

Posouzení možných strukturálních změn u vybraných polymerních materiálů po ozáření laserovým paprskem

Bc. Michal Kratochvíl

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal Kratochvíl**
Osobní číslo: **T19502**
Studijní program: **N0788A270002 Výrobní inženýrství**
Studijní obor: **Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Posouzení možných strukturálních změn u vybraných polymerních materiálů po ozáření laserovým paprskem**

Zásady pro vypracování

Vypracování literární studie na dané téma
Výroba vzorků z polymerních materiálů
Posouzení možných strukturálních změn pomocí laboratorních zkoušek
Vyhodnocení a porovnání získaných dat

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

Seznam doporučené literatury:

MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-709-9430-4.

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

MLEZIVA, Josef; ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery ? výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles 2000. ISBN 80-85920-72-7

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Knedlová, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 1. 5. 2021

Jméno a příjmení studenta: Bc. Michal Kratochvíl

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Konvenční způsoby dělení materiálu z důvodu jejich omezení jen na přímé řezy, byly ve velké míře nahrazeny nekonvenčními způsoby řezání, mezi které patří řezání laserem, plazmou, vodním paprskem nebo elektroerozivní drátové řezání. Prioritou zpracovatelského průmyslu se stalo laserové řezání polymerních materiálů, a to zejména kvůli neustále rostoucí poptávce po těchto materiálech. Práce je zaměřená na řezání polyamidu 6, polyoxymethylenu, polypropylenu, polystyrenu, polykarbonátu a polymethylmethakrylátu CO₂ laserem ILS 3 - NM při konstantním výkonu a měnících se řezných rychlostech. Během procesu laserového řezání dochází k tepelnému ovlivnění vzorků z důvodu soustředění vysoké tepelné energie do místa řezu. Strukturu polymerních materiálů ovlivňují podstatně nižší teploty, než je tomu například u ocelí, proto bylo na zhotovených vzorcích následně zkoumáno ovlivnění jejich struktury v důsledku ozáření laserovým paprskem, především vznik tepelně ovlivněné zóny.

Klíčová slova: CO₂ laserové zařízení ILS 3 – NM, laserové řezání, řezná rychlost, polymerní materiály, polymerní struktura, FTIR, DSC.

ABSTRACT

Conventional methods of cutting material, due to their limitation to straight cuts, have been largely replaced by unconventional cutting methods, which include laser, plasma, water jet or electroerosive wire cutting. Laser cutting of polymeric materials has become a priority for the manufacturing industry, mainly due to the ever-increasing demand for these materials. The work is focused on cutting polyamide 6, polyoxymethylene, polypropylene, polystyrene, polycarbonate and polymethyl methacrylate with CO₂ laser ILS 3 - NM at constant power and changing cutting speeds. During the laser cutting process, the samples are thermally affected due to the concentration of high thermal energy in the cutting point. The structure of polymeric materials is affected by significantly lower temperatures than, for example steels, so the influencing of their structure due to irradiation with a laser beam, especially the formation of a heat-affected zone, was subsequently investigated on the prepared samples.

Keywords: CO₂ laser machine ILS 3 – NM, laser cutting, cutting speed, polymeric materials, polymer structure, FTIR, DSC.

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce paní Ing. Janě Knedlové, Ph.D. za cenné rady, připomínky, ochotu a vstřícnost při vypracovávání celé mé diplomové práce. Další velké díky patří také paní doc. Ing. Martině Hřibové, Ph.D. a paní doc. Ing. Aleně Kalendové, Ph.D. za odbornou pomoc a rady při vyhodnocování výsledků měření. Chtěl bych poděkovat také panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pomoc s měřeními drsnosti vzorků. Na závěr bych chtěl poděkovat celé mé rodině a přítelkyni, kteří mě v mém studiu plně podporují.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ	12
1.1 KLASIFIKACE NEKONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ	12
1.1.1 Obrobitelnost materiálů.....	12
1.1.2 Komplexnost tvarovosti součástí	13
1.1.3 Automatizace výroby	13
1.1.4 Integrita povrchu s vysokou přesností.....	13
1.1.5 Miniaturizace dílců.....	13
1.2 ROZDÍL MEZI NEKONVENČNÍMI A KONVENČNÍMI METODAMI OBRÁBĚNÍ.....	14
1.3 ROZDĚLENÍ NEKONVENČNÍCH METOD OBRÁBĚNÍ	15
1.4 NEKONVENČNÍ METODY DĚLENÍ MATERIÁLŮ	15
1.4.1 Dělení materiálu laserem.....	16
1.4.2 Dělení materiálu plazmou	16
1.4.3 Dělení materiálu vodním paprskem	17
1.4.4 Elektroerozivní drátové dělení materiálu	18
1.5 SROVNÁNÍ NEKONVENČNÍCH METOD DĚLENÍ MATERIÁLŮ	19
2 LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ	21
2.1 BUZENÍ LASEROVÉHO PAPRSKU	21
2.2 VLASTNOSTI LASEROVÉHO PAPRSKU	23
2.3 ZÁKLADNÍ SOUČÁSTI LASERU.....	27
2.4 ROZDĚLENÍ LASERŮ	30
2.4.1 CO ₂ lasery	32
2.5 OBLASTI POUŽITÍ LASERŮ	35
2.5.1 Řezání polymerních materiálů laserem.....	35
3 POLYMERNÍ MATERIÁLY	38
3.1 FÁZOVÉ STAVY POLYMERŮ	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	43
4 CÍLE PRÁCE	44
5 VYBRANÉ TYPY POLYMERŮ	45
5.1 POLYAMID 6 (PA6) – NOVAMID B30 P	45
5.2 POLYOXYMETHYLEN (POM) – DELRIN 107 NC010	45
5.3 POLYPROPYLEN (PP) – TATREN IM 12 59	46
5.4 POLYKARBONÁT (PC) – LEXAN 923	46
5.5 POLYSTYREN (PS) – STYRON 495.....	47
5.6 POLYMETHYLMETHAKRYLÁT (PMMA)	47

6	PŘÍPRAVA VZORKŮ	49
6.1	VSTŘIKOVÁNÍ VZORKŮ.....	49
6.2	LASEROVÉ ŘEZÁNÍ VZORKŮ	51
7	MĚŘENÍ INFRAČERVENÉ SPEKTROSKOPIE (FTIR)	54
7.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ PA6.....	56
7.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ POM	57
7.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ PP.....	59
7.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ PC	61
7.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ PS.....	63
7.6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ FTIR VZORKŮ PMMA.....	65
8	MĚŘENÍ DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC)	67
8.1	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ PA6.....	70
8.2	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ POM	70
8.3	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ PP	71
8.4	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ PC	73
8.5	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ PS	74
8.6	VÝSLEDKY DSC ANALÝZY VZORKŮ PMMA.....	75
9	MĚŘENÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY	78
9.1	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ PA6.....	80
9.2	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ POM	81
9.3	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ PP	81
9.4	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ PC	84
9.5	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ PS	85
9.6	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA VZORKŮ PMMA.....	86
10	MĚŘENÍ PLOŠNÉ DRSNOSTI POVRCHU ŘEZU VZORKŮ	88
10.1	NAMĚŘENÉ PARAMETRY PLOŠNÉ DRSNOSTI ZKOUMANÝCH VZORKŮ.....	90
11	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	93
11.1	VYHODNOCENÍ KRYSTALINITY VZORKŮ	93
11.2	VYHODNOCENÍ TEPLŮT TÁNÍ SEMIKRYSTALICKÝCH VZORKŮ	95
11.3	VYHODNOCENÍ TEPLŮT SKELNÉHO PŘECHODU AMORFNÍCH VZORKŮ	96
11.4	VYHODNOCENÍ PLOŠNÉ DRSNOSTI.....	97
	ZÁVĚR	99
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	106
	SEZNAM OBRÁZKŮ	108

SEZNAM TABULEK.....	110
SEZNAM PŘÍLOH.....	111

ÚVOD

Dělení materiálů pomocí nekonvenčních technologií, jako je řezání laserem, plazmou, vodním paprskem nebo elektroerozivní drátové řezání, zaznamenaly v poslední době velký rozmach. Využití laserů se stalo prioritou zpracovatelského průmyslu. Velký zájem o tyto technologie je způsobený především jejich vysokou přesností a efektivitou celého řezného procesu. Konvenční způsoby řezání materiálů jsou známe už řadu let, avšak jejich použití má určitá omezení, především to, že umožňují pouze příčné řezy. Z toho vyplývá větší množství odpadu a tím i vyšší výrobní náklady. Oproti tomu nekonvenční způsoby dělení materiálů umožňují řezání složitých 2 D i 3 D profilů, nejsou potřebné žádné dodatečné úpravy a umožňují plnou automatizaci řezných procesů. Tyto technologie jsou v dnešní době využívány v celé řadě aplikací.

V dnešní době existuje již mnoho významných prací, které se zabývají laserovým řezáním kovů, jejich slitin a kompozitů. V poslední době se však dosahuje významného průlomu v oblasti laserového řezání polymerních materiálů, protože stále roste poptávka po těchto materiálech z důvodu jejich snadného zpracovávání a také z důvodu jejich nízké ceny. Tuto problematiku je však nutno více zkoumat, poněvadž se zatím nedosahuje příliš vysoké účinnosti řezání těchto materiálů.

Práce se zabývá ovlivněním struktury polymerních materiálů, konkrétně polyamidu 6, polyoxymethylenu, polypropylenu, polykarbonátu, polystyrenu a polymethylmethakrylátu, po procesu řezání CO₂ laserem ILS 3 – NM. Po procesu řezání nás nejvíce zajímá vznik tepelně ovlivněné zóny, která vykazuje největší strukturní změny po ozáření laserovým paprskem. Strukturu polymerních materiálů ovlivňují podstatně nižší teploty, než je tomu například u ocelí. Tepelné ovlivnění vzniká v důsledku působení vysoké tepelné energie laserového paprsku v místě řezu. Tepelně ovlivněná zóna zhoršuje fyzikální i mechanické vlastnosti výrobků, proto je žádoucí, aby při zpracování materiálů docházelo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění. Každý ze zkoumaných polymerních materiálů má jiné vlastnosti, proto se u každého z nich projevuje jiná změna ve struktuře a jinak velká tepelně ovlivněná oblast. Z tohoto důvodu se práce zaměřuje na vznik tepelně ovlivněných oblastí a na změny ve strukturách u vybraných typů polymerů v závislosti na procesních parametrech laserového zařízení, především řezné rychlosti, která určuje, jak dlouho je výrobek vystaven teplotnímu působení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ

Konvenční technologie obrábění jsou využívány ke zpracování široké škály materiálů. Složité profily součástí je však těmito procesy obtížné vyrobit a také nastávají určitá omezení při zpracování těžce obrobitelných materiálů. Proto se používají nekonvenční technologie obrábění, pomocí kterých lze obrábět i složité profily součástí, a to i v obtížně obrobitelných materiálech. Nekonvenčními metodami je možné dosáhnout přesného a jemného obrábění materiálů. [1]

1.1 Klasifikace nekonvenčních technologií

Nekonvenční technologie jsou způsoby obrábění, kdy se v převážné většině k úběru materiálu nepoužívá mechanická práce, tak jako je tomu u konvenčních způsobů obrábění. K úběru materiálu dochází vlivem tepelných, chemických, elektrických, abrazivních, ultrazvukových jevů nebo jejich vzájemnou kombinací bez silového působení na materiál a bez vzniku třísky.

V případě nekonvenčních technologií není obrobitelnost materiálu ovlivňována mechanickými vlastnostmi, jako je tvrdost a pevnost, ale je ovlivněna především fyzikálními vlastnostmi. Mezi fyzikální vlastnosti nejvíce ovlivňující obrobitelnost materiálu patří tepelná a elektrická vodivost, teplota tavení, chemické složení a elektroerozivní odolnost. [2]

Nekonvenční technologie v současnosti představují běžný způsob opracování materiálů nebo variantní řešení konvenčních technologií opracování a tvarování. Jejich použití zahrnuje množství výhod. Mezi tyto výhody patří především obrobitelnost materiálů, tvarová komplexnost součástí, jednoduchá automatizace výroby, integrita povrchu s vysokou přesností a miniaturizace dílců. [3]

1.1.1 Obrobitelnost materiálů

V oblasti nekonvenčních technologií se vytrácí charakteristický pojem pro řezání a broušení materiálů, který je založený na mechanických vlastnostech materiálů jako je pevnost, houževnatost, tvrdost. V této oblasti nepředstavují mechanické vlastnosti materiálů omezení z hlediska obrobitelnosti. U těchto technologií hrají důležitou roli vlastnosti jako je tepelná a elektrická vodivost, teplota tavení, atomové číslo a lomové vlastnosti. [3]

1.1.2 Komplexnost tvarovosti součástí

Nové procesy obrábění materiálů jsou nutné kvůli zvyšujícím se požadavkům na složitost tvarů vybraných dílců. Při použití konvenční technologie vrtání je jednoduché vyrobit kruhovou díru, ovšem při požadavku na díru čtvercovou vzniká problém z důvodu neexistujícího konvenčního nástroje, kterým by bylo možné vytvořit takovou díru, ale pro elektrojiskrové a elektrochemické obrábění to problém není. Také tvarování drážek a otvorů do dílců o tloušťce několik mikrometrů je mnohem snazší při použití technologie chemického nebo fotochemického obrábění. [3]

1.1.3 Automatizace výroby

Automatizace výrobního systému se zavádí především kvůli snížení výrobních časů, výrobních nákladů, zásob apod. Toho se s výhodou využívá při zavádění NC a CNC strojů a využívání CAD / CAM systémů ve výrobě. Z pohledu řízení procesů je jednodušší zavádění nekonvenčních technologií do automatizovaných výrobních systémů než zavádění konvenčních technologií. Příkladem takového řízení jsou NC a CNC stroje pro elektrojiskrové obrábění a pro řízení pohybu dýzy vodního paprsku, CNC laserové zařízení a automatické řízení procesů iontového a elektronového paprsku. [3]

1.1.4 Integrita povrchu s vysokou přesností

Užitkové vlastnosti konvenčně řezaných nebo broušených povrchů mohou být nepříznivě ovlivněny zbytkovým napětím, zpevněním, chvěním a výraznými mikronerovnostmi. Proto se používají pro dosažení požadovaných povrchů s požadovanými vlastnostmi nekonvenční technologie obrábění, kdy dochází k vytvoření vysoké přesnosti u dokončených povrchů. V oblasti atomárních a molekulárních vrstev dokážou zabezpečit iontové a elektronové procesy odpařování a rozprašování ve vakuu vysokou přesnost úběru. [3]

1.1.5 Miniaturizace dílců

Moderní trendy mající za následek zmenšování rozměrů dílců vyžadují zavádění nových procesů obrábění, které umožňují nano úběr, a dokonce i úběr několika molekulárních nebo atomárních vrstev. Například vrtání děr ultra malého průměru 10 až 100 μm je téměř nemožné vrtat běžnými technologiemi. Tento problém lze snadno vyřešit použitím technologie mikrochemického obrábění nebo technologie obrábění svazkem elektronů a iontů. Právě proto se mikroobrábění stalo významným zdrojem vybraných oblastí průmyslové výroby. [3]

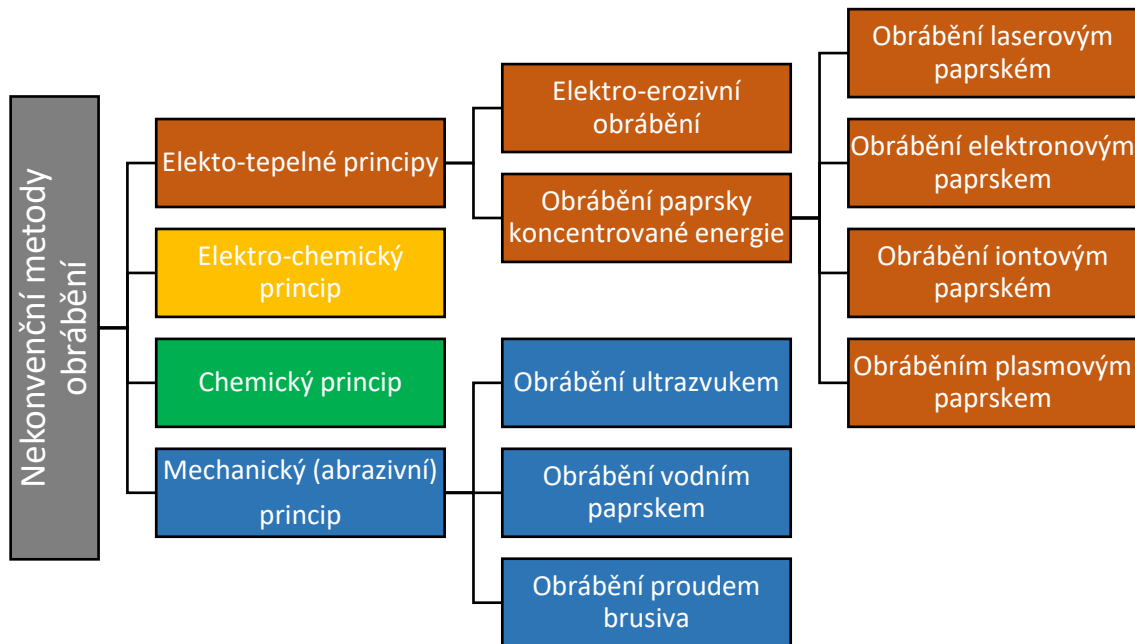
1.2 Rozdíl mezi nekonvenčními a konvenčními metodami obrábění

Rozdíly mezi nekonvenčními a konvenčními metodami obrábění je možné shrnout následovně:

- vlastnosti materiálu jako je tvrdost, houževnatost nebo pevnost nemají v případě použití nekonvenční technologie vliv na úběr materiálu, proto se zde vytrácí pojem obrobitelnost, který je klasický pro konvenční obrábění, jako je řezání nebo broušení
- při použití nekonvenční technologie se obrobky vlivem mechanického zatížení vyplývajícího z technologického procesu nedeformují, jelikož v průběhu procesu obrábění nepůsobí řezná síla, a nevzniká tedy řezný odpor
- vlivem oddělování mikro-rozměrových částic, ke kterému dochází na velkém množství míst a vlivem vysoké frekvence elementárních úběrů při nekonvenčním obrábění dochází k menšímu přestupu tepla z místa úběru materiálu do obrobku
- využití nekonvenční technologie umožňuje opracovávat celý povrch obrobku najednou
- velikost obrobku je při nekonvenčním obrábění limitována energetickou základnou zařízení
- nekonvenční technologie umožňují mikroobrábění a dosažení rozměrů v řádech 10^{-9} mm
- klasické, konvenční, procesy obrábění vykazují menší spotřebu energie při úběru materiálu a vyšší poměrný úběr [3]

1.3 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění

Nekonvenční metody obrábění lze rozdělit dle fyzikálních účinků, které využívají pro úběr materiálu. Na obr. 1.1 je uvedeno rozdělení těchto technologií na základě využívaného principu nebo způsobu využití energie.



Obr. 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění na základě fyzikálního principu dle [2].

Elektrotepelné principy obrábění využívají pro řízené odtavování materiálu převážně teplo. Elektrochemické obrábění kovů pracuje na principu galvanických procesů, a to na intenzivní elektrolýze. Elektrochemické a elektroerozivní obrábění řadíme s ohledem na přímé působení elektrického proudu pro úběr materiálu pod společný název elektrické metody obrábění. Chemický princip obrábění je založený na přímém využití chemických reakcí pro obrábění. Stimulace abrazivních nebo erozivních účinků vhodných látek, jako je brusivo a kapalina, je využívána pro mechanické metody obrábění. [2]

1.4 Nekonvenční metody dělení materiálů

Z hlediska dělení materiálů mají největší využití metody, které využívají mechanické a tepelné principy, mezi tyto metody lze zařadit řezání materiálů laserem, plazmou, vodním paprskem s abrazivem nebo bez abraziva a řezání drátovou elektrodou. Volba technologie pro dělení materiálu závisí na druhu materiálu a na použitých procesních podmínkách. Procesní podmínky je možné optimalizovat buď na základě zkušeností obsluhy, nebo pomocí speciálních výpočetních programů, které dokážou určit vhodnost materiálů pro danou technologii včetně optimalizačních podmínek procesu řezání. [4][5]

Vlastnosti děleného materiálu, zejména v okolí místa řezu, ovlivňují doprovodné jevy, které je nutné zohlednit kvůli následujícím pracovním operacím. Tyto jevy se vyskytují především v případě použití vysoce výkonných tepelných zdrojů, jako je laser nebo plazma. [5][6][7]

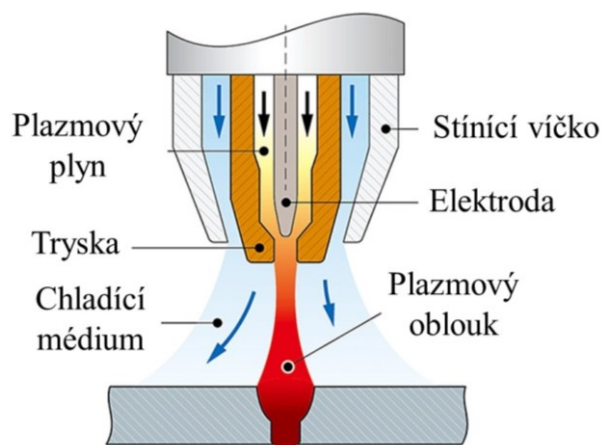
1.4.1 Dělení materiálu laserem

Řezání materiálu laserem spočívá v zesílení světla pomocí stimulované emise záření. Za laser se tedy považuje kvantově elektrický zesilovač a generátor světelných vln. Energie ve formě elektronového záření, iontového záření nebo elektromagnetického vlnění excituje atomy plynné, kapalně nebo tuhé aktivní látky, ve které dojde k vyvolání inverzního stavu. Atomy této látky vytvoří stimulovanou emisí přechodem do základního stavu monochromatické (o jedné vlnové délce) koherentní (vzájemně související světelné paprsky společného původu v jediném zdroji) záření, které je jednoduše ovládáno pomocí optických čoček a zrcadel. Laserový paprsek pak při dopadu na povrch obrobku přemění svoji energii na tepelnou. [2][3]

Princip laserového zařízení, jejich dělení a způsoby řezání materiálů jsou podrobně vysvětleny v kapitole 2.

1.4.2 Dělení materiálu plazmou

Pojem plazma znamená speciální stav plynů, který je často označován jako čtvrtý stav hmoty. Plazmatického stavu lze obecně dosáhnout několika způsoby – elektrickým výbojem, zvýšením teploty nebo zvýšením tlaku. Pro dosažení plazmatického stavu je v technické praxi nejvíce využíváno elektrického výboje. Princip řezání plazmovým paprskem je zobrazen na obr. 1.2. [8][9]



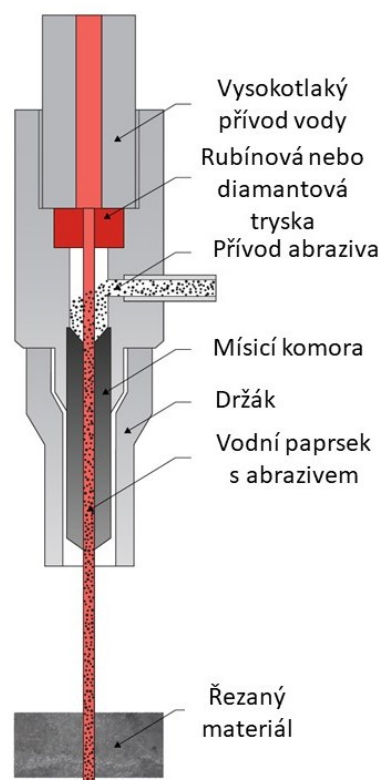
Obr. 1.2 Schéma plazmového řezání dle [10].

Vlivem dopadajícího paprsku s vysokou hustotou energie na povrch materiálu dochází k jeho natavení. Dynamika plazmového paprsku zajišťuje vyfouknutí nataveného materiálu z řezné spáry. Chlazené plazmové hořáky umožňují přívod fokusačního a ochranného (asistenčního) plynu, případně vody, ke zvýšení koncentrace energie plazmového oblouku, což má za následek výrazné zvýšení výkonu. Ochranný plyn obklopuje elektrický oblouk a tím chrání vytvářené řezné hrany před vlivem okolní atmosféry.

Výhody této technologie spočívají především ve vysoké rychlosti řezání, schopnosti řezat neželezné kovy a relativně malému tepelnému ovlivnění v místě řezu. [8][9]

1.4.3 Dělení materiálu vodním paprskem

Princip dělení materiálů vodním paprskem je založený na využívání kinetické energie vysokotlakého vodního paprsku. V případě použití abrazivních částic ve vodním paprsku se rovněž využívá kinetická energie těchto částic. Na následujícím obrázku (obr. 1.3) je zobrazen princip řezání vodním paprskem. Během procesu řezání dochází k vysokorychlostnímu erozivnímu procesu. [11]



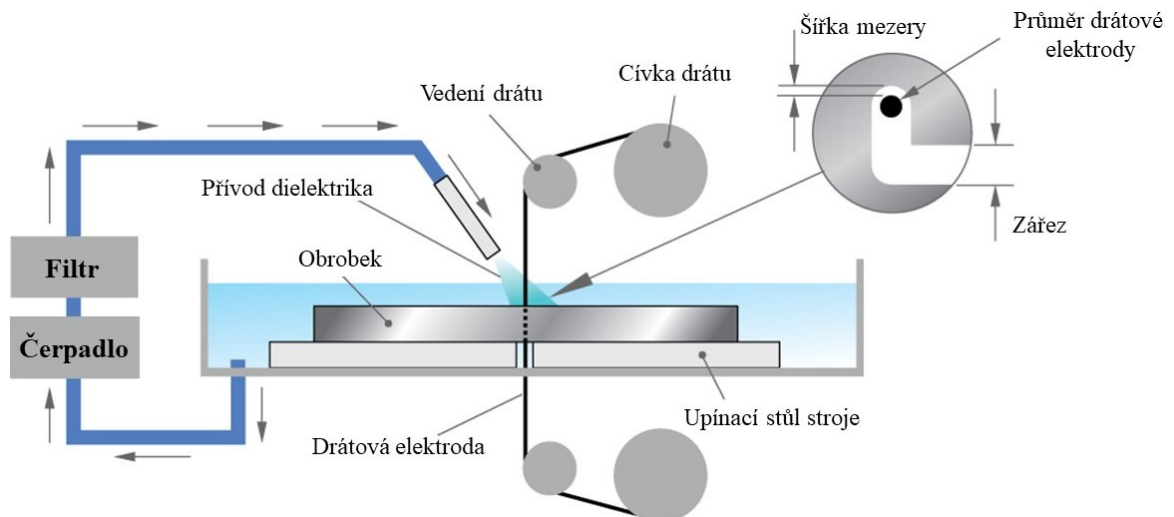
Obr. 1.3 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem dle [12].

Proces řezání probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku vzniká na materiálu prohlubeň vlivem působení tlaku kapaliny. Vzniklá prohlubeň se následně změní v otvor. V druhém

kroku dochází k prohlubování otvoru a k vzniku řezné spáry. V důsledku nárazu vodního paprsku na povrch materiálu dochází k akumulaci vysokého tlaku na velmi malé ploše. To má za následek vznik rázových vln v řezaném materiálu, rychlou destrukci materiálu na hranici zrn a vznik mikrotrhlin. Rychle se šířící mikrotrhliny vlivem dynamického zatížení způsobují odebrání materiálu. Pro zvýšení výše popsaných účinků vodního paprsku se přidává do paprsku kapaliny abrazivum. Vodní paprsek s abrazivem se využívá při řezání kovů a keramiky. [3][13][14]

1.4.4 Elektroerozivní drátové dělení materiálu

Elektroerozivní drátové dělení materiálu je nekonvenční modifikací elektroerozivního obrábění. Princip metody elektroerozivního drátového řezání lze vidět na obr. 1.4. [3]



Obr. 1.4 Princip elektroerozivního drátového dělení dle [15].

Technologie elektroerozivního drátového řezání se řídí všemi zákonitostmi procesu elektrické eroze. Nástrojovou elektrodu tvoří tenký drát, nejčastěji mosazný nebo měděný, který se postupně odvíjí pomocí speciálního zařízení a elektrodu opačné polarity tvoří obráběný materiál. Postupné odvíjení drátu je důležité kvůli jeho opotřebení, drát je možné použít pouze jednou. Pomalý pohyb drátu je řízen pomocí NC nebo CNC systému stroje podle požadovaného tvaru výrobku.

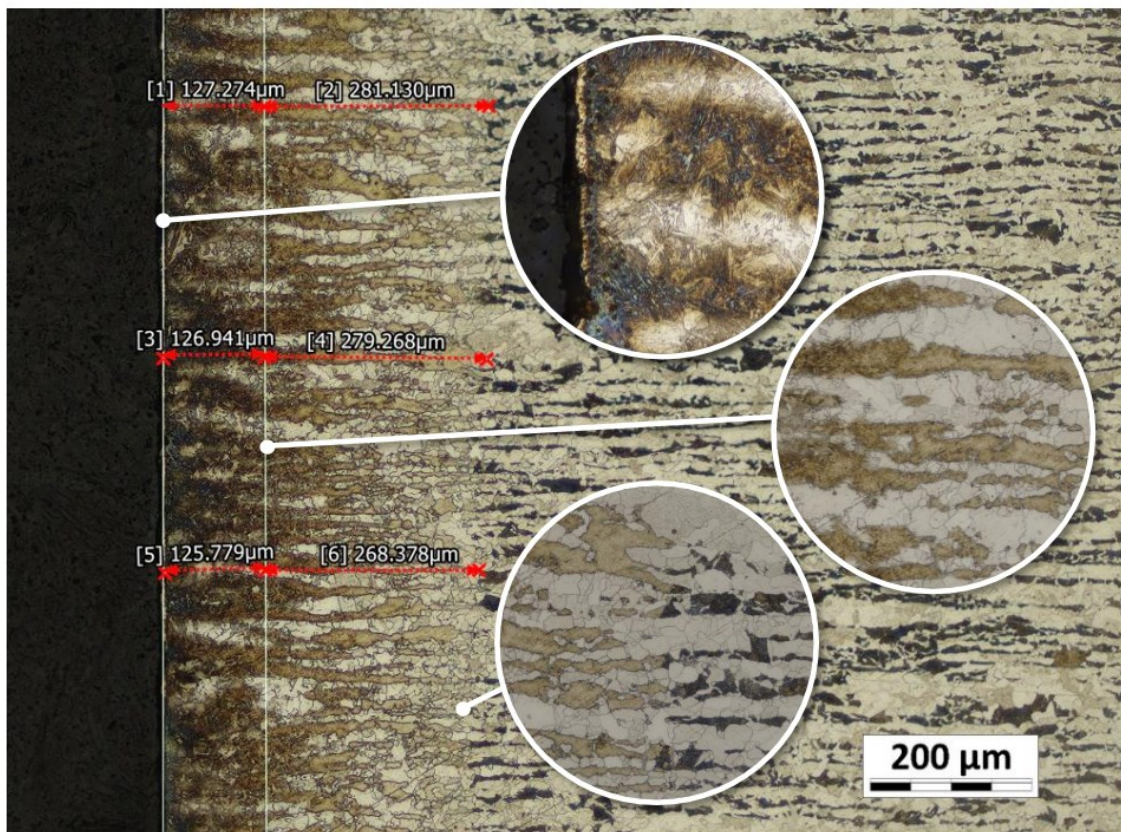
Dielektrikum, nejčastěji deionizovaná voda, musí zajišťovat dostatečné chlazení drátové elektrody a řezané oblasti obrobku a musí odplavovat erozní zplodiny z místa řezu.

Elektroerozivní drátové řezání se používá pro opracování vysoce tvrdých elektricky vodivých keramických materiálů, opracování tvářecích nástrojů, dělení součástí ze spékaných karbidů, kubického nitridu bóru a polykrystalického diamantu. [3]

1.5 Srovnání nekonvenčních metod dělení materiálů

Srovnání nekonvenčních metod pro řezání materiálů provedl ve svém experimentu Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D., který pro svou práci použil ocel 1.0553, 1.7102 a 1.4301. Ve své práci zkoumal tepelně ovlivněné oblasti vzorků, které byly zhotoveny pomocí řezání laseru, plazmy, vodního paprsku a elektrojiskrového drátového řezání.

Výzkumem bylo zjištěno, že kromě korozivzdorné oceli 1.4301 došlo u všech vzorků ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti v místě řezu s výrazně vyšší tvrdostí, než byla tvrdost základního materiálu. Příklad tepelně ovlivněné oblasti u oceli 1.0553 po řezání laserem je zobrazen na obr. 1.5, kde lze vidět, že struktura tepelně ovlivněné oblasti se mění se vzdáleností od řezné hrany. V případě řezání laserem se se zvětšující hloubkou řezu zvětšovala i tepelně ovlivněná oblast, měřená od řezné hrany. Procesní parametry výrobních zařízení měly také výrazný vliv na rozměry tepelně ovlivněné oblasti. Především metody, které pracují při vyšších teplotách a nižších rychlostech, vytvářejí větší tepelně ovlivněnou oblast.



Obr. 1.5 Tepelné ovlivnění laserem řezané oceli 1.0553 v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany. [16]

Metalografickou analýzou ploch zkušebních vzorků vyrobených tepelným způsobem dělení bylo prokázáno, že došlo ke vzniku drobných povrchových vad na řezných plochách. V důsledku vysoké ochlazovací rychlosti došlo u vzorků v tepelně ovlivněné oblasti k vnitřnímu pnutí, což mělo za následek vznik trhlin a jejich další šíření po hranicích zrn. Tato místa poté zpravidla vykazují nejnižší odolnost proti korozi a rovněž zde dochází k výraznému zhoršení mechanických vlastností.

Měření drsnosti řezných ploch prokázalo velkou nekonzistentnost drsnosti na různých místech řezné plochy v případě použití metody dělení laserem a plazmou. Lepší drsnosti bylo dosaženo dělením elektroerozivním drátovým řezáním a vodním paprskem.

Velikost tepelně ovlivněných oblastí u vybraných ocelí se lišila v závislosti na chemickém složení, tloušťce děleného materiálu a intenzitě a koncentraci tepelného účinku použité technologie dělení. Lze tedy předpokládat, že u ocelí po řezání laserem došlo k jinému tepelnému ovlivnění a změně struktury, než nastane v případě laserového řezání polymerních materiálů. [16]

2 LASEROVÉ OBRÁBĚNÍ

Laserové obrábění patří díky několika výhodám, zejména vysoké produkci, flexibilitě systému, nepotřebnosti specifických přípravků, žádnému opotřebením nástroje, žádným vibracím a nepotřebnosti upínání dílů, mezi nejpoužívanější moderní metody. Laserové řezání způsobilo revoluci ve zpracovatelském průmyslu, která přinesla používání laserového řezání různých materiálů jako je kov, sklo, dřevo nebo plast. V poslední době značně vzrostlo především uplatnění laserové aplikace v oblasti řezání plastových materiálů, protože je možné touto technologií dosáhnout špičkové kvality hotového výrobku spolu s vyšší spolehlivostí procesu. [17][18][19]

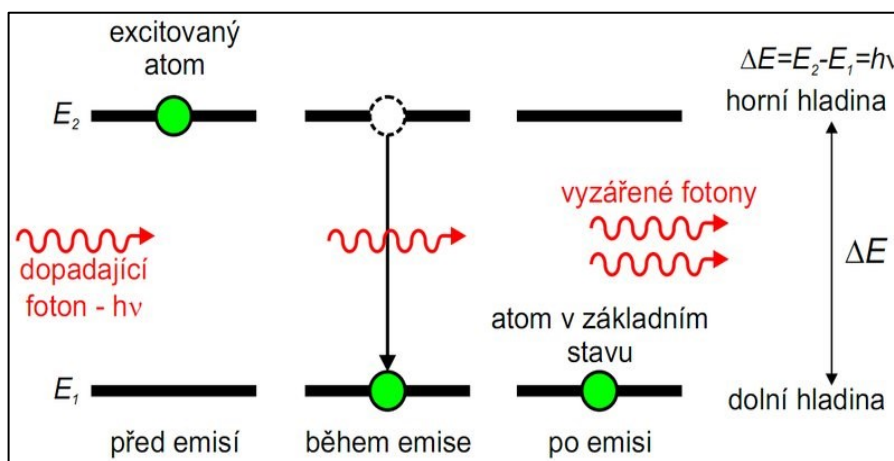
2.1 Buzení laserového paprsku

Laser lze chápat jako generátor elektromagnetického záření v optické oblasti vlnových délek při využití stimulované emise záření. Princip laserového zařízení je možné vysvětlit pomocí kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. V tomto modelu elektrony obíhají okolo kladně nabitého jádra (protonu) na uzavřených drahách. Tyto elektrony podléhají elektrostatickým silám. Každé dráze elektronu přísluší určité množství energie, zaujímá tedy určitou energetickou hladinu. Čím blíže je dráha elektronu k jádru, tím je jeho energie menší. Všechny elektrony u atomu v základním stavu zaujímají nejnižší energetické hladiny, které přísluší drahám o nejmenších poloměrech. Přejít elektronu z nižší energetické hladiny E_1 na vyšší E_2 vyžaduje absorpci a přechod opačného směru emisí určité hodnoty energie. Přesné množství energie se nazývá kvantum a je to v podstatě elektromagnetické záření o určité frekvenci ν , kterou je možné určit ze vztahu (2.1). Tedy atom, kterému bylo dodáno určité množství energie se vrátí do základního stavu, na nižší energetickou hladinu. Během přechodu na nižší energetickou hladinu atom odevzdá přebytečnou energii například spontánní emisí ve formě elektromagnetického záření. Funkci laseru můžeme chápat jako zesílení světla pomocí vybuzené emise záření. Zesílení světla poskytuje lavinu fotonů v úzkém svazku (kvantum elektromagnetického záření). [2][3]

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (2.1) [3]$$

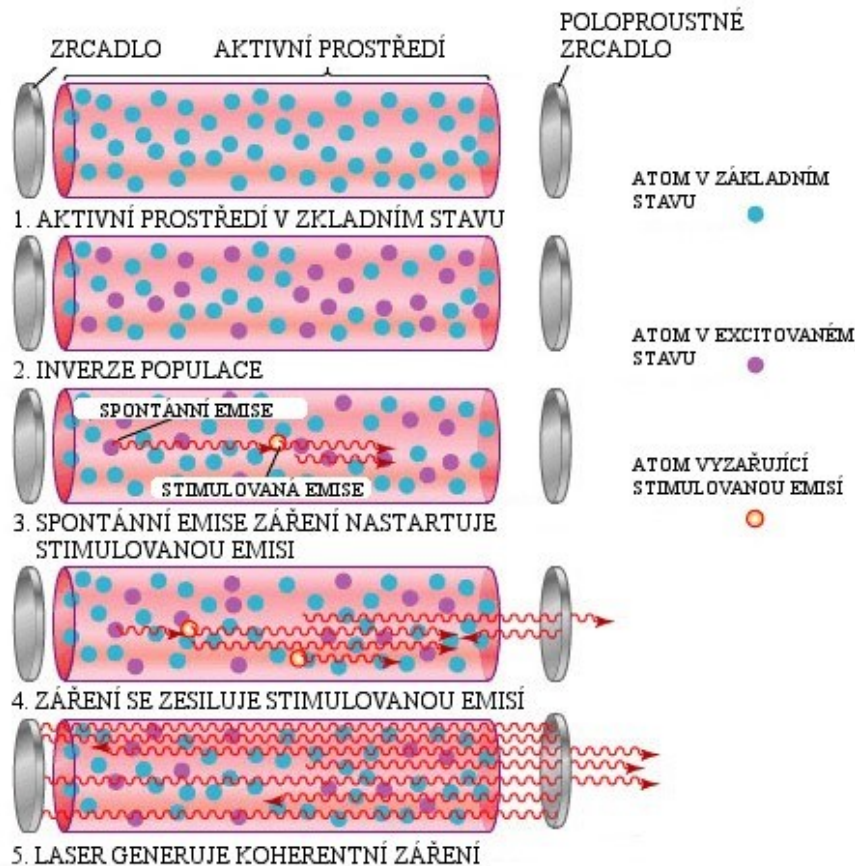
Kde $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J · s] je Planckova konstanta.

Princip laseru lze tedy vysvětlit následovně. Aktivní prostředí laserového zařízení obsahuje vždy element, nejčastěji atom, který se může nacházet ve dvou energetických stavech, a to buď v základním stavu s nižší energií nebo ve vybuzeném stavu s energií vyšší. Při přechodu atomu z vyššího do nižšího energetického stavu dochází k vyzáření fotonu (kvantum elektromagnetického záření). Přechod atomu se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižší energií, tedy ve stavu termodynamické rovnováhy. Buzením paprsku dojde k porušení tohoto stavu a převedení aktivního prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina atomů ve stavu s vyšší energií, tomuto stavu se říká inverze populace. Poté dojde k přeměně energie dodané aktivnímu prostředí na proud fotonu neboli laserový svazek. K této přeměně dochází pomocí stimulované emise, která je zobrazena na obr. 2.1. V podstatě se jedná o jakýsi lavinovitý efekt, kdy foton, který dopadne na excitovaný atom stimuluje jeho přechod z vyšší energetické hladiny na nižší a během toho dojde k emisi dalšího fotonu.



Obr. 2.1 Schéma stimulované emise fotonů. [20]

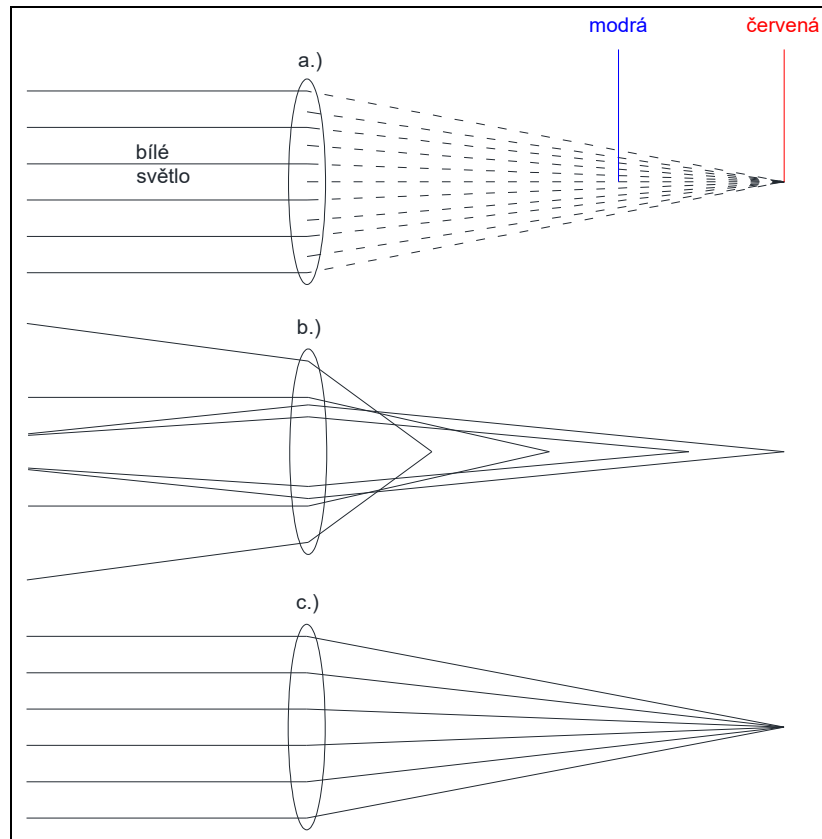
Odrážející se fotony od jednoho zrcadla k druhému způsobují, že jejich počet rychle roste a dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě svazku laseru (obr. 2.2). [20]



Obr. 2.2 Průchod fotonů rezonátorem. [20]

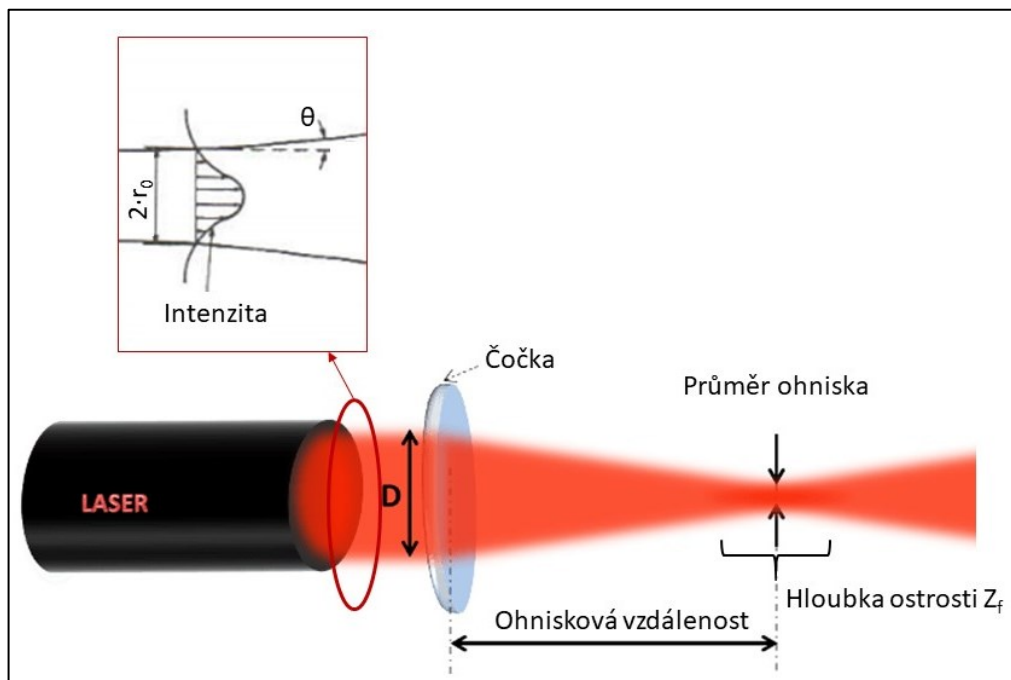
2.2 Vlastnosti laserového paprsku

Laser je zdrojem světla, který má několik unikátních vlastností. První takovou vlastností je, že je laserové světlo monochromatické, protože stimulovaně emitované fotony mají všechny stejnou vlnovou délku, která definuje barvu záření, a tím i stejnou energii. Na obr. 2.3 na str. 24 je možné vidět rozdíl fokusovaného bílého a laserového světla. Obr. 2.3 a.) nám ukazuje, že když je fokusované bílé světlo, tak každá barva má jinou ohniskovou vzdálenost od čočky. Obr. 2.3 b.) zobrazuje fokusované neparalelní světlo, jehož ohnisková vzdálenost závisí na úhlu dopadu částic původního paprsku. Poslední obr. 2.3 c.) zobrazuje monochromatické a rovnoběžné laserové světlo, které je možné soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku. [3][21]



Obr. 2.3 Rozdíl fokusovaného bílého a laserového světla dle [3].

Další vlastností je koherence záření, tedy že záření postupuje stejným směrem. Nízká rozbíhavost a vysoká koherence umožňují laserovému svazku fokusaci na velmi malý průměr, kde dochází k vysoké hustotě výkonu laserového záření (obr. 2.4). [21]



Obr. 2.4 Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace paprsku laseru dle [3][22].

Laserový paprsek má minimální divergenci (rozbíhavost) θ , která je charakterizována poloviční hodnotou vrcholového úhlu kužele, který vystupuje s průměrem r_0 z rovinného okénka, přičemž divergence laserového paprsku s vlnovou délkou λ_w je dána vztahem (2.2):

$$\theta = \frac{\lambda_w}{\pi \cdot r_0} \quad (2.2) [3]$$

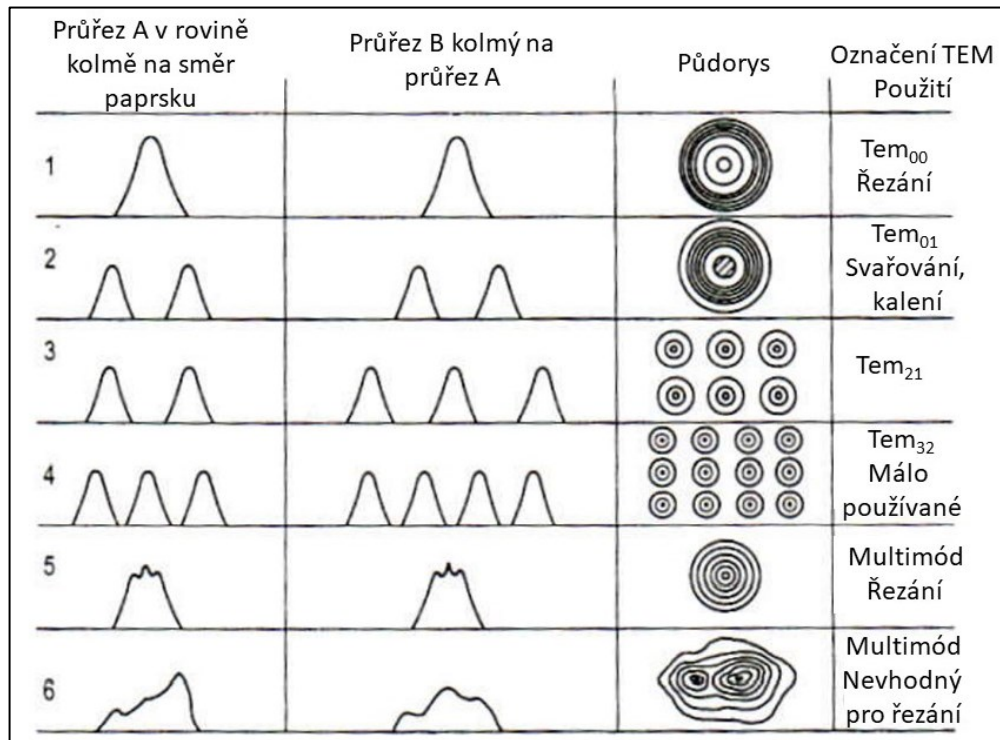
Paprsek má vysokou výstupní intenzitu I [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$], která je limitována zákony záření absolutně černého tělesa. Pro intenzitu záření laserového paprsku platí vztah (2.3), kde I_0 je intenzita záření ve středu paprsku, r_0 je poloměr, ve kterém je intenzita redukována ze střední hodnoty faktorem e^2 .

$$I = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-2 \cdot r^2}{r_0^2}\right) \quad (2.3) [3]$$

Laserové zařízení mají módovou strukturu TEM (Transverse Electromagnetic Mode), která spočívá v tom, že v příčném průřezu paprsek vytváří buď jen jednoduchou stopu (základní mód), nebo složitější obrazce kruhově nebo pravoúhle symetrické. To je určeno tím, že uvnitř laserového rezonátoru elektromagnetické pole generované stimulovanou emisí záření získává v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru určitou konfiguraci (mód). Nejvyšší hustoty energie je možné dosáhnout při dané výstupní energii laseru pomocí laserů pracujících v základním módu označovaném jako TEM₀₀, kde index charakterizuje symetrii elektromagnetického pole v rovině, která je kolmá na směr šíření paprsku. Základní mód TEM₀₀ vyzařuje energii ve tvaru Gaussovy křivky. Jedná se o ideální mód, paprsek s tímto módem dosahuje nejnižších ztrát způsobených difrací a má minimální rozbíhavost, což umožňuje jej maximálně zaostřit. [3][23]

Symetrie Gaussova módu způsobuje hlavní závislost výsledků řezání na směru řezu. Módová struktura TEM₀₀ může být obzvlášť vhodná pro řezání laserem kovů menších tlouštěk, kdy se tvoří symetrický řez a úzká řezná spára s centrem intenzity ležícím uprostřed. Pevnolátkové lasery využívají TEM₀₀, CO₂ lasery mají módovou strukturu nazývanou Top Head. Mód Top Head má příčný průřez intenzity záření ve tvaru obdélníku, nemá tedy vrchol intenzity, ale je rotačně symetrický podle svislé osy. Oproti základnímu Gaussovu módu má menší schopnost zaostření, tudíž vzniká širší řezná spára. Tento mód je převážně využíván pro laserové dělení kovů větších tlouštěk. [23]

Podle módu laseru je možné určit jeho vhodnost pro dané průmyslové použití, např. pro řezání, svařování a jiné technologie. Příklady módové struktury TEM jsou uvedeny na následujícím obrázku (obr. 2.5).



Obr. 2.5 Ukázky módové struktury laseru dle [3].

Výše uvedené vlastnosti laserového paprsku umožňují při jeho fokusaci vhodnou optickou soustavou jeho soustředění do velmi malého bodu s mimořádně vysokou hustotou energie v místě dopadu paprsku. To má za následek natavení a odpaření materiálu, čímž dojde k dosažení požadovaného efektu zpracování. Pro porovnání jsou v tab. 2.1 uvedeny hustoty výkonů různých energetických zdrojů. [3]

Tab. 2.1 Hustoty výkonů různých energetických zdrojů dle [3].

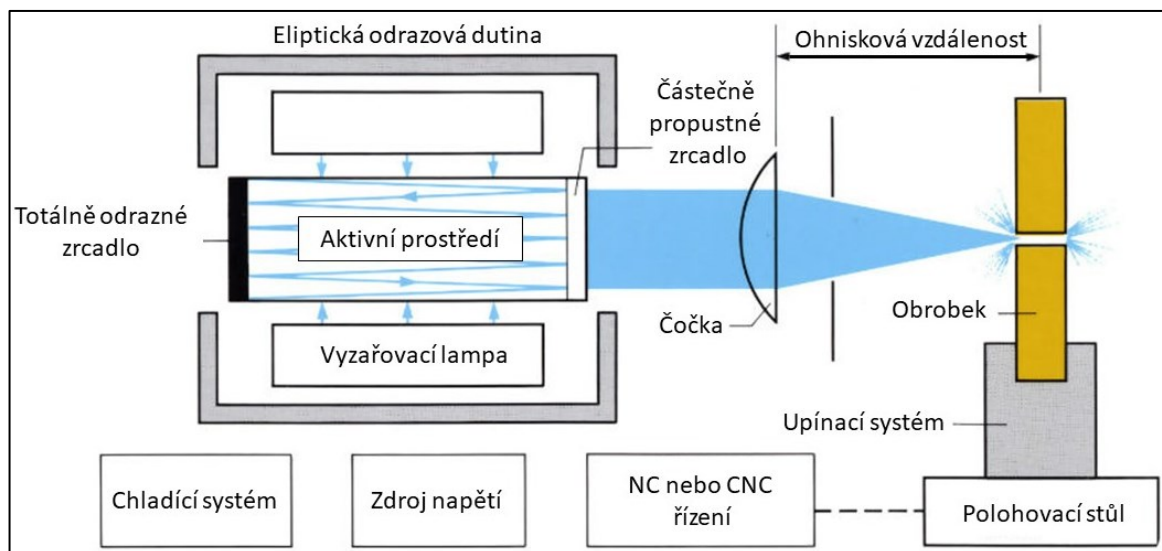
Zdroj energie	Dosahovaná hustota výkonu (W · cm ⁻²)
Slunce (čočka f = 50 mm)	$5 \cdot 10^2$
Elektrický oblouk	$1 \cdot 10^5$
Acetylén – kyslíkový plamen	$1 \cdot 10^4$
Plazmový paprsek	$1 \cdot 10^5$
Elektronový paprsek	$4 \cdot 10^8$
CO ₂ laser	$1 \cdot 10^9$
Nd laser	$1 \cdot 10^{14}$

2.3 Základní součásti laseru

Základními nezbytnými součástmi laserového systému jsou kromě aktivního prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi, i čerpací zařízení, chlazení, optický rezonátor, vedení svazku, manipulační zařízení a řídicí počítač.

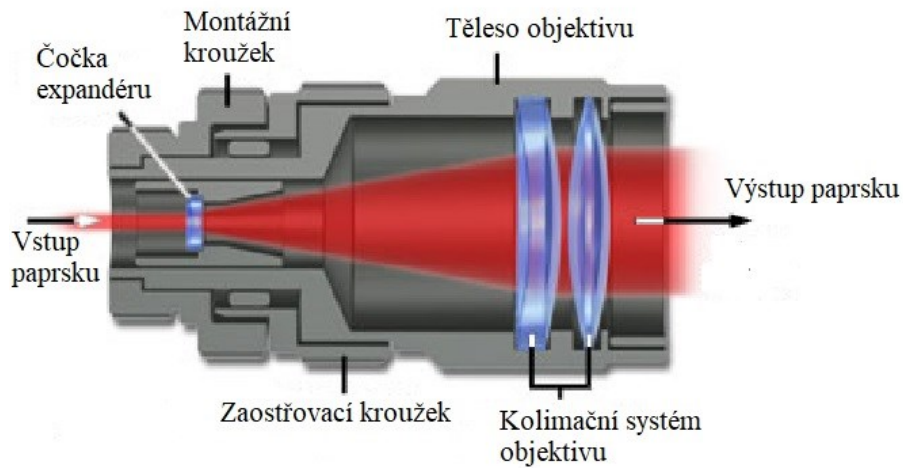
Čerpací zařízení přivádí energii aktivnímu prostředí a zajišťuje tak přebytek částic ve stavu vyšší energetické hladiny, tedy inverzní populaci, která je nezbytná pro zajištění stimulované emise.

Optický rezonátor je do systému zařazen kvůli dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním. Rezonátor se skládá ze dvou zrcadel, mezi kterými je umístěno aktivní prostředí (obr. 2.6). Záření, které vystupuje z aktivního prostředí naráží a následně se odráží od zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde funguje jako podnět pro další stimulovanou emisi, tím dochází k zesílení laserového záření. Částečně propustné zrcadlo propouští vystupující svazek, který dosáhl požadované intenzity. [21]



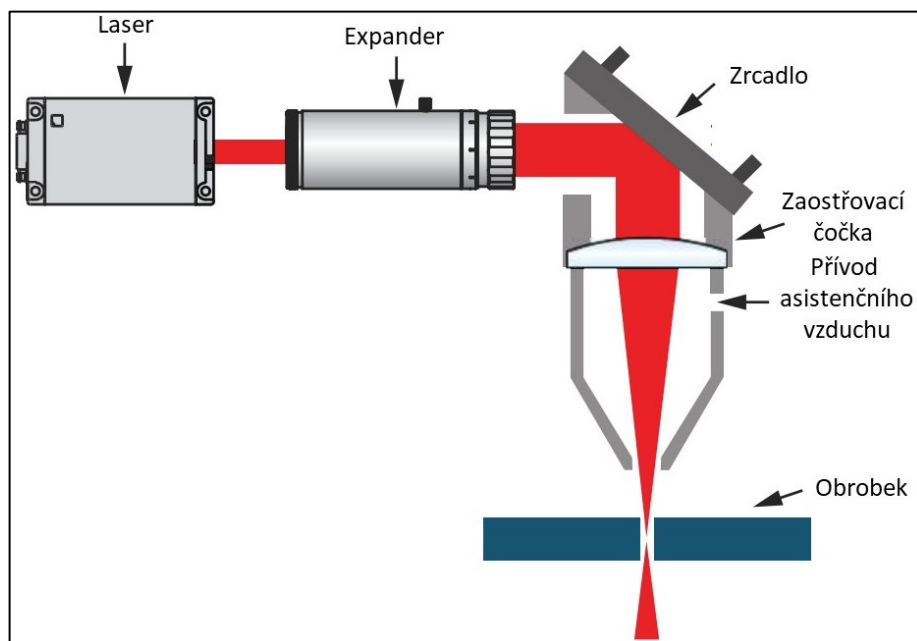
Obr. 2.6 Schéma laserového zařízení dle [24].

Systém čoček a clon v případě průmyslových laserů dále zvyšuje kvalitu a upravuje směr výstupního svazku. Tomuto zařízení se říká expander, který slouží především ke snížení divergence svazku (obr. 2.7, str. 28). V expanderu dochází ke snížení výsledné účinnosti laserového systému v důsledku velkých energetických ztrát. Kvalita svazku je často v řadě aplikací důležitější než jeho výkon. [21]



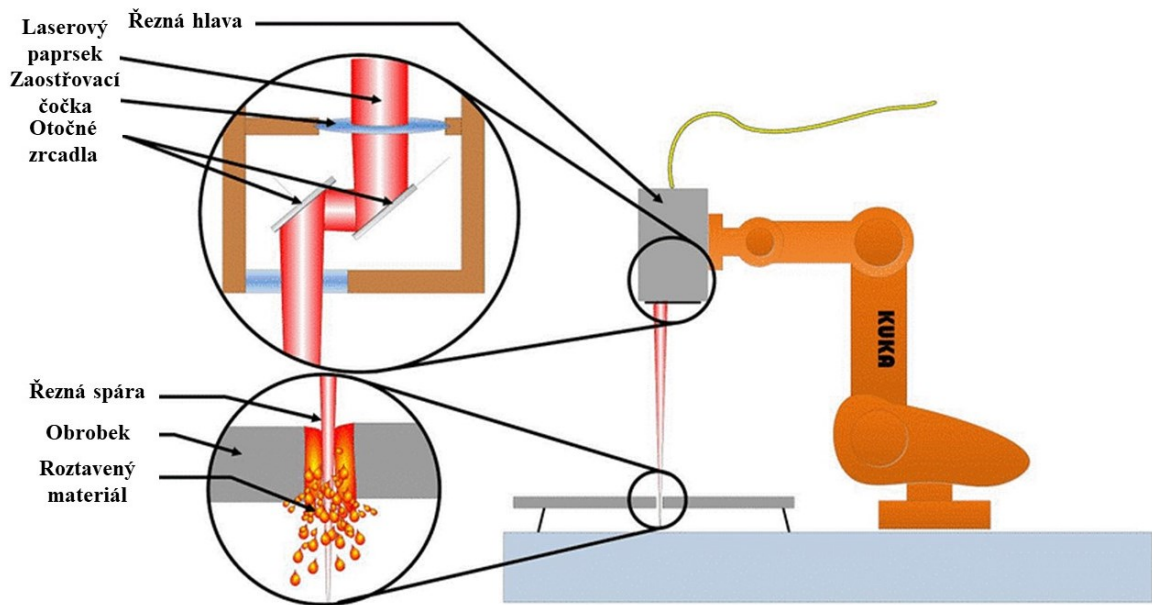
Obr. 2.7 Expander laserového zařízení dle [25].

Soustava zrcadel a čoček vede filtrovaný svazek dále do pracovní hlavy laseru (laserové hlavice), popřípadě do optického vlákna a jejich prostřednictvím k místu obrábění (obr. 2.8). Dielektrické sklo nebo leštěné kovy jsou nejvíce používány jako materiál, ze kterého jsou optické komponenty vyrobeny. Při volbě materiálu optických komponentů závisí na vlnové délce generovaného záření, jelikož materiál nesmí toto záření pohlcovat. [21]



Obr. 2.8 Vedení filtrovaného svazku do pracovní hlavy laseru dle [26].

Pracovní stoly s přesnými motorizovanými posuvy, popřípadě pohyblivé laserové hlavy, se používají, když je vyžadován vzájemný pohyb svazku a zpracovávaného materiálu. Při vyžadování přesného 3 D pohybu se používají roboty a manipulátory. Schéma robota od firmy KUKA pro řezání laserem je uvedeno na obr. 2.9. [21]



Obr. 2.9 Schéma laserového řezacího robota od firmy KUKA dle [27].

Během činnosti laseru dochází k významnému ohřevu mnoha součástí vzhledem k velkým energetickým ztrátám při buzení aktivního prostředí, ztrátám v rezonátoru i na optických prvcích, kterými svazek prochází. Je-li aktivním prostředím krystal, může docházet ke změně jeho rozměrů, tím i k změně vlastností a laser přestává při určité teplotě fungovat. Proto se používá chladicí zařízení pro každý výkonový laserový systém, kde se využívá především chlazení založené na proudění kapaliny, nejčastěji demineralizované vody.

Významnou součástí laserového systému je řídicí počítač, který bývá často zabudován do opláštění systému. Řídicí systém obsahuje software pro nastavení všech parametrů laseru. Systém ovládá otvírání a zavírání laserové závěrky i vzájemný pohyb pracovního stolu a laserové pracovní hlavy. Jednoduché pohyby mohou být realizovány pomocí zadávání G – kódu, kterým lze řídit spouštění a ukončení funkce laseru. Pro složitější geometrie se používá některý z 3 D programů, z něhož jsou data následně naimportována do řídicího programu. [21]

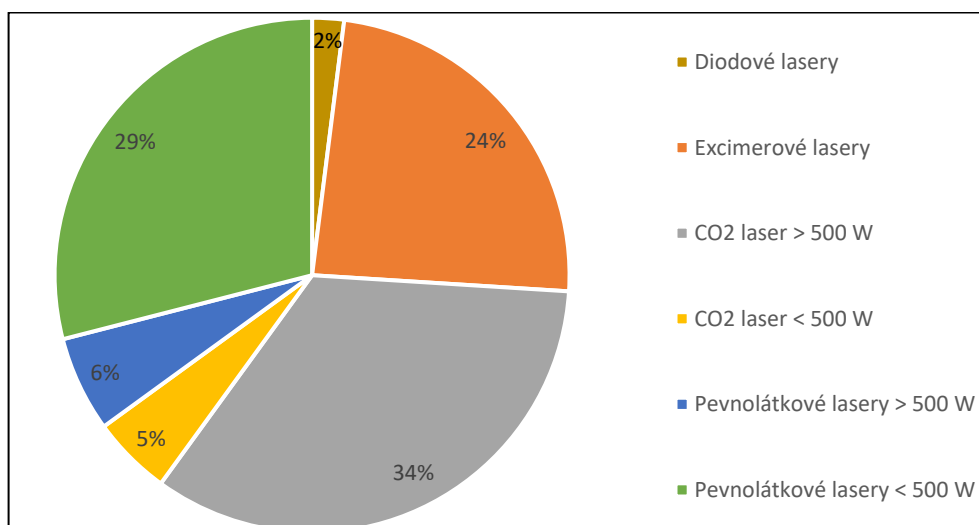
2.4 Rozdělení laserů

Rozdělení druhů laserů je důležité pro určitou systematickosti vzhledem k rozmanitosti dostupných laserů, rozdílu jejich vlastností, dosahovaných výkonů i oblasti použití. Lasery je možné rozdělovat podle:

- aktivního prostředí (skupenství materiálu, které se používá ke generování záření), toto rozdělení se dále dělí na pevné, plynné, kapalné a polovodičové lasery
- vlnové délky, které se dále dělí podle frekvence záření na lasery vyzařující infračervené záření, optozáření (světelné záření), ultrafialové záření, rentgenové a gama záření
- druhy paprsku, respektive režimu paprsku, který může být kontinuální, pulzní nebo tzv. Q – switched režim
- výkonu
- konstrukce laserového zařízení
- použití

Charakteristiky jednotlivých druhů laserů podle vlnové délky, režimu paprsku a oblasti použití jsou uvedeny v tab. 2.2 na str. 31.

Nejvíce zastoupené lasery používané pro tepelné aplikace ve strojírenském průmyslu jsou pevné lasery na bázi rubínu, Nd – YAG, Nd – sklo, alexandrit a dále plynné CO₂ lasery, He – Ne, argonové, excimerové a částečně kapalinové lasery. Procentuální zastoupení laserů v průmyslu je zobrazeno na obr. 2.10. [3]



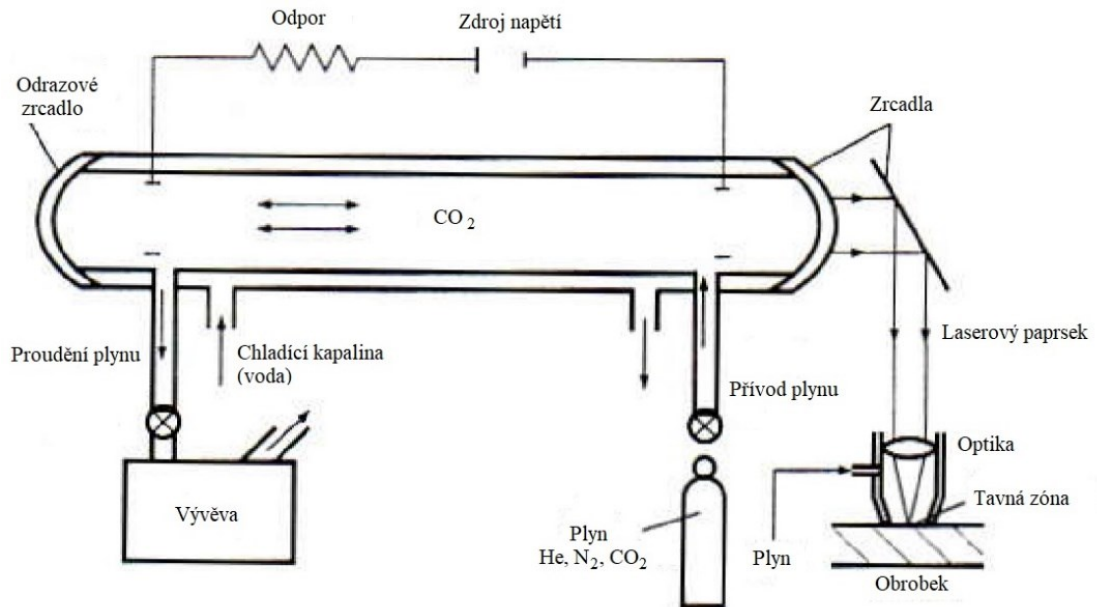
Obr. 2.10 Procentuální zastoupení laserů v průmyslu dle [28].

Tab. 2.2 Rozdělení laserů dle [3].

Typ laseru	Aktivní látka		Vlnová délka (μm)	Režim paprsku	Výkon laseru	Oblast použití
Pevný	Rubín	Cr^{3+}	0,6943	pulzní	5 W	Holografie
	Nd – YAG	Nd^{3+}	1,064	Kontinuální pulzní	100 až 1200 W	Strojírenský průmysl
	Nd – sklo	Nd^{3+}	1,064	Pulzní	2 mW	
	alexandrit		0,7 až 0,818	Pulzní	10 W	
Polovodičový	GaAs		0,8 až 0,9	Pulzní	2 až 10 mW	Informační technologie optoelektronika
Plynný	CO_2 ($\text{N}_2 + \text{He}$)	CO_2	10,6	Kontinuální nebo pulzní	500 až 15000 W	Strojírenský průmysl
	He – Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	Kontinuální	20 mW	Metrologie, geodzie, holografie
	Ar	Ar^+	0,4764; 0,488; 0,5145	Kontinuální nebo pulzní	1 až 5000 W	Laserová chirurgie
	Excimer (ArCl) (XeCl) (XeF) (KrF)		0,170 0,308 0,351 0,248	pulzní	20 až 250 W	Fotolitografie, laserová chirurgie, strojírenství
Kapalinový	Barvivo Rhodamine 6	Etanol, metanol	0,34 až 1,175	pulzní	100 W	Fotochemie, spektroskopie

2.4.1 CO₂ lasery

CO₂ lasery využívají ke vzniku stimulované emise záření kvantově-energetické přechody související s oscilací molekul oxidu uhličitého (CO₂) a dusíku (N₂). Schéma CO₂ laseru je uvedeno na obr. 2.11.

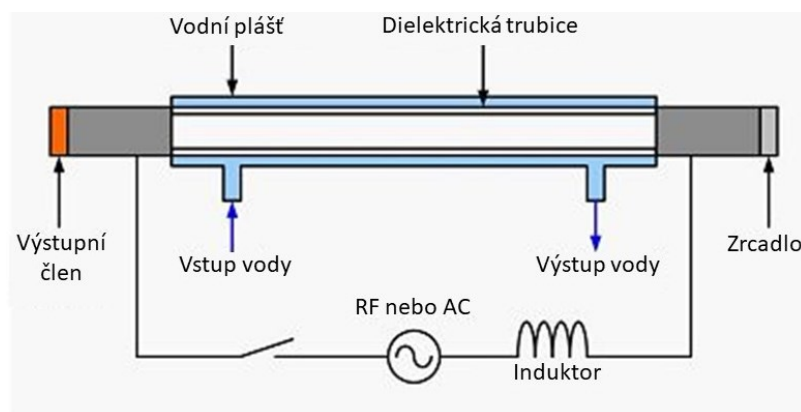


Obr. 2.11 Schéma CO₂ laseru dle [3].

Základní součástí laseru je laserová trubice, ve které se nachází směs plynů oxidu uhličitého, dusíku a Helia (He). Excitace vyžaduje potřebnou energii, která je vytvářena ve formě doutnavého výboje mezi elektrodami. Na elektrody je z generátoru vysokého napětí přiváděno napětí. V doutnavém výboji excitují molekuly dusíku N₂ srážkami s elektrony ze svého základního energetického stavu E_0 do prvního vibračního stavu, který představuje energetickou hladinu E_1 . Tato energetická hladina se blíží k energii asymetrických vibrací molekul oxidu uhličitého E_2 . Nepružnými srážkami excitovaných molekul N₂ s molekulami CO₂ se může velmi rychle a účelně měnit vibrační energie molekul. Molekuly CO₂ přeskakují z vyšší energetické hladiny E_2 a tím dochází k přechodu z asymetrických vibrací molekul na vibrace symetrické. Tento přechod je doprovázen vyzářením kvanta energie s vlnovou délkou 10,6 μm . K zajištění inverzní populace na energetické hladině E_2 , je nutné ji neustále doplňovat, tedy čerpat energii do systému ve formě doutnavého výboje, ale také účinně depopulovat dolní energetickou hladinu, což je zajišťované srážkami s molekulami He. Molekuly He odvádějí přijatou energii do systému ve formě tepla. Helium je vhodné především kvůli jeho velkému koeficientu tepelné vodivosti.

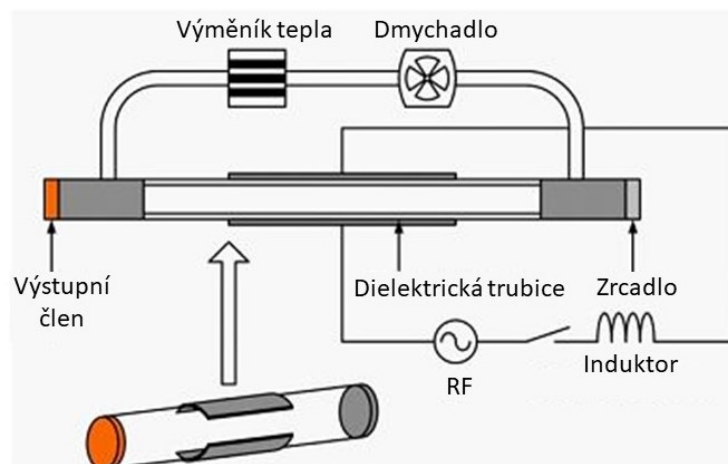
Chladicí médium, nejčastěji voda, odvádí ze systému teplo pomocí chladicího agregátu. Chlazení musí být dostatečně účinné, aby nedošlo k překročení teploty cca 400 °K v dutině laseru.

Vývěva udržuje potřebný nízký tlak plynu, který zaručuje vznik doutnavého výboje v laserové trubici. Plyn po průchodu trubicí může být veden na regeneraci a případně může být znovu použit. Průchodem trubicí dochází k postupnému znehodnocování plynu, tím že se CO₂ částečně rozkládá na oxid uhelnatý a kyslík, což vede k poklesu výkonu laseru. Plynné CO₂ lasery se mohou dělit podle uspořádání toku plynu vzhledem k optické ose. Prvním typem jsou axiální CO₂ lasery, kde plyn proudí ve směru optické osy laseru (obr. 2.12).



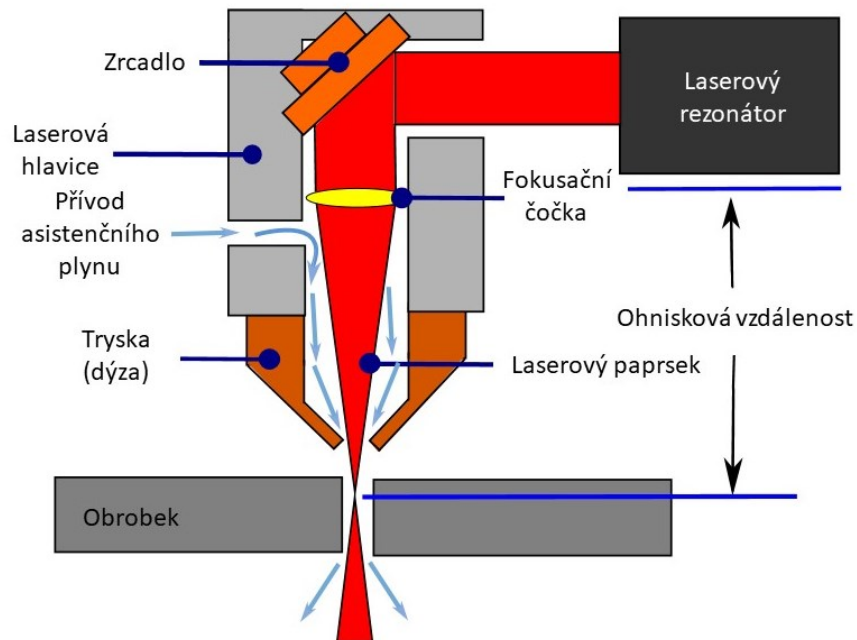
Obr. 2.12 Axiální CO₂ laser dle [29].

Druhým typem jsou transverzální CO₂ lasery, kde plyn proudí kolmo na směr optické osy a většinou i kolmo na směr elektrického výboje v dutině (obr. 2.13). Tento druh oscilátorů se dále dělí na dvouosý a trojosý podle vztahu mezi průtokem plynu a výbojem mezi elektrodami. Dosahují se jimi vyšší výkonů na jednotku objemu dutiny. [3]



Obr. 2.13 Transverzální CO₂ laser dle [29].

Generovaný laserový paprsek vystupuje do laserové hlavice z rezonátoru polopropustným zrcadlem. Paprsek je do laserové hlavice vedený zrcadlovým systémem. V hlavici je umístěná fokusační čočka, která je chlazená chladícím prstencem (obr. 2.14). [3]

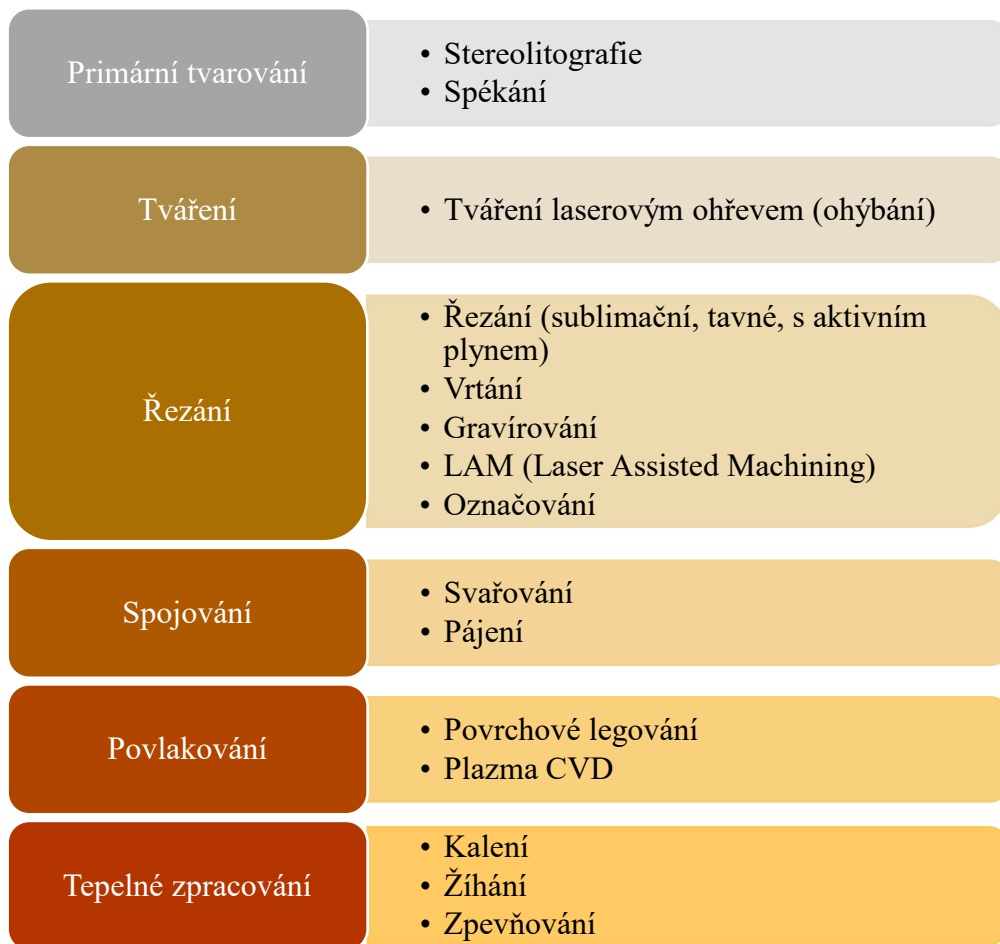


Obr. 2.14 Laserová fokusační hlavice dle [30].

Do laserové hlavice se přivádí asistenční plyn, který z ní vystupuje spolu s fokusovaným paprskem. Asistenční plyn chrání optiku před produkty rozkladu opracovávaného materiálu. Plyn může vytvářet v místě dopadu laserového paprsku ochranou, nebo oxidační či jinak vhodně agresivní atmosféru. Pomocí plynu je také odstraňována tavenina z obráběného materiálu, čímž dochází k čistějšímu a rychlejšímu průběhu opracování. Tento účinek lze ještě zvýšit vakuovým odsáváním produktů interakce laserového paprsku s materiálem. [3]

2.5 Oblasti použití laserů

Oblasti použití laseru jsou velmi rozsáhlé a zasahují do mnoha průmyslových odvětví. O tom, že má laser nezastupitelné místo ve výrobním procesu svědčí i skutečnost, že technologie zpracování materiálů laserem klasifikuje norma DIN 8580, která je dělí na šest základních skupin. Toto rozdělení je uvedeno na následujícím obrázku (obr. 2.15). [3]



Obr. 2.15 Klasifikace technologií laserového opracování normou DIN 8580 dle [3].

2.5.1 Řezání polymerních materiálů laserem

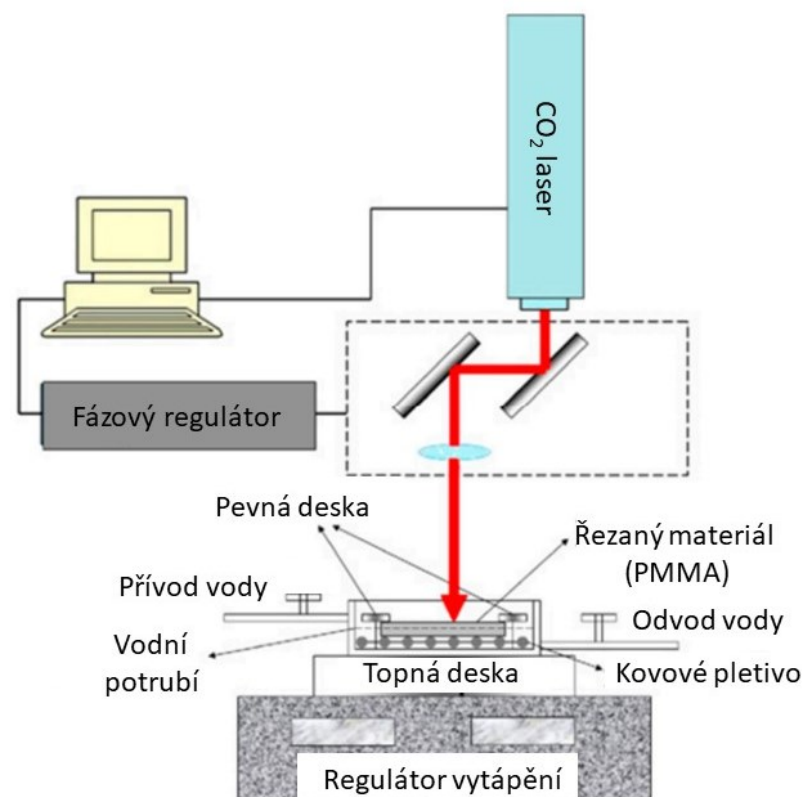
Laserové zařízení je možné považovat za univerzální nástroj pro technologii řezání téměř všech druhů konstrukčních materiálů, který je vhodný pro malosériovou i sériovou výrobu. Proces řezání je nejvíce ovlivňován vlastnostmi materiálu při styku s laserovým paprskem (absorpce, reflektivita povrchu, tepelná vodivost a teplota tavení). K řezání se nejvíce využívají CO₂ lasery pracující v kontinuálním režimu.

Řez vzniká v tavenině v důsledku působení tlaku asistenčního plynu, který je vedený koaxiálně s laserovým paprskem. Volba asistenčního plynu závisí na řezaném materiálu.

Pro kovy a uhlíkové oceli je využíván kyslík a vzduch a pro nekovy a plasty (PMMA, PP) se používají inertní plyny. Kromě kyslíku a inertních plynů se používá také dusík, především k řezání nekovových materiálů (PVC, textil). Dusík brání řezné plochy před spálením a vznícením. [3]

Řezný proces nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a kompozitní materiály, se skládá ze tří mechanismů. Prvním mechanismem je dělení tavením s následným smykem nebo stříhem. Někdy označován jako fúzní řezání. Jedná se o základní mechanismus, který je podobný procesu řezání kovů inertním plynem s velmi vysokou kvalitou řezu. Tento způsob je typický pro termoplasty (PP, PE, PS, nylon) a keramické materiály.

Druhým mechanismem je odpařování materiálu, princip této metody je zobrazen na obr. 2.16. Jedná se o způsob, kdy dojde k natavení materiálu a jeho následnému odpaření. V místě řezu vzniká malý zářez s vysokou kvalitou. Vlivem vysoké teploty dochází ke změně pevné fáze materiálu na kapalnou a následně na páru. Mechanismus je vhodný pro tenké obrobky z PMMA, polyacetátu nebo akrylu. [1][3]



Obr. 2.16 Řezný mechanismus odpařováním materiálu dle [1].

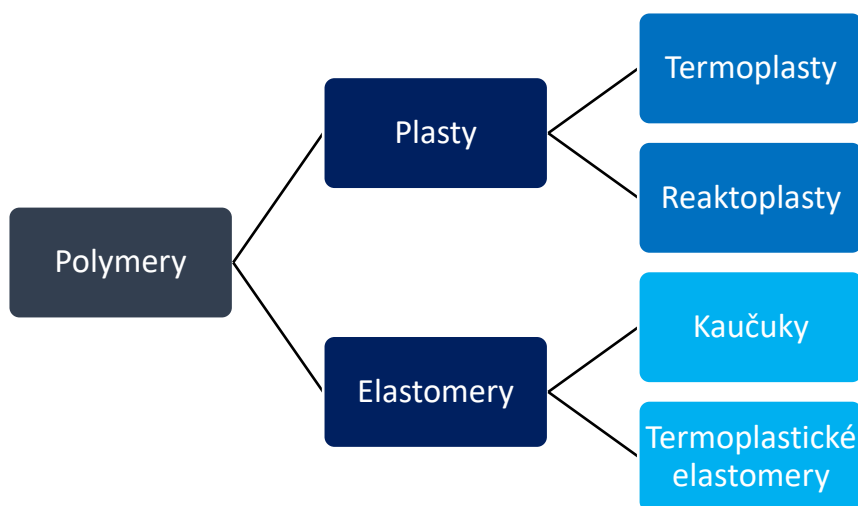
Třetím mechanismem je chemická degradace, ke které dochází vlivem vysoké teploty a nerovnosti složení materiálu. Laserový paprsek mění integritu materiálu přerušením chemických vazeb. Hrany jsou po řezání rovné a povrch je hladký, ale je pokrytý jemnou vrstvou zbytkového uhlíkového prachu, což může vyžadovat následné čištění. Tento mechanismus je typický pro řezání různých termosetů, jako je guma a epoxidová pryskyřice, ale také k řezání PVC nebo polyuretanu. [1][3]

3 POLYMERNÍ MATERIÁLY

Polymerní materiály jsou populární především v tom, že mají několikanásobně menší hustotu než kovy. Plasty a polymerní kompozity přináší novou kvalitu výrobků s vyšší užitnou hodnotou, nové technologie a příznivější výrobní ekonomiku. Plasty také přinesly nové estetické řešení výrobků. Řada jejich zajímavých vlastností je permanentně využívána pro inovaci výrobků. Těmito vlastnostmi jsou korozní odolnost, elektroizolační vlastnosti, snadná zpracovatelnost, tlumení hluku a vibrací, vybavitelnost ve hmotě. Plasty přináší zcela nové koncepční způsoby konstruování výrobků, které jsou založené na integraci jednoduchých dílů ve složitější vícefunkční součásti a na efektivnějším zhodnocení specifických vlastností těchto materiálů. [31]

Polymery jsou chemické látky s mnoha vlastnostmi, které obsahují ve svých molekulách většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, často také dusíku, chlóru a jiných prvků. Výrobky z polymerů jsou v tuhém stavu, ale v určitém stádiu zpracování jsou ve stavu kapalném, který dovoluje, většinou za zvýšené teploty a tlaku, udělit budoucímu výrobku požadovaný tvar.

Polymery se dělí podle několika kritérií. Základní rozdělení polymerů je z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty (obr. 3.1). Podle tohoto kritéria se dělí na elastomery a plasty. Plasty se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty. [32]



Obr. 3.1 Rozdělení polymerů dle teplotního chování dle [33].

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které je možné za běžných podmínek malou silou značně deformovat, aniž by došlo k jejich porušení, dosahuje se vratných deformací. Typickým elastomerem je kaučuk, z něhož se vulkanizací, zesílením

(nejčastěji sírou), vyrábí pryže. Pryž je charakterizována chemickými příčnými vazbami mezi molekulami, které tvoří uzly prostorové sítě. Jedná se o amorfní polymer.

Amorfní polymery mají nepravidelné uspořádání makromolekul ve struktuře a ve většině případů jsou číré (průhledné). Oproti tomu jsou polymery semikrystalické, u kterých se vytváří částečně uspořádané makromolekuly ve struktuře, které jsou obklopeny makromolekulami v neuspořádaném amorfním stavu. Tento proces probíhá především ve fázi chlazení taveniny a nazývá se krystalizace. Úplné krystalizace v reálných podmínkách nelze docílit. Toho je možné dosáhnout pouze v laboratorních podmínkách za příznivých podmínek. Ke krystalizaci polymeru je nutná jeho strukturní a chemická pravidelnost molekuly. Dlouhé postranní řetězce makromolekuly, její chemická nepravidelnost a objemové substituenty zabraňují krystalizaci. Podíl krystalického obsahu ve struktuře polymeru, který je závislý na strukturních podmínkách makromolekuly a na podmínkách jeho zpracování, nazýváme stupněm krystalinity. [32][33][34]

U amorfních polymerů vznikají při řezání laserem mikrotrhliny, které se objevují na řezaném povrchu a v tepelně ovlivněné oblasti. U semikrystalických polymerů dochází k menšímu vzniku tepelně ovlivněné oblasti a dochází ke snížení drsnosti. Přítomnost mikrotrhlin snižuje pevnost v tahu polymerních materiálů. Mikrotrhliny rostou při tahovém zatížení a vedou k lomu vzorku. [1]

Termoplastické elastomery vykazují vlastnosti velmi podobné pryžím. Strukturu mají tvořenou tvrdými segmenty termoplastu a měkkými segmenty elastomeru. Tyto segmenty pak vytvářejí uzly sítě. Termoplastické elastomery, na rozdíl od pryží, přechází zvyšováním teploty do tekutého stavu. Hlavní rozdíl je ve vlastnostech uzlů sítě, kdy pryž má síť chemické povahy, zatímco termoplastické elastomery mají síť povahy fyzikální. Elastické vlastnosti termoplastických elastomerů jsou nižší než u pryží, ale jejich výhodou je možnost vstřikování na běžných strojích určených pro termoplasty a taky možnost jejich recyklace.

Plasty jsou za běžných podmínek většinou tvrdé a často i křehké. Zvyšováním teploty se stávají plastickými a tvarovatelnými. Termoplasty se nazývají materiály, u kterých je změna z plastického stavu do tuhého vratná a opakovatelná. Do oblasti taveniny se dostávají zahřátím nad teplotu tání, zpětným ochlazením pod tuto teplotu přechází do tuhého stavu. Zahříváním nedochází k chemické reakci, a tak se během zpracování nemění ani jejich chemická struktura. Dochází pouze k fyzikálním změnám. Termoplasty mohou být jak amorfní, tak i semikrystalické.

Reaktoplasty jsou tavitelné a tvarovatelné jen určitou dobu po zahřátí. Během dalšího ohřívání dochází k chemické reakci, kdy původní molekuly zesítují a stanou se netavitelnými a nerozpustnými. Jedná se o nevratný proces. Chemická reakce způsobující zesíťování struktury se nazývá vytvrzování. Reaktoplasty jsou amorfní polymery a výrobky z těchto polymerů vykazují vysokou chemickou a tepelnou odolnost, tvrdost a tuhost. [32][33]

3.1 Fázové stavy polymerů

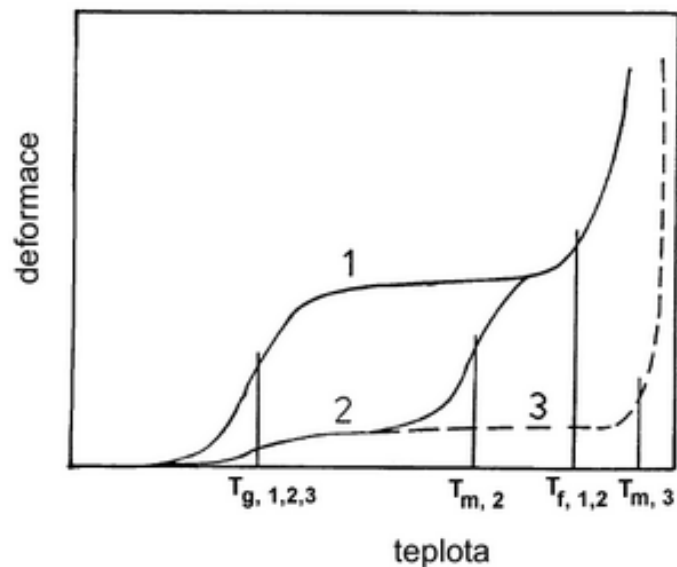
Vlastnosti polymerů závisí na jejich chemickém složení, fázovém stavu a molekulové hmotnosti. Vzhledem k tomu, že polymery mají značně vysokou molekulovou hmotnost, tak jejich bod varu je nezvykle vysoký a nachází se ve všech případech nad jejich teplotou rozkladu. Neexistuje tedy plynný stav polymerů. Polymery se mohou nacházet pouze ve stavu tuhém nebo kapalném. Pravidelnost geometrického uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhé fázi ukazuje vysoce uspořádaný krystalický stav a prakticky neuspořádaný sklovitý stav.

Sklovitý stav odpovídá kapalnému kvůli malé míře uspořádanosti polymerních řetězců. Jejich schopnost téct z jednoho místa na druhé je potlačena. V tomto stavu se mohou vyskytovat všechny amorfní látky.

Na rozdíl od nízkomolekulárních látek je pro polymery charakteristický ještě přechodový stav mezi sklovitým a kapalným, tzv. kaučukovitý stav. V tomto stavu se dá polymer poměrně malou silou deformovat do neobvyklé míry, tudíž jej nelze definovat jako tuhou látku, ale ani jako kapalinu, protože při deformaci nedochází k nevratnému toku, který je charakteristický pro stav plastický – kapalný. Polymery tedy mohou existovat ve čtyřech fázových stavech, a to v krystalickém nebo ve třech amorfních (skelném, kaučukovitém nebo plastickém). Ve kterém z těchto stavů se polymer nachází za běžných podmínek a jak široké jsou teplotní rozmezí těchto jeho stavů, rozhoduje především chemické složení a molekulová hmotnost makromolekulární látky.

Charakterizovat zvláštní fázové polymerní stavy, tedy určit, jak dalece jsou amorfními kapalinami, tuhými látkami nebo krystalickými, je hodně obtížné. Amorfní polymer lze z hlediska chování za různých teplot charakterizovat teplotou skelného přechodu T_g , tzv. zesklenní, a krystalický polymer teplotou tání T_m . Kdybychom jsme si zvolili jako charakteristický projev polymeru deformaci vznikající působením určité síly po určitou dobu za dané teploty a kdybychom provedli měření v co nejkratším teplotním rozmezí, získali

bychom tzv. termomechanickou křivku, která je charakteristická pro každý polymer. Příklad termomechanické křivky je uveden na obr. 3.2, kde křivka 1 znázorňuje amorfní polymer a křivky 2 a 3 znázorňují dva různé krystalické polymery.

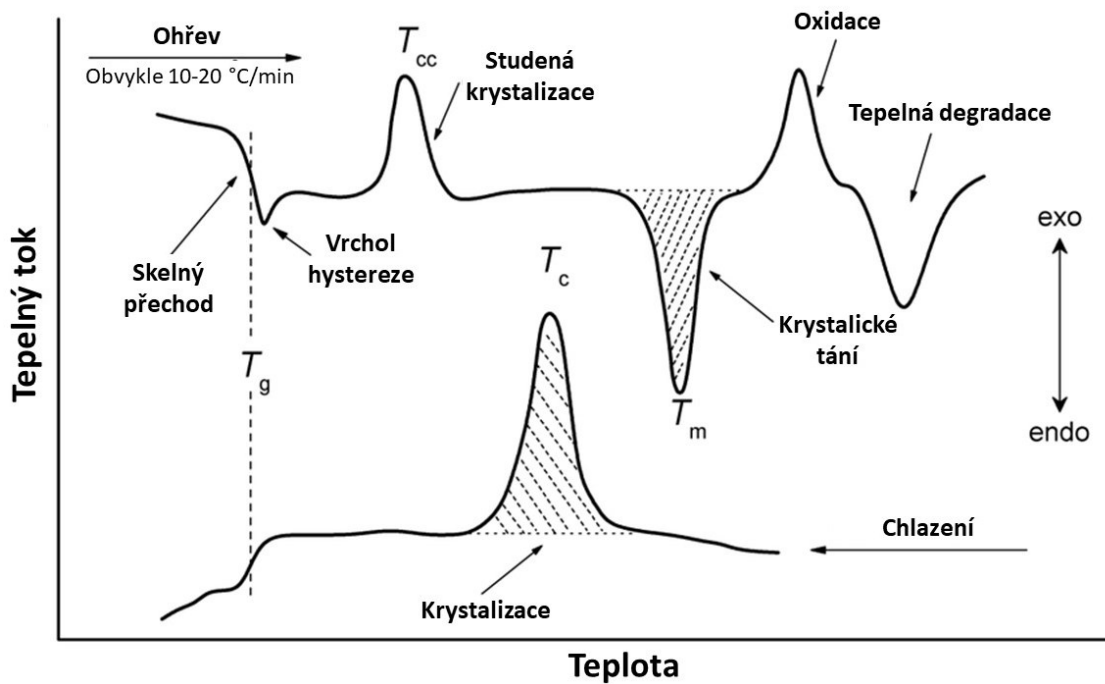


Obr. 3.2 Termomechanická křivka. [32]

Teplota tání T_m vymezuje oblast krystalického stavu, oblast skelného (amorfního) stavu vymezuje teplota skelného přechodu T_g . Rozmezí teplot skelného přechodu T_g a toku T_f odpovídá kaučukovité oblasti. V této oblasti se deformace mění velmi málo s teplotou a deformace je převážně vratná. V oblasti teploty toku T_f dochází v důsledku zahřívání k poměrně náhlému a značnému růstu deformace, protože se začne projevovat viskózní tok, který se vyznačuje nevratnou deformací. Polymer se nad touto teplotou nachází v plastickém stavu.

Ne všechny polymery mohou existovat ve všech třech amorfních fázových stavech. Takové polymery mohou mít teploty skelného přechodu a teploty toku vyšší než teplota rozkladu. Takové polymery lze charakterizovat např. pouze kaučukovitým a skelným stavem, nebo jen stavem skelným, jako je tomu u celulózy. [32]

Fázové změny vzorků polymerů je možné zkoumat pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC). Metodou DSC je možné získat charakteristické teploty jako je teplota tání nebo skelného přechodu, nebo specifického tepla tání, krystalinity, a je možné provádět i kontrolu vyžhání nebo vytvrzení. Výsledkem měření je záznam vyjadřující tepelný tok jako funkci teploty nebo času. Schématické křivky ohřevu a chlazení diferenční skenovací kalorimetrie typického polymeru jsou zobrazeny na obr. 3.3 na str. 42. [35]



Obr. 3.3 Schématické křivky ohřevu a chlazení DSC dle [36].

Zkouška diferenční kalorimetrie byla použita jako jedna z metod pro vyhodnocení ovlivnění struktury vybraných polymerů po ozáření laserovým paprskem v praktické části mé diplomové práce. V praktické části je řešeno, k jakým změnám došlo ve struktuře vybraných polymerních materiálů po ozáření laserovým paprskem při procesu řezání. Vybrané typy polymerů mají odlišnou strukturu i vlastnosti, a tedy i působení laserového paprsku se bude projevovat u každého polymeru jinými strukturními změnami.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Práce posuzuje závislost procesních parametrů laseru ILS 3 – NM, především řezné rychlosti, během procesu řezání, na strukturní změny vybraných typů polymerů. Možné změny ve struktuře nařezaných vzorků byly zkoumány pomocí infračervené vibrační spektroskopie (FTIR), diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) a rentgenové difrakční analýzy. Tyto měření jsou doplněna posouzením drsnosti naskenovaných povrchů řezných ploch vzorků. Cíle práce jsou:

- vyhotovení vzorků z polymerních materiálů
- posouzení možných strukturálních změn pomocí laboratorních zkoušek
- měření drsnosti řezných ploch
- vyhodnocení a porovnání naměřených dat

5 VYBRANÉ TYPY POLYMERŮ

Pro experiment bylo zvoleno šest zástupců nejvíce používaných polymerů ve výrobním průmyslu, a to polyamid 6, polyoxymethylen, polypropylen, polykarbonát, polystyren a polymethylmethakrylát. Jednotlivé typy polymerů jsou popsány níže.

5.1 Polyamid 6 (PA6) – NOVAMID B30 P

Nejběžnější polyamidy jsou polyamidy alifatické. Alifatické polyamidy jsou lineární polymery, které jsou charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž se pravidelně střídají amidové skupiny – CONH–. Typické polyamidy v tuhém stavu jsou krystalické z 30 až 50 % a jsou neprůhledné. Vodíkové můstky propojují mezi amidovými skupinami řetězové molekuly. Jejich množství má vliv na krystalickou strukturu, bod skelného přechodu, tání a většinu dalších vlastností. Polyamidy mají vysokou houževnatost, tvrdost, odolnost proti oděru a dobré elektroizolační charakteristiky. Jednotlivé typy polyamidů se výrazně liší bodem tání, skelného přechodu a rozpustností v různě koncentrované kyselině mravenčí za normální teploty. [32][37]

Pro tuto práci byl použit polyamid 6 s obchodním názvem NOVAMID B30 P. Jedná se o tepelně stabilizovaný typ polyamidu 6, který je určený především ke vstřikování. Využívá se převážně k výrobě elektrických součástí. Základní fyzikální vlastnosti tohoto typu polyamidu 6 jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

5.2 Polyoxymethylen (POM) – DELRIN 107 NC010

Polyoxymethylen je termoplastický polymer na bázi formaldehydu a patří do skupiny polyacetalů. Vyznačuje se vysokou houževnatostí až do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, proto je vhodný na výrobu předmětů, které odolávají náhlým rázům (klín západky u dveří automobilu, ozubená kola). Mají malý součinitel tření, proto jsou vhodné pro výrobu ložisek bez mazání, popř. s malým mazáním. Mají vysokou odolnost proti oděru, dobré elektroizolační vlastnosti a vysokou odolnost vůči organickým rozpouštědlům. Tento polymer má vysoký stupeň krystalinity.

Polyoxymethylen se převážně zpracovává vstřikováním, a to až z 90 %, dále pak vytlačováním a vyfukováním při teplotě $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $210\text{ }^{\circ}\text{C}$. [37]

Pro tuto práci byl použit polyoxymethylen s obchodním názvem DELRIN 107 NC010. Jedná se o vysoce viskózní acetalový homopolymer s UV stabilizátory. Je vhodný ke zpracování vstřikováním na konstrukční díly. Základní fyzikální vlastnosti tohoto polyoxymethylenu jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

5.3 Polypropylen (PP) – TATREN IM 12 59

Polypropylen je významný polymer s mnohostranným použitím, který patří do skupiny polyolefinů. Má prakticky nepolární strukturu a je neprůhledný vzhledem ke stupni krystalinity, který dosahuje 60 až 75 %. Polypropylen má vyšší teplotu měknutí a tím i použitelnost při vyšších teplotách v porovnání s lineárním polyethylenem, má taky nižší hustotu, menší odolnost vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti. Na druhou stranu má vyšší pevnost, tvrdost a odolnost vůči oděru.

Polypropylen se zpracovává vstřikováním při teplotě 205 °C až 280 °C a vytlačováním při teplotě 200 °C až 270 °C. Polypropylen se vzhledem k jeho dobrým mechanickým vlastnostem, tuhosti, pevnosti a dobrým elektroizolačním vlastnostem, používá na součásti strojů a přístrojů v automobilovém a spotřebním průmyslu. [32][37]

V této práci byl použit polypropylen obchodně nazývaný TATREN IM 12 59. Jedná se o kopolymer s dobrou stabilitou při zpracování a se střední tekutostí. Vyznačuje se především vysokou tuhostí a odolností proti nárazu. Tento materiál je určený zejména ke vstřikování výrobků při teplotě 190 °C až 250 °C. Je také vhodný pro výrobu farmaceutických obalových produktů. Základní fyzikální vlastnosti tohoto typu polypropyleny jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

5.4 Polykarbonát (PC) – LEXAN 923

Obecně jsou polykarbonáty polyestery kyseliny uhličitě a symetrických aromatických dihydroxysloučenin obsahující dvě fenolická jádra, která jsou spojena můstkem, odvozeným od alkylu, nebo atomem kyslíku či síry. Polykarbonáty mají výborné mechanické a dielektrické vlastnosti, které jsou konstantní v širokém rozmezí teplot od -70 °C do 140 °C. Mají také malou nasákavost, značnou povětrnostní odolnost, transparentci, rozměrovou stabilitu, jsou chemicky odolné a snadno zpracovatelné. Polykarbonáty mají vysokou rázovou houževnatost i za velmi nízkých teplot. Tento materiál je možné zpracovávat běžně používanými technologiemi jiných termoplastů, jako je vstřikování, při teplotách 280 °C až 310 °C. [32][37]

V této práci byl použit polykarbonát s obchodním názvem LEXAN 923. Tento typ polykarbonátu je neprůhledné barvy, má nízkou viskozitu, zpomaluje hoření, snižuje emise toxických plynů a je UV stabilizovaný. Základní fyzikální vlastnosti tohoto typu polykarbonátu jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

5.5 Polystyren (PS) – STYRON 495

Polystyren patří mezi nejstarší syntetické polymery. V dnešní době patří polystyren společně s polyolefiny a polyvinylchloridem k nejpoužívanějším polymerům. Polystyren je dosti křehký, tvrdý, vodojasný polymer, tedy že propouští z 90 % viditelné světlo. Má vysoký lesk s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi. Za běžných podmínek má dostatečnou odolnost vůči oxidaci, ale jeho použití se nedoporučuje ve venkovních prostorech, jelikož fotooxidací žloutne a křehne. Zpracování polystyrenu je snadné a provádí se především vstřikováním při teplotě 180 °C až 240 °C. Z důvodu jeho křehkosti se používá hlavně k výrobě nenáročného spotřebního zboží, jako jsou obaly, kelímky, misky, podnosy, ozdobné předměty a dětské hračky. [32][37]

V této práci byl použit polystyren s obchodním názvem STYRON 495. Jedná se o vysoce odolný polystyren s vysokou rázovou houževnatostí, dobrou tepelnou odolností a vysokou tuhostí. Používá se především na výrobky pro spotřební elektroniku. Základní fyzikální vlastnosti tohoto typu polystyrenu jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

5.6 Polymethylmethakrylát (PMMA)

Polymethylmethakrylát je nejvíce používaný z esterových polymerů. Vlastností nejvíce charakterizující polymethylmethakrylát je jeho čírost a naprostá bezbarvosť i ve velkých tloušťkách vrstev. Má velmi vysokou odolnost proti povětrnosti. Polymethylmethakrylát je kaučukovitý a snadno tvarovatelný při teplotě 130 °C až 140 °C. Vykazuje také vynikající tvarovou paměť. Propustnost světla v celém rozsahu spektra je cca 92 %. Polymethylmethakrylát má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává vodě, kyselinám a zředěným alkáliím. Je dobře mechanicky obrobitelný a bez zatížení odolává teplotě okolo 80 °C. Nevýhodou je, že má nízkou povrchovou tvrdost.

Blokový polymethylmethakrylát je relativně drahý plast, který se používá především při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě krytů přístrojů, kancelářských potřeb a hodinkových sklíček. Významné aplikace polymethylmethakrylátu jsou i v zubní protetice. [37]

V případě tohoto typu polymeru nebyl zjištěn přesný obchodní název. Z toho důvodu byly použity obecné parametry pro polymethylmethakrylát. Základní fyzikální vlastnosti polymethylmethakrylátu jsou uvedeny v tab. 5.1 na str. 48.

Tab. 5.1 Základní fyzikální vlastnosti vybraných typů polymerů.

Parametry materiálů		Materiál					
		PA6	POM	PP	PC	PS	PMMA
		Typ polymeru					
		NOVAMID B30 P	DELFIN 107 NC010	TATREN IM 12 59	LEXAN 923	STYRON 495	
ρ (kg / m ³)		1120	1420	900	1217	1050	1170 – 1200
T_m (°C)		223	178	157 – 165	-	-	-
T_g (°C)		Zasucha 70 Zamokra 20	-50	-15	151	98	110
E (MPa)		1050	3100	1450	2240	2000	3000 – 3300
Teplota použití (°C)	Max. krátkodobá	140 – 180	110 – 140	140	160	60 – 80	85 – 100
	Max. dlouhodobá	80 – 100	90 – 110	100	135	50 – 70	65 – 90
	Min. dlouhodobá	-30	-60	-10	-100	-10	-40

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vzorky z vybraných typů polymerů byly zhotoveny pomocí laserového zařízení ILS 3 – NM ze vstřikovaných zkušebních tělísek.

6.1 Vstřikování vzorků

Vstřikování zkušebních tělísek probíhalo na vstřikovacím stroji Allrounder 470 E–1000–290 (35) (obr. 6.1). Jedná se o elektrický vstřikovací stroj. Základní parametry tohoto typu vstřikovacího stroje jsou uvedeny v tab. 6.1.



Obr. 6.1 Vstřikovací stroj Allrounder 470 E–1000–290 (35).

Tab. 6.1 Základní parametry vstřikovacího stroje Allrounder 470 E–1000–290 (35).

Parametr	Hodnota
Vzdálenost mezi sloupky (mm)	470 x 470
Uzavírací síla (kN)	1000
Rozměr upínací desky (mm)	637 x 637
Maximální kalkulovaný objem materiálu (cm ³)	144

Parametry vstřikování pro jednotlivé typy polymerů jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 6.2).

Tab. 6.2 Parametry vstřikovacího procesu zkušebních tělísek pro zhotovení vzorků.

Parametry vstřikování		Materiál					
		PA 6	POM	PP	PC	PS	PMMA
		Typ polymeru					
		NOVAMID B30 P	DELFIN 107 NC010	TATREN IM 12 59	LEXAN 923	STYRON 495	
Teplota topných pásem (°C)	1. pásmo (pod násypkou)	240	195	200	280	200	220
	2. pásmo	245	200	205	285	205	225
	3. pásmo	250	205	210	285	210	230
	4. pásmo	255	210	215	290	215	235
	5. pásmo (na konci šneku)	260	215	220	290	220	240
Teplota temperace (°C)		60	80	35	70	35	70
Vstřikovací tlak (bar)		350	600	500	600	500	600
Dotlak (bar)		300	500	400	500	400	500
Doba dotlaku (s)		20	20	20	20	20	20
Doba chlazení (s)		30	30	30	30	30	30
Vstřikovací rychlost (mm / s)		60	60	60	60	60	60
Dráha dávkování (mm)		70	70	70	70	70	70
Bod přepnutí (mm)		25	25	25	25	25	25
Dekomprese (bar)		10	5	2	5	3	5

6.2 Laserové řezání vzorků

Vzorky byly nařezány pomocí laserového zařízení ILS 3 – NM (obr. 6.2), které komunikuje se softwarem Corel Draw. Jedná se o CO₂ laser, který pracuje v pulsním režimu. Tento typ laseru je určený především pro opracování materiálů jako je dřevo, papír, sklo, kůže, kámen a plasty.



Obr. 6.2 Laserové zařízení ILS 3 – NM.

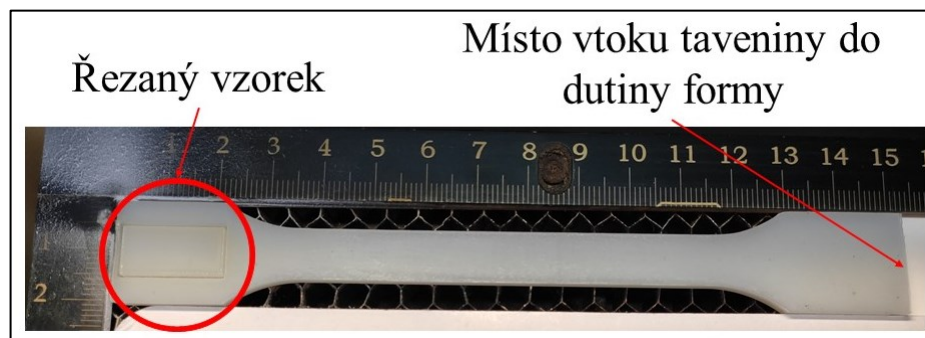
Procesní parametry laserového zařízení, výkon P a řezná rychlost v_f , se nastavují procentuálně (1–100 %) z maximálních hodnot těchto parametrů ($P_{\max} = 100$ W; $v_{f\max} = 1524$ mm / s). Parametry laserového zařízení ILS 3 – NM jsou uvedeny v tab. 6.3.

Tab. 6.3 Parametry laserového zařízení ILS 3 – NM.

Model laseru	ILS 3-NM-100
Maximální výkon laseru	100 W
Maximální řezná rychlost	1524 mm / s
Rozlišení	1000, 500, 333, 250, 200, 166 (DPI)
Maximální velikost obrobku	Šířka 660 mm, výška 495 mm, hloubka 200 mm
Paměť	64 MB / maximálně 99 souborů
LCD display zobrazuje	Název aktuálního souboru, výkon laseru, rychlost vektoru nebo rastru, pracovní čas, počet načtených souborů v paměti, nastavení a menu.
Provozní režimy	Vektorové řezání, rastrové gravírování a bodové vrtání
Vnější rozměry zařízení	Šířka 970 mm, výška 865 mm, hloubka 990 mm
Chlazení	Vzduchem

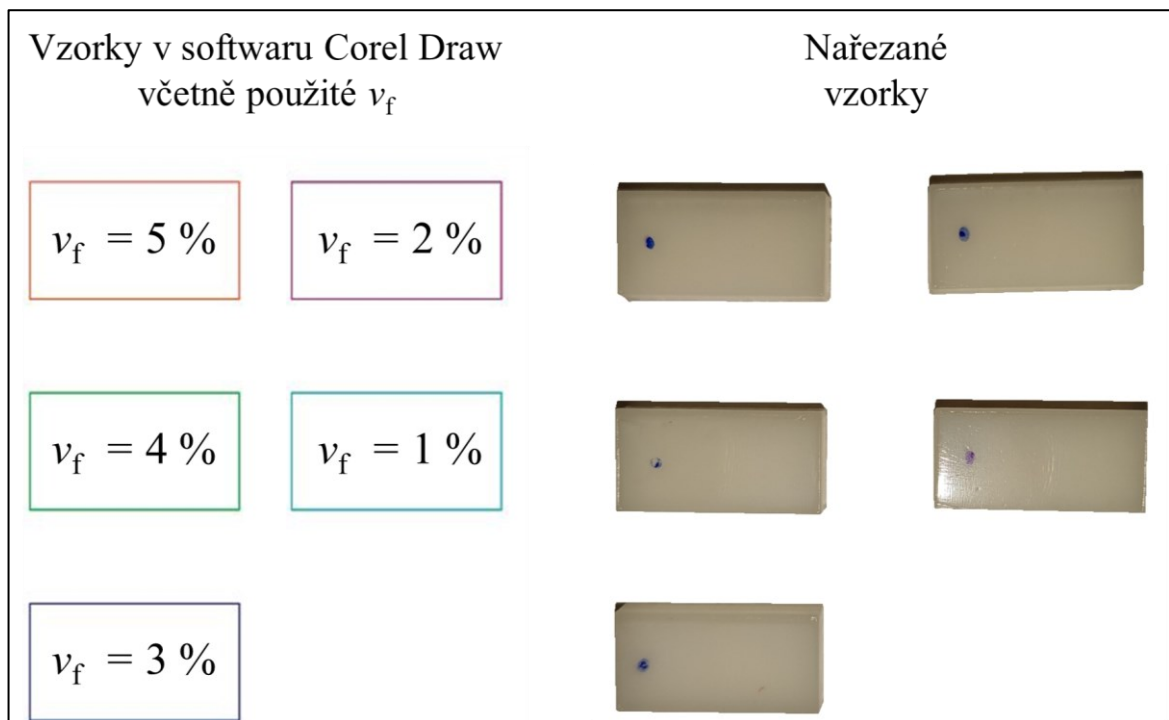
Pro zhotovení vzorků byla proměnlivým procesním parametrem řezná rychlost. Hodnoty řezné rychlosti byly nastaveny na 5 % (76,2 mm / s), 4 % (60,96 mm / s), 3 % (45 mm / s), 2 % (30,48 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) maximální řezné rychlosti. Výkon laseru zůstal pro všechny vzorky konstantní 100 W. Parametr DPI byl nastaven konstantně na hodnotu 1000. Pro řezání vzorků byla použita čočka s ohniskovou vzdáleností $f 1,5''$.

Tvar vzorků byly obdélníky vyřezané z části vstříkovaného zkušební tělíska nejvíce vzdáleného od místa vtoku taveniny do dutiny formy (obr. 6.3).



Obr. 6.3 Místo řezu vzorku na vstříkovaném zkušebním tělísku.

Rozměry vzorků byly 20 x 10 mm (Š x V) a jejich tloušťka byla 4 mm (obr. 6.4).



Obr. 6.4 Zhotovené vzorky řezány při konstantním výkonu laseru 100 W.

Procesní podmínky laserového řezání vzorků byly nastaveny konstantně na maximální hodnotu výkonu (100 W) a řeznou rychlost od 5 % (76,2 mm / s) do 1 % (15,24 mm / s), proto aby došlo k úplnému proříznutí vzorků, nebo alespoň k vytvoření dostatečně velké řezné spáry, aby mohly být nařezané vzorky následně vzájemně odděleny. Zároveň také maximální výkon laseru 100 W a nejnižší řezná rychlost 15,24 mm / s představovali pracovní podmínky, kdy laserový paprsek nejvíce tepelně působil na řezané vzorky.

7 MĚŘENÍ INFRAČERVENÉ SPEKTROSKOPIE (FTIR)

Infračervená spektroskopie je nedestruktivní analytická metoda měření, kdy nedochází k žádnému poškození měřeného vzorku, a přesto se získají informace o jeho složení. Naměřené hodnoty vibračních energií jsou spjaty s pevností chemických vazeb, ale také s molekulovou strukturou, tedy molekulovou geometrií a hmotnostmi jader.

Podstatou měření infračervené spektroskopie je interakce infračerveného záření se zkoumanou hmotou, kdy v případě pohlcení fotonu zkoumanou hmotou mluvíme o absorpční infračervené spektroskopii a v případě vyzáření fotonu pak o emisní infračervené spektroskopii. Infračervené záření je elektromagnetické záření v rozsahu vlnočtů $12\,500$ až 20 cm^{-1} a vlnových délek 800 nm až $0,5\text{ mm}$. K identifikaci a k určování chemické struktury je nejvíce využívána střední infračervená oblast, která odpovídá vlnočtu $4\,000$ až 200 cm^{-1} .

Energie fotonů infračerveného záření není dostatečná pro excitaci elektronů v molekulových orbitalech, ale postačuje ke změně vibračního stavu nebo rotačního stavu molekuly. Molekuly jsou tvořeny atomy, které nejsou spojeny rigidními vazbami, ale tyto vazby vykazují určitou pružnost. Máme tedy systém atomů, které mohou různými způsoby vibrovat. Výstupem měření infračervené spektroskopie je grafické znázornění závislosti absorbance A na vlnočtu v cm^{-1} . [38]

Pro měření vzorků byl použit spektrometr Nicolet AVATAR 320 ATR (obr. 7.1).



Obr. 7.1 Spektrometr Nicolet AVATAR 320 ATR.

Tento spektrometr pracuje s Fourierovou transformací. Označení spektrometru ATR (Attenuated Total Reflection) udává, že se jedná o techniku zeslabeného úplného odrazu. Tato technika je založena na principu jednoduchého nebo vícenásobného úplného odrazu záření na fázovém rozhraní zkoumaného vzorku a měřicího krystalu, který má dostatečně vysoký index lomu. Vzorek se pokládá na ATR krystal ZnSe tak, aby byli vzájemně v dokonalém kontaktu kvůli dokonalému průniku záření do vzorku. Svazek paprsků je přiveden soustavou zrcadel do krystalu tak, aby úhel dopadu na fázové rozhraní vyhovoval podmínce úplného odrazu. Jestliže zkoumaný vzorek absorbuje záření určité frekvence, pak tato složka bude v totálně odraženém záření zeslabena. Penetrační hloubka záření do povrchu je malá, řádově v jednotkách μm . [38]

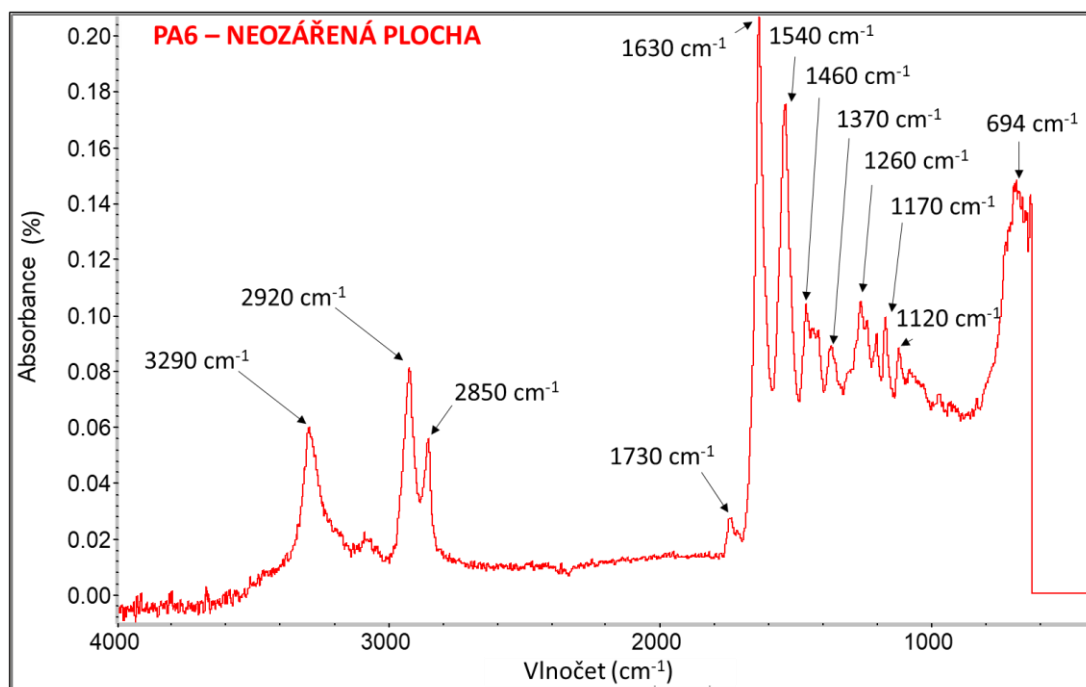
Počet skenů pro měření FTIR spekter vzorků byl nastaven na hodnotu 32. Zkoumané vzorky byly měřeny v místě vstupu laserového paprsku do řezaného materiálu. Měření vzorků probíhalo na vrchní části, na kterou byla nastavena ohnisková vzdálenost čočky laseru 1,5“, co nejbližší k ploše řezu (obr. 7.2). Vzorky byly zkoumány v tomto místě z toho důvodu, že laserový paprsek při vstupu do řezaného materiálu vykazuje největší výkon, který s postupným pronikáním paprsku hlouběji do materiálu mírně klesá. Dalo se tedy předpokládat, že se v tomto místě projeví největší změny ve struktuře zkoumaných vzorků.



Obr. 7.2 Oblast zkoumaného vzorku pro měření FTIR.

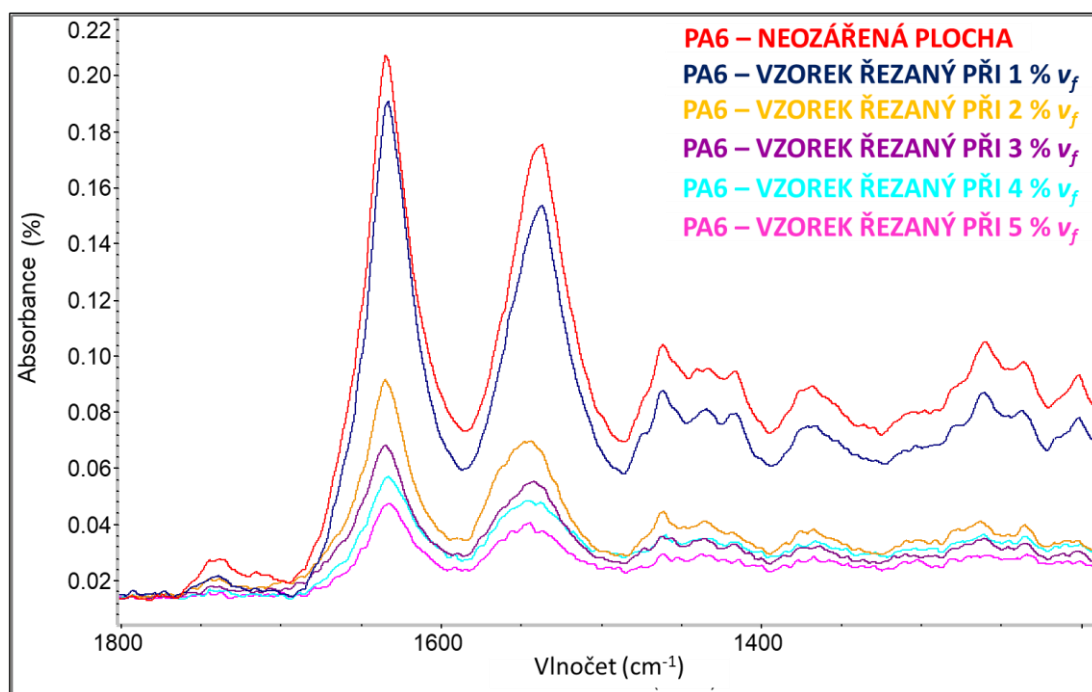
7.1 Výsledky měření FTIR vzorků PA6

Infračervené spektrum neozářené plochy laserovým paprskem vzorku PA6 je zobrazeno na obr. 7.3. FTIR spektrum materiálu PA6 ukazuje několik píků, které znázorňují absorbanci. První pík se nachází při vlnočtu 3290 cm^{-1} a jedná se o oblast N–H vazeb, které jsou vázané na vodík. Další píky se nacházejí v oblastech při vlnočtu 2920 a 2850 cm^{-1} . V těchto oblastech se nacházejí asymetrické (2920 cm^{-1}) a symetrické (2850 cm^{-1}) CH_2 vazby. Dále se ve FTIR spektru neozářené plochy PA6 nachází pík v oblasti vlnočtu 1730 cm^{-1} , zde se jedná o dvojně $\text{C}=\text{O}$ vazby. FTIR spektrum ukazuje také charakteristické píky amidových skupin. První amidová skupina zahrnuje dvojně $\text{C}=\text{O}$ vazby a $\text{C}-\text{N}$ vazby, oblast této amidové skupiny se vyskytuje při vlnočtu 1630 cm^{-1} . Druhou amidovou skupinu představují $\text{C}-\text{N}$ a $\text{N}-\text{H}$ vazby a nacházejí se v oblasti vlnočtu 1540 cm^{-1} . Třetí amidová skupina se nachází při vlnočtu 1460 cm^{-1} a představuje vazby $\text{N}-\text{H}$, $\text{C}-\text{C}$ a $\text{C}=\text{O}$. V oblasti vlnočtu 1370 cm^{-1} se nacházejí CH_2 vazby. Další charakteristický pík se nachází v oblasti vlnočtu 1260 cm^{-1} , zde se jedná o $\text{C}-\text{N}$ vazby. Pík v oblasti vlnočtu 1170 cm^{-1} určuje $\text{N}-\text{C}-\text{O}$ vazby. Předposlední pík nacházející se při vlnočtu 1120 cm^{-1} udává vazby $\text{C}-\text{C}$. Poslední charakteristická oblast se nachází při vlnočtu 694 cm^{-1} a tato oblast náleží vazbám $\text{N}-\text{H}$.



Obr. 7.3 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PA6.

Porovnávanou oblastí FTIR spekter vzorků PA6 byla oblast při vlnočtu 1800 až 1200 cm^{-1} (obr. 7.4). V této oblasti se nacházel charakteristický pík při vlnočtu 1730 cm^{-1} znázorňující dvojné C=O vazby, které se vytvářejí vlivem degradace. V této oblasti lze pozorovat změnu v naměřených spektrech, že největší absorbní pás vykazuje spektrum neozářeného vzorku PA6 a následně tento pás u vzorků řezaných při 5 % (76,2 mm / s) a 4 % (60,96 mm / s) řezné rychlosti téměř zmizel a při dále se snižující řezné rychlosti docházelo opět k růstu absorbního pásu C=O vazeb. Ovšem jelikož se jednalo o snížení spekter v celé oblasti vlnočtu, nemohla tato změna být brána jako prokazatelná.

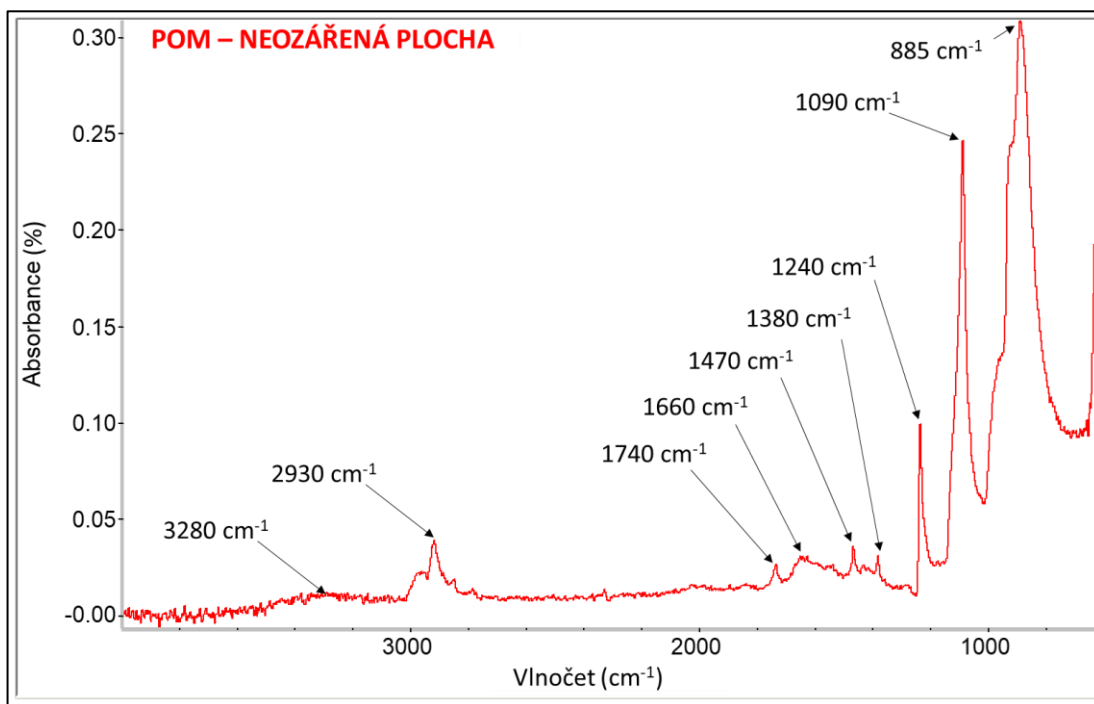


Obr. 7.4 Porovnání FTIR spekter vzorků PA6 v oblasti vlnočtu 1800 až 1200 cm^{-1} .

7.2 Výsledky měření FTIR vzorků POM

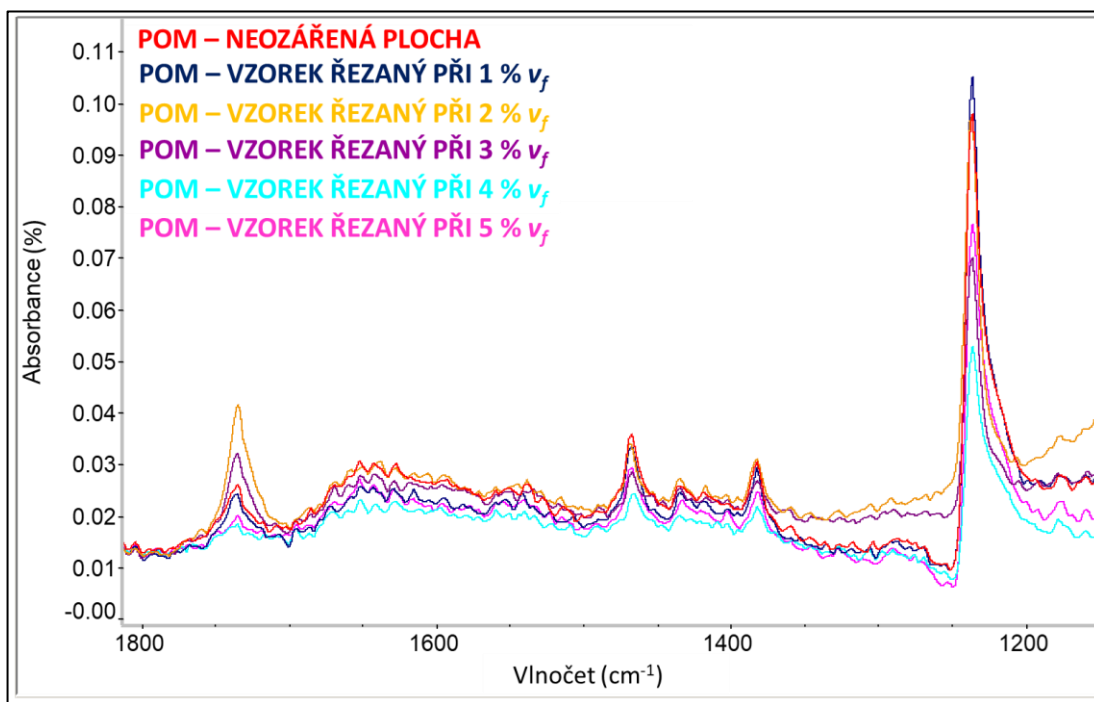
Infračervené spektrum neozářeného vzorku POM laserovým paprskem je uvedeno na obr. 7.5 na str. 58. FTIR spektrum neozářeného materiálu POM ukazuje několik charakteristických absorbních píků. První nepatrný nárůst absorbance lze vidět při vlnočtu 3280 cm^{-1} , tento nepatrný nárůst určuje výskyt O–H vazeb. Druhý pík lze vidět při vlnočtu 2930 cm^{-1} , tento nárůst absorbance naznačuje výskyt CH_2 vazeb. Další nárůst absorbance lze pozorovat v oblasti vlnočtu 1740 cm^{-1} , tento nárůst určuje výskyt dvojných C=O vazeb. Nárůst absorbance v oblasti vlnočtu 1660 cm^{-1} určuje přítomnost esterových vazeb ve struktuře materiálu POM. Pík v oblasti vlnočtu 1470 cm^{-1} znamená, že se ve struktuře materiálu objevují další CH_2 vazby. Po nárůstu absorbance v oblasti vlnočtu 1470 cm^{-1} lze také vidět nárůst absorbance při vlnočtu 1380 cm^{-1} . Tento nárůst je opět přičítán výskytu

CH₂ vazeb. V oblasti vlnočtu 1240 cm⁻¹ a 1090 cm⁻¹ se vyskytují C–O–C vazby. Poslední absorbní pík v oblasti 885 cm⁻¹ poukazuje na výskyt C–O vazeb ve struktuře vzorků.

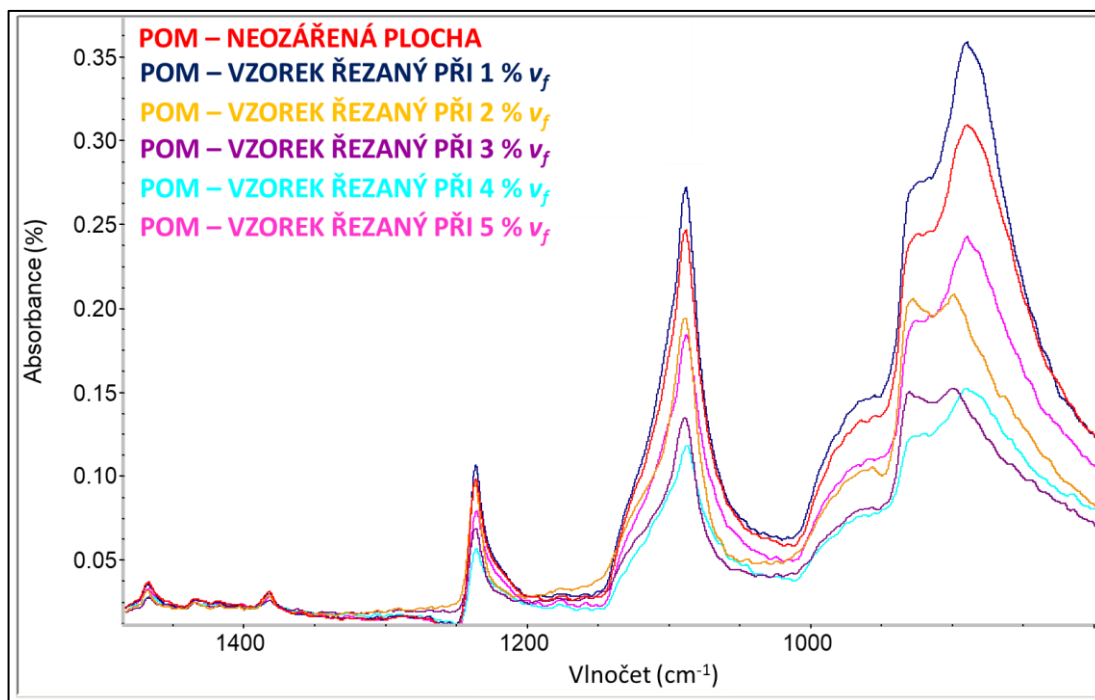


Obr. 7.5 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem POM.

Struktury vzorků POM po ozáření laserem byly zkoumány opět ve dvou oblastech vlnočtů. První oblast byla při vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹ (obr. 7.6) a druhá oblast při vlnočtu 1500 až 800 cm⁻¹ (obr. 7.7, str. 59).



Obr. 7.6 Porovnání FTIR spekter vzorků POM v oblasti vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹.



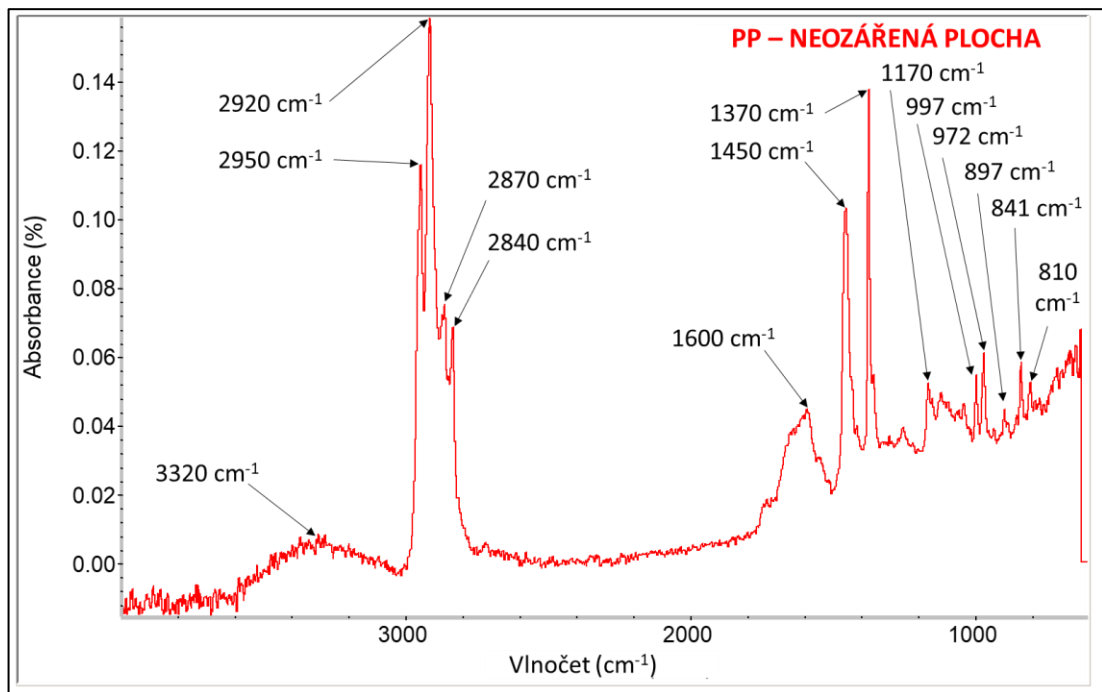
Obr. 7.7 Porovnání FTIR spekter vzorků POM v oblasti vlnočtu 1500 až 800 cm^{-1} .

V obou oblastech vlnočtů pro porovnání změn ve struktuře vzorků po ozáření laserovým paprskem nebyla opět zjištěna žádná významná změna v těchto spektrech a všechny charakteristické absorpční pásy byly zachovány. Na obr. 7.7 lze pozorovat změnu u vzorků řezaných při 2 % (30,48 mm / s) a 3 % (45 mm / s) řezné rychlosti. U spekter těchto vzorků lze pozorovat při vlnočtu 885 cm^{-1} změnu v C–O vazbách, kde došlo k vytvoření rovnoměrného absorpčního dvoj – pásu. Ovšem kvůli naměřenému FTIR spektru vzorku řezaného při 1 % řezné rychlosti (15,24 mm / s), které vykazuje charakteristický absorpční pás jako ukazují spektra vzorků řezaných při 5 % (76,2 mm / s) a 4 % (60,96 mm / s) řezné rychlosti a spektrum neozářeného vzorku, nebyla tato změna prokázána.

7.3 Výsledky měření FTIR vzorků PP

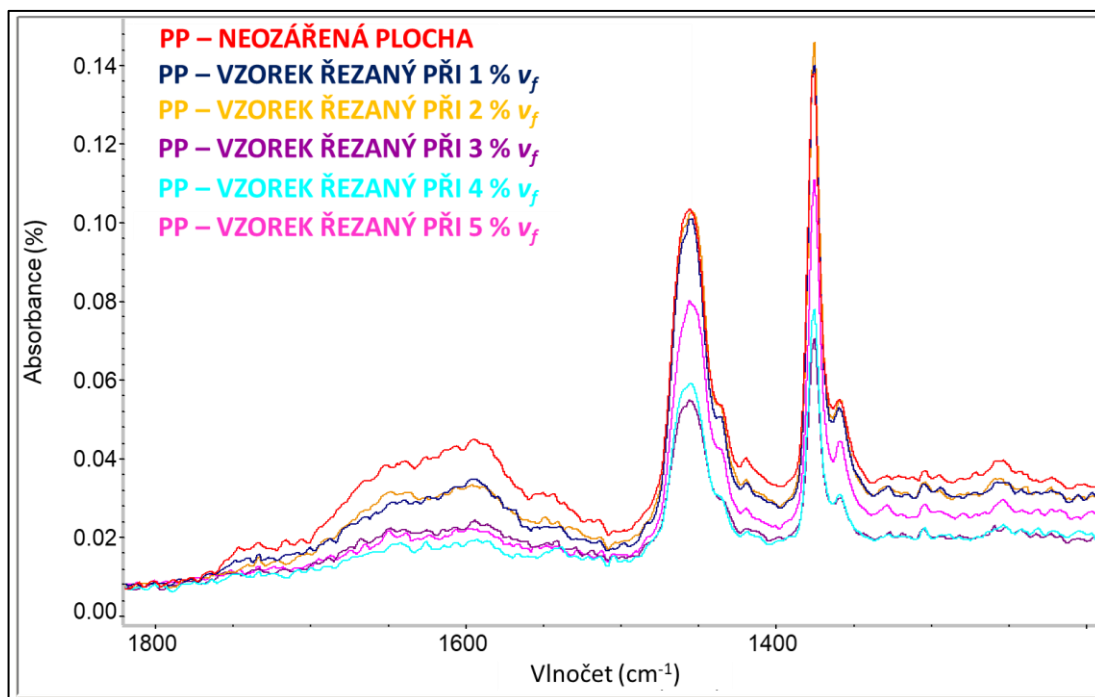
Na obr. 7.8 na str. 60 lze vidět FTIR spektrum neozářeného vzorku laserovým paprskem polypropylenu. V tomto spektru můžeme pozorovat nárůst absorbance v oblasti vlnočtu 3320 cm^{-1} , což je způsobeno nárůstem O–H vazeb. Dále je možné vidět čtyři vysoké úzké píky, z nich první dva při vlnočtu 2950 cm^{-1} a 2920 cm^{-1} jsou připisovány CH_3 vazbám. Další dva píky z této čtveřice při vlnočtu 2870 cm^{-1} a 2840 cm^{-1} jsou vázány s CH_2 vazbami ve struktuře vzorku. Nárůst absorbance v oblasti 1600 cm^{-1} značí výskyt ketonových vazeb. Další pík se nachází při vlnočtu 1450 cm^{-1} a značí opět výskyt CH_2 vazeb. Stejně tak vysoký úzký pík při vlnočtu 1370 značí výskyt vazeb CH_3 . Nárůst absorbance v oblasti vlnočtu

1170 cm^{-1} značí výskyt vazeb C–H, CH_3 a C–C. Malý pík při vlnočtu 997 cm^{-1} ukazuje, že se ve struktuře vzorku nacházejí C–H a CH_3 vazby. Podobný pík tomu předchozímu nacházející se při vlnočtu 972 cm^{-1} a pík při vlnočtu 897 cm^{-1} naznačují, že se ve struktuře objevují C–C a CH_3 vazby. Předposlední pík v oblasti vlnočtu 841 cm^{-1} ukazuje na výskyt CH_2 a C– CH_3 vazeb. Poslední pík značí výskyt vazeb CH_2 , C–C a C–CH a nachází se v oblasti vlnočtu 810 cm^{-1} .



Obr. 7.8 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PP.

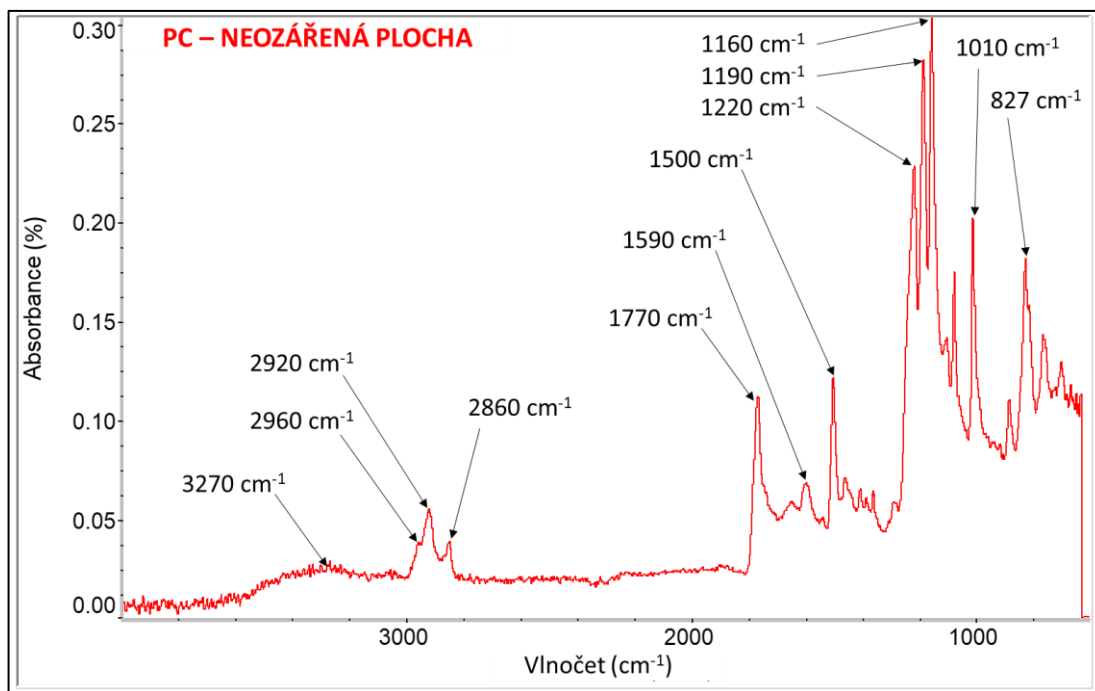
Pro vzorky polypropylenu byla zvolena oblast pro zkoumání změn v jejich struktuře v oblasti vlnočtu 1800 až 1200 cm^{-1} (obr. 7.9, str. 61). Z oblastí FTIR spekter pro porovnání struktur vzorků nebyly patrné žádné výrazné změny. Na obr. 7.9 lze vidět mírnou změnu v oblasti vlnočtu 1600 cm^{-1} , kde se jedná o dvojně C=O vazby. Lze vidět, že nejvíce těchto vazeb se nachází u neozářeného vzorku, kde tyto vazby pravděpodobně vznikly během procesu vstřikování. Následně by se dalo říct, že poté u vzorků řezaných při 5% řezné rychlosti ($76,2\text{ mm / s}$) došlo k výraznému poklesu těchto vazeb a poté při snižování řezné rychlosti laseru docházelo k opětovnému nárůstu těchto vazeb. Z důvodu poklesu spekter v celém rozsahu vlnočtu však tyto změny nemohly být brány jako průkazné.



Obr. 7.9 Porovnání FTIR spekter vzorků PP v oblasti vlnočtu 1800 až 1200 cm^{-1} .

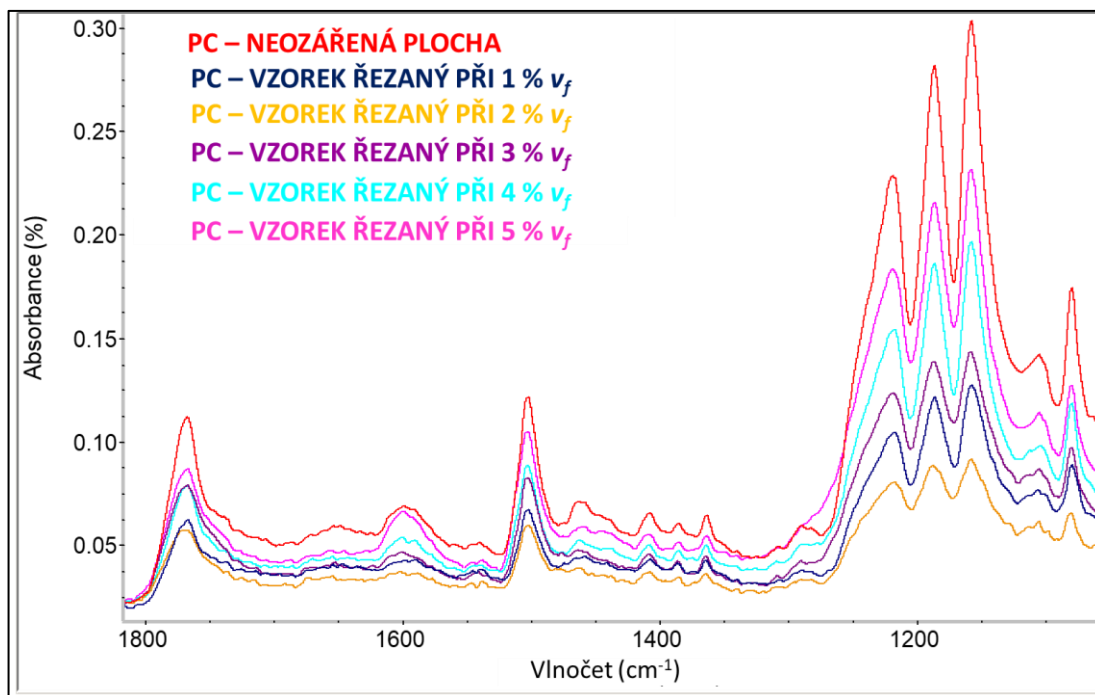
7.4 Výsledky měření FTIR vzorků PC

FTIR spektrum neozářeného vzorku PC laserovým paprskem je zobrazeno na obr. 7.10 na str. 62. Stejně jako u předchozích materiálu se i zde nacházejí vibrační píky, charakteristické pro určité chemické vazby. První takový malý pík lze pozorovat při vlnočtu 3270 cm^{-1} . Tento mírný nárůst absorbance je spojený s výskytem O–H vazeb. Dále je vidět ve spektru vzorku neopracovaného laserem skupina třech píku (2960 , 2920 a 2860 cm^{-1}) tyto píky souvisí s výskytem C–H vazeb ve struktuře vzorků. Oblast vlnočtu 2960 cm^{-1} je charakteristická pro CH_2 vazby a oblast vlnočtu 2860 cm^{-1} je typická pro CH_3 vazby. Dále je ve spektru neozářeného vzorku PC vidět vysoký pík v oblasti vlnočtu 1770 cm^{-1} , který znázorňuje výskyt dvojných vazeb C=O. Pík v oblasti vlnočtu 1590 cm^{-1} značí výskyt vazeb C=C. Následující pík v oblasti vlnočtu 1500 cm^{-1} dává informaci o výskytu C–H vazeb ve struktuře vzorku. Nárůst absorbance v oblasti 1220 cm^{-1} určuje výskyt CH_2 vazeb. Dva nejvyšší píky spektra při vlnočtu 1190 cm^{-1} a 1160 cm^{-1} značí výskyt C–O vazeb. Píky v oblastech vlnočtu 1010 cm^{-1} a 827 cm^{-1} jsou přičítány C–H vazbám.



Obr. 7.10 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PC.

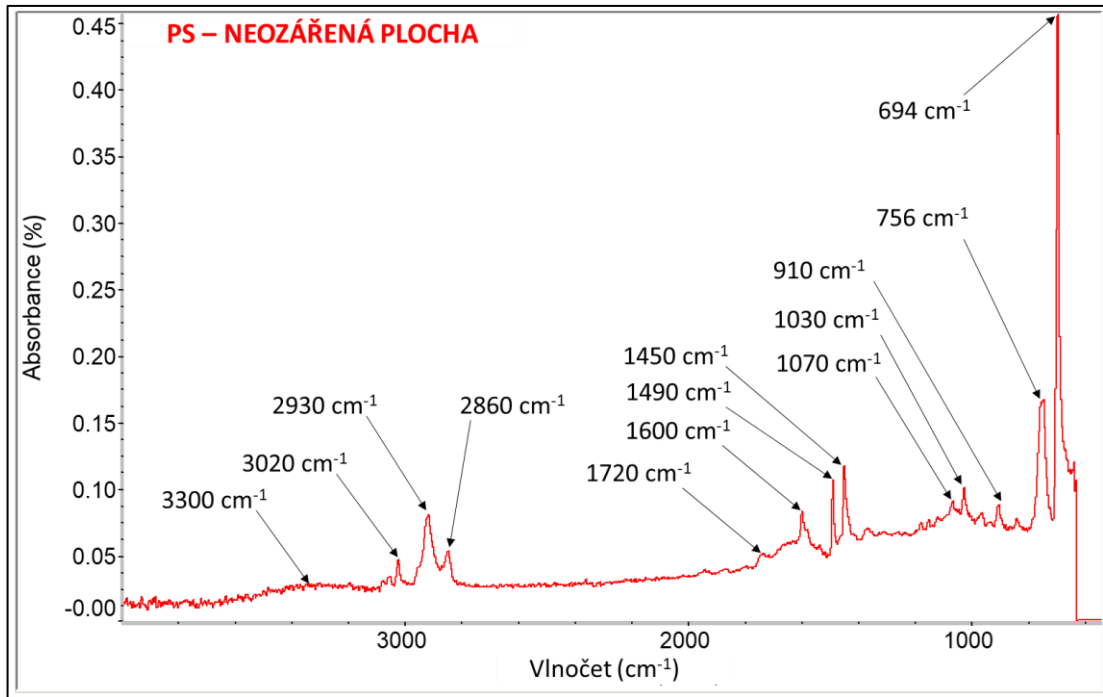
Pro porovnání změn ve struktuře vzorků PC byla vybrána oblast 1800 až 1050 cm^{-1} . V této oblasti se nachází charakteristické absorpční pásy pro dvojnásobné C=O vazby při vlnětu 1770 cm^{-1} a při vlnětu 1590 cm^{-1} pro vazby C=C. Na obr. 7.11 na str. 63 jsou zobrazeny naměřená spektra vzorků PC. Zde lze vidět, že se v naměřených spektrech nevyskytovala opět žádná výrazná změna. Lze říct, že u vzorku řezaného při 5 % řezné rychlosti (76,2 mm / s) lze pozorovat změnu v jeho naměřeném FTIR spektru, která spočívá ve větším absorpčním pásu při vlnětu 1590 cm^{-1} , kde se jedná o C=C vazby. Ovšem tento zvýšený výskyt C=C vazeb nebyl potvrzen FTIR měřeními ostatních vzorků, tudíž nebyl brán jako průkazný.



Obr. 7.11 Porovnání FTIR spekter vzorků PC v oblasti vlnočtu 1800 až 1050 cm^{-1} .

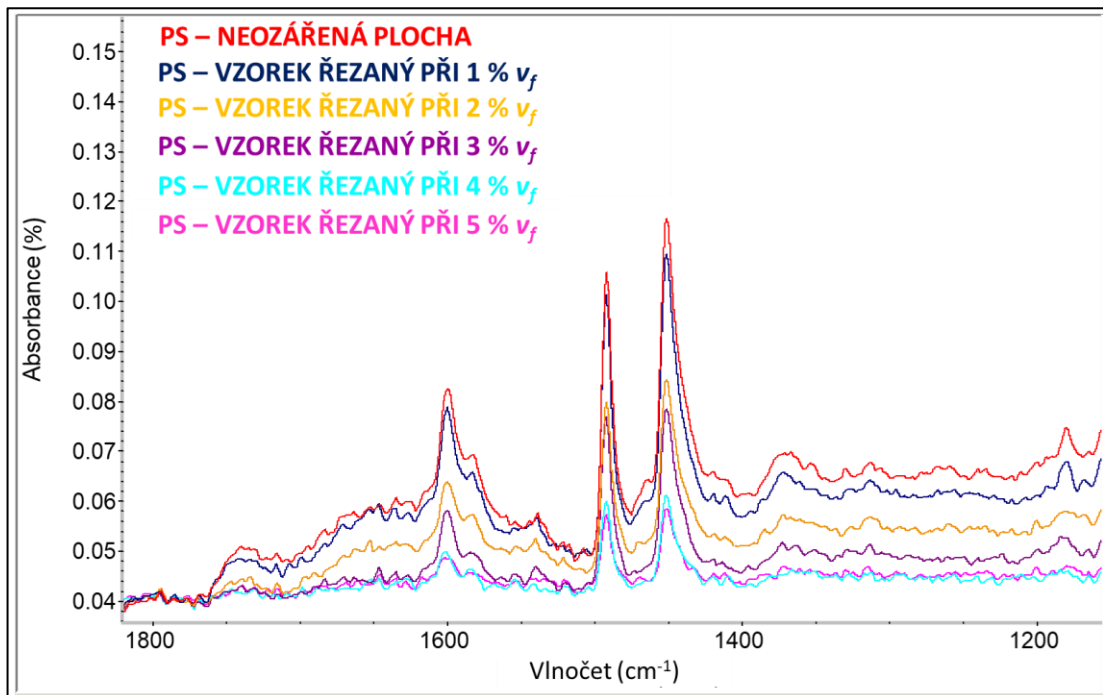
7.5 Výsledky měření FTIR vzorků PS

FTIR spektrum vzorku PS, který nebyl řezán laserem lze vidět na obr. 7.12 na str. 64. V jeho spektru se nacházejí jednotlivé absorpční píky, které jsou charakteristické pro určité chemické vazby. První menší nárůst absorbance lze pozorovat při vlnočtu 3300 cm^{-1} , což lze připisovat O–H vazbám ve struktuře vzorku. Další, taktéž méně výrazný nárůst absorbance se vyskytuje v oblasti vlnočtu 3020 cm^{-1} , tento pík naznačuje výskyt aromatických C–H vazeb. Další, o poznání větší nárůst absorbance se vyskytuje při vlnočtu 2930 cm^{-1} a značí výskyt asymetrických CH_2 vazeb. Pík v oblasti vlnočtu 2860 cm^{-1} značí taktéž vazby CH_2 , ale v tomto případě se jedná o symetrické vazby. Pík v oblasti vlnočtu 1720 cm^{-1} značí výskyt dvojných C=O vazeb. Přítomnost dvojných vazeb C=C ve struktuře vzorku nám říkají píky v oblasti vlnočtu 1600 cm^{-1} a 1490 cm^{-1} . Absorbanční pás při vlnočtu 1450 cm^{-1} značí výskyt CH_2 vazeb. V oblasti vlnočtů 1070 cm^{-1} a 1030 cm^{-1} nám nárůst absorbance značí výskyt aromatických C–H vazeb. Píky při vlnočtu 910 cm^{-1} a 756 cm^{-1} nám značí opět výskyt C–H vazeb. Poslední absorpční pík v oblasti vlnočtu 694 cm^{-1} značí výskyt aromatických vazeb C–H ve struktuře vzorku.



Obr. 7.12 FTIR spektrum nezářené plochy laserovým paprskem PS.

K porovnání struktury vzorků ozářených laserem a vzorku nezářeného byla vybrána oblast vlnočtu, kde by se mohla vyskytovat změna v naměřených spektrech vzorků, tedy ve změně dvojných C=O vazeb, které vznikají v důsledku degradace. Tato oblast pro zkoumání spekter se nacházela při vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹ (obr. 7.13).

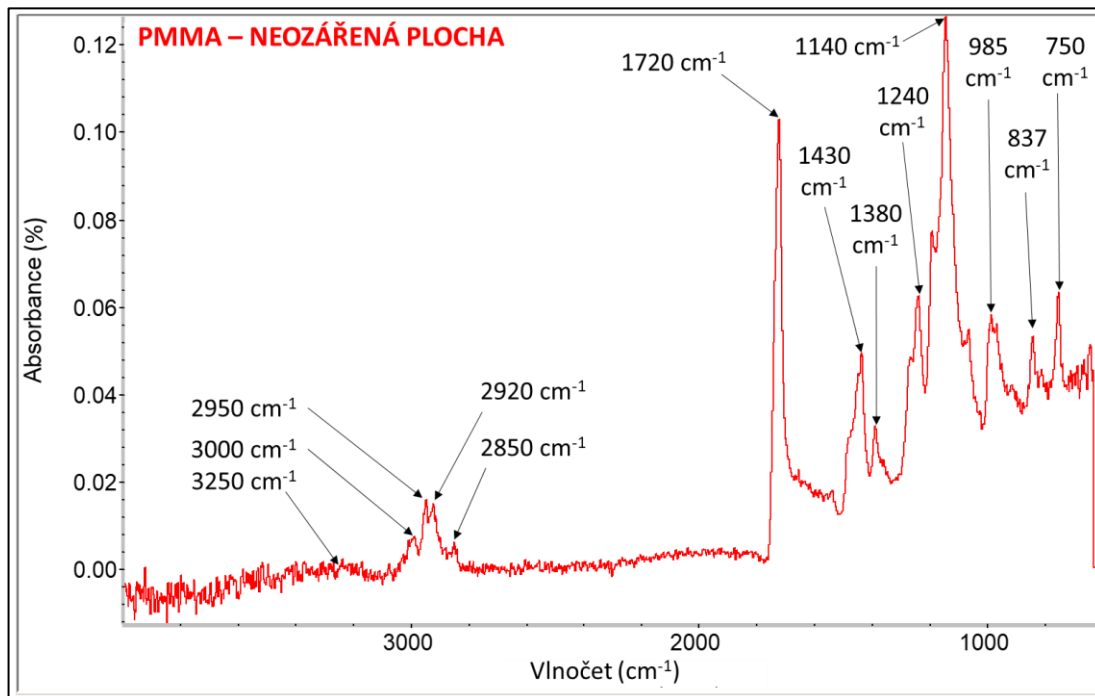


Obr. 7.13 Porovnání FTIR spekter vzorků PS v oblasti vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹.

V naměřených spektrech vzorků PS se opět nenacházely žádné výrazné změny, jelikož docházelo opět v poklesech absorbančních pásů v celých naměřených spektrech vzorků.

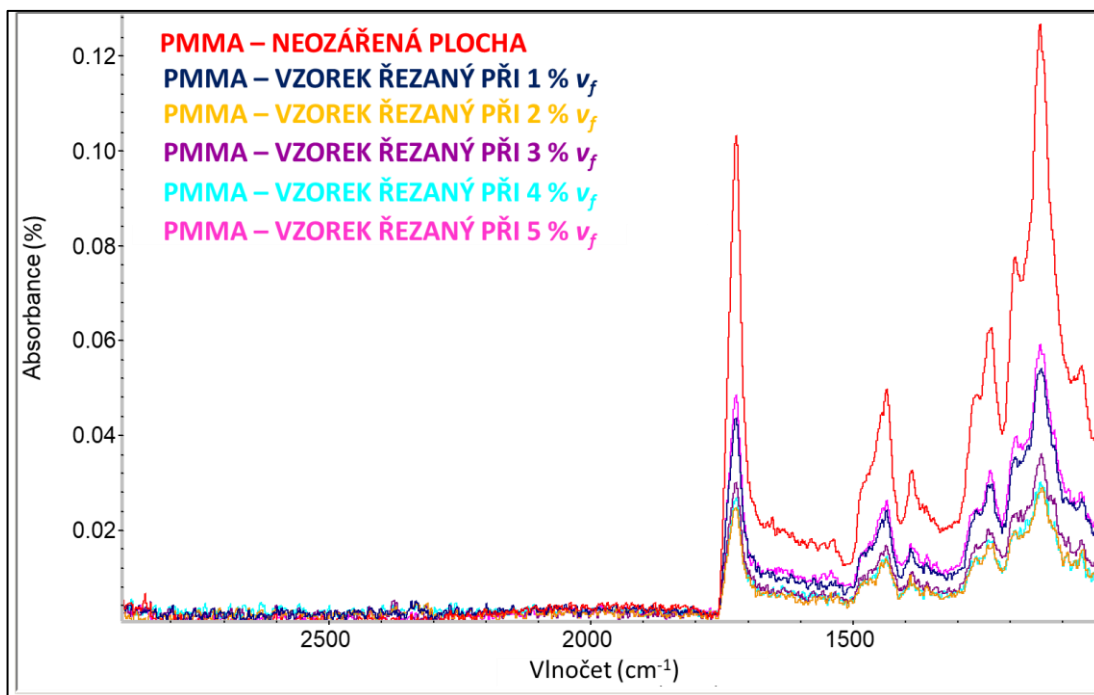
7.6 Výsledky měření FTIR vzorků PMMA

Naměřené FTIR spektrum neopracovaného vzorku PMMA laserem je uvedeno na obr. 7.14. V oblasti vlnočtu lze pozorovat velmi mírný nárůst absorbance značící výskyt O–H vazeb ve struktuře vzorku. Následná oblast čtyř píků (3000 , 2950 , 2920 a 2850 cm^{-1}) je přiřítána C–H vazbám. Oblast vlnočtu 3000 cm^{-1} a 2950 cm^{-1} je charakteristická pro CH_3 vazby. Vysoký úzký pík v oblasti vlnočtu 1720 cm^{-1} souvisí s výskytem dvojných C=O vazeb. Vazby O–CH₃ ve struktuře vzorku jsou určeny píkem v oblasti 1430 cm^{-1} . Pík v oblasti vlnočtu 1380 cm^{-1} značí výskyt CH_3 vazeb a pík v oblasti vlnočtu 1240 cm^{-1} pak značí výskyt CH_2 vazeb. Nejvyšší pík v naměřeném spektru vzorku při vlnočtu 1140 cm^{-1} souvisí s výskytem C–O vazeb. Po něm následující pík při vlnočtu 985 cm^{-1} značí vazby C–O–C. Předposlední pík spektra při vlnočtu 837 cm^{-1} souvisí s výskytem vazeb C–H vazeb. Posledním pozorovaným píkem je nárůst absorbance při vlnočtu 750 cm^{-1} . Tento nárůst absorbance je přiřítán vazbám CH_2 a vazbám C=O.



Obr. 7.14 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PMMA.

Pro porovnání naměřených spekter vzorku PMMA byla vybrána rozsáhlejší oblast vlnočtu 2900 až 1000 cm^{-1} (obr. 7.15, str. 66). V této oblasti se nachází většina charakteristických absorbních pásů materiálu PMMA.



Obr. 7.15 Porovnání FTIR spekter vzorků PMMA v oblasti vlnočtu 2900 až 1000 cm^{-1} .

Ze získaných FTIR spekter vzorků PMMA lze říct, že ve vzorcích došlo po ozáření laserovým paprskem téměř k nulovým změnám. Jedná se o amorfni materiál, který vykazuje vyšší tvrdost, a proto podléhá těmto změnám jen minimálně. Tedy ani u tohoto materiálu nebyla pozorována změna v jeho chemické struktuře.

Při základním zhodnocení FTIR spekter všech zkoumaných vzorků nejsou patrné žádné významné změny u vzorků ozářených laserovým paprskem. To dokazuje to, že jsou vidět všechny charakteristické absorbní pásy. Nicméně tepelná degradace může způsobovat kvantitativní změny, tedy může docházet ke snižování intenzity vybraných pásů. K posouzení těchto změn však ATR technika, tedy technika zeslabeného úplného odrazu, není příliš vhodná, protože tato technika nezohledňuje tloušťku vzorku. Aby mohly být tyto změny posouzeny bylo by nutné zvolit tzv. referenční absorbní pás, tj. funkční skupinu, která nepodléhá degradaci. Tato skupina je však pro každý materiál jiná.

8 MĚŘENÍ DIFERENČNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC)

Měření diferenční skenovací kalorimetrie patří mezi hlavní termální analýzy. Metoda měření spočívá v porovnávání přiváděného tepla a zvyšující se teploty zkoumaného vzorku s referenčním vzorkem. Oba vzorky jsou vystaveny stejnému teplotnímu programu. Zaznamenává se rozdíl množství tepla, které je přiváděné k oběma vzorkům, pro dosažení stejných teplot.

Charakteristika měření se mění s množstvím pohlceného či uvolněného tepla, se změnou entalpie. Tyto změny jsou doprovázeny fyzikálními a chemickými změnami v materiálu vzorku, jako jsou fázové přechody, nebo rozklad a determinace specifického tepla.

Teploty skelného přechodu T_g a teploty tání T_m charakterizují u polymerů fázové přechody. Jestliže je zkoumaný polymerní vzorek semikrystalický a je zahříván, je jeho změna stavu (tání) přechodem prvního řádu a je doprovázena změnou tepelné kapacity a změnou objemu. V tomto případě se jedná o endotermický děj.

U amorfních polymerů je fázová změna doprovázena skelným přechodem T_g , zde se jedná o přechod druhého řádu. [39]

Pro měření termální analýzy DSC bylo použito zařízení DSC1 od firmy Mettler Toledo. (obr. 8.1).



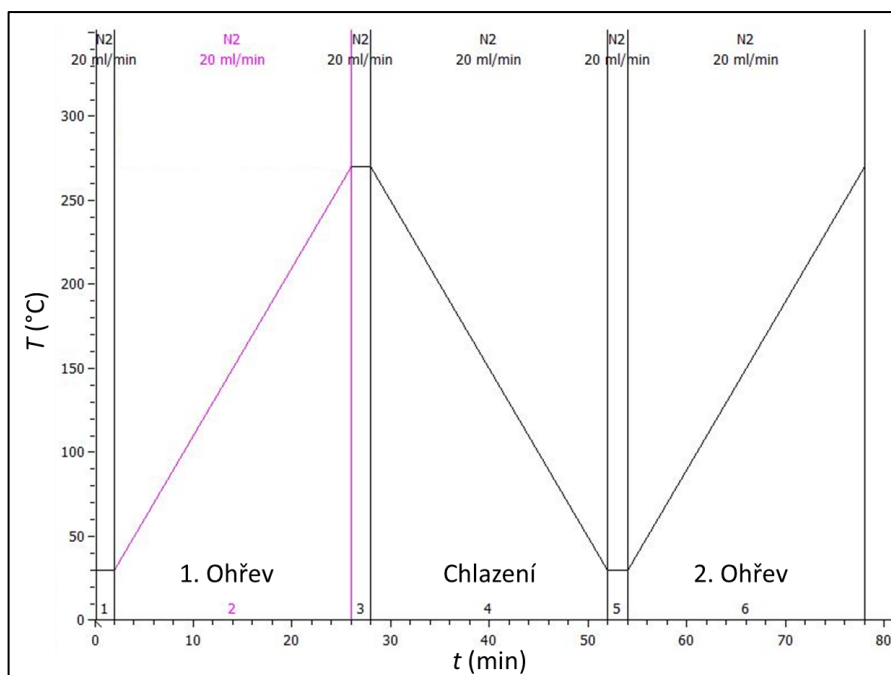
Obr. 8.1 Měřicí zařízení DSC1 od firmy Mettler Toledo.

Pro měření vzorků pomocí DSC musely být nejprve vzorky odebrány z plochy řezu a naváženy v hliníkových pánvích pomocí laboratorních vah na hmotnost co nejbližší k hodnotě 5 mg. Jako referenční vzorek pro měření DSC byla použita prázdná hliníková pánev, tedy vzduch. Navážené hmotnosti zkoumaných vzorků materiálů jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Navážené hmotnosti zkoumaných vzorků pro měření DSC.

Typ vzorku		m (mg)					
		PA6	POM	PP	PC	PS	PMMA
Neozářený		4,86	4,82	4,92	4,98	4,73	4,98
vr (%)	5	5,05	5,08	4,78	4,97	4,78	5,00
	4	4,58	4,96	4,56	5,08	4,73	4,73
	3	4,74	4,95	5,09	5,04	4,80	5,00
	2	4,66	4,69	4,76	4,76	4,79	4,81
	1	4,98	4,87	4,96	4,69	4,84	4,86

Pro každý typ materiálu musela být nastavena metoda měření DSC. Graf znázorňující metodu měření vzorků PA6 je uvedený na obr. 8.2. Z grafu je patrné, že metoda měření se skládala ze dvou ohřevů a jednoho chlazení vzorků, to bylo pro měření všech zkoumaných materiálů stejné. Přičemž první ohřev obecně slouží ke stabilizaci tepelných vlastností vzorků a vyrušení vlivů předchozího zpracování materiálu. Rychlost ohřevu byla taktéž konstantní pro všechny materiály, a to 10 °C / min.



Obr. 8.2 Metoda měření DSC vzorků PA6.

Metody měření vzorků jednotlivých typů materiálů se lišily pouze v počátečních a konečných teplotách ohřevů a ochlazování. Nastavené teploty ohřevů pro jednotlivé typy materiálů jsou uvedeny v následující tab. 8.2. Pro ochlazování se potom tyto teploty jen vyměnily.

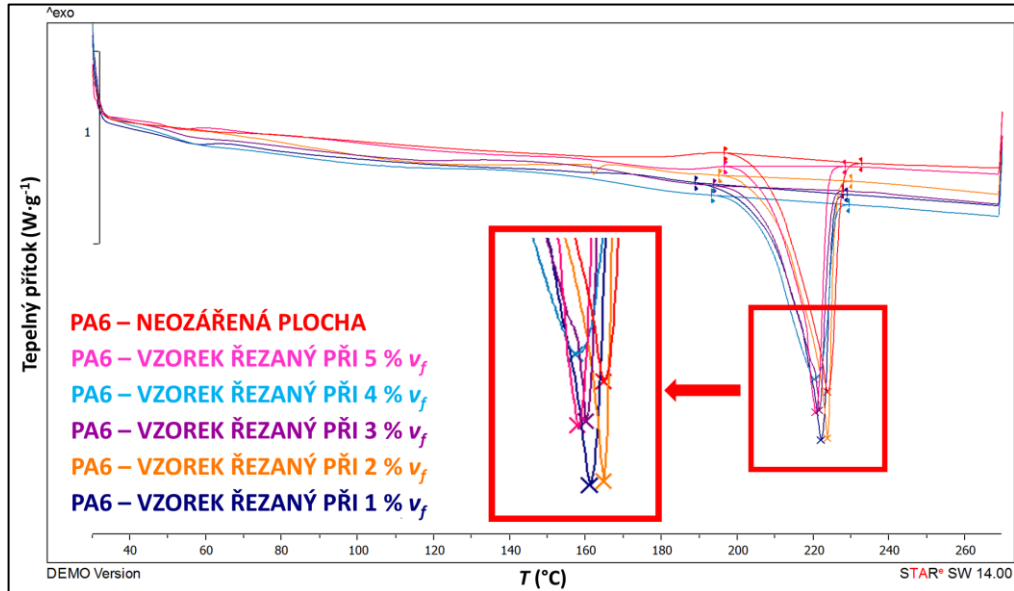
Tab. 8.2 Teploty ohřevu měření DSC pro jednotlivé materiály.

Materiál	T (°C)	
	PA6	Začátek
Konec		270
POM	Začátek	25
	Konec	220
PP	Začátek	-40
	Konec	210
PC	Začátek	100
	Konec	190
PS	Začátek	25
	Konec	150
PMMA	Začátek	25
	Konec	150

Pro vyhodnocení ovlivnění struktury a tepelných vlastností vzorků po ozáření laserovým paprskem byly použity pouze DSC křivky prvního ohřevu, protože po prvním ohřevu byly stabilizovány tepelné vlastnosti vzorků a byl smazán také vliv laserového řezání na tyto vlastnosti. Výstupem měření byl tedy graf znázorňující závislost tepelného přítoku na teplotě.

8.1 Výsledky DSC analýzy vzorků PA6

Na obr. 8.3 jsou zobrazeny DSC křivky prvního ohřevu zkoumaných vzorků PA6.

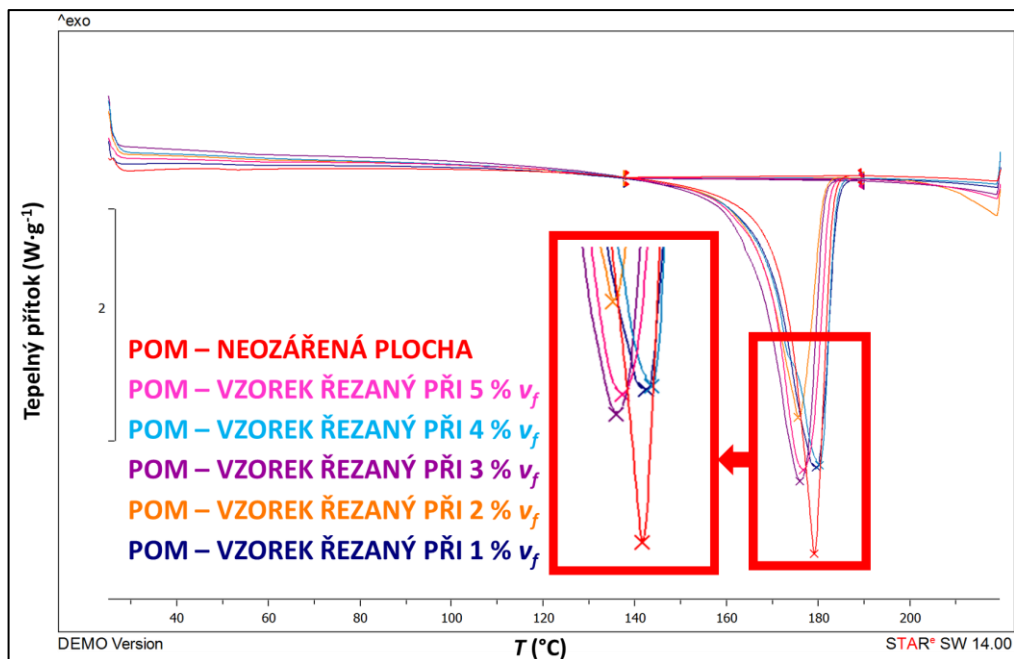


Obr. 8.3 DSC křivky vzorků PA6 pro první ohřev.

Vyhodnocené výsledky z naměřených DSC křivek vzorků PA6 jsou uvedeny v tab. 8.3 na str. 72.

8.2 Výsledky DSC analýzy vzorků POM

Naměřené DSC křivky pro zkoumané vzorky POM jsou zobrazeny na obr. 8.4.

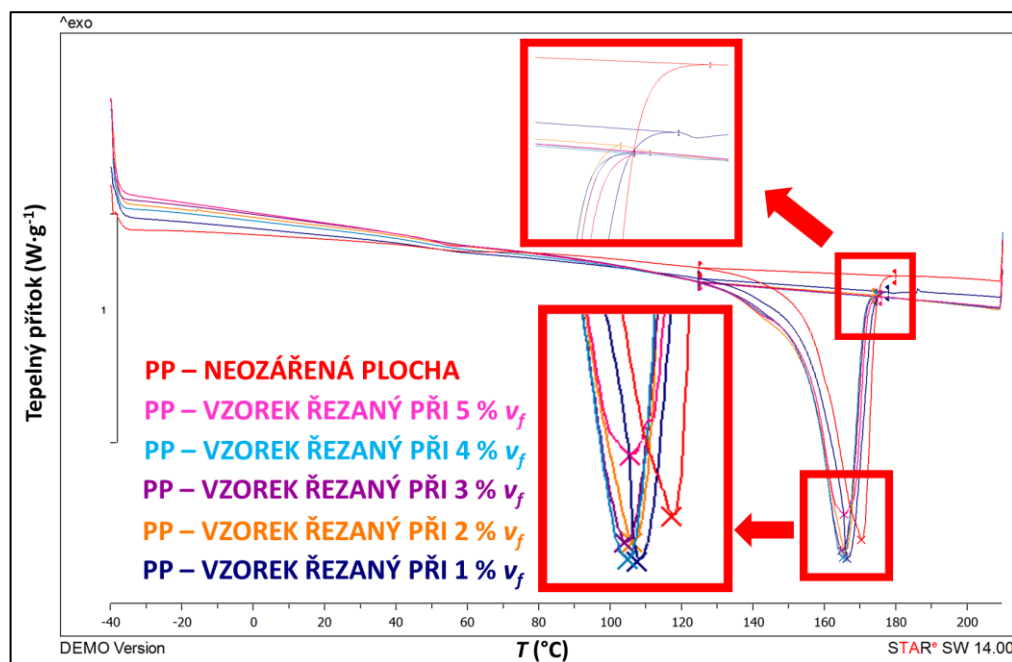


Obr. 8.4 DSC křivky vzorků POM pro první ohřev.

Výsledky vyhodnocené z naměřených DSC křivek vzorků POM jsou uvedeny v tab. 8.3 na str. 72

8.3 Výsledky DSC analýzy vzorků PP

Naměřené DSC křivky prvního ohřevu zkoumaných vzorků PP jsou uvedeny na následujícím obr. 8.5.



Obr. 8.5 DSC křivky vzorků PP pro první ohřev.

Vzorky PA6, POM a PP jsou semikrystalické, proto byla u těchto vzorků zkoumána teplota tání T_m . Tání materiálu značí endotermický proces. Teplota vzorků těchto materiálů zůstává konstantní navzdory kontinuálnímu ohřívání. Dochází tedy k absorpci tepla do zkoumaných vzorků a přeměně této energie na tání. Na DSC křivkách se tento jev projevil ve tvaru píků. Teplota tání je pak vyhodnocována jako vrchol těchto píků a spotřebovaná energie na tání vzorků se získá integrací píků.

Na DSC křivkách semikrystalických vzorků byla vyhodnocena, kromě teploty tání T_m a měrného tepla tání i krystalinita vzorků. Pro výpočet krystalinity zkoumaných vzorků byla použita hodnota teoretického měrného tepla tání pro 100 % krystalický materiál, pro vzorky PA6 to bylo $190 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, pro vzorky POM $325 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ a pro vzorky PP $208 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$. Naměřené výsledky z DSC analýzy semikrystalických vzorků jsou uvedeny v následující tab. 8.3 na str. 72.

Tab. 8.3 Výsledky DSC analýzy semikrystalických vzorků.

Materiál	Typ vzorku	Krystalinita (%)	Teplota tání T_m (°C)	Měrné teplo tání ($J \cdot g^{-1}$)	
PA 6	Neozářený	39,95	223,78	-75,91	
	v_f (%)	5	33,34	220,56	-63,36
		4	36,67	220,27	-69,68
		3	34,52	221,56	-65,59
		2	36,65	223,68	-69,94
		1	40,68	222,00	-77,30
POM	Neozářený	52,42	179,12	-170,36	
	v_f (%)	5	54,57	176,71	-177,34
		4	55,28	180,17	-179,67
		3	56,85	175,97	-184,76
		2	42,25	175,64	-137,30
		1	55,40	179,57	-180,06
PP	Neozářený	43,92	170,34	-91,35	
	v_f (%)	5	43,00	165,48	-89,45
		4	43,74	165,13	-90,98
		3	44,04	164,76	-91,60
		2	44,51	165,62	-92,59
		1	42,78	166,32	-88,98

U výsledků krystalinity vzorků PA6 lze vidět, že u neozářeného vzorku laserovým paprskem dosahovala krystalinita hodnoty 39,95 % a poté následně u vzorku řezaného při maximálním výkonu laseru 100 W a 5 % řezné rychlosti (76,2 mm / s) docházelo ke skokovému snížení krystalinity na hodnotu 33,34 %. Následně poté při měnící se řezné rychlosti k 1 % (15,24 mm / s) opět docházelo k nárůstu krystalinity. Stejný trend poklesu a růstu hodnot lze pozorovat i u výsledků teplot tání, které se vážou na hodnoty krystalinity, a měrného tepla tání vzorků. Při porovnání teploty tání neozářeného vzorku PA6 223,78 °C a teploty tání, která je udávána pro tento typ materiálu 223 °C (tab. 5.1, str. 48) je vidět, že se tyto teploty shodují. Lze tedy říct, že proces vstřikování neměl na teplotu tání vzorků PA6 žádný vliv.

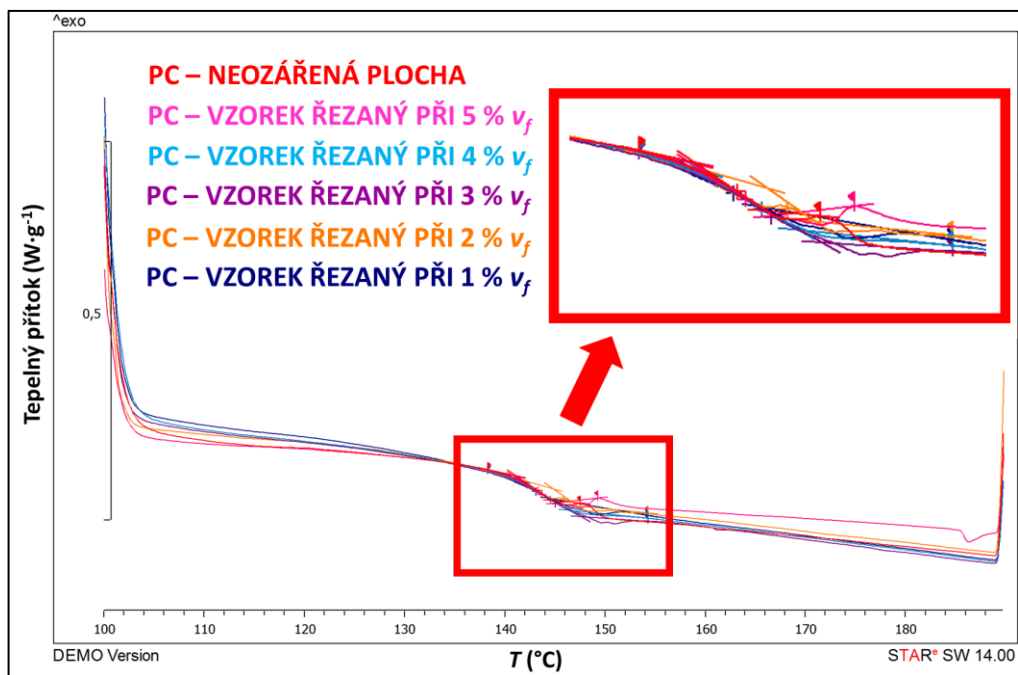
Výsledky DSC analýzy zkoumaných vzorků POM ukazují mírnou změnu v krystalinitě těchto vzorků. Změna spočívá v tom, že u vzorku odebraného z plochy, která nebyla ozářena laserovým paprskem byla naměřena nižší krystalinita než u vzorků, které

byly řezány laserem. U vzorků řezaných laserem lze vidět skokový pokles krystalinity u vzorku, který byl řezán při maximálním výkonu laseru (100 W) a 2 % řezné rychlosti (30,48 mm / s). Tato skoková změna byla způsobena nevhodným odebráním vzorku, protože výsledky krystalinity ostatních vzorků řezaných laserem vykazují vyšší hodnoty než základní neozářený materiál. U výsledků teploty tání zkoumaných vzorků POM nelze vidět žádnou výraznou změnu. Můžeme zde pozorovat mírný pokles teploty tání u vzorků ozářených laserovým paprskem oproti neozářenému materiálu. Avšak teplota tání u některých vzorků řezaných laserem dosahovala podobné hodnoty jako u neozářeného základního materiálu. Porovnáním získané hodnoty teploty tání neozářeného vzorku POM 179,12 °C a teploty tání udávané pro tento typ materiálu 178 °C (tab. 5.1, str. 48) lze pozorovat mírný rozdíl těchto teplot o 1 °C. Tento rozdíl mohl být způsobený procesem vstřikování, který mohl tuto vlastnost mírně ovlivnit. Výsledky měrného tepla tání vykazují rostoucí trend, stejně jako hodnoty krystalinity vzorků, od neozářeného základního materiálu POM a následně při snižování řezné rychlosti.

Výsledky DSC analýzy zkoumaných vzorků PP ukazují, že hodnoty krystalinity vzorků a hodnoty měrného tepla tání nevykazují žádné výraznější změny. Ovšem u výsledků teplot tání vzorků došlo k výraznějšímu poklesu hodnot u vzorků ozářených laserovým paprskem. Z těchto hodnot lze vidět, že teplota tání u vzorků řezaných laserem klesla téměř o 5 °C. Také je zde vidět, že změna řezné rychlosti laseru neměla na hodnoty teplot tání žádný vliv. Teplota tání neozářeného vzorku PP se lišila od teploty tání udávané pro tento typ materiálu (tab. 5.1, str. 48). Pro tento typ materiálu se udává teplota tání v rozmezí mezi teplotami 158 °C až 165 °C. Naměřená hodnota teploty tání vzorku po vstřikování dosahovala teploty 170,34 °C. V tomto případě je patrné, že proces vstřikování mohl ovlivnit tepelné vlastnosti vzorků PP.

8.4 Výsledky DSC analýzy vzorků PC

Naměřené křivky prvního ohřevu vzorků PC jsou zobrazeny na obr. 8.6 na str. 74. Jak si lze všimnout, tyto křivky se od DSC křivek předchozích semikrystalických materiálů liší, protože se jedná o amorfní materiál. Z tohoto důvodu nevykreslují DSC křivky měřených vzorků teplotu tání, ale vykreslují teplotu skelného přechodu T_g .

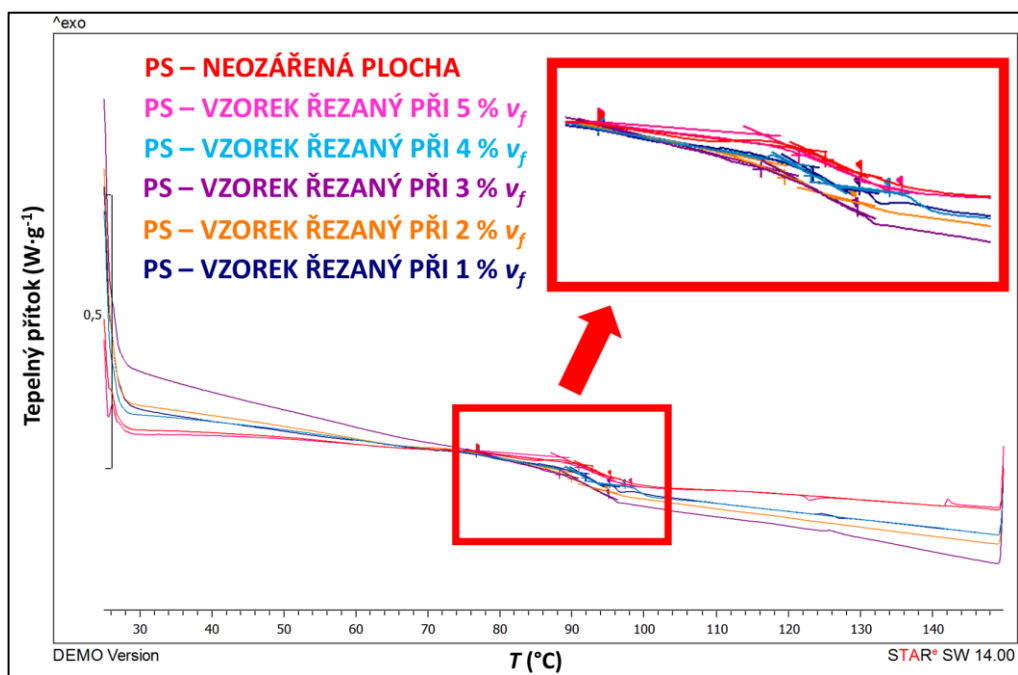


Obr. 8.6 DSC křivky vzorků PC pro první ohřev.

Vyhodnocené hodnoty teplot skelného přechodu T_g z DSC křivek vzorků PC jsou uvedeny v tab. 8.4 na str. 76.

8.5 Výsledky DSC analýzy vzorků PS

DSC křivky pro první ohřev zkoumaných vzorků PS jsou zobrazeny na následujícím obr. 8.7.

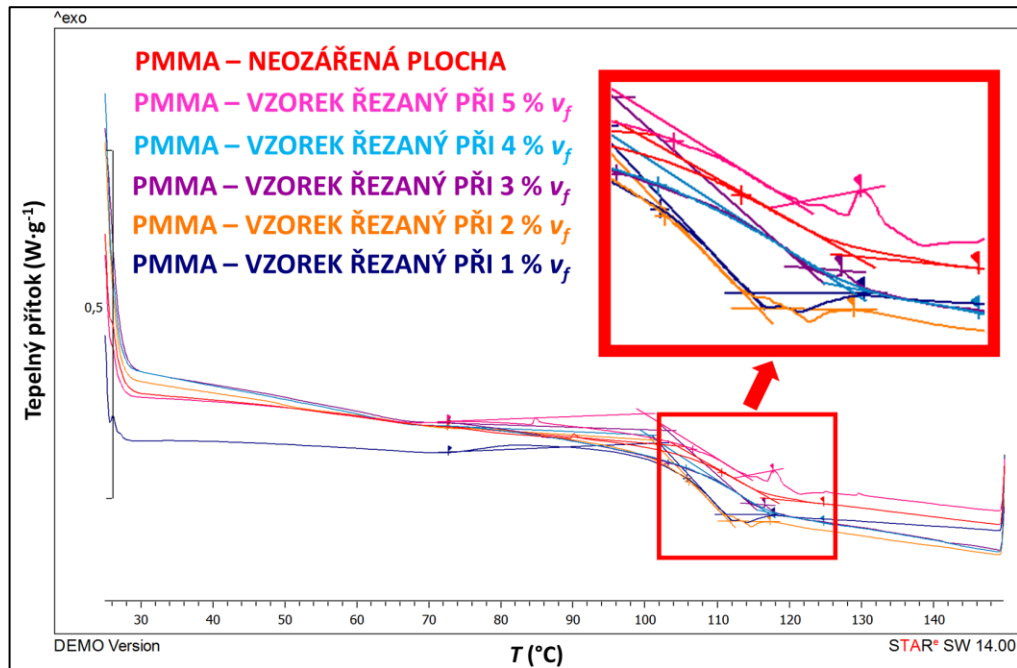


Obr. 8.7 DSC křivky vzorků PS pro první ohřev.

Teploty skelného přechodu T_g vyhodnocené z DSC křivek vzorků PS jsou uvedeny v tab. 8.4 na str. 76.

8.6 Výsledky DSC analýzy vzorků PMMA

Pro zkoumané vzorky PMMA jsou naměřené DSC křivky prvního ohřevu zobrazeny na obr. 8.8.



Obr. 8.8 DSC křivky vzorků PMMA pro první ohřev.

Pro všechny amorfní materiály, tedy PC, PS a PMMA, byla vyhodnocena z DSC analýzy pouze teplota skelného přechodu T_g . Získané hodnoty teplot skelných přechodů vzorků všech zkoumaných amorfních materiálů jsou uvedeny v následující tab. 8.4. na str. 76.

Tab. 8.4 Výsledky DSC analýzy amorfních zkoumaných materiálů.

Materiál	Typ vzorku	Teplota skelného přechodu T_g (°C)	
PC	Neozářený	143,28	
	v_f (%)	5	143,75
		4	144,54
		3	145,12
		2	145,92
		1	143,12
PS	Neozářený	92,74	
	v_f (%)	5	90,96
		4	91,82
		3	88,29
		2	89,95
		1	91,96
PMMA	Neozářený	110,60	
	v_f (%)	5	106,59
		4	105,65
		3	103,19
		2	106,03
		1	105,73

Z výsledků DSC analýzy vzorků PC lze pozorovat změnu v teplotách skelného přechodu T_g mezi základním neozářeným vzorkem a vzorky, které byly řezány laserem. Změna spočívá v mírném nárůstu teploty skelného přechodu při menších řezných rychlostech. U vzorku řezaného při 1 % řezné rychlosti (15,24 mm / s) lze vidět pokles teploty skelného přechodu oproti předchozím ozářeným vzorkům. Tento pokles byl zaviněn nevhodným odběrem materiálu vzorku pro měření metodou DSC, tedy i z místa vzdálenějšího od plochy řezu. To vysvětluje fakt, že teplota skelného přechodu neozářeného vzorku, a právě vzorku řezaného při 1 % řezné rychlosti se téměř nelišila. Z vyhodnocené teploty skelného přechodu neozářeného vzorku laserovým paprskem, která ukazuje hodnotu 143,28 °C lze vidět u tohoto vzorku pokles této teploty oproti teplotě skelného přechodu 151 °C, která je udávána pro tento typ materiálu (tab. 5.1, str. 48). Z tohoto rozdílu je patrné, že proces vstřikování mohl mít na tepelné vlastnosti vzorků PC výraznější vliv.

Teploty skelných přechodů T_g vzorků PS ukazují pokles hodnot u vzorků ozářených laserovým paprskem. U vzorků řezaných při 4 % (60,96 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) řezné rychlosti byly vzorky odebrány i z místa mimo řeznou plochu, tedy místa, které bylo více vzdálené od plochy řezu. Z tohoto důvodu tyto vzorky vykazují hodnoty teploty skelného přechodu velmi podobné hodnotě neozářeného základního vzorku. Porovnáním teploty skelného přechodu neozářeného vzorku laserovým paprskem 92,74 °C a teploty skelného přechodu udávané pro tento typ materiálu 98 °C (tab. 5.1, str. 48) bylo zjištěno, že proces vstřikování způsobil výraznější rozdíl v těchto teplotách, a tedy ovlivnil i tepelné vlastnosti vzorků PS. Z naměřených hodnot teplot skelných přechodů vzorků PS lze pozorovat, že proces vstřikování způsobil pokles teploty skelného přechodu vzorků a následným procesem laserového řezání došlo k dalšímu snížení hodnot této teploty.

Ze získaných výsledků teplot skelných přechodů T_g neozářeného základního materiálu PMMA a řezaných vzorků tohoto materiálu laserem lze pozorovat pokles této teploty po ozáření laserovým paprskem cca o 5 °C. U vzorků ozářených laserovým paprskem tedy došlo pravděpodobně k vytvoření tepelně ovlivněné zóny. V systému tepelně ovlivněné zóny zřejmě došlo ke zvětšení tzv. volného objemu, což je obecně způsobeno vzrůstem pohyblivosti jednotlivých segmentů makromolekuly. Konce molekul vnášely do systému více volného objemu než monomerní jednotky uvnitř řetězce. Zvětšení volného objemu se pak projevilo poklesem teploty skelného přechodu. Porovnáním získané hodnoty teploty skelného přechodu neozářeného vzorku laserovým paprskem s hodnotou skelného přechodu udávané pro tento typ materiálu 110 °C (tab. 5.1, str. 48) bylo zjištěno, že se tyto hodnoty téměř shodují, a tedy proces vstřikování neměl na tuto teplotní vlastnost vzorků PMMA žádný vliv.

9 MĚŘENÍ RENTGENOVÉ DIFRAKČNÍ ANALÝZY

Ovlivnění struktury polymerních vzorků působením laserového paprsku bylo také zkoumáno měřením rentgenové difrakční analýzy, kdy výstupem měření byl graf znázorňující závislost intenzity záření smluvní hodnotou (a. u.) na hodnotách úhlů natočení 2θ ($^\circ$). Z této závislosti byly následně zkoumány změny krystalické struktury vzorků.

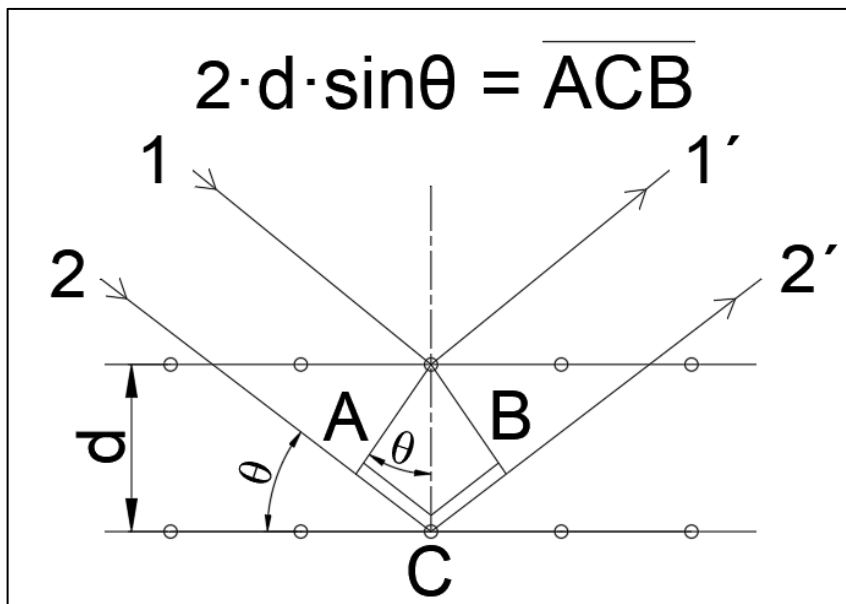
Každá látka, která je krystalická má charakteristické uspořádání svých částic (molekul, iontů, atomů). V této krystalické mřížce uspořádaných částic existují rovnoběžné plochy, které mají určité vzdálenosti, tzv. krystalové konstanty, a ty jsou charakteristické pro krystaly dané látky. [40]

U této metody měření se využívá difrakce rentgenového záření na krystalech studované látky, v tomto případě polymerních materiálů. Dopadne-li rentgenové záření na krystal, pak dochází kvůli periodičnosti krystalu k rozptylu záření a k následné interferenci tohoto záření, tedy k difrakci. Pomocí analýzy záznamu z měření lze charakterizovat a stanovit krystalické fáze ve zkoumaných vzorcích. Pro difrakci je podstatný tzv. pružný rozptyl. Jedná se o situaci, kdy energie a vlnová délka rozptýlených fotonů je stejná jako dopadající. Elektronové vlny ve vnějších slupkách atomů jsou rozkmitány vlivem dopadajících fotonů a stávají se tak zdrojem elektromagnetického záření o stejné vlnové délce jako dopadající záření. [40][41]

Braggova rovnice udává obecné pravidlo pro interferenci dvou paprsků, a to takové, že jejich dráhový rozdíl musí být celočíselným násobkem vlnové délky:

$$2 \cdot d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (9.1)[41]$$

V rovnici 9.1 je d mezivrstevná vzdálenost sousedních atomových rovin, λ je vlnová délka dopadajícího a difraktovaného záření, θ je úhel mezi difraktovaným svazkem a atomovou rovinou a n je řád reflexe. Na obr. 9.1 na str. 79 je patrné, že úhel mezi dopadajícím a difraktovaným svazkem je 2θ . Součet délek úseček AC a CB zde představuje dráhový rozdíl mezi paprsky $1'$ a $2'$ difraktovanými od dvou sousedních atomových rovin. Každá atomová rovina rozptýlí pouze malé množství záření. Ovšem z těchto všech difraktovaných vln záření se vytváří detailní zobrazení difrakčního obrazu zkoumaného krystalu. [41]



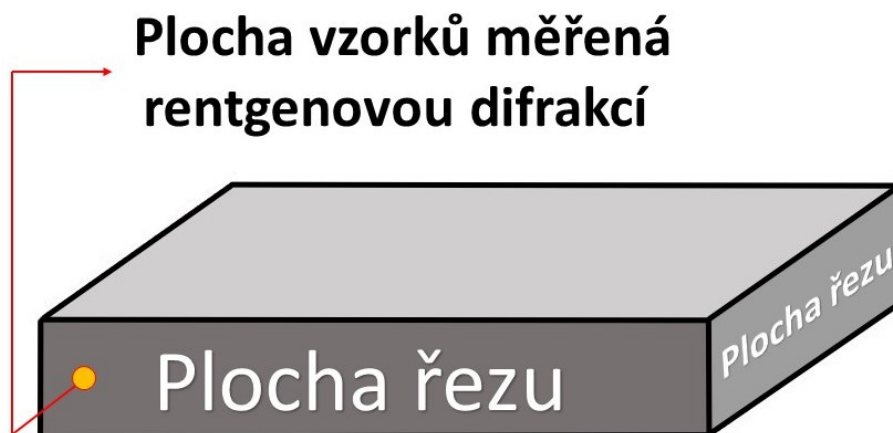
Obr. 9.1 Ilustrace Braggovy difrakční podmínky dle [41].

Rentgenová difrakční analýza vybraných polymerních vzorků byla prováděna pomocí rentgenového difraktometru Rigaku MiniFlex 600 (obr. 9.2). Toto měřicí zařízení využívá rentgenové záření CoK_α filtrované kobaltem. Měření probíhalo při napětí 40 kV a proudu 30 mA. Skeny byly měřeny v reflexním režimu v rozsahu úhlu natočení 2θ 3–60 ° při pokojové teplotě. Geometrie uspořádání prvků difraktometru byla tzv. Bragg-Brentanova, kdy byl uprostřed umístěný měřený vzorek, který se natáčel mezi pevně upevněným zdrojem rentgenového záření a detektorem tohoto záření.



Obr. 9.2 Rentgenový difraktometr Rigaku MiniFlex 600.

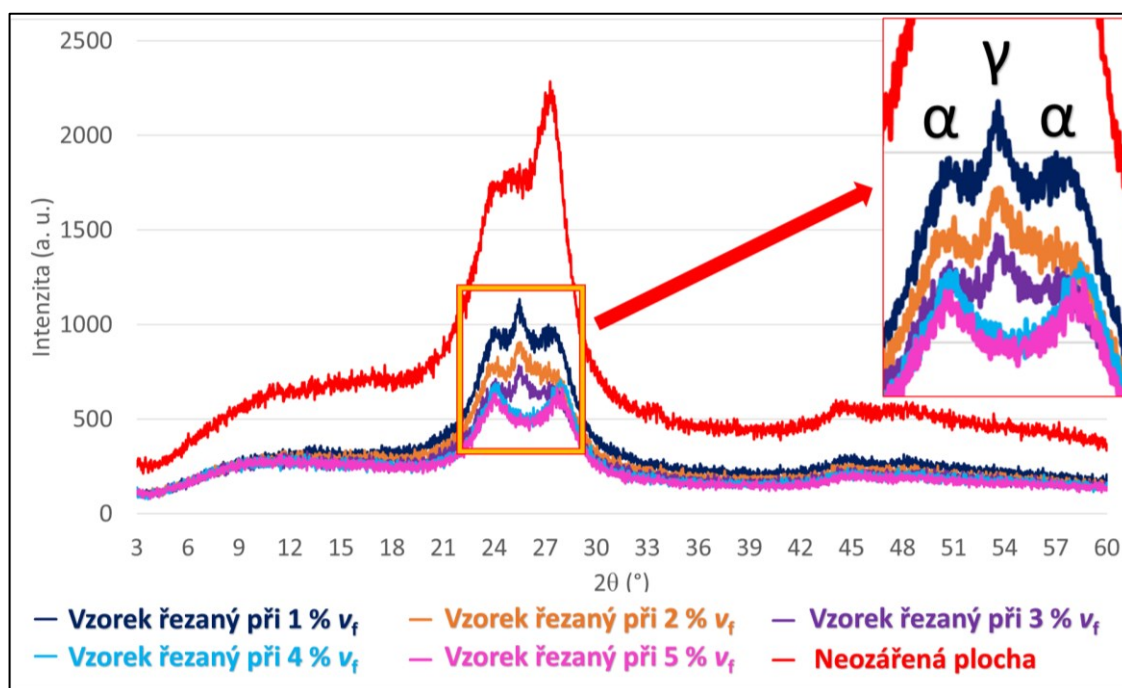
Rentgenová difrakční analýza byla u všech zkoumaných vzorků měřena na ploše řezu delší rezné hrany kvůli uchycení vzorků v držáku rentgenového difraktometru (obr. 9.3).



Obr. 9.3 Plocha řezu polymerních vzorků měřená rentgenovou difrakcí.

9.1 Rentgenová difrakční analýza vzorků PA6

Na obr. 9.4 jsou zobrazeny rentgenové difrakční snímky měřených vzorků PA6. V naměřených difrakčních snímcích lze pozorovat změnu v krystalických fázích zkoumaných vzorků. U vzorku řezaných při 5 % (76,2 mm / s) a 4 % (60,96 mm / s) rezné rychlosti se vyskytují pouze krystalické fáze α , kdežto u vzorků řezaných při 3 % rezné rychlosti (45 mm / s) a rezné rychlosti nižší lze vidět, že se vytvořila u těchto vzorků také krystalická fáze γ .

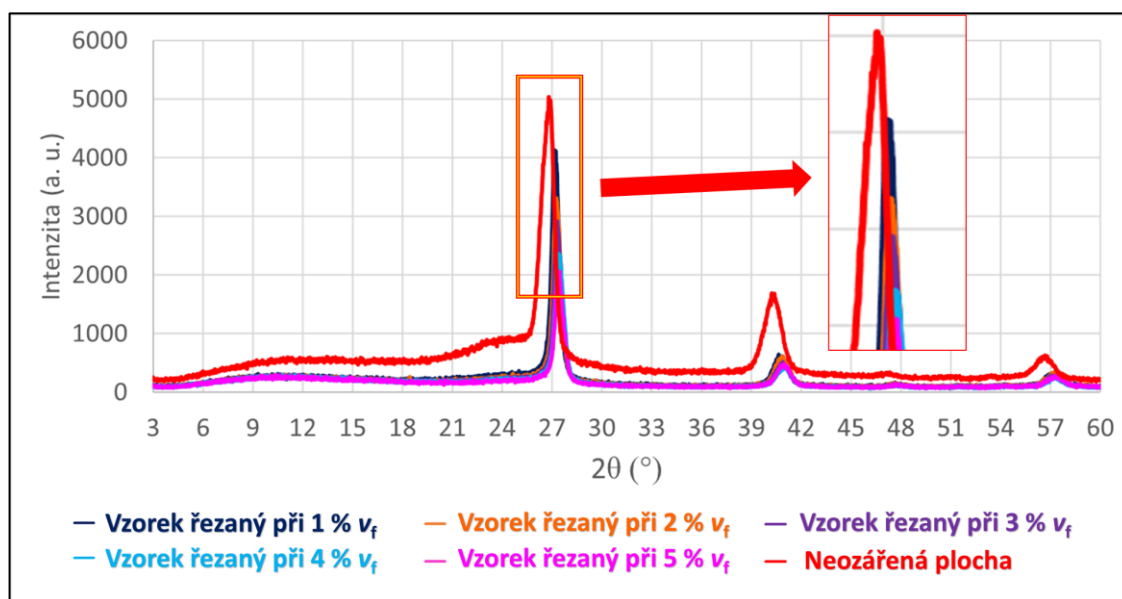


Obr. 9.4 Rentgenový difrakční snímek vzorků PA6.

Vyhodnocené hodnoty krystalinity vzorků PA6 z RTG difrakce jsou uvedeny v tab. 9.1 na str. 83.

9.2 Rentgenová difrakční analýza vzorků POM

Naměřené rentgenové difrakční snímky vzorků POM jsou zobrazeny na následujícím obr. 9.5. U naměřených snímků vzorků se vyskytovaly hexagonální krystalické fáze β . Lze také pozorovat mírný posun krystalických píků k vyššímu úhlu 2θ .

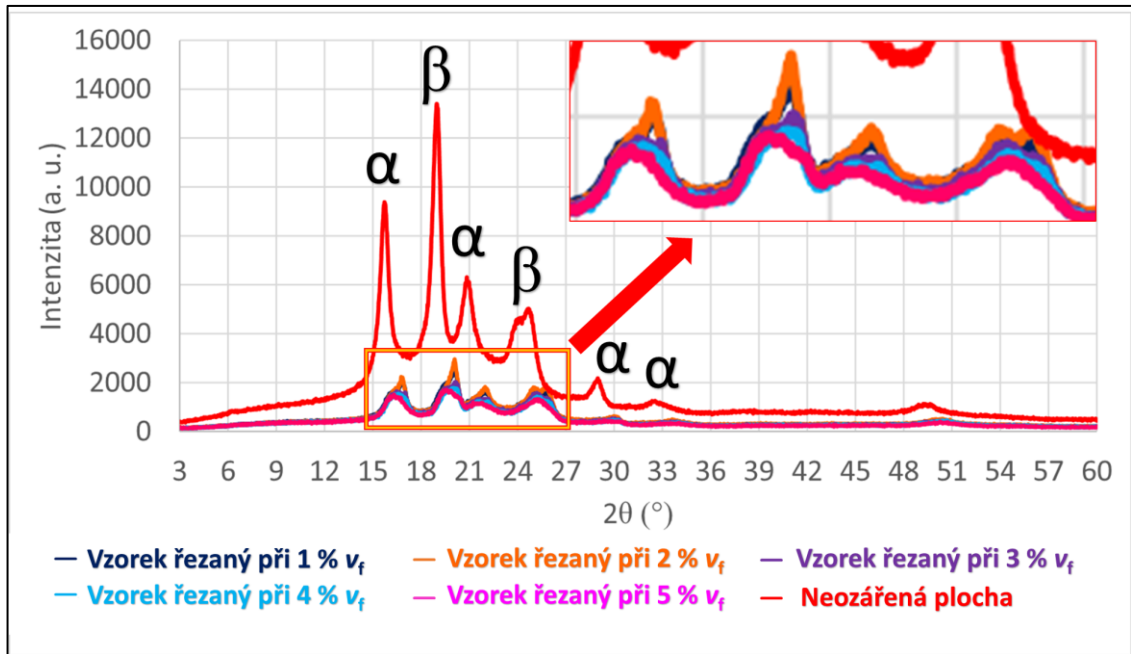


Obr. 9.5 Rentgenový difrakční snímek vzorků POM.

Hodnoty krystalinity z RTG difrakce zkoumaných vzorků POM jsou uvedeny v tab. 9.1 na str. 83.

9.3 Rentgenová difrakční analýza vzorků PP

Rentgenové difrakční snímky zkoumaných vzorků PP jsou uvedeny na následujícím obr. 9.6 na str. 82. V uvedených difrakčních snímcích lze pozorovat při jakém úhlu natočení 2θ se vyskytovala jaká krystalická fáze. Ve struktuře vzorků polypropylenu se vyskytovaly krystalické fáze α a krystalické fáze β .



Obr. 9.6 Rentgenový difrakční snímek vzorků PP.

Z naměřených RTG difrakčních snímků semikrystalických vzorků PA6, POM a PP byl vyhodnocen krystalický podíl ve struktuře těchto vzorků. Krystalinita byla vypočítána jako plocha pod křivkou adekvátního podílu po odečtení amorfního pozadí. Získané výsledky krystalinity těchto vzorků jsou uvedeny v tab. 9.1 na str. 83.

Tab. 9.1 Výsledky krystalinity zkoumaných semikrystalických vzorků.

Materiál	Typ vzorku		Krystalinita (%)
PA6	Neozářený		41,19
	v_f (%)	5	36,51
		4	36,65
		3	36,72
		2	38,07
		1	39,37
POM	Neozářený		44,99
	v_f (%)	5	50,38
		4	46,50
		3	50,90
		2	49,28
		1	47,17
PP	Neozářený		51,70
	v_f (%)	5	51,12
		4	52,13
		3	52,59
		2	50,35
		1	52,38

Z naměřených hodnot krystalinity vzorků PA6 pomocí rentgenové difrakce lze pozorovat stejný trend vývoje těchto hodnot jako u hodnot získaných metodou DSC (tab. 8.3, str. 72). Lze tedy pozorovat, že u vzorku řezaného při 5 % rezné rychlosti (76,2 mm / s) došlo k zdatnému poklesu krystalinity. Tento pokles krystalinity je jasnou známkou, že u tohoto vzorku došlo k síťování a štěpení hlavního řetězce současně, přičemž v závislosti na podmínkách ozáření převládalo síťování. Při snižování rezné rychlosti docházelo opět k růstu krystalinity, jelikož začalo během procesu laserového řezání převládat štěpení hlavního řetězce, a fragmenty řetězce uvolňované štěpením řetězce v amorfni fázi se tak mohly integrovat do krystalické fáze.

Ve výsledcích krystalinity zkoumaných vzorků POM získaných pomocí rentgenové difrakce lze pozorovat stejnou změnu jako u výsledků podílu krystalické fáze v těchto vzorcích získaných měřeními DSC v tab. 8.3, str. 72. Výsledky ukazují, že krystalinita u vzorků ozářených laserovým paprskem stoupla. Mezi jednotlivými reznými rychlostmi dále

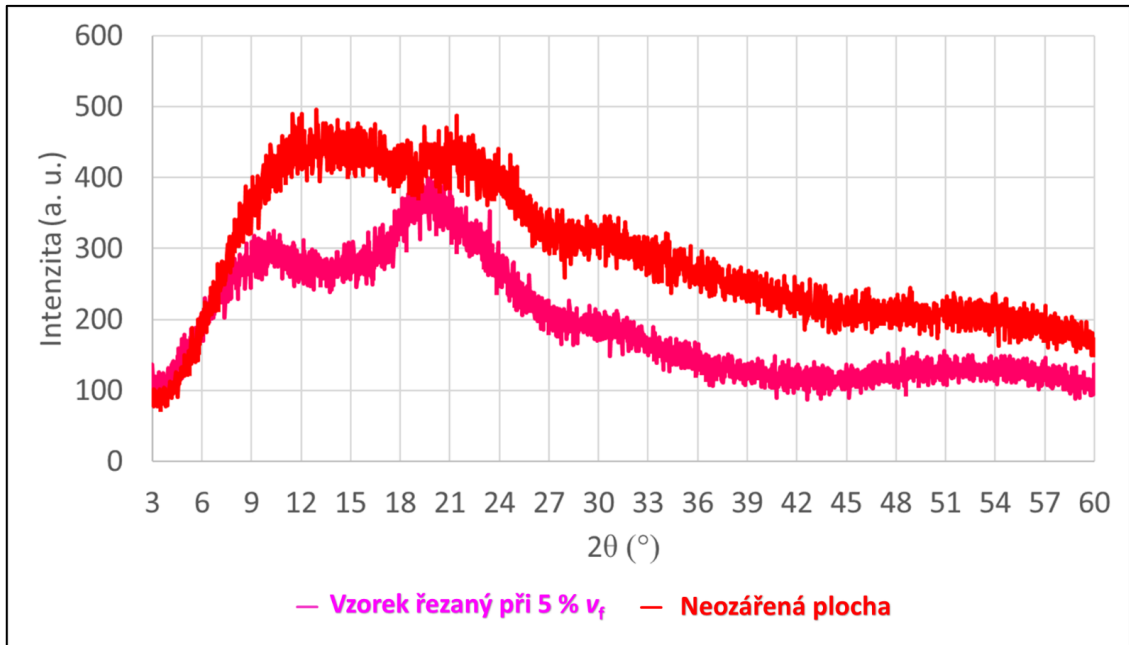
nebyl pozorován žádný patrný rozdíl v hodnotách krystalinity. Během tepelné degradace vzorků ozářených laserovým paprskem nejprve docházelo k odštěpování formaldehydu na nestabilních koncích řetězců a následně při zvýšeném tepelném účinku laserového paprsku docházelo k náhodnému štěpení polymerního řetězce, což vedlo k růstu krystalinity. U vzorku řezaného laserem při 4 % (60,96 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) řezné rychlosti došlo k poklesu krystalického podílu vzorků. To mohlo být způsobeno vzniklou deformací vzorků během procesu vstřikování.

Získané výsledky krystalinity zkoumaných vzorků PP ukazují, stejně jako výsledky krystalinity těchto vzorků získaných měřeními DSC v tab. 8.3 na str. 72, že ve vzorcích ozářených laserovým paprskem nedošlo k žádné výrazné změně krystalinity. Lze pozorovat pouze velmi malý nárůst krystalinity u ozářených vzorků při snižování řezné rychlosti. To naznačuje, že u vzorků ozářených laserovým paprskem docházelo k mírné degradaci v podobě náhodného štěpení polymerních řetězců.

9.4 Rentgenová difrakční analýza vzorků PC

Rentgenová difrakční analýza nebyla prováděna na všech vzorcích PC jako u předchozích materiálů, jelikož nebylo vytvořeno dostatečné množství vzorků pro tuto metodu měření při nižší řezné rychlosti, než byla řezná rychlost 5 % (76,2 mm / s). Při nižší řezné rychlosti docházelo k hoření vzorků během procesu řezání laserem, tudíž mohlo dojít k poškození čočky v laserové hlavě.

Naměřené rentgenové difrakční snímky zkoumaných vzorků PC jsou zobrazeny na obr. 9.7. na str. 85.

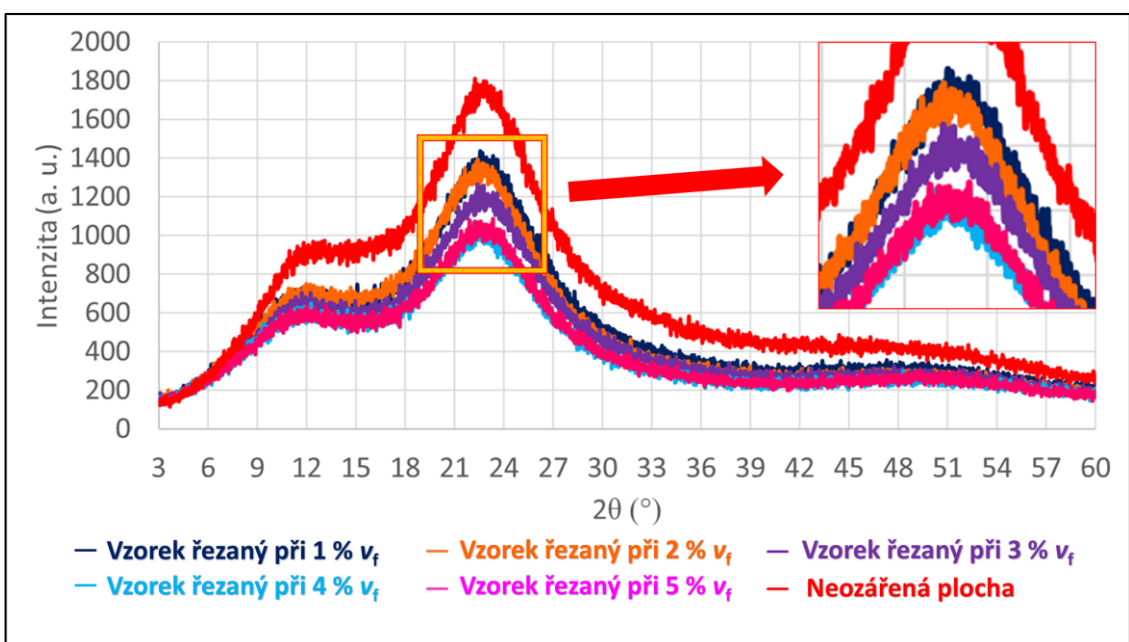


Obr. 9.7 Rentgenový difrakční snímek vzorků PC.

Vyhodnocené parametry DSC analýzy pozorovaných vzorků PC jsou uvedeny v tab. 9.2 na str. 87.

9.5 Rentgenová difrakční analýza vzorků PS

Na obr. 9.8 jsou zobrazeny rentgenové difrakční snímky vzorků PS. Jedná se o amorfní materiál, proto bylo předpokládáno, že se u tohoto materiálu neprojeví žádné nebo velmi malé změny ve strukturách zkoumaných vzorků.

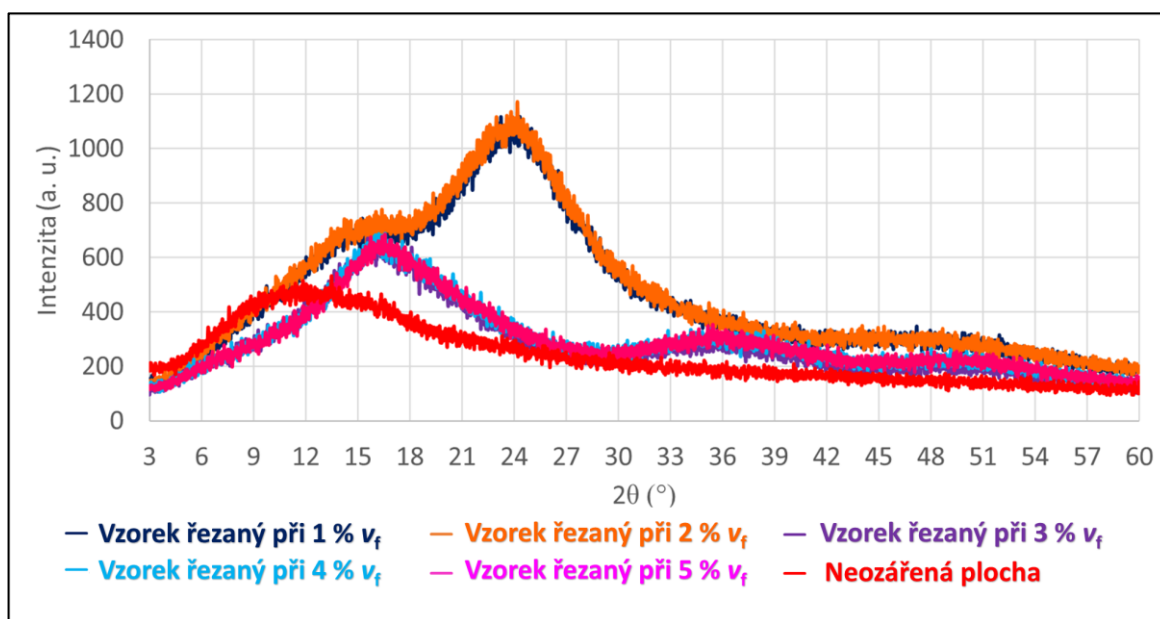


Obr. 9.8 Rentgenový difrakční snímek vzorků PS.

Parametry vyhodnocené z DSC analýzy pro vzorky PS jsou uvedeny v tab. 9.2 na str. 87.

9.6 Rentgenová difrakční analýza vzorků PMMA

Naměřené difrakční snímky zkoumaných vzorků PMMA jsou zobrazeny na obr. 9.9. V naměřených difrakčních snímcích lze pozorovat postupný nárůst intenzity RTG záření u vzorků, které byly řezány pomocí laseru.



Obr. 9.9 Rentgenový difrakční snímek vzorků PMMA.

U amorfních vzorků PC, PS a PMMA bylo možné zkoumat pomocí rentgenové difrakce opět jen krystalický podíl v jejich strukturách, jako tomu bylo u semikrystalických materiálů, i když tato metoda měření není vhodná pro amorfní materiály. Získané výsledky krystalinity v amorfních vzorcích jsou uvedeny v tab. 9.2 na str. 87.

Tab. 9.2 Výsledky krystalinity zkoumaných amorfních materiálů.

Materiál	Typ vzorku		Krystalinita (%)
PC	Neozářený		6,73
	v_f (%)	5	15,95
PS	Neozářený		15,25
	v_f (%)	5	20,35
		4	20,20
		3	20,87
		2	19,59
1		19,85	
PMMA	Neozářený		6,71
	v_f (%)	5	4,18
		4	4,07
		3	3,97
		2	11,97
1		13,73	

Výsledky krystalinity vzorků PC ukázaly u neozářeného vzorku hodnotu 6,73 % a u vzorku řezaného při 5 % (76,2 mm / s) řezné rychlosti hodnotu 15,95 %. Lze tedy pozorovat nárůst krystalického podílu ve vzorcích po ozáření laserovým paprskem. Pomocí laserového paprsku byla pravděpodobně dodána do vzorků dostatečná aktivační energie pro nukleaci malých krystalických zárodků v jejich struktuře a tím došlo u ozářených vzorků k nárůstu krystalinity.

Hodnoty krystalinity vzorků PS byly o něco vyšší, než je přisuzováno tomuto materiálu. K zapříčinění vyšší krystalinity mohlo dojít vlivem procesu vstřikování. Krystalinita vzorků PS stoupla u vzorků řezaných laserem, jak udává tab. 9.2.

Z vyhodnocených výsledků krystalinity vzorků PMMA lze pozorovat, že u vzorků řezaných vyšší řeznou rychlostí docházelo k mírnému poklesu krystalinity. U vzorků řezaných při řezné rychlosti 2 % (30,48 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) pak došlo ke skokovému nárůstu krystalinity. Zkoumané vzorky PMMA a PS vykazují podobné změny v hodnotách krystalinity. Laserový paprsek u těchto materiálů pravděpodobně způsobil růst a takticitu malých polymerních řetězců. Nárůst řetězců se pak projevil nárůstem krystalinity.

10 MĚŘENÍ PLOŠNÉ DRSNOSTI POVRCHU ŘEZU VZORKŮ

Plošné parametry umožňují kvantitativní hodnocení plochy všemi technicky významnými směry, protože jsou zkoumané povrchy posuzovány v trojrozměrném prostoru.

Pro analýzu textury povrchu je podstatné, aby byly správně vybrány a nastaveny filtry. Při snímání povrchu se nejdříve aplikuje filtr, pomocí kterého se odstraní z povrchu prvky s velmi krátkou vlnovou délkou. Tím vznikne základní povrch, ze kterého se pomocí následné operace na základě metody nejmenších čtverců vyloučí vliv tvaru z primárního povrchu. Na takto vzniklém povrchu může být ještě aplikován další filtr pro odstranění prvků s dlouhou prostorovou vlnovou délkou.

Pro vyhodnocení, který vzorek zkoumaných materiálů byl nejvíce ovlivněn laserovým řezáním bylo využito plošných výškových parametrů podobného charakteru jako u profilových výškových parametrů.

Prvním výškovým parametrem byl parametr S_a . Tento parametr udává aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu. Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (\mu m) \quad (10.1)$$

Druhým parametrem, který byl vyhodnocován, byl parametr S_q . Tento parametr určuje základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu. Lze jej vyjádřit jako základ průměrné kvadratické výšky povrchu omezeného stupnicí na stanovené ploše A .

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (\mu m) \quad (10.2)$$

Posledním vyhodnoceným parametrem byl parametr S_z . Parametr S_z udává maximální výšku omezené stupnice. Jedná se o součet hodnoty výšky píku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy. [42][43][44]

Pro měření plošné drsnosti povrchu řezu vybraných vzorků byl použit optický profilometr NewView 8000 od firmy Zygo (obr. 10.1, str. 89). Toto měřicí zařízení využívá mód vertikálního interferometrického skenování i interferometrického skenování na základě fázového posuvu využitím monochromatického a bílého světla. Díky kombinaci těchto metod lze provádět měření na netransparentních i transparentních materiálech.



Obr. 10.1 Optický profilometr NewView 8000.

Základní parametry použitého optického profilometru NewView 8000 jsou uvedeny v tab. 10.1.

Tab. 10.1 Parametry optického profilometru NewView 8000.

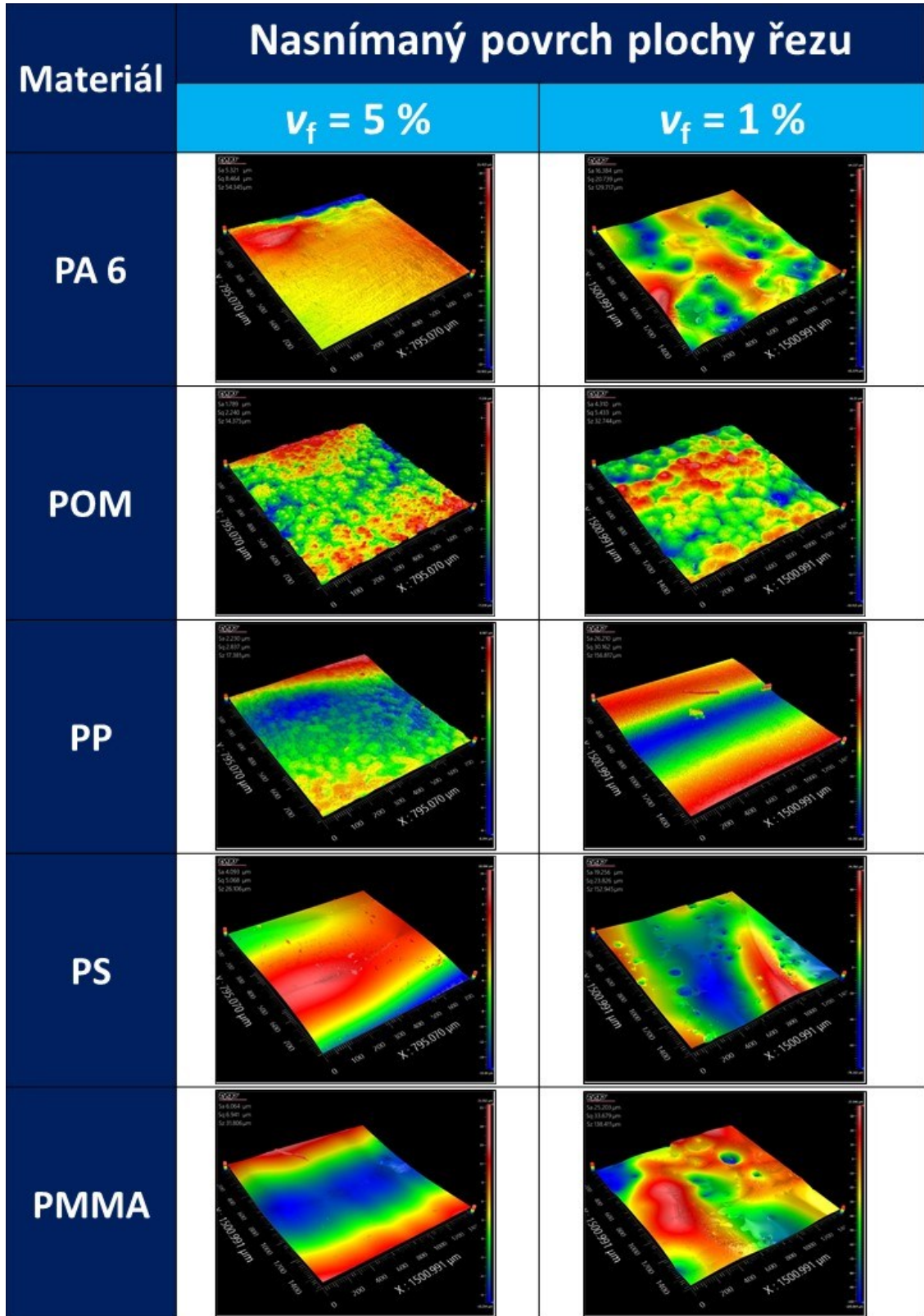
Parametr	Hodnota
Opakovatelnost (nm)	až 0,12
Max. rychlost vertikálního skenování ($\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	96
Rozsah výšky skenovaného profilu (μm)	150 až 20000

V této kapitole jsou uvedeny pro porovnání snímky povrchu řezu vzorků řezaných při 5 % (76,2 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) řezné rychlosti, protože mezi povrchy těchto vzorků se předpokládá největší rozdíl. Snímky všech měřených povrchů ploch řezů pro porovnání mezi jednotlivými materiály jsou uvedeny v příloze I. Snímky povrchů řezů pro jednotlivé materiály kvůli větší přehlednosti jsou pak uvedeny v přílohách II – VI.

Parametry plošné drsnosti povrchu řezů nebyly zkoumány u vzorků PC z důvodu nedostatku zhotovených vzorků v důsledku jejich hoření během procesu laserového řezání a tím možného vzniku poškození čočky laserové hlavy.

10.1 Naměřené parametry plošné drsnosti zkoumaných vzorků

Na obr. 10.2 jsou zobrazeny nasnímané povrchy zkoumaných vzorků řezané při konstantním výkonu laseru 100 W a 5 % a 1 % řezné rychlosti pro vyhodnocení plošné drsnosti.



Obr. 10.2 Nasnímané povrchy ploch řezů vzorků.

Naměřené parametry plošné drsnosti všech nasnímaných povrchů vzorků jsou uvedeny v následující tab. 10.2.

Tab. 10.2 Plošná drsnost povrchů řezů pro různé řezné rychlosti.

Materiál	v_f (%)	S_a	S_q	S_z
		(μm)		
PA 6	5	5,321	8,464	54,345
	4	14,440	17,997	106,682
	3	11,121	14,600	100,057
	2	10,054	12,897	82,212
	1	16,384	20,739	129,717
POM	5	1,789	2,240	14,375
	4	3,619	4,236	24,735
	3	2,951	3,578	23,406
	2	4,076	5,110	30,852
	1	4,310	5,433	32,744
PP	5	2,230	2,837	17,381
	4	2,076	2,901	20,545
	3	3,257	4,224	25,068
	2	2,557	3,005	15,954
	1	26,210	30,162	156,817
PS	5	4,093	5,068	26,106
	4	4,082	5,012	31,171
	3	6,400	8,172	47,371
	2	9,051	11,758	66,444
	1	19,256	23,826	152,945
PMMA	5	6,064	6,941	31,806
	4	3,264	3,967	21,035
	3	2,525	3,071	14,517
	2	13,731	18,094	117,389
	1	25,203	33,679	138,411

Hodnoty S_a samy o sobě neodhalují nic o vlastnostech povrchu. Zcela jiné povrchy mohou mít tu samou hodnotu S_a a přesto mohou vypadat jinak. S_z se měřila jako maximální výška profilu, a proto vykazuje zvyšující se hodnotu v přítomnosti vrcholu nebo údolí, které detekoval zvyšující se parametr S_q .

Z naměřených parametrů v tab. 10.2 lze pozorovat, že změna parametrů plošné drsnosti probíhala u všech materiálů podobně. Výsledky měření plošné drsnosti všech zkoumaných materiálů ukazují, že nejkvalitnější povrchy řezů vznikaly při konstantním maximálním výkonu laseru (100 W) a vyšší řezné rychlosti laseru, v tomto případě 5 % řezné rychlosti (76,2 mm / s). Naopak povrchy řezů nejvíce zasažené a deformované teplotním působením laserového paprsku vznikaly při konstantním výkonu laseru 100 W a minimální řezné rychlosti 1 % (15,24 mm / s).

U parametrů plošné drsnosti povrchů řezů vzorků POM lze pozorovat, že nedošlo k tak výraznému nárůstu plošné drsnosti jako u vzorků PA6. U vzorků POM se nepředpokládalo, že by lépe odolávaly tepelnému působení laserového paprsku než vzorky PA6, tomu nasvědčuje i vyšší teplota tání vzorků PA6. Lze tedy předpokládat, že u vzorků POM docházelo k většímu natavení povrchu řezu a po ochlazení tak vznikl povrch s nižší plošnou drsností.

Naměřené parametry plošné drsnosti povrchu řezů vzorků PP vykazují podobné hodnoty jako vzorky POM. U vzorku řezaného při 1 % řezné rychlosti laseru (15,24 mm / s) lze pozorovat velký nárůst plošné drsnosti. Tuto náhlou změnu způsobily vady ve struktuře vzorků, jak bylo vidět na snímku povrchu tohoto řezu na obr. 10.2 na str. 90. Nejvyšší pík pak ukazuje také parametr plošné drsnosti S_z .

V naměřených parametrech plošné drsnosti vzorků PMMA lze pozorovat u vzorku řezaného při 5 % řezné rychlosti laseru (76,2 mm / s) vyšší plošnou drsnost, než u vzorků řezaných při 4 % (60,96 mm / s) a 3 % (45 mm / s) řezné rychlosti. To způsobila vada ve struktuře vzorku řezaného při 5 % řezné rychlosti, která je zřejmá na snímku povrchu tohoto řezu na obr. 10.2 na str. 90. Z měřených povrchů řezů se zdál být nejkvalitnější povrch řezaný při 3 % řezné rychlosti laseru. Avšak mezi povrchy řezů vzorků řezaných laserem při 5 %, 4 % a 3% řezné rychlosti není rozdíl parametrů plošné drsnosti tak zřejmý. Zřejmý rozdíl těchto parametrů se projevil až u vzorků řezaných při 2 % (30,48 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) řezné rychlosti laseru. U těchto vzorků je vidět zřejmý růst plošné drsnosti v důsledku většího teplotního působení paprsku laseru na povrchy těchto řezů.

11 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Práce se zabývala zkoumáním šesti polymerních materiálů, z nichž tři byly semikrystalické a tři amorfni. Zkoumané polymerní materiály byly PA6, POM, PP, PC, PS a PMMA. Na těchto materiálech bylo zkoumáno, jaký vliv mělo laserové řezání na jejich strukturu za účelem vyhodnocení nejvhodnějších rezných podmínek řezání, při kterých docházelo k nejmenšímu ovlivnění jejich struktury.

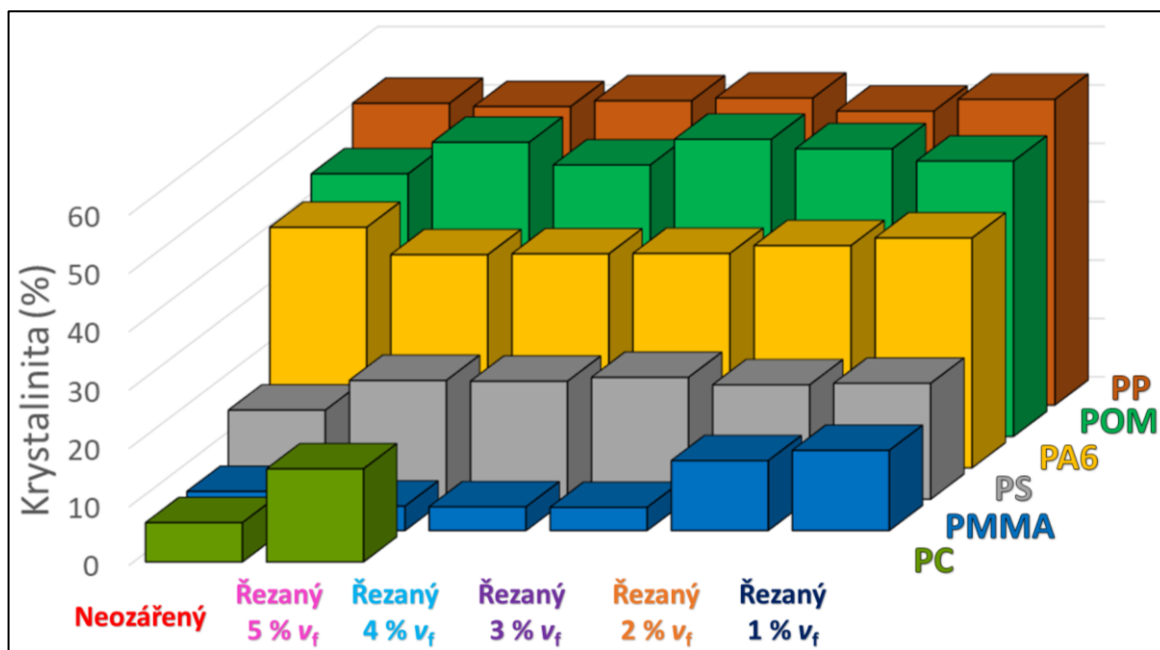
První bylo na vzorcích řezaných laserovým paprskem při maximálním výkonu (100 W) a měnící se rezné rychlosti prováděno měření infračervené spektroskopie (FTIR). Při základním zhodnocení FTIR spekter všech zkoumaných vzorků nebyly patrné žádné významné změny u všech pozorovaných vzorků. Všechny charakteristické absorpční pásy daných materiálů byly viditelné u všech měřených FTIR spekter. Nicméně tepelná degradace mohla způsobovat u pozorovaných vzorků kvantitativní změny, mohlo tedy docházet ke snižování intenzity vybraných pásů. K posouzení těchto změn však technika zeslabeného úplného odrazu (ATR) nebyla příliš vhodná, protože tato metoda nezohledňovala tloušťku vzorků. Aby mohly být tyto změny posouzeny bylo by nutné zvolit tzv. referenční absorpční pás, tj. funkční skupinu, která nepodléhá degradaci. Každý materiál má však tuto funkční skupinu jinou.

Ostatní pozorované výsledky měření změn struktury vzorků zkoumaných materiálů po ozáření laserovým paprskem jsou popsány níže.

11.1 Vyhodnocení krystalinity vzorků

Krystalinita zkoumaných vzorků byla měřena dvěma metodami. První metodou byla DSC analýza a druhou metodou RTG difrakční analýza. Pomocí první metody bylo možné vyhodnotit krystalinitu jen u semikrystalických vzorků. Tyto hodnoty vykazovaly stejný trend v nárůstu a poklesu jako hodnoty následně získané pomocí RTG difrakce. Pomocí rentgenové difrakce, která sice není vhodná pro amorfni materiály, bylo možné vyhodnotit i malý krystalický podíl ve strukturách amorfni vzorků. Pro vyhodnocení byly použity naměřené hodnoty krystalinity vzorků pomocí rentgenové difrakční analýzy. Výsledky krystalinity uvádí tab. 9.1 na str. 83 a výsledky krystalinity amorfni vzorků pak tab. 9.2 na str. 87. Na základě naměřených hodnot uvedených v obou tabulkách byl vytvořen graf znázorňující hodnoty krystalinity zkoumaných vzorků (obr. 11.1 na str. 94). Z tohoto obrázku je patrné, že nejmenší hodnoty krystalinity vykazovaly amorfni vzorky, především PMMA. U vzorků semikrystalických, jak se dalo předpokládat, byly naměřeny podstatně

vyšší hodnoty krystalinity. Z těchto vzorků pak vykazovaly největší krystalický podíl ve struktuře vzorky PP.



Obr. 11.1 Krystalinita vzorků vyhodnocená z RTG difrakce.

Krystalinita u amorfních vzorků PC, PMMA a PS ukazovala nárůst krystalického podílu ve vzorcích po ozáření laserovým paprskem. To by značilo, že pomocí laserového paprsku byla pravděpodobně dodána do vzorků aktivační energie pro nukleaci malých krystalických zárodků a docházelo k malému růstu a takticitě malých polymerních řetězců v jejich struktuře, to pak zapříčinilo u ozářených vzorků nárůst krystalinity.

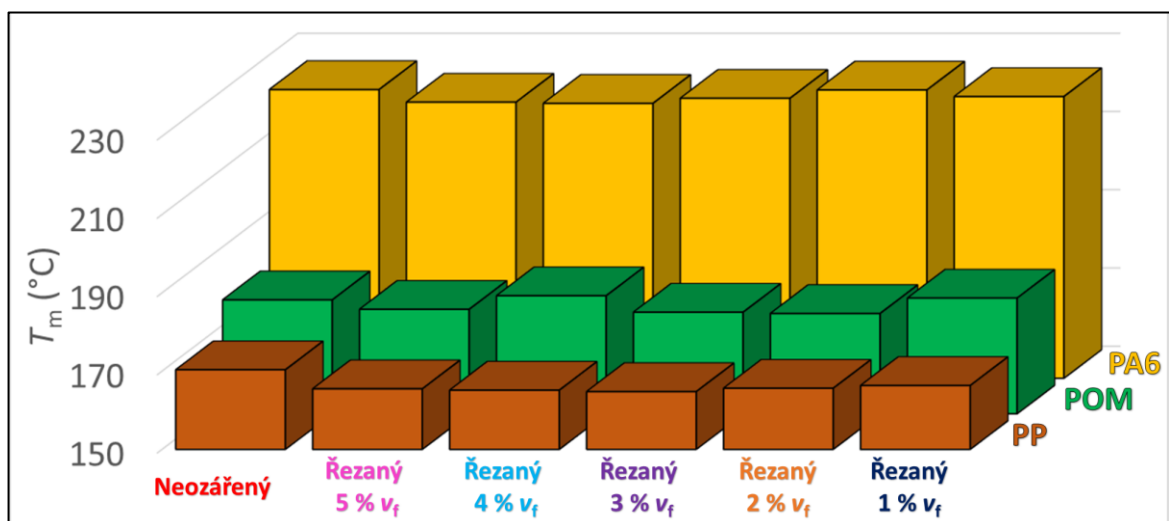
Krystalinita vzorků PA6 ukazuje, že u vzorku řezaného při vyšší rezné rychlosti došlo k zratelnému poklesu krystalinity. Tento pokles značí, že u tohoto vzorku došlo k síťování a štěpení hlavního řetězce současně, přičemž v závislosti na podmínkách ozáření převládalo síťování. Při snižování rezné rychlosti docházelo opět k růstu krystalinity, protože začalo během procesu laserového řezání převládat štěpení hlavního řetězce a fragmenty řetězce uvolňované štěpením řetězce v amorfni fázi se tak mohly integrovat do krystalické fáze.

Výsledky POM ukazují, že krystalinita u vzorků ozářených laserovým paprskem mírně stoupla. Mezi jednotlivými reznými rychlostmi dále nebyl pozorován žádný patrný rozdíl v hodnotách krystalinity. Během tepelné degradace vzorků ozářených laserovým paprskem pravděpodobně nejprve docházelo k odštěpování formaldehydu na nestabilních koncích řetězců a následně docházelo k náhodnému štěpení polymerního řetězce, což vedlo k růstu krystalinity.

Získané výsledky krystalinity zkoumaných vzorků PP ukazují, že ve vzorcích ozářených laserovým paprskem nedošlo k žádné podstatné změně krystalinity. Lze pozorovat pouze velmi malý nárůst krystalinity u ozářených vzorků při snižování řezné rychlosti během procesu laserového řezání. To naznačuje, že u vzorků ozářených laserovým paprskem docházelo k mírné degradaci v podobě náhodného štěpení polymerních řetězců.

11.2 Vyhodnocení teplot tání semikrystalických vzorků

Tab. 8.3 na str. 72 uvádí naměřené hodnoty teplot tání T_m semikrystalických zkoumaných vzorků, tyto hodnoty jsou zobrazeny v grafu na obr. 11.2. Z obrázku lze vidět, že největší hodnoty teplot tání byly získány měřením DSC u vzorků PA6, a naopak nejnižší hodnoty teplot tání u vzorků PP. Z toho vyplývá vlastnost, že PA6 lépe odolává krátkodobému vystavení vyššímu tepelnému působení.



Obr. 11.2 Teploty tání semikrystalických vzorků.

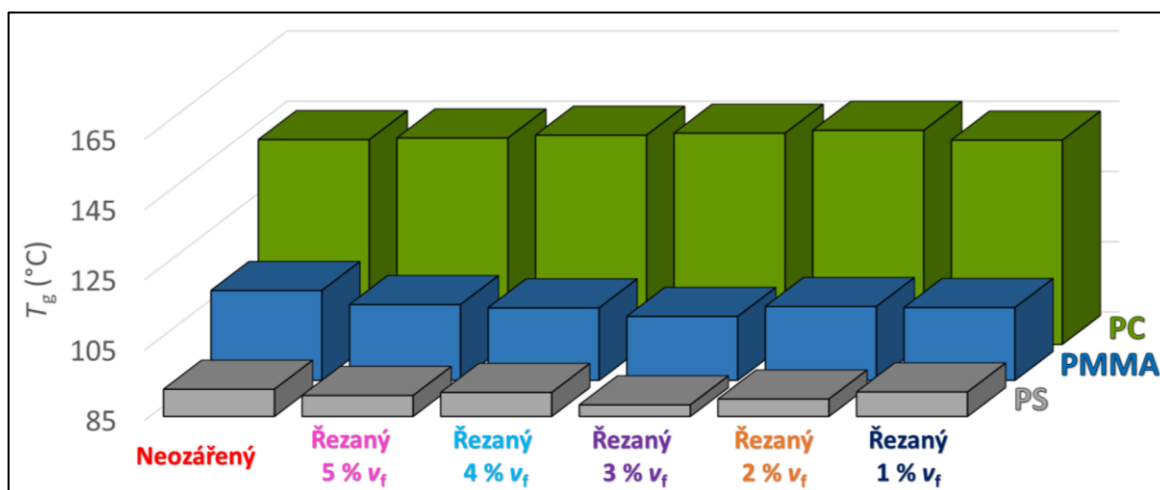
Teplota tání vzorků PA6 vykazuje stejný trend v poklesu a následném růstu při snižování řezné rychlosti, jako tomu bylo u hodnot krystalinity těchto vzorků, protože se v tomto případě hodnoty teplot tání vázaly na hodnoty krystalinity.

U výsledků teploty tání zkoumaných vzorků POM nelze vidět žádnou výraznou změnu. Můžeme zde pozorovat mírný pokles teploty tání u vzorků ozářených laserovým paprskem oproti neozářenému materiálu. To mohlo zapříčinit odštěpování formaldehydu na nestabilních koncích řetězců a následně náhodné štěpení polymerního řetězce. Avšak teplota tání u některých vzorků řezaných laserem dosahovala podobné hodnoty jako u neozářeného základního materiálu.

Výsledky teplot tání vzorků PP ukazují výraznější pokles hodnot u vzorků ozářených laserovým paprskem. Také je zde vidět, že změna řezné rychlosti laseru neměla na hodnoty teplot tání žádný vliv. Pokles teploty tání vzorků PP po ozáření laserovým paprskem naznačuje, že při náhodném štěpení polymerních řetězců, jak tomu naznačovaly hodnoty krystalinity, vznikly kratší řetězce, než byly ty původní, vykazující nižší teplotu tání.

11.3 Vyhodnocení teplot skelného přechodu amorfních vzorků

V tab. 8.4 str. 76 jsou uvedeny naměřené hodnoty teplot skelných přechodů T_g amorfních zkoumaných vzorků měřené pomocí DSC. Získané výsledky těchto teplot jsou vyobrazeny na obr. 11.3. Nejvyšší teploty skelného přechodu byly naměřeny pomocí DSC analýzy u vzorků PC, a naopak nejnižší hodnoty u vzorků PS. Proto vzorky PC lépe odolávají krátkodobému tepelnému působení než vzorky PS.



Obr. 11.3 Teploty skelného přechodu amorfních vzorků.

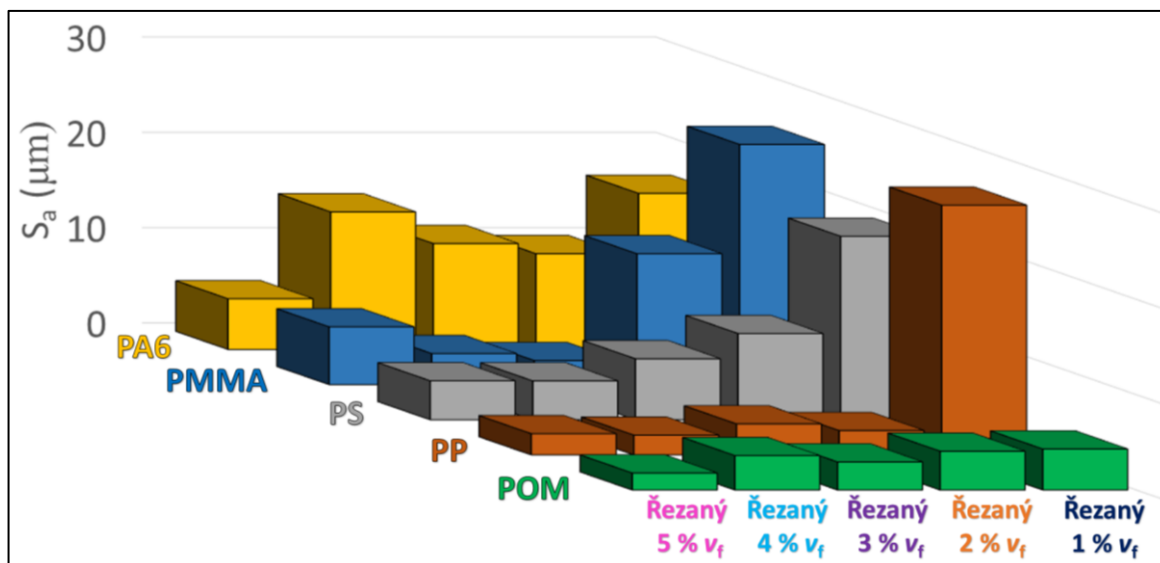
Z výsledků DSC analýzy vzorků PC lze pozorovat změnu v teplotách skelného přechodu mezi základním neozářeným vzorkem a vzorky, které byly řezány laserem. Lze pozorovat mírný nárůst T_g , který mohl souviset s vytvořením řídkých sítí důsledkem síťování vzorků na základě většího tepelného působení laserového paprsku při nižších řezných rychlostech.

Teploty skelných přechodů vzorků PS ukazují pokles hodnot u vzorků ozářených laserovým paprskem. U vzorků řezaných při 4 % (60,96 mm / s) a 1 % (15,24 mm / s) řezné rychlosti byly vzorky odebrány i z místa mimo řeznou plochu, tedy místa, které bylo více vzdálené od plochy řezu. Z tohoto důvodu tyto vzorky vykazují hodnoty teploty skelného přechodu velmi podobné hodnotě neozářeného základního vzorku.

Ze získaných výsledků teplot skelných přechodů neozářeného základního materiálu PMMA a řezaných vzorků tohoto materiálu laserem lze pozorovat pokles této teploty po ozáření laserovým paprskem cca o 5 °C. U vzorků PMMA a PS ozářených laserovým paprskem došlo pravděpodobně k vytvoření tepelně ovlivněné zóny. V systému tepelně ovlivněné zóny došlo ke zvětšení tzv. volného objemu, což je obecně způsobeno vrůstem pohyblivosti jednotlivých segmentů makromolekuly. Konce molekul vnášely do systému více volného objemu než monomerní jednotky uvnitř řetězce. Zvětšení volného objemu se pak projevilo poklesem teploty skelného přechodu.

11.4 Vyhodnocení plošné drsnosti

Vyhodnocené parametry aritmetické střední odchylky povrchů ploch řezů S_a jsou uvedeny spolu s parametry S_z a S_q v tab. 10.2 na str. 91. Všechny tři vyhodnocené parametry vykazují stejný trend v růstu naměřených hodnot u vzorů řezaných laserem při nižší řezné rychlosti. Z tohoto důvodu byl vytvořen pouze graf z vyhodnocených parametrů aritmetické střední odchylky povrchů řezaných vzorků. Graf je zobrazen na následujícím obr. 11.4 na str. 98. Z obrázku je vidět, že plošná drsnost po ozáření vzorků laserovým paprskem nejméně vzrostla u vzorků materiálu POM a PP. U plochy řezu vzorku PP řezaného při 1 % řezné rychlosti (15,24 mm/s) lze vidět prudký nárůst plošné drsnosti. Tento nárůst však nebyl způsoben ovlivněním laserovým řezáním, ale vadou ve struktuře vzorku, která vznikla pravděpodobně během procesu vstřikování. Největší nárůst plošné drsnosti ze zkoumaných semikrystalických vzorků byl pozorován u vzorků PA6. Největší nárůst hodnot plošné drsnosti ze všech vzorků byl pak naměřen u amorfních vzorků PMMA a PS z důvodu jejich vyšší křehkosti.



Obr. 11.4 Hodnoty S_a zkoumaných vzorků.

Z vyhodnocených parametrů lze pozorovat, že změna parametrů plošné drsnosti probíhala u všech materiálů podobně. Výsledky měření plošné drsnosti všech zkoumaných materiálů ukazují, že nejkvalitnější povrchy řezů vznikaly při maximálním výkonu laseru (100 W) a vyšší řezné rychlosti laseru, v tomto případě 5 % řezné rychlosti (76,2 mm / s). Naopak povrchy řezů nejvíce zasažené a deformované teplotním působením laserového paprsku vznikaly při maximálním výkonu laseru (100 W) a minimální řezné rychlosti 1 % (15,24 mm / s).

ZÁVĚR

Laserový paprsek způsobuje u různých materiálů různé účinky. Tyto účinky závisí především na vlastnostech zpracovávaného materiálu. Práce posuzuje účinky laserového působení na strukturu tří semikrystalických (PA6, POM a PP) a tří amorfních polymerních materiálů (PC, PS a PMMA). Každý ze zkoumaných materiálů měl jinou strukturu a chemické složení, tedy u každého materiálu docházelo k jiným změnám v jejich struktuře.

Vzorky byly připraveny ze vstřikovaných zkušebních tělísek řezáním pomocí laserového zařízení ILS 3 – NM. Vzorky měly rozměry 20 x 10 mm (Š x V) a jejich tloušťka byla 4 mm. Aby došlo k proříznutí tloušťky vzorku 4 mm byl zvolen maximální výkon laseru 100 W a řezná rychlost byla postupně snižována od 5 % do 1 % maximální řezné rychlosti 1524 mm / s. U PC byly vytvořeny pouze vzorky při 5 % řezné rychlosti laseru a pouze pár vzorků při řezné rychlosti nižší, protože při nižší řezné rychlosti docházelo k většímu tepelnému působení laserového paprsku a docházelo, jak bylo předpokládáno, k hoření vzorků a k vytváření zplodin, díky čemuž mohlo dojít k poškození laserové hlavy, především čočky. Tím bylo ověřeno, že PC je nevhodný pro laserové řezání.

Na připravených vzorcích byla nejprve měřena infračervená spektroskopie, pomocí které byly zkoumány chemické struktury vzorků v místě řezu. Metoda měření byla ATR, metoda zeslabeného úplného odrazu, která se ukázala jako ne příliš vhodná, protože tato metoda nezohledňuje tloušťku vzorků. Po základním zhodnocení FTIR spekter všech zkoumaných polymerních materiálů po procesu laserového řezání nebyly patrné žádné významné změny v jejich struktuře.

Výsledky měření vzorků PA6 prokázaly, že při vyšší řezné rychlosti docházelo k síťování a štěpení hlavního řetězce současně, přičemž v závislosti na podmínkách laserového ozáření převládalo síťování. Při nižší řezné rychlosti začalo během procesu laserového řezání převládat štěpení hlavního řetězce, a fragmenty řetězce uvolňované štěpením řetězce v amorfní fázi se tak mohly integrovat do krystalické fáze.

Výsledky měření vzorků POM ukázaly, že u vzorků ozářených laserovým paprskem docházelo během tepelné degradace způsobované tepelným působením laserového paprsku nejprve k odštěpování formaldehydu na nestabilních koncích řetězců a následně docházelo k náhodnému štěpení polymerního řetězce.

Na základě výsledků měření vzorků PP bylo zjištěno, že ve vzorcích ozářených laserovým paprskem docházelo k mírné tepelné degradaci v podobě náhodného štěpení polymerních řetězců.

Z výsledků měření vzorků PC byly pozorovány mírné změny v jejich struktuře po ozáření laserovým paprskem, které mohly souviset s vytvořením řídkých sítí důsledkem sítování vzorků na základě tepelného působení laserového paprsku.

U vzorků PMMA a PS ozářených laserovým paprskem došlo pravděpodobně na základě výsledků měření k vytvoření tepelně ovlivněné zóny. V systému tepelně ovlivněné zóny došlo ke zvětšení tzv. volného objemu, což je obecně způsobeno vzrůstem pohyblivosti jednotlivých segmentů makromolekuly. Konce molekul vnášely do systému více volného objemu než monomerní jednotky uvnitř řetězce.

Lze vidět, že laserový paprsek má opravdu na každý ze zkoumaných polymerních materiálů různý účinek v různé míře, ovšem jedná se spíše o menší strukturní změny tepelnou degradací způsobenou působením laserového paprsku. Na základě všech pozorovaných výsledků a z pohledu kvality plochy řezu, která je velmi důležitá kvůli přesnosti budoucích výrobků, lze říct, že nejkvalitnějších povrchů bylo dosaženo při konstantně maximálním výkonu laseru 100 W a při vyšší rezné rychlosti (5 %) a při následném snižování rezné rychlosti docházelo k zhoršování kvality povrchů řezů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WANG, Yanen, Mudassar REHMAN a Mozammel MIA. State-Of-The-Art and Trends in CO₂ Laser Cutting of Polymeric Materials—A Review. *Materials* [online]. 2020, **13**(3839), 3839-3839 [cit. 2020-10-30]. ISSN 13173839. Dostupné z: doi:10.3390/ma13173839
- [2] MORÁVEK, R. Nekonvenční metody obrábění. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 102 s. ISBN 80-7082-518-9.
- [3] Maňková, Ildikó. Progresívne technológie. Viena Košice, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [4] KRAUS, M. Cutting techniques influence on a properties of tool steels. METAL 21.-23.5. 2014 Brno. 2014.
- [5] HARRIS, J. et al. Laser cutting of thick plate. *Materials Forum*. 2001, vol. 25, pp. 88-115. ISSN 0883-2900.
- [6] BARCAL, J. Nekonvenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1989.
- [7] ION, J. Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application, 2005. 576 s.
- [8] MINAŘÍK, V. Tepelné dělení materiálu. 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993, 50s. ISBN 80-01-01028-7.
- [9] KUBÍČEK, J. et al. Technologie svařování a zařízení. 2. vyd. Ostrava: ZERROS, 2001. 395s., ISBN 80-85771-81-0.
- [10] Plasma Welding Machines. CHIH SHENG YI TECHNOLOGY CO.,LTD. [online]. © 2021 [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <http://www.csy-tech.com/EN/?f=Plasma-Welding-Machines>.
- [11] HÍREŠ O. et al. Delenie kovových materiálov okružnou pilou, vodným prúdom a plazmovým oblúkom. 2007. 147 s. ISBN 978-80-8073-769-6.
- [12] WATERJETS. AyersTech LLC [online]. © 2020 [cit. 2021-01-20] Dostupné z: <https://www.ayers-tech.com/waterjets>.
- [13] KOČMAN, K. a kol. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 270 s.

- [14] MADADNIA, J. et al. A Study of Cavitation Induced Surface Erosion in Abrasive Waterjet Cutting Systems. *Advanced Materials Research*. 2008, vol. 53–54.
- [15] Wire EDM (Wire Electro Discharge Machining). EngineeringClicks - The No.1 Mechanical Design Engineering Portal [online]. © 2011 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/wire-edm/>.
- [16] STOKLÁSEK, Pavel. Vliv technologie dělení materiálů na jejich povrchové vlastnosti. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 120 s. Dostupné také z: <http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/45786>.
- [17] HADDADI, Elyas, Mahmoud MORADI, Ayub KARIMZAD GHAVIDEL, Ali KARIMZAD GHAVIDEL a Saleh MEIABADI. Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO2 laser cutting of polystyrene. *Optik* [online]. 2019, **184**, 103-114 [cit. 2020-10-31]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2019.03.040
- [18] CHOUDHURY, I.A. a S. SHIRLEY. Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. *Optics and Laser Technology* [online]. 2010, **42**(3), 503-508 [cit. 2020-10-31]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2009.09.006
- [19] CAIAZZO, F., F. CURCIO, G. DAURELIO a F. Memola Capece MINUTOLO. Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO 2 laser beam. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. 2005, **159**(3), 279-285 [cit. 2020-10-31]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.02.019
- [20] NOVÁK, Miroslav. SERIÁL NA TÉMA LASERY – ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. LAO – průmyslové systémy [online]. 15. 3. 2011 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery--zakladni-princip-laseru-ajejich-deleni-127>
- [21] LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. Univerzita Palackého v Olomouci [online], 13. 12. 2010 [cit. 2020-11-1]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>

- [22] Diffraction Limited Spot Size Optical Calculator. Holo/OR LTD. Design and Manufacture of Diffractive Optics Elements for high power lasers [online]. © 2021 [cit. 2021-01-23]. Dostupné z: <https://www.holor.co.il/optical-calculator/diffraction-limited-spot-size/>.
- [23] DOČEKAL, Miroslav. Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-01-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/27382>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.
- [24] Laser cutting. OpenLearn. The Open University. [online]. © 2017 [cit. 2021-24-1]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-technology/manupedia/laser-cutting>.
- [25] Laser Systems for Optical Microscopy [online]. [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/microscopylasers/>
- [26] Key Parameters of a Laser System. Edmund Optics Inc [online]. [cit. 2021-01-24]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/lasers/key-parameters-of-a-laser-system/>.
- [27] Villumsen, Sigurd. Process time optimization of robotic remote laser cutting by utilizing customized beam patterns and redundancy space task sequencing. 2016 [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5278/vbn.phd.engsci.00080>.
- [28] Mrňa, Libor. Využití výkonových laserů ve strojírenské praxi svařování, dělení a další technologie. Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2021-01-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7209420-Vyuziti-vykonovych-laseru-ve-strojirenske-praxi-svarovani-deleni-a-dalsi-technologie.html>.
- [29] Kazuyuki Uno. Longitudinally Excited CO2 Laser, Laser Pulses - Theory, Technology, and Applications, Igor Peshko, IntechOpen. 2012 [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/laser-pulses-theory-technology-and-applications/longitudinally-excited-co2-laser>.
- [30] Laser Cutting. Bechtel Innovation Design Center. Purdue University [online]. © 2020. [cit. 2021-01-31]. Dostupné z: <https://www.purdue.edu/bidc/resources/laser-engraving-and-cutting/>.

- [31] Plasty jako konstrukční materiál [online]. PETŘÍK, Jan. 2015 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-jako-konstrukcni-material.html?fbclid=IwAR30ccF-QoqLQELd3VEnA5oH7h0S3g98h8opwnYRhS3Bmx_DwVxVDbtCrHU.
- [32] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [33] Rozdělení a charakteristika polymerů [online]. [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>.
- [34] Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti [online]. [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>.
- [35] Termické analýzy [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf.
- [36] Kalogeras, I.M. Glass-Transition Phenomena in Polymer Blends. In Encyclopedia of Polymer Blends, A.I. Isayev (Ed.). 2016 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9783527653966.ch1>.
- [37] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 8085920727.
- [38] KANIA, Patrik. Infračervená spektrometrie. Vysoká škola chemicko – technologická v Praze [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infračervená+spektrometrie.pdf?redirected>
- [39] BROWN, R. Handbook of Polymer Testing, Marcel Dekker, New York, 1999.
- [40] Rentgenová spektrální analýza [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/1IAME/5aIAME-rtg.pdf
- [41] RTG difrakce v materiálovém výzkumu. Přírodovědecká fakulta Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem [online]. ČAPKOVÁ, Pavla. 2011 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf

- [42] KLICHOVÁ, D., Identifikace topografie povrchu materiálů vytvořených hydroabrazivním proudem. Ostrava 2017, 131 s. Disertační práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [43] JIANG, X., DAVID. J., WHITEHOUSE, D. J., Technological Shifts in Surface Metrology. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61, 2012, pp. 815-836, ISSN: 0007-8506
- [44] ČSN EN ISO 25178-2, Geometrické specifikace produktu (GPS) -Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 52 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly a zkratky	Rozměr	Význam
E_0	(-)	Základní energetická hladina
E_1	(-)	Dolní energetická hladina
E_2	(-)	Horní energetická hladina
ν	(Hz)	Frekvence
h	(J · s)	Planckova konstanta
θ	(°)	Divergence
λ_w	(nm)	Vlnová délka laserového paprsku
r_0	(μm)	Průměr vystupujícího laserového paprsku
I	($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Výstupní intenzita záření
I_0	($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Intenzita záření ve středu laserového paprsku
f	(“)	Ohnisková vzdálenost
T	(°C)	Teplota
T_g	(°C)	Teplota skelného přechodu
T_m	(°C)	Teplota tání
T_f	(°C)	Teplota toku
ρ	(kg / m^3)	Hustota
E	(MPa)	Modul pružnosti v tahu
P	(W)	Výkon
ν_f	(%)	Řezná rychlost
m	(mg)	Hmotnost
t	(min)	Čas
d	(-)	Mezirovinná vzdálenost sousedních atomových rovin
λ	(μm)	Vlnová délka
θ	(°)	Braggův úhel

n	(-)	Řád reflexe
S _a	(μm)	Aritmetická střední odchylka povrchu
S _z	(μm)	Maximální výška omezené stupnice povrchu
S _q	(μm)	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
PA6		Polyamid 6
POM		Polyoxymethylen
PP		Polypropylen
PC		Polykarbonát
PS		Polystyren
PMMA		Polymethylmethakrylát
FTIR		Infračervená vibrační spektroskopie s Fourierovou transformací
DSC		Diferenční skenovací kalorimetrie

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1 Rozdělení nekonvenčních metod obrábění na základě fyzikálního principu dle [2].</i>	15
<i>Obr. 1.2 Schéma plazmového řezání dle [10].</i>	16
<i>Obr. 1.3 Princip řezání vodním paprskem s abrazivem dle [12].</i>	17
<i>Obr. 1.4 Princip elektroerozivního drátového dělení dle [15].</i>	18
<i>Obr. 1.5 Tepelné ovlivnění laserem řezané oceli 1.0553 v závislosti na vzdálenosti od řezné hrany. [16]</i>	19
<i>Obr. 2.1 Schéma stimulované emise fotonů. [20]</i>	22
<i>Obr. 2.2 Průchod fotonů rezonátorem. [20]</i>	23
<i>Obr. 2.3 Rozdíl fokusovaného bílého a laserového světla dle [3].</i>	24
<i>Obr. 2.4 Rozbíhavost, prostorový profil a fokusace paprsku laseru dle [3][22].</i>	24
<i>Obr. 2.5 Ukázky módové struktury laseru dle [3].</i>	26
<i>Obr. 2.6 Schéma laserového zařízení dle [24].</i>	27
<i>Obr. 2.7 Expander laserového zařízení dle [25].</i>	28
<i>Obr. 2.8 Vedení filtrovaného svazku do pracovní hlavy laseru dle [26].</i>	28
<i>Obr. 2.9 Schéma laserového řezacího robota od firmy KUKA dle [27].</i>	29
<i>Obr. 2.10 Procentuální zastoupení laserů v průmyslu dle [28].</i>	30
<i>Obr. 2.11 Schéma CO₂ laseru dle [3].</i>	32
<i>Obr. 2.12 Axiální CO₂ laser dle [29].</i>	33
<i>Obr. 2.13 Transverzální CO₂ laser dle [29].</i>	33
<i>Obr. 2.14 Laserová fokusační hlavice dle [30].</i>	34
<i>Obr. 2.15 Klasifikace technologií laserového opracování normou DIN 8580 dle [3].</i>	35
<i>Obr. 2.16 Řezný mechanismus odpařováním materiálu dle [1].</i>	36
<i>Obr. 3.1 Rozdělení polymerů dle teplotního chování dle [33].</i>	38
<i>Obr. 3.2 Termomechanická křivka. [32]</i>	41
<i>Obr. 3.3 Schématické křivky ohřevu a chlazení DSC dle [36].</i>	42
<i>Obr. 6.1 Vstřikovací stroj Allrouder 470 E-1000-290 (35).</i>	49
<i>Obr. 6.2 Laserové zařízení ILS 3 – NM.</i>	51
<i>Obr. 6.3 Místo řezu vzorku na vstříkovaném zkušebním tělisku.</i>	52
<i>Obr. 6.4 Zhotovené vzorky řezány při konstantním výkonu laseru 100 W.</i>	52
<i>Obr. 7.1 Spektrometr Nicolet AVATAR 320 ATR.</i>	54
<i>Obr. 7.2 Oblast zkoumaného vzorku pro měření FTIR.</i>	55
<i>Obr. 7.3 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PA6.</i>	56
<i>Obr. 7.4 Porovnání FTIR spekter vzorků PA6 v oblasti vlnočtu 1800 až 1200 cm⁻¹.</i>	57

<i>Obr. 7.5 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem POM.</i>	58
<i>Obr. 7.6 Porovnání FTIR spekter vzorků POM v oblasti vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹.</i>	58
<i>Obr. 7.7 Porovnání FTIR spekter vzorků POM v oblasti vlnočtu 1500 až 800 cm⁻¹.</i>	59
<i>Obr. 7.8 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PP.</i>	60
<i>Obr. 7.9 Porovnání FTIR spekter vzorků PP v oblasti vlnočtu 1800 až 1200 cm⁻¹.</i>	61
<i>Obr. 7.10 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PC.</i>	62
<i>Obr. 7.11 Porovnání FTIR spekter vzorků PC v oblasti vlnočtu 1800 až 1050 cm⁻¹.</i>	63
<i>Obr. 7.12 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PS.</i>	64
<i>Obr. 7.13 Porovnání FTIR spekter vzorků PS v oblasti vlnočtu 1800 až 1150 cm⁻¹.</i>	64
<i>Obr. 7.14 FTIR spektrum neozářené plochy laserovým paprskem PMMA.</i>	65
<i>Obr. 7.15 Porovnání FTIR spekter vzorků PMMA v oblasti vlnočtu 2900 až 1000 cm⁻¹.</i>	66
<i>Obr. 8.1 Měřicí zařízení DSC1 od firmy Mettler Toledo.</i>	67
<i>Obr. 8.2 Metoda měření DSC vzorků PA6.</i>	68
<i>Obr. 8.3 DSC křivky vzorků PA6 pro první ohřev.</i>	70
<i>Obr. 8.4 DSC křivky vzorků POM pro první ohřev.</i>	70
<i>Obr. 8.5 DSC křivky vzorků PP pro první ohřev.</i>	71
<i>Obr. 8.6 DSC křivky vzorků PC pro první ohřev.</i>	74
<i>Obr. 8.7 DSC křivky vzorků PS pro první ohřev.</i>	74
<i>Obr. 8.8 DSC křivky vzorků PMMA pro první ohřev.</i>	75
<i>Obr. 9.1 Ilustrace Braggovy difrakční podmínky dle [41].</i>	79
<i>Obr. 9.2 Rentgenový difraktometr Rigaku MiniFlex 600.</i>	79
<i>Obr. 9.3 Plocha řezu polymerních vzorků měřená rentgenovou difrakcí.</i>	80
<i>Obr. 9.4 Rentgenový difrakční snímek vzorků PA6.</i>	80
<i>Obr. 9.5 Rentgenový difrakční snímek vzorků POM.</i>	81
<i>Obr. 9.6 Rentgenový difrakční snímek vzorků PP.</i>	82
<i>Obr. 9.7 Rentgenový difrakční snímek vzorků PC.</i>	85
<i>Obr. 9.8 Rentgenový difrakční snímek vzorků PS.</i>	85
<i>Obr. 9.9 Rentgenový difrakční snímek vzorků PMMA.</i>	86
<i>Obr. 10.1 Optický profilometr NewView 8000.</i>	89
<i>Obr. 10.2 Nasnímané povrchy ploch řezů vzorků.</i>	90
<i>Obr. 11.1 Krystalinita vzorků vyhodnocená z RTG difrakce.</i>	94
<i>Obr. 11.2 Teploty tání semikrystalických vzorků.</i>	95
<i>Obr. 11.3 Teploty skelného přechodu amorfních vzorků.</i>	96
<i>Obr. 11.4 Hodnoty S_a zkoumaných vzorků.</i>	98

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2.1 Hustoty výkonů různých energetických zdrojů dle [3].</i>	26
<i>Tab. 2.2 Rozdělení laserů dle [3].</i>	31
<i>Tab. 5.1 Základní fyzikální vlastnosti vybraných typů polymerů.</i>	48
<i>Tab. 6.1 Základní parametry vstřikovacího stroje Allrouder 470 E–1000–290 (35).</i>	49
<i>Tab. 6.2 Parametry vstřikovacího procesu zkušebních tělísek pro zhotovení vzorků.</i>	50
<i>Tab. 6.3 Parametry laserového zařízení ILS 3 – NM.</i>	51
<i>Tab. 8.1 Navážené hmotnosti zkoumaných vzorků pro měření DSC.</i>	68
<i>Tab. 8.2 Teploty ohřevu měření DSC pro jednotlivé materiály.</i>	69
<i>Tab. 8.3 Výsledky DSC analýzy semikrystalických vzorků.</i>	72
<i>Tab. 8.4 Výsledky DSC analýzy amorfních zkoumaných materiálů.</i>	76
<i>Tab. 9.1 Výsledky krystalinity zkoumaných semikrystalických vzorků.</i>	83
<i>Tab. 9.2 Výsledky krystalinity zkoumaných amorfních materiálů.</i>	87
<i>Tab. 10.1 Parametry optického profilometru NewView 8000.</i>	89
<i>Tab. 10.2 Plošná drsnost povrchů řezů pro různé řezné rychlosti.</i>	91

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Povrchy ploch řezů všech vzorků pro různé řezné rychlosti.

Příloha P II: Povrchy ploch řezů vzorků PA6 pro různé řezné rychlosti.

Příloha P III: Povrchy ploch řezů vzorků POM pro různé řezné rychlosti.

Příloha P IV: Povrchy ploch řezů vzorků PP pro různé řezné rychlosti.

Příloha P V: Povrchy ploch řezů vzorků PS pro různé řezné rychlosti.

Příloha P VI: Povrchy ploch řezů vzorků PMMA pro různé řezné rychlosti.