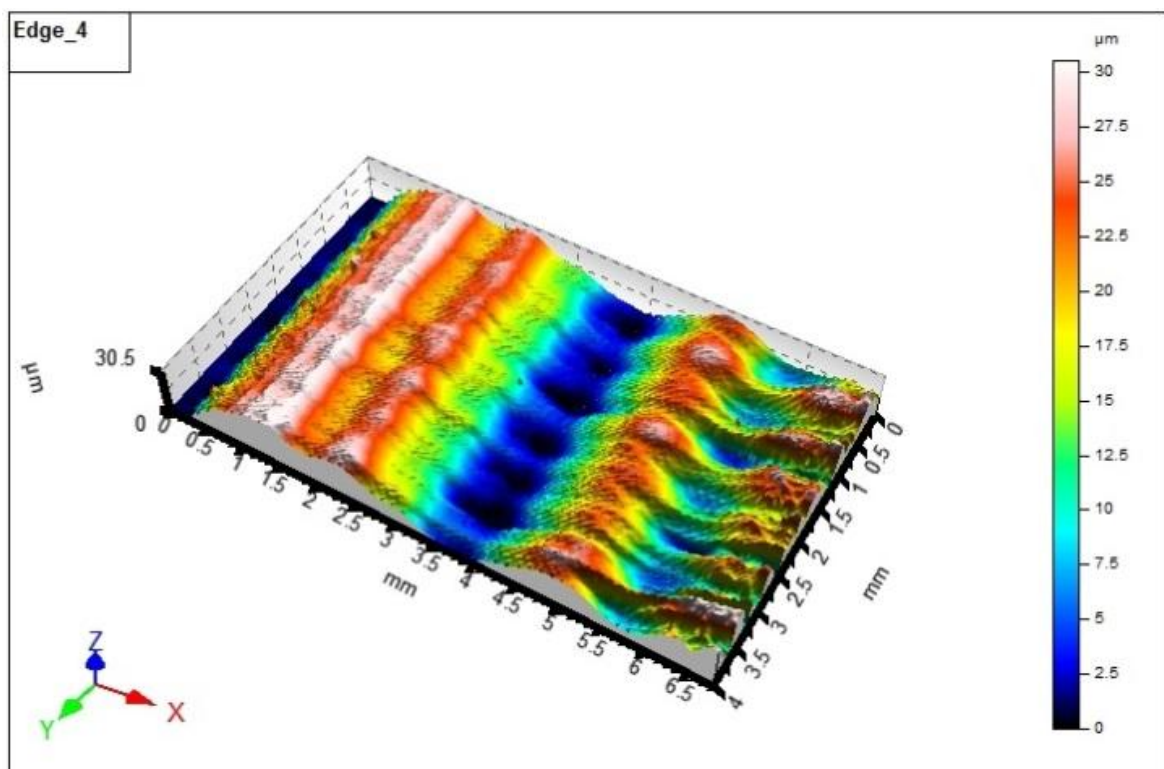


Graf 18 – Drsnost Edge_3 v podélném a příčném řezu

11.5.4 4. Drážka

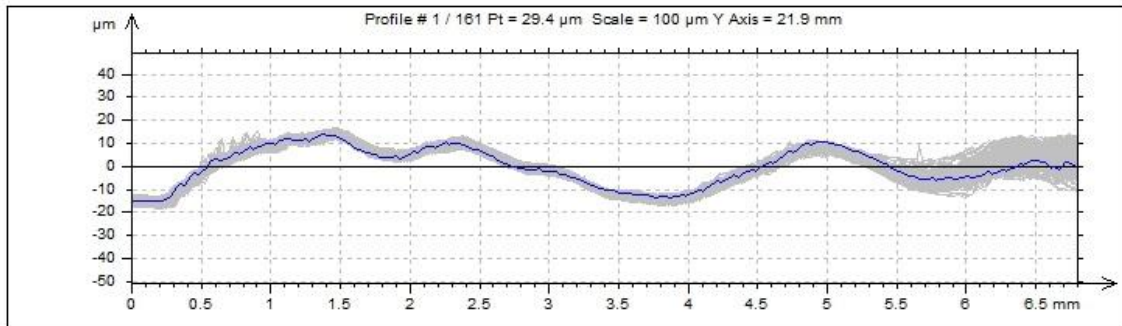


Graf 19 – Leveling Edge_4

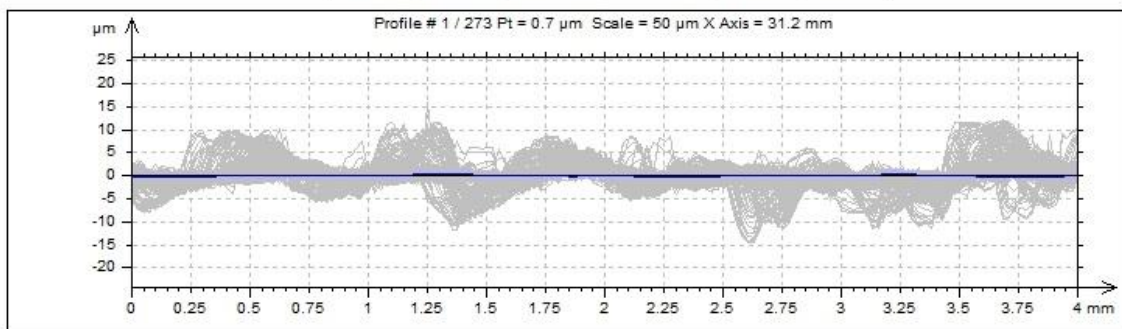


Graf 20 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_4

Edge_4



ISO 4287				
		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	1.7	1.4	2.6
Rv	µm	1.5	1.3	1.8
Rz	µm	3.2	2.7	4.3
Rc	µm	2.6	1.9	4
Rt	µm	6.4	4.4	12.3
Ra	µm	0.8	0.7	0.9
Rq	µm	1	0.9	1.2
Rsk		0.2	-0.8	1.9
Rku		4.1	2.6	16.7



ISO 4287				
		Mean	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile				
Rp	µm	2	0.1	7
Rv	µm	2.1	0.1	6.4
Rz	µm	4.1	0.1	13.4
Rc	µm	3.3	0.1	11.4
Rt	µm	6.3	0.2	19.8
Ra	µm	1	0	3.2
Rq	µm	1.2	0	3.8
Rsk		0	-1.5	3.6
Rku		3.4	1.8	26.4

TalyMap Gold 5.1.1.5374

Graf 21 – Drsnost Edge_4 v podélném a příčném řezu

11.6 Popis grafů a zhodnocení

Bezkontaktní snímání povrchů bylo prováděno kolmo na směr drážek.

Nefiltrovaný, neboli primární povrch, je skutečný profil povrchu, který byl zjištěn měřicím přístrojem. Filtrovaný profil drsnosti je získán z primárního profilu potlačením vlnitosti. Vždy u prvního grafu prošly výsledky nejdříve funkcí Leveling, což je vyrovnání přímosti.

Pro lepší přehlednost byly pomocí programu Talymap vytvořeny i 3D náhledy, ve kterých je znázorněna nasnímaná drsnost spolu s vlnitostí povrchu.

Další grafické vyobrazení znázorňuje drsnosti povrchu ve 2D a to jak v podélném řezu, tak i v řezu příčném. Podle délek jednotlivých drážek byl proveden určitý počet měření.

Pro lepší představu budou popsány získané výsledky u drážky Edge_1 (graf 12). Na osách X jsou uvedeny délky drážek v mm, osy Y znázorňují výšky nasnímaných profilů v jednotkách μm , středová čára má hodnotu 0.

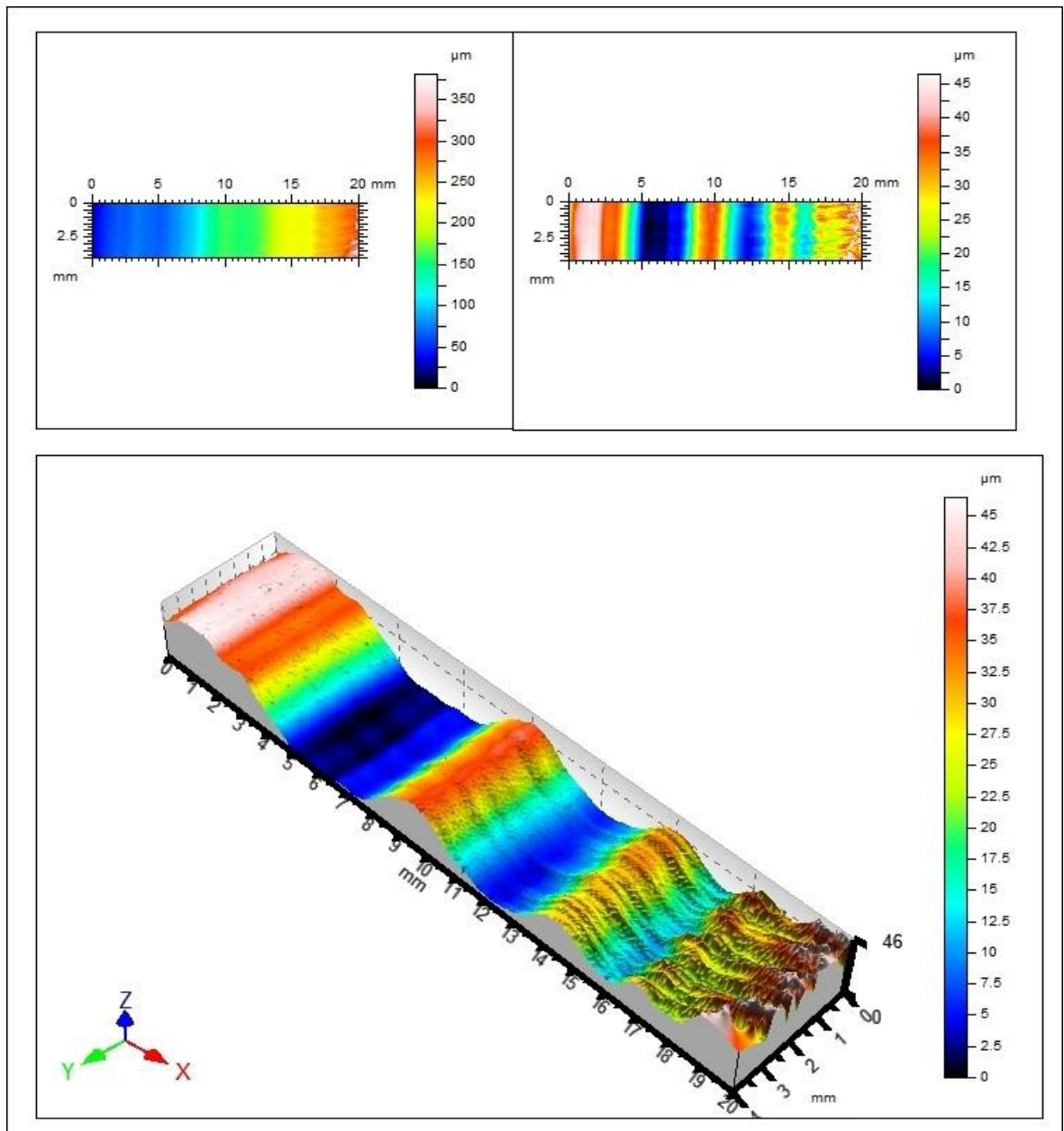
V podélném řezu bylo provedeno 161 měření, což znamená, že zkoumaná část povrchu o šířce 4 mm byla rozdělena na 161 dílů a z těchto pak byly vyhodnoceny výsledky – viz tabulka pod grafem. Podobným způsobem došlo k rozdělení zkoumaného povrchu v příčném řezu. Z grafu 12 lze vyčíst, že bylo vyhodnoceno 681 řezů a ze získaných dat vytvořen graf. Výsledky jsou uvedeny v tabulce pod grafem.

Nejmenší hodnoty drsnosti R_a měla drážka Edge_3, v podélném řezu byla tato hodnota $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, v příčném řezu $R_a = 0,6 \mu\text{m}$. Ostatní hodnoty drsností u dalších drážek byly velice podobné.

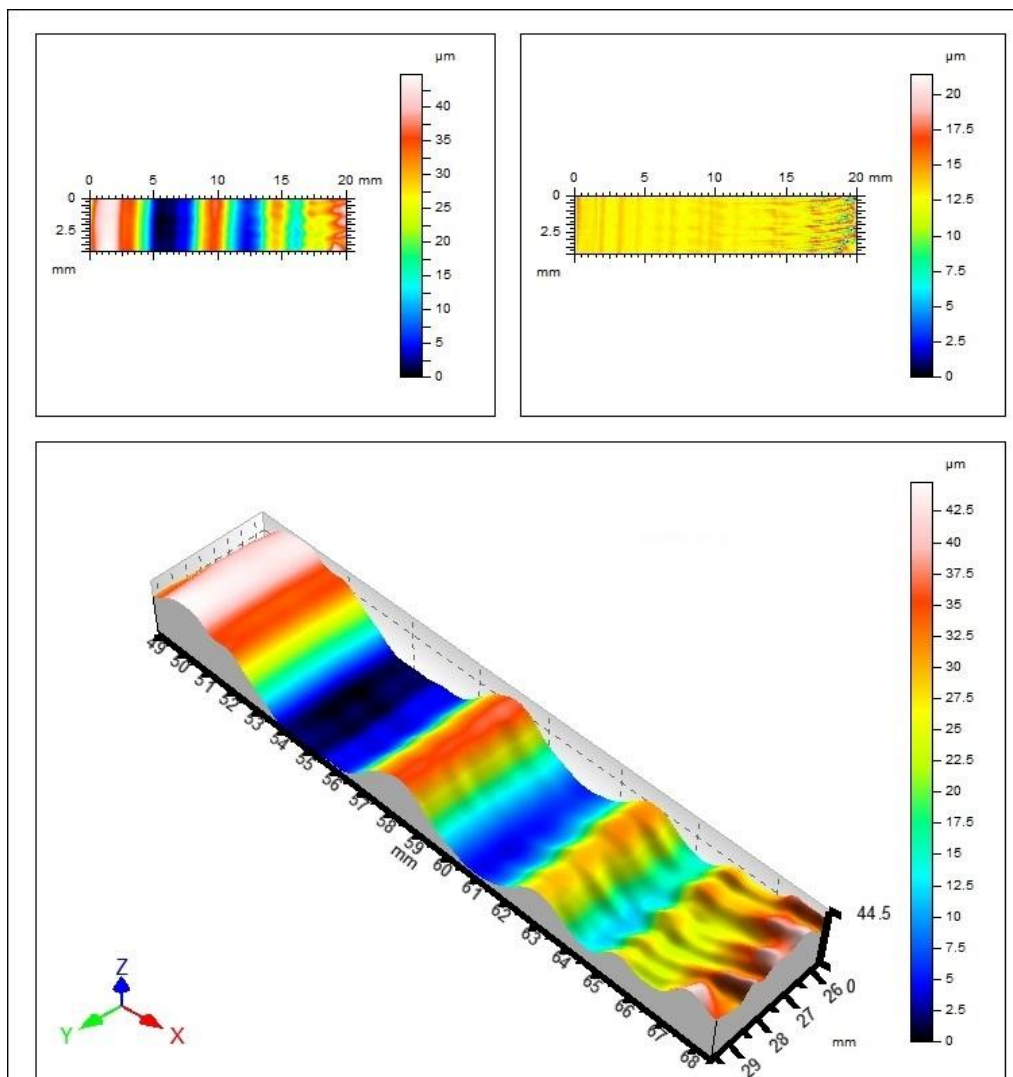
V grafech se vyskytují některé hodnoty, které se od ostatních poměrně výrazně odchyľují. Tyto hodnoty jsou způsobeny nepřesností měření, ale nemají zásadní vliv na vyhodnocené výsledky.

Tabulky obsahují střední (Mean), maximální (Max) a minimální (Min) hodnoty jednotlivých drsností.

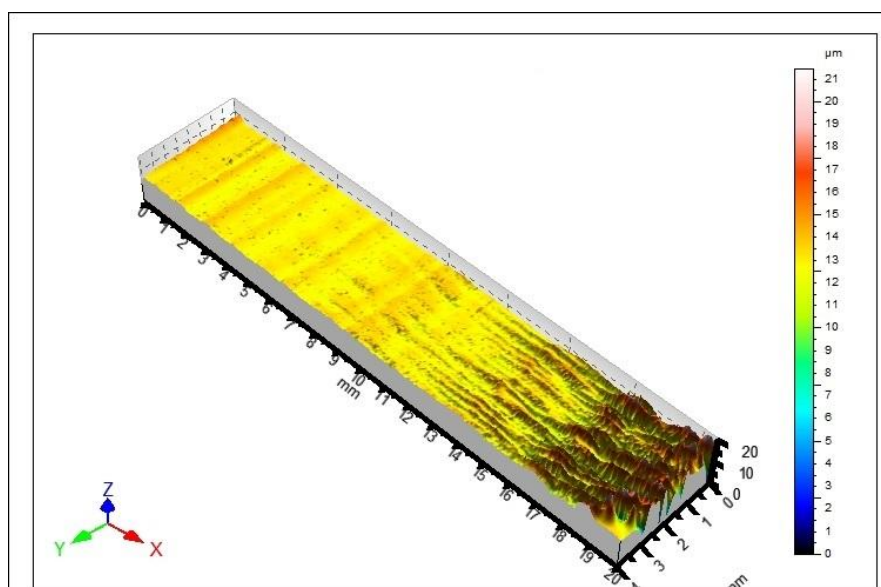
11.7 Snímání povrchu kostky



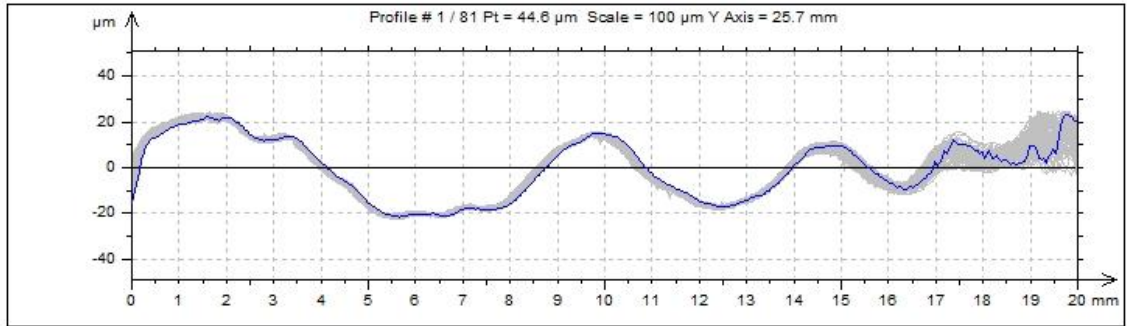
Graf 22 – Scan povrchu, Leveling, 3D drsnost a vlnitost



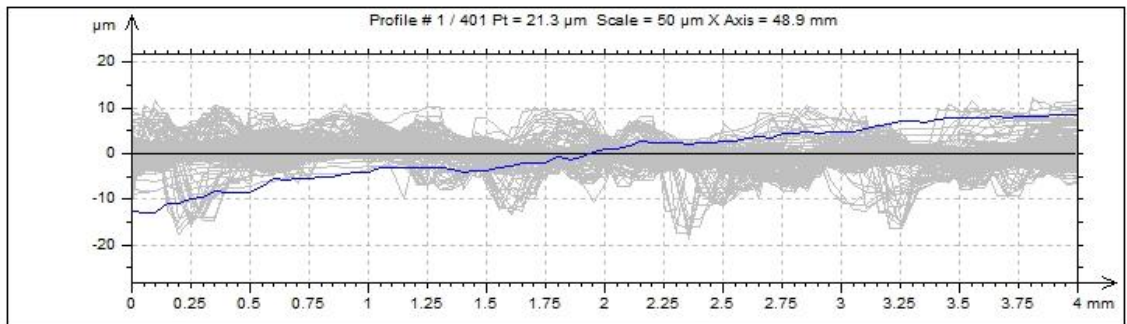
Graf 23 – Vlnitost 2D, Drsnost 2D, Vlnitost 3D



Graf 24 – Drsnost 3D



ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	µm	0.7	0.1	0.6	1
Rv	µm	0.9	0.1	0.7	1.2
Rz	µm	1.7	0.2	1.4	2
Rc	µm	1.7	0.3	1	2.5
Rt	µm	12.2	2.7	5.7	17.6
Ra	µm	0.4	0	0.3	0.5
Rq	µm	0.5	0	0.4	0.6
Rsk		-13.1	9.1	-35.4	7.5
Rku		260	168.9	13.4	826.4



ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	µm	1.1	1.4	0.1	6.7
Rv	µm	1.1	1.7	0.1	9
Rz	µm	2.2	3.1	0.2	14.8
Rc	µm	1.8	2.6	0.2	14
Rt	µm	3.1	4.2	0.3	19.8
Ra	µm	0.5	0.8	0	3.4
Rq	µm	0.6	0.9	0.1	4.1
Rsk		0.1	0.9	-2.8	12.2
Rku		4.4	6.4	1.9	118.1

TalyMap Gold 5.1.1.5374

Graf 25 – Drsnost kostky v podélném a příčném řezu

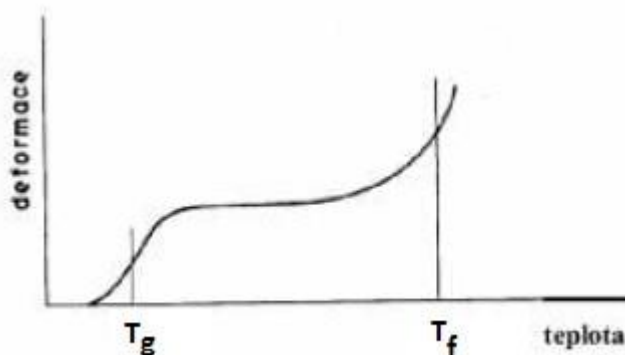
Tak jako u předchozího snímání povrchů drážek, byl u kostky nasnímán povrch. U tohoto případu bylo navíc využito funkce pro detekci drsnosti ve 2D a drsnosti ve 3D. U obou případů drsností byla vyloučena vlnitost povrchu.

První graf představuje pouze naskenování povrchu ve 2D s barevnou odlišitelností znázorňující výšku výstupků, tak jako u drážek. U druhého grafu je znovu využita funkce Leveling, tedy vyrovnání přímosti. Vlnitost v rovině a vlnitost ve 3D jsou vyobrazeny na grafu 23. Hlavně na prostorovém zobrazení vlnitosti je velmi přehledně vidět, jaký tvar má zkoumaná část povrchu. Následující graf 25 znázorňuje drsnost kostky. U obou je však vyloučena vlnitost, pro pouhé znázornění drsnosti. I zde je využito podélných a příčných řezů, aby mohl software vyhodnotit data do přehledných tabulek. Hodnota drsnosti R_a v podélném řezu je $0,4 \mu\text{m}$ a v příčném řezu $R_a = 0,5 \mu\text{m}$.

Povrch v oblasti, kde končí laserový paprsek (lze pozorovat u všech grafů), je velmi hustě osídlen výstupky, které nabývají nejvyšších výškových hodnot. Lze také pozorovat (hlavně u zobrazení povrchů v rovině – 2D), že laserový paprsek v této oblasti jakoby „uhýbá“. To je způsobeno ztrátou energie paprsku, která je využita hlavně na odpaření obráběného materiálu. Tento jev je u obrábění laserovým paprskem (řezáním), ale i vodním paprskem, typický.

12 POSOUZENÍ KVALITATIVNÍCH ZMĚN PO PRŮCHODU LASEROVÉHO SVAZKU MATERIÁLEM

Polymerní materiály jsou za normálních teplot křehké, při větší zátěži a namáhání mohou praskat. Se vzrůstající teplotou se polymery stávají tvárnějšími, elastičtějšími. Vlastnosti těchto materiálů jsou tedy závislé na teplotě. V určitých oblastech teploty probíhají změny rychleji nebo se mohou projevit skokově. Tyto oblasti jsou charakterizovány přechodovými teplotami, jako jsou T_g , což je teplota skelného přechodu, dále T_f , která nám udává teplotu tečení, projevuje se velkým vzrůstem deformace a je nevratná. Jako poslední je T_m – teplota tání.



Obr. 52 – Termomechanická křivka amorfního polymeru

Projev zvýšené teploty působící na polymery může být takový, že začnou měknout a popřípadě může dojít i ke zvýšení kinetické energie makromolekulárního řetězce, až překoná mezimolekulární síly a polymer získá vlastnosti velice blízké vlastnostem kapaliny.

Může také docházet ke změně struktury polymerů, a to tak, že se některé vysokomolekulární látky začnou štěpit na nízkomolekulární produkty. Někdy může docházet až ke štěpení na monomer. To však může probíhat beze změny chemického složení určitého polymeru.

Sklon k této depolymeraci až na monomer a bez změn chemického složení mají i vzorky ze zkoumaného PMMA. K depolymeraci dojde řetězovou reakcí, u které se uvolňuje monomer od konců makromolekulárních řetězců.

V dalších kapitolách se budeme zabývat zkoumáním strukturálních změn po průchodu laserového svazku. Tyto strukturální změny se budou nejspíše projevovat pouze ve velmi malé blízkosti od místa průchodu laserového paprsku. Jednotlivé druhy zkoušek se budou provádět na vzorcích z PMMA s drážkami, které by měly být tepelně ovlivněné průchodem

laserového paprsku, a vzorkem taktéž z PMMA, kterým žádný laserový paprsek neprošel a neměl by tedy být tepelně ovlivněn. Mělo by se dokázat, zda má tento paprsek vliv na změnu struktury po průchodu materiálem, nebo zda bude struktura beze změny.

Za účelem posouzení možných strukturálních změn v materiálu po průchodu laserového svazku byly vybrány následující metody vibrační spektroskopie:

1. FTIR infračervená (spektrometrie) s Fourierovou transformací (Fourier Transform Infra Red).
2. Ramanova spektroskopie
3. Difrakční analýza – Roentgenová difrakce

12.1 Použité měřicí přístroje

Ke zkoumání povrchů vybranými vibračními metodami byly použity následující přístroje.

FTIR – FTIR mikroskop Nicolet iN10



Obr. 53 – mikroskop Nicolet iN10

Tento infračervený mikroskop, který využívá Fourierovskou transformaci, nabízí jednoduchost FTIR spektrometru a je schopný měřit vzorky velikosti několika mikrometrů. FTIR

spektrometru umístěný přímo v mikroskopu umožňuje významné zkrácení optických drah. Pozlacená zrcadla a dokonalé utěsnění vnitřku přístroje optimalizuje výkon mikroskopu.

Ramanův disperzní mikroskop DXR Nicolet



Obr. 54 – mikroskop DXR Nicolet

Je určen pro aplikace, kde je potřeba vysokého prostorového rozlišení, jednoduchost přípravy vzorků a využívá silných stránek Ramanovy spektroskopie. Hlavními výhodami přístroje jsou:

- Autoexpozice a autofokus – jako u digitálních fotoaparátů.
- Prostorové rozlišení 1 μm v osách X, Y, hluboké rozlišení 2 μm v ose Z.
- Pět různých excitačních laserů pro optimální získání spektra složitých vzorků
- Regulace výkonu laseru – neměnný výkon laseru dodávaný na vzorek
- Rychlá kalibrace

Difraktometr PANanalytical – X – ray

Tento rentgenový difraktometr je určený pro získání difrakčních dat v maximální kvalitě. V kombinaci se snadným použitím a flexibilitou nabízí přepínání do různých aplikací. Nároky na vysoké rozlišení difrakčních experimentů vyžaduje vysoce monochromatický paprsek s dobře definovanou vlnovou délkou. Systém PAN analytic – X – ray slouží ke splnění těchto požadavků. Difrakce je získána tím, že se vzorek vystaví rentgenovému záření, které má charakteristickou vlnovou délku.

- Cu X – ray trubice
- Automatická divergence
- Anti-rozptyl
- Přijímací štěrby
- Dvě parabolická zrcadla Goebel
- Paralelní deska kolimátor
- Vysokoteplotní magnetická rezonance s přímým a sálavým vytápěním
- Úplné ovládání přes PC

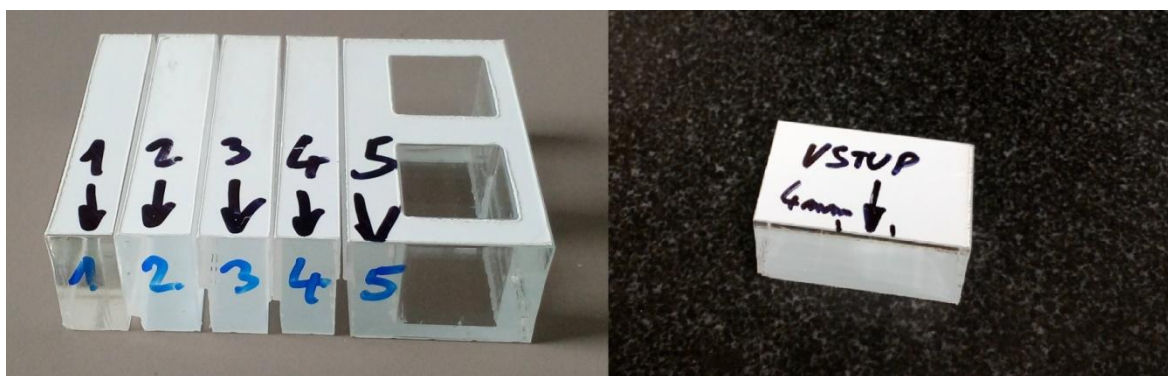


Obr. 55 – Difraktometr PANanalytical – X - ray

12.2 Podmínky měření a popis materiálu

Měření se provádělo v laboratorních podmínkách za teploty 25°C a atmosférického tlaku.

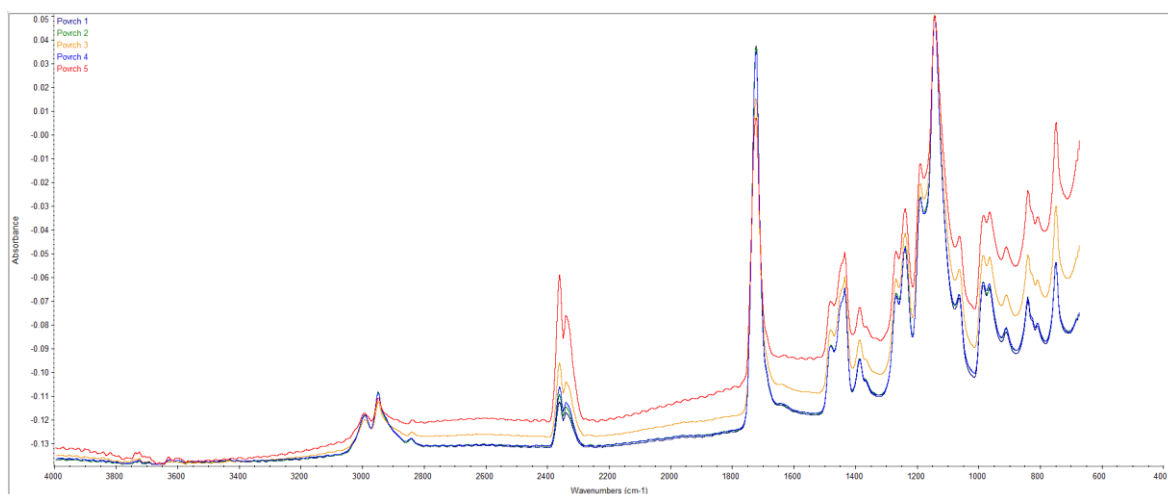
Materiál vzorku byl PMMA, ve kterém byly, za různých technologických podmínek (měnící se výkon a posuvová rychlost), vyřezávány drážky laserem označené číslicemi 1 až 5. Měření se provádělo v jednotlivých řezech a pro porovnání byl zvolen základní materiál, na který žádný laserový svazek nepůsobil.



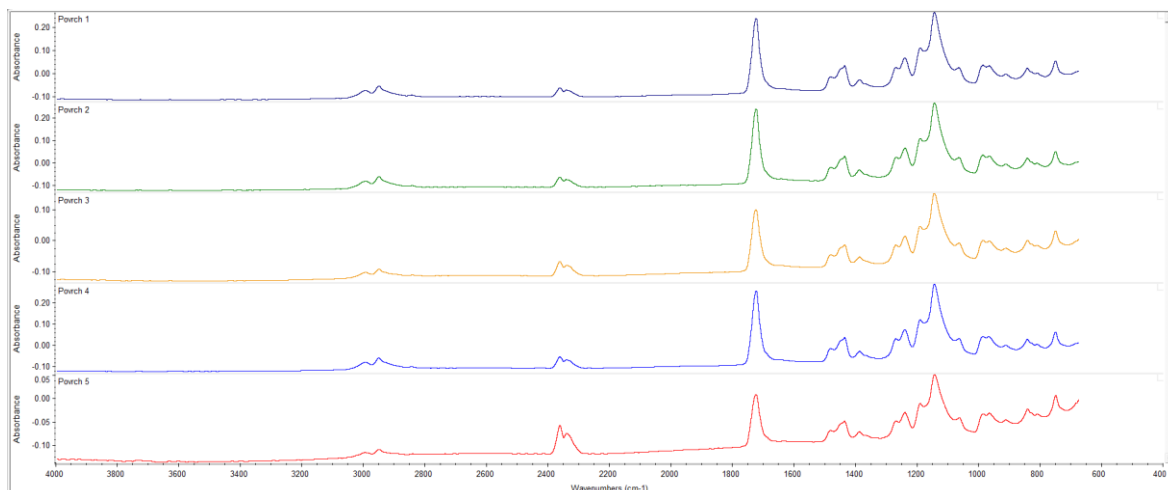
Obr. 56 – zkoumavé vzorky PMMA (vlevo-materiál ovlivněný laserem, vpravo-materiál laserem neovlivněný)

12.3 Zkoumání povrchu pomocí FTIR infračervené spektroskopie

FTIR spektroskopie umožňuje rozlišit molekulovou stavbu látek na základě různé absorpce těchto látek v infračervené oblasti spektra elektromagnetického záření. Pro FTIR byl využit Germaniový krystal ve formě hrotu dotýkajícího se měřeného povrchu s konstantním přitlakem. Snímaná plocha měla velikost 100 μm x 100 μm .



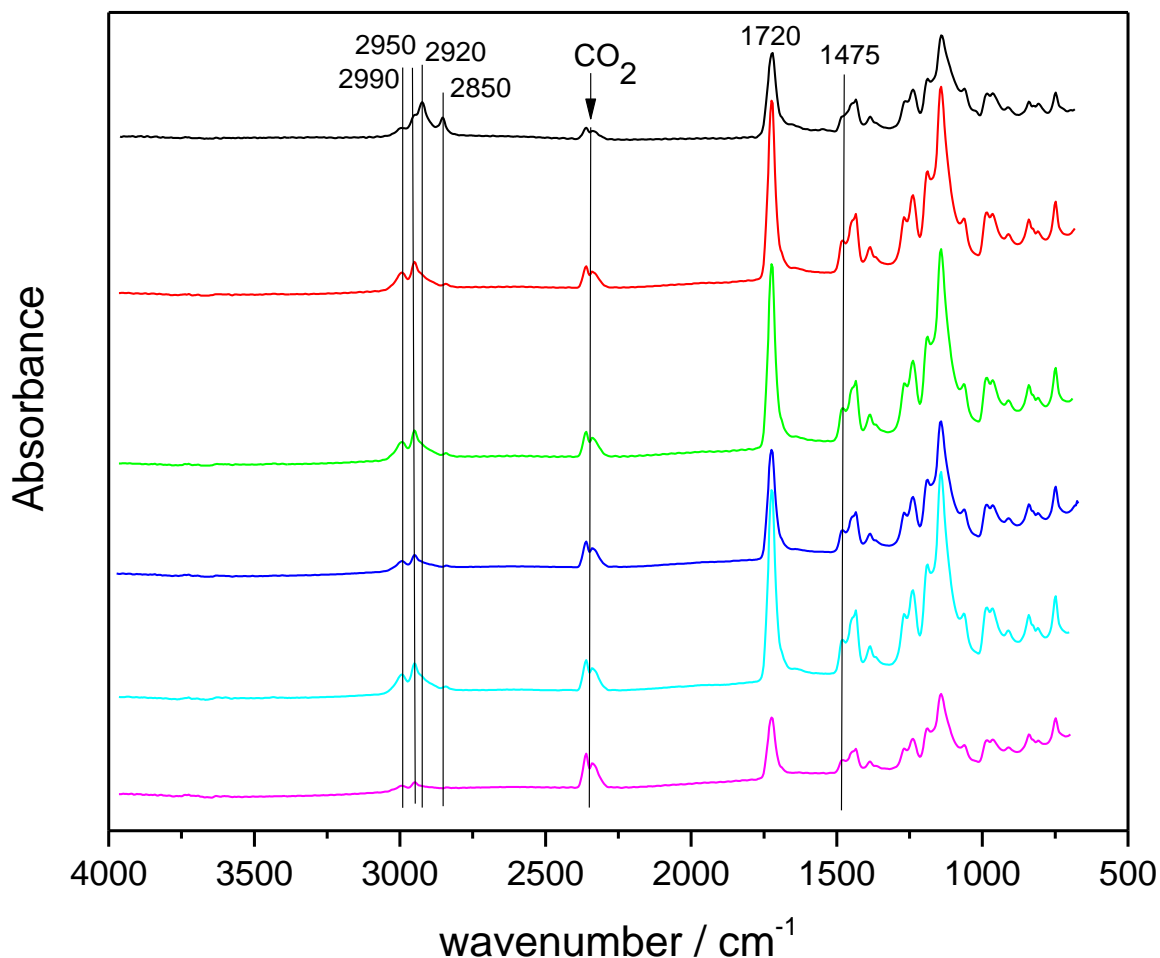
Graf 26 – Kvalitativní srovnání IČ spekter jednotlivých povrchů ozářených laserem



Graf 27 – IČ spektra jednotlivých povrchů ozářených laserem

Vyobrazené křivky mají určitou geometrii. Tato geometrie křivky je charakteristická pro materiál PMMA. Tmavě modrá barva znázorňuje křivku pro drážku 1 (Edge_1), zelená křivka náleží drážce č.2 (Edge_2), oranžová je drážka č.3 (Edge_3), světle modrá patří drážce č.4 (Edge_4) a červená je 5. drážka. Osa X znázorňuje vlnovou délku v jednotkách cm^{-1} , na ose Y se znázorněna absorpce.

Z měření vyplívá, že co se týká kvalitativních změn materiálu na opracovaném povrchu, nebyly tyto změny pomocí FTIR prokázány. Všechny vzorky (drážky 1 až 5) mají stejná infračervená spektra. Z výsledků lze tedy konstatovat, že změny technologických parametrů, tj. změna výkonu a posuvové rychlosti, nemají vliv na molekulovou vazbu ve zkoumaném materiálu.



Graf 28 – Kvalitativní srovnání IČ spekter jednotlivých povrchů ozvaných laserem s povrchem neořezaným

Dále bylo provedeno kvalitativní srovnání IČ spekter povrchů, na které působil laserový paprsek s povrchem neopracovaným (nepůsobil laserový svazek), ten je znázorněn černou barvou.

Ve FTIR spektrech jsou patrné některé výrazné změny na pásích vyznačených svislými přímkami. V oblasti okolo 3000 cm^{-1} lze pozorovat, že u neošetřeného povrchu (černá barva křivky) je nejvyšší intenzita absorpce na vlnočtu 2920 cm^{-1} . Dále je také patrný pás na 2850 cm^{-1} . Tyto pásy jsou spojeny s valenčními vibracemi CH_2 skupin a to jak asymetrickými (2920 cm^{-1}), tak symetrickými (2850 cm^{-1}). Pásky na vlnočtech 2990 cm^{-1} a 2950 cm^{-1} jsou spojeny asymetrickými a symetrickými vibracemi CH_3 skupin. Je vidno, že s ošetřením povrchu se snižuje intenzita pásu 2920 cm^{-1} , až skoro mizí, a dále se projevuje

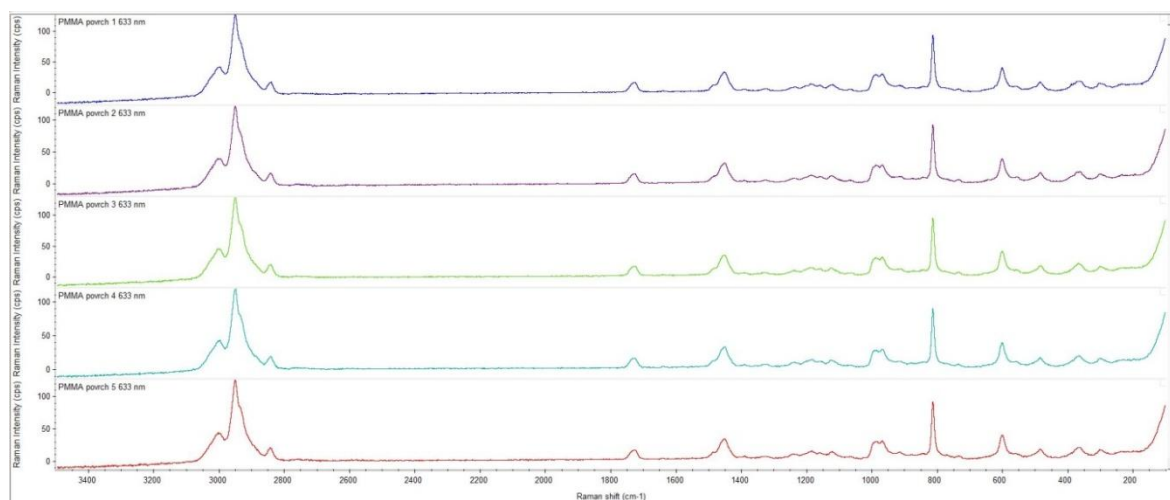
jen jako ramínko pásu 2950 cm^{-1} . Pás 2850 cm^{-1} zaniká s ošetřením povrchu téměř zcela. Tento jev lze přisoudit tomu, že s ošetřením povrchu dojde k degradaci materiálu a krácení řetězců, což se projeví úbytkem CH_2 skupin ve spektru a k nárůstu koncových CH_3 skupin. Další pozorovatelný fenomén je, že na vlnočtu 1475 cm^{-1} , který náleží deformačním vibracím CH_3 skupin, je ve spektru neošetřeného povrchu pouze málo výrazné ramínko. Naпротив tomu, u ošetřených povrchů, se projevuje zcela rozlišený (i když intenzitně malý) pás. To by mohlo potvrzovat úvahu o příbytku CH_3 skupin v materiálu a také možné degradaci $-\text{CH}_2-$ skupin.

Pás 1720 cm^{-1} je typický pro estery, tzn. vazbu $-(\text{CO})-\text{O}-$. Jedná se o valenční vibrace. Dále pak v oblasti okolo 1100 cm^{-1} se nachází pás pro deformační vibrace této vazby.

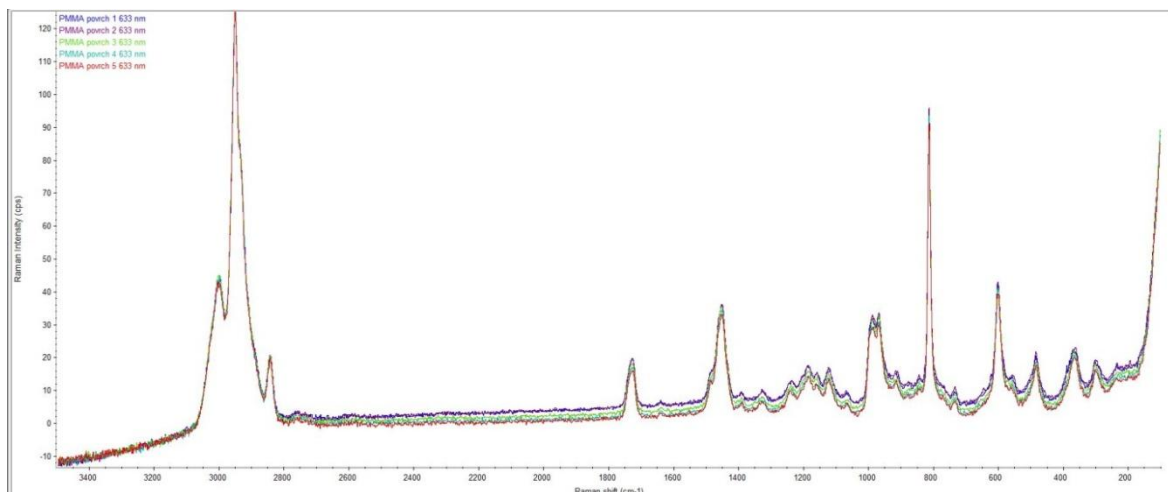
Lze tedy potvrdit, že pomocí vibrační spektroskopie – FTIR spektroskopie byly strukturální změny povrchů, ovlivněných laserem s povrchem neovlivněným, prokázány a tyto změny popsány výše.

12.4 Zkoumání povrchu pomocí Ramanovy spektroskopie

Spektroskopická analýza s využitím Ramanovského rozptylu má schopnost rozlišit molekulární látky na základě odlišné struktury a tím i rozlišné míry neelastického (Ramanova) rozptylu elektromagnetického záření.

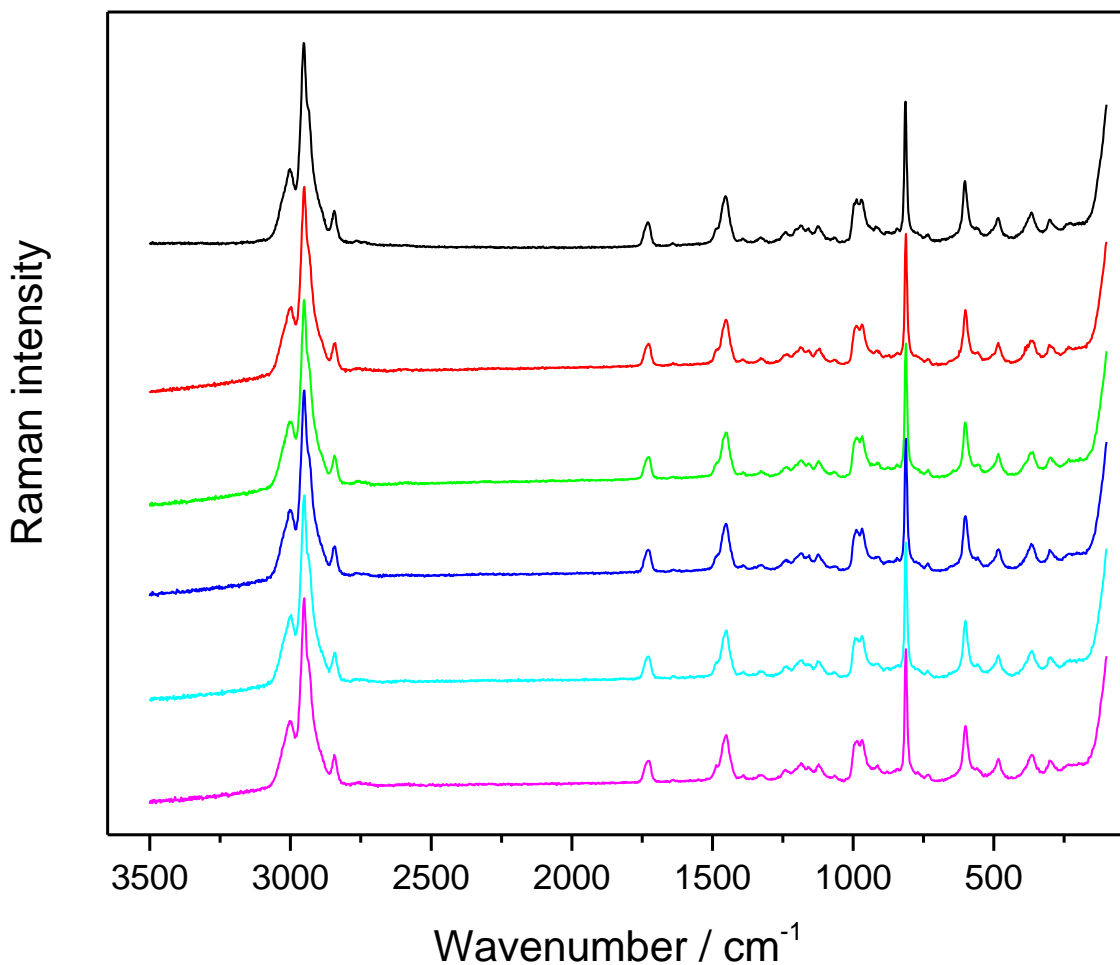


Graf 29 – Ramanská spektra jednotlivých povrchů



Graf 30 – Kvalitativní srovnání Ramanských spekter jednotlivých povrchů

Z měření vyplývá, že co se týká kvalitativních změn materiálu na opracovaném povrchu (působení laserového svazku na materiál), tyto změny nebyly prokázány ani pomocí Ramanské spektroskopie. Z výše uvedených grafů lze pozorovat, že geometrie jednotlivých křivek (každá barva náleží jedné ze zkoumaných drážek) jsou téměř totožné a nejsou zaznamenány žádné větší odchylky, kterým by bylo třeba věnovat větší pozornost a dále je jakkoliv hodnotit. Stejně jako u hodnocení povrchu za pomoci FTIR spektroskopie, tak i u tohoto druhu spektroskopie je tvar zobrazené křivky charakteristický pro zkoumaný materiál PMMA.



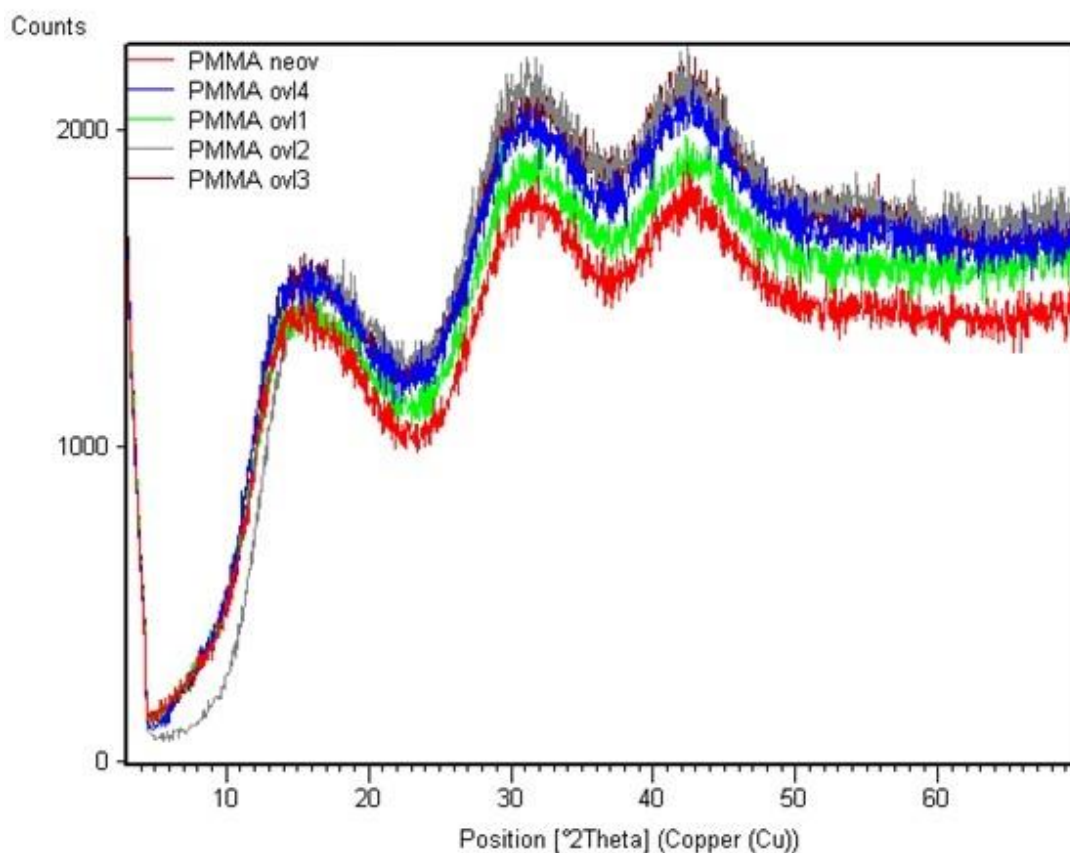
Graf 31 – Kvalitativní srovnání Ramanských spekter jednotlivých povrchů ořezaných laserem s povrchem neořezaným

Co se týká kvalitativních změn v Ramanských spektrech u ošetřeného (ořezaného materiálu pomocí laseru) a neošetřeného (neřezaného) povrchu, který má černou barvu křivky, tyto změny nelze pozorovat. Ramanské spektrum je typické pro PMMA a nevyskytují se zde žádné neobvyklé pásy.

Na vlnočtech okolo 3000 cm⁻¹ jsou opět rozptyly CH₃ a CH₂ skupin. Dva pásy v oblasti 1750 cm⁻¹ 1475 cm⁻¹ náleží rozptylu na vazbě –(CO)-O-.

Lze tedy tvrdit, že pomocí Ramanovy spektroskopie, která nám poskytla uvedené výsledky, nejsou v oblasti, ve které působil laser žádné změny kvality materiálu. Materiál tedy dle této metody zůstal nezměněný a vlastnosti ovlivněného materiálu laserem se shodují s vlastnostmi materiálu, který zůstal bez dalšího opracování.

12.5 Roentgenová difrakční analýza



No.	Visible	Dataset N...	Start pos...	End pos. [...]	Step [°2Th.]	Measured D...	Cluster Number	Crystallinity [%]
1	<input checked="" type="checkbox"/>	PMMA	3.0131	69.9631	0.0260	14.4.2016 12:	0	-1.00
2	<input checked="" type="checkbox"/>	PMMA	3.0131	69.9631	0.0260	14.4.2016 13:	0	-1.00
3	<input checked="" type="checkbox"/>	PMMA	3.0131	69.9631	0.0260	14.4.2016 12:	0	-1.00
4	<input checked="" type="checkbox"/>	PMMA	3.0131	69.9631	0.0260	14.4.2016 13:	0	-1.00
5	<input checked="" type="checkbox"/>	PMMA	3.0131	69.9631	0.0260	14.4.2016 13:	0	-1.00

Graf 32 – Kvalitativní srovnání ovlivněných ploch s neovlivněnou plochou za pomoci Roentgenovy difrakce

U třetího a posledního způsobu zjišťování strukturních změn materiálu bylo využito analýzy Roentgenové difrakce. Jelikož je PMMA materiál amorfní, amorfním zůstal i po působení laserového svazku. Jeho struktura dle této zkoušky zůstala taktéž nezměněná a z grafického znázornění výsledků lze pozorovat, že jednotlivé křivky (každá barva náleží jedné ze čtyř drážek, červená barva je pro materiál neovlivněný) mají téměř shodnou geometrii. Na ose X se vyskytují hodnoty pro úhly natočení senzorů, osa Y pak náleží hodnotám absorpce jednotlivých ploch.

Lze také tvrdit, že při působení laserového svazku nevnikaly spolu s laserem cizí částice. Kdyby se tak stalo a nežádoucí atomy částic by se dostaly mezi atomy zkoumaného materiálu, potom by se tyto změny na grafickém zobrazení projevíly, a to v podobě různých odchylek, které by vybočovaly od standardní geometrie křivky pro PMMA.

ZÁVĚR

Diplomová práce shrnuje poznatky analytického zkoumání materiálových struktur a jejich změn po průchodu laserové paprsku materiálem za využití vibračních metod spektroskopie.

Úvod teoretické části práce byl věnován nekonvenčním metodám obrábění se zaměřením na problematiku laseru, jehož funkce a účel byly využity při tvorbě praktické části diplomové práce. Bylo nastíněno rozdělení laseru, popis jeho funkce a princip. Větší pozornost byla věnována laseru CO₂. Další kapitoly se zabývaly analytickými metodami určené pro zkoumání struktur materiálů. Ze širokého sortimentu nabídek současné doby byly vybrány a popsány tři analytické metody. Těmito vibračními metodami spektroskopie jsou FTIR spektroskopie, Ramanova spektroskopie a Roentgenova difrakční analýza. Poslední část teorie navazovala na polymery, z nichž byly některé vybrány a dále zkoumány v kapitolách praktické části práce.

Experimentální část měla za úkol vybrat tři druhy polymerů a za pomoci vybraných analytických metod zkoumat jejich strukturu po průchodu laserovým svazkem (proudem fotonů). Za tímto účelem byly tedy vybrány polymerní materiály, a to dle dostupnosti materiálových zásob firmy MRB Sazovice s.r.o. Firma disponovala materiály: polypropylen (PP), houževnatý polystyren (HPS) a polymethylmetakrylát (PMMA). Ve výrobních prostorách MRB Sazovice s.r.o. se nachází laserové zařízení EUROLASER, na kterém byly z těchto vybraných materiálů vyrobeny vzorky o tvaru a rozměrech uvedených na výkrese v úvodu praktické části. Již po dokončení laserového pálení vzorků bylo zřejmé (bez žádných dalších zkoušek), že materiály PP a HPS nejspíše nebudou pro další strukturální hodnocení vhodné a byly z dalšího experimentování vyloučeny. Pravděpodobně by mohlo dojít k získání klamavých, neobjektivních či zcela zkreslených výsledků. Zkoumání dále probíhalo pouze na vzorku z PMMA.

Vzorek byl převezen do laboratoří Fakulty technologické na UTB a podroben již zmíněným zkouškám. Nejprve následovalo zpřístupnění vytvořených drážek na vzorku. Některé totiž nebyly průchozí, a tak se muselo využít pásové pily, aby došlo k oddělení a dostupnosti jednotlivých drážek potřebných pro další analýzu. Moderní metody zkoumání zobrazily hloubku vytvořených drážek. Nové systémy snímání povrchu také dokázaly nasbírané výsledky převést do 2D a 3D zobrazení a určit tak parametry výsledné plochy, jako např. drsnost, vlnitost nebo kombinaci těchto dvou povrchových úkazů. Následovalo podrobení

vzorku třem zmíněným analytickým metodám. Spektroskopie Ramanova a FTIR byly provedeny v Centru polymerních systémů Univerzity T. Bati. Pomocí spektroskopie využívající Ramanova rozptylu, která má schopnost rozlišit molekulární látky na základě odlišné struktury, nebyly zjištěny žádné změny struktur jednotlivých drážek ani v porovnání se vzorkem PMMA, který nebyl podroben žádným účinkům laserového záření. Tytéž výsledky přinesla i metoda Roentgenovy difrakční analýzy. Jediné viditelné změny strukturního složení zobrazila až poslední vibrační spektroskopická metoda, a to FTIR spektroskopie. Ta umožňuje rozlišit molekulovou stavbu na základě různé absorpce těchto látek v IČ oblasti spektra elektromagnetického záření. Díky této metodě bylo zjištěno, že na určitých hodnotách vlnových délek docházelo k jistým strukturálním změnám, jako například k degradaci materiálu a krácení řetězců, což se projevovalo úbytkem CH_2 skupin ve spektru a k nárůstu koncových CH_3 skupin. Lze tedy s určitostí tvrdit, že touto vibrační metodou spektroskopie byly strukturální změny zkoumaných povrchů potvrzeny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ [online]. Dostupné na webové stránce: coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=33789&instance=2 [cit. 2016]
- [2] P. ENGST, M. HORÁK. Populární přednášky o fyzice. Aplikace laserů. Nakladatelství technické literatury. Praha, 1989.
- [3] M MORÁVEK. Nekonvenční metody obrábění. Západočeská univerzita vydavatelství. Plzeň, 1999.
- [4] M. VRBOVÁ A KOLEKTIV. Lasery a moderní optika. Odborná encyklopedie. Nakladatelství Prometheus. Praha, 1994.
- [5] SÝKOROVÁ. LBN-přednáška č.6. Presentace PowerPoint. UTB Zlín.
- [6] OPTICKÉ REZONÁTORY. [online]. Dostupné na webové stránce: fyzi-ka.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_10.pdf [cit. 2016].
- [7] BRIMUS, Jan. Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály: diplomová práce. Zlín, 2007.
- [8] MÁCHÁČKOVÁ, KOCICH. Sdílení tepla a proudění: učební text. [online]. Dostupné na webové stránce: www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/STP/STP_FINAL_LAST.pdf, [cit. 2016].
- [9] TERMOMECHANIKA. [online]. Dostupné na webové stránce: http://www.spsko.cz/documents/MEC_kratochvil/TERMOMECHANIKA_INTERNET_DOC/17_Sdileni_tepla_salanim.pdf, [cit. 2016].
- [10] JAK VYBRUJÍ ATOMY V MOLEKULÁCH. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://docplayer.cz/1558467-Jak-vibruji-atomy-v-molekulach.html>, [cit. 2016].
- [11] VYBRAČNÍ FREKVENCE. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://old.vscht.cz/anl/matejka/2012-ACH1-10-spektra-molekuly-vibrace.pdf>, [cit. 2016].

- [12] RAMANOVA SPEKTROSKOPIE. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://www.lao.cz/aplikace-79/mereni-spektralnich-charakteristik-98/ramanova-spektroskopie-216>, [cit. 2016].
- [13] RAMANOVA SPEKTROSKOPIE. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://old.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>, [cit. 2016].
- [14] ANALÝZA A VYUŽITÍ LASERU PŘI OBRÁBĚNÍ. [online]. Dostupné na webové stránce: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18069, [cit. 2016].
- [15] POLYMERY. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>, [cit. 2016].
- [16] VULKANIZACE. [online]. Dostupné na webové stránce: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vulkanizace>, [cit. 2016].
- [17] ROZDĚLENÍ PLASTŮ A PROMYSLOVÉ ZPRACOVÁNÍ. [online]. Dostupné na webové stránce: <http://ucivozs.sweb.cz/plast2.html>, [cit. 2016].
- [18] V.S. LETOCHOV, N.D. USTINOV. *Výkonné lasery a ich využitie*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, [24.10.2015]. Bratislava, 1982.
- [19] OŠŤÁDAL, Luboš. Výzkum laserového mikro-obrábění polymerních materiálů: diplomová práce. Zlín 2010.
- [20] L. LAPČÍK, M. RAAB. *Nauka o materiálech II*. Učební texty vysokých škol, UTB – Academia centrum Zlín. UTB, 2004.
- [21] APLIKACE ANALYTICKÝCH METOD VYUŽÍVAJÍCÍ RTG ZÁŘENÍ. [online]. Dostupné na webové stránce: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=48969, [cit. 2016].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PMMA	Polymethylmetakrylát
PP	Polypropylen
HPS	Houževnatý polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
RTG	Radioizotopový termoelektrický generátor
UV	Ultrafialové záření (Ultra Violet)
E_2	Energetická hladina (vyšší)
E_1	Energetická hladina (nižší)
E	Kvantum světelného záření [J]
h	Planckova konstanta, $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ [J.s]
f	Frekvence [Hz]
z_1	zrcadlo
z_2	zrcadlo
L	délka [mm]
NdYAG	Neodym Yttrium Alluminium Granat
CO_2	Oxid uhličitý
CO	Oxid uhelnatý
KBr	Bromid draselný
NaCl	Chlorid sodný
He	Helium
N_2	Dusík
O_2	Kyslík
λ	Součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
ΔE	Rozdíl energií dopadajícího a rozptýleného fotonu [J]
$h_{\nu r}$	Energie rozptýleného fotonu [J]

$h\nu_0$	Energie dopadajícího fotonu [J]
I	Intenzita světelného paprsku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]
T_g	Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Teplota tečení [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
IČ	Infračervený
CLA	Chromatic Length Aberration
FTIR	Fourier Transform Infra Red

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Rozdělení laserů podle využívaného fyz. principu.....</i>	14
<i>Obr. 2 – Spontánní emise.....</i>	17
<i>Obr. 3 – Stimulovaná emise.....</i>	18
<i>Obr. 4 – Absorpce.....</i>	18
<i>Obr. 5 – Planetový model.....</i>	19
<i>Obr. 6 – Schéma laserového zařízení.....</i>	20
<i>Obr. 7 – Optický rezonátor.....</i>	20
<i>Obr. 8 – Rezonátor.....</i>	21
<i>Obr. 9 – Druhy světel.....</i>	22
<i>Obr. 10 – Vlnové délky pro jednotlivé typy laserů.....</i>	23
<i>Obr. 11 – Soustava laser – materiál.....</i>	24
<i>Obr. 12 – Schéma principu zařízení pro řezání laserem.....</i>	27
<i>Obr. 13 – Schéma CO₂ laseru.....</i>	29
<i>Obr. 14 – Typy oscilátorů pro CO₂ laser (a-axiální, b-ortogonální dvoj osový, c-ortogonální troj osový).....</i>	30
<i>Obr. 15 – Oscilátor.....</i>	32
<i>Obr. 16 – Molekula vody.....</i>	33
<i>Obr. 17 – Princip infračerveného spektroskopu.....</i>	35
<i>Obr. 18 – Schéma Ramanovy spektroskopie.....</i>	37
<i>Obr. 19 – Kyveta.....</i>	38
<i>Obr. 20 – Difrakce Rentgenového záření na krystalu.....</i>	39
<i>Obr. 21 – Interakce světelného paprsku s materiálem.....</i>	40
<i>Obr. 22 – Drsnosti povrchu a odraz.....</i>	41
<i>Obr. 23 – Rozdělení polymerů.....</i>	43
<i>Obr. 24 – Kaučukovník.....</i>	44
<i>Obr. 25 – Výrobky ze syntetického kaučuku.....</i>	45
<i>Obr. 26 – Lisování.....</i>	47
<i>Obr. 27 – Válcování.....</i>	48
<i>Obr. 28 – Vytlačování.....</i>	48
<i>Obr. 29 – Vyfukování.....</i>	49
<i>Obr. 30 – Výkres vzorku.....</i>	53
<i>Obr. 31 – Vzorec PMMA.....</i>	54

<i>Obr. 32 – Fotografie vzorku z PMMA</i>	56
<i>Obr. 33 – Vzorec PP</i>	56
<i>Obr. 34 – Fotografie vzorku z PP</i>	57
<i>Obr. 35 – Vzorec PS</i>	58
<i>Obr. 36 – Fotografie vzorku z PS</i>	58
<i>Obr. 37 – EUROLASER LCS XL-1600</i>	59
<i>Obr. 38 – Eurolaser ve firmě MRB Sazovice s.r.o.</i>	59
<i>Obr. 39 – Talisurf CLI 500</i>	61
<i>Obr. 40 – Fotografie z procesu řezání laserem u PMMA</i>	63
<i>Obr. 41 – Fotografie vzorku z PMMA po řezání laserem</i>	64
<i>Obr. 42 – Fotografie z procesu řezání laserem u PP</i>	65
<i>Obr. 43 – Fotografie vzorku z PP po řezání laserem</i>	65
<i>Obr. 44 – Fotografie z procesu řezání laserem HPS</i>	67
<i>Obr. 45 – Fotografie vzorku z HPS po řezání laserem</i>	67
<i>Obr. 46 – Vzorek PMMA po rozřezání pásovou pilou</i>	69
<i>Obr. 47 – Fotografie rozdělení vzorku PMMA na jednotlivé drážky</i>	70
<i>Obr. 48 – Fotografie zkoumané kostky z PMMA</i>	70
<i>Obr. 49 – Schéma snímání konfokální sondou</i>	74
<i>Obr. 50 – Pracovní prostředí programu Talymap</i>	75
<i>Obr. 51 – Drsnost R_a a R_z</i>	76
<i>Obr. 52 – Termomechanická křivka amorfního polymeru</i>	90
<i>Obr. 53 – mikroskop Nicolet iN10</i>	91
<i>Obr. 54 – mikroskop DXR Nicolet</i>	92
<i>Obr. 55 – Difraktometr PANalytical – X - ray</i>	93
<i>Obr. 56 – zkoumané vzorky PMMA (vlevo-materiál ovlivněný laserem, vpravo- materiál laserem neovlivněný)</i>	94

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Srovnání vybraných druhů obrábění</i>	15
<i>Tab. 2 – Názvosloví polymerů.....</i>	46
<i>Tab. 3 – Přepočet hodnot výkonu</i>	62
<i>Tab. 4 – Vstupné parametry stroje u PMMA</i>	63
<i>Tab. 5 – Vstupní parametry u PP</i>	64
<i>Tab. 6 – Vstupní parametry u HPS</i>	66

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 - Závislost hustoty energie na době vzájemného působení</i>	25
<i>Graf 2 - Křivky potencionální energie</i>	33
<i>Graf 3 – Hustota výkonu</i>	41
<i>Graf 4 - Celosvětová objemová produkce oceli a plastu za rok 1950 až 2000.....</i>	49
<i>Graf 5 - Světová spotřeba plastu ve vybraných odvětvích za rok 2003</i>	50
<i>Graf 6 – Scan Edge_1</i>	71
<i>Graf 7 – Scan Edge_2</i>	71
<i>Graf 8 – Scan Edge_3</i>	72
<i>Graf 9 – Scan Edge_4</i>	72
<i>Graf 10 – Leveling Edge_1</i>	77
<i>Graf 11 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_1</i>	77
<i>Graf 12 – Drsnost Edge_1 v podélném a příčném řezu.....</i>	78
<i>Graf 13 – Leveling Edge_2</i>	79
<i>Graf 14 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_2</i>	79
<i>Graf 15 – Drsnost Edge_2 v podélném a příčném řezu.....</i>	80
<i>Graf 16 – Leveling Edge_3</i>	81
<i>Graf 17 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_3</i>	81
<i>Graf 18 – Drsnost Edge_3 v podélném a příčném řezu.....</i>	82
<i>Graf 19 – Leveling Edge_4</i>	83
<i>Graf 20 – 3D drsnosti+vlnitosti Edge_4</i>	83
<i>Graf 21 – Drsnost Edge_4 v podélném a příčném řezu.....</i>	84
<i>Graf 22 – Scan povrchu, Leveling, 3D drsnost a vlnitost.....</i>	86
<i>Graf 23 – Vlnitost 2D, Drsnost 2D, Vlnitost 3D.....</i>	87
<i>Graf 24 – Drsnost 3D</i>	87
<i>Graf 25 – Drsnost kostky v podélném a příčném řezu</i>	88
<i>Graf 26 – Kvalitativní srovnání IČ spekter jednotlivých povrchů ozářených laserem.....</i>	94
<i>Graf 27 – IČ spektra jednotlivých povrchů ozářených laserem</i>	95
<i>Graf 28 – Kvalitativní srovnání IČ spekter jednotlivých povrchů ozvaných laserem s povrchem neořezaným</i>	96
<i>Graf 29 – Ramanská spektra jednotlivých povrchů.....</i>	97
<i>Graf 30 – Kvalitativní srovnání Ramanských spekter jednotlivých povrchů.....</i>	98

<i>Graf 31 – Kvalitativní srovnání Ramanských spekter jednotlivých povrchů ořezaných laserem s povrchem neořezaným.....</i>	<i>99</i>
<i>Graf 32 – Kvalitativní srovnání ovlivněných ploch s neovlivněnou plochou za pomoci Roentgenovy difrakce</i>	<i>100</i>

SEZNAM PŘÍLOH