

# Vliv materiálu na jakost povrchu obráběného laserovým paprskem

Vendula Divišová

---

Bakalářská práce  
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vendula Divišová**  
Osobní číslo: **T21029**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Vliv materiálu na jakost povrchu obráběného laserovým paprskem**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Provedení výroby vzorků pro experiment
3. Posouzení obrobeneých ploch
4. Zpracování a vyhodnocení získaných dat

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

Seznam doporučené literatury:

GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. ISBN 978-80-227-3997-9.

DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola  
*A Deep Dive Into Laser Cutter Speed And Power* 2019 <https://makenzine.com/2019/03/04/a-deep-dive-into-laser-cutter-speed-and-power/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Knedlová, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

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

L.S.

**doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 4. března 2024

## **PROHLÁŠENÍ AUTORKY BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- 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 – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji 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 na bakalářské práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků budu uvedena jako spoluautorka.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studentky: Vendula Divišová

.....  
podpis studentky

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá vlivem pracovních podmínek laserového zařízení ILS 3 NM na jakost polymerních materiálů PP, PS, PA6, POM a PMMA. Při výrobě vzorků byly použity různé rezné rychlosti a konstantní výkon.

V teoretické části je podrobně vysvětlen princip laseru, jeho rozdělení a využití v průmyslu. Jsou zde také uvedeny účinky laseru na polymerní materiály, jejich fázové stavy a konkrétní vlastnosti polymerů použitých v praktické části.

V praktické části jsou experimentálně vyhotoveny vzorky ze vstříkovaných polymerních materiálů. Při výrobě vzorků pro experiment byl výkon nastaven na konstantní hodnotu 100 W, zatímco rezná rychlost se měnila na 1 066,8 mm/s, 1 371,6 mm/s a 1 524 mm/s. Následné zhodnocení je zaměřeno na posouzení vytvořené obrobené plochy na povrchu materiálu a porovnání vygravírované hloubky mezi jednotlivými polymery.

Klíčová slova: laser, gravírování, pracovní podmínky, rezná rychlost, výkon, polymer, struktura povrchu, měření hloubky

## **ABSTRACT**

The Bachelor's thesis deals with the impact of the working conditions of the ILS 3 NM laser equipment on the quality of polymer materials PP, PS, PA6, POM and PMMA. Different cutting rates and constant power were used in the production of samples.

The theoretical part explains the principle of laser, its distribution and use in industry in detail. The effects of the laser on polymer materials, their phase states and the specific properties of the polymers used in the practical part are also listed here.

In the practical part, samples are experimentally obtained from injected polymer materials. During the production of the samples for the experiment, the power was set to a constant value of 100 W, while the cutting speed varied to 1 066,8 mm/s, 1 371,6 mm/s and 1 524 mm/s. The subsequent evaluation is aimed at evaluating the formed refined surface on the surface of the material and comparing the engraved depth between the individual polymers.

Keywords: laser, engraving, working conditions, cutting speed, power, polymer, surface structure, depth measurement

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Janě Knedlové Ph.D. za její odborné vedení, cenné rady, ochotu a trpělivost kterou semnou měla po celou dobu tvorby této bakalářské práce. Děkuji také své rodině, která mi věřila, podporovala mě a dodávala mi sílu a motivaci pokračovat. V neposlední řadě bych poděkovala sama sobě, že jsem se nevzdala ani v těch nejtěžších chvílích, získala tak spoustu zkušeností a přiblížila se ke zdárnému cíli.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRINCIP A VLASTNOSTI LASERU .....	11
1.1.1 Princip laseru.....	12
1.1.2 Vlastnosti laseru .....	13
1.2 ROZDĚLENÍ LASERU .....	14
1.2.1 Aktivní prostředí .....	14
1.2.2 Konstrukční uspořádání .....	18
1.2.3 Vlnová délka .....	19
<b>2 VYUŽITÍ LASERU</b> .....	<b>20</b>
2.1 VYUŽITÍ LASERU VE STROJÍRENSTVÍ.....	20
2.2 METODY OBRÁBĚNÍ.....	22
2.2.1 Řezání.....	23
2.2.2 Vrtání.....	23
2.2.3 Soustružení.....	23
2.2.4 Gravírování .....	24
<b>3 POLYMERY</b> .....	<b>25</b>
3.1 ÚČINEK LASEROVÉHO PAPERU NA POLYMERNÍ MATERIÁLY .....	26
3.2 FÁZOVÉ STAVY POLYMERŮ .....	26
3.3 VLASTNOSTI POUŽITÝCH POLYMERŮ .....	29
3.3.1 Polyamid 6 (PA6).....	29
3.3.2 Polyoxymethylen (POM) .....	30
3.3.3 Polypropylen (PP) .....	30
3.3.4 Polymethylmetakrylát (PMMA) .....	31
3.3.5 Polystyren (PS).....	31
<b>4 JAKOST POVRCHU</b> .....	<b>32</b>
4.1 KRITÉRIA HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU PO OBRÁBĚNÍ LASEREM.....	33
4.2 DRSNOST POVRCHU .....	35
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
<b>5 CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>38</b>
<b>6 PŘÍPRAVA VZORKŮ</b> .....	<b>39</b>
6.1 VSTŘIKOVÁNÍ TĚLÍSEK .....	39
6.2 VÝROBA VZORKŮ PRO EXPERIMENT .....	40
<b>7 MĚŘENÍ</b> .....	<b>43</b>
7.1 MĚŘENÍ DRSNOSTI.....	43
7.1.1 Bezkontaktní drsnoměr Talysurf CLI 500 .....	43

7.1.2	Naměřené hodnoty .....	44
7.2	MĚŘENÍ HLOUBKY .....	47
7.2.1	Úchylkoměr ID – H0530.....	47
7.2.2	Naměřené hodnoty .....	48
<b>8</b>	<b>VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ.....</b>	<b>60</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>70</b>



## ÚVOD

Laserové zpracování materiálů je stále častěji využívanou metodou ve výrobních procesech různých odvětví průmyslu díky své přesnosti a efektivitě. Od svého vzniku v roce 1960 se neustále vyvíjí a rozšiřuje své možnosti. Díky své bezkontaktní povaze je laser vhodným nástrojem pro obrábění různých materiálů. S narůstajícím množstvím typů laserů a nových aplikací se stává klíčovým prvkem moderního průmyslu a výzkumu. V důsledku rostoucího požadavku na přesnou výrobu s minimálními tolerancemi se stala laserová technologie ideálním řešením. Nabízí vyšší výkon, zvýšenou efektivitu, nižší míru vad a schopnost pracovat v úzkých mezích tolerance. [1]

Každý materiál reaguje na laserový paprsek individuálně, přičemž jeho vlastnosti a struktura mají zásadní vliv na konečný výsledek zpracování. V dnešní době jsou lasery často využívány pro zpracování polymerních materiálů. I přesto, že tyto procesy jsou stále ve fázi objevování a zdokonalování, poskytují již nyní inovativní řešení pro široké spektrum průmyslových odvětví. Pro gravírování, řezání a značení těchto materiálů jsou často využívány CO<sub>2</sub> lasery, díky jejich schopnosti řídit intenzitu paprsku a tepelný účinek, což umožňuje čisté a přesné obrábění různých typů polymerů. [1; 2]

V budoucnosti má laserová technologie obrovský potenciál k dalšímu rozvoji a rozšíření svého vlivu do různých odvětví. S narůstajícími požadavky na přesnost a kvalitu výrobků se lasery stávají klíčovým prostředkem pro dosažení vyšších standardů v průmyslové výrobě. Rozvoj nových materiálů a technologií otevírá nové možnosti jejich využití v širokém spektru procesů. Průmyslové lasery jsou dobře integrovatelné do automatizovaných výrobních linek a procesů, což vede k efektivnější výrobě a vyšší produktivitě. S růstem digitalizace se očekává další investice do laserových technologií. Celkově je možné předpokládat, že lasery budou hrát stále důležitější roli v moderním průmyslu a stanou se klíčovým faktorem pro inovaci, efektivitu a konkurenceschopnost firem napříč všemi odvětvími.

Tato práce se zaměřuje na zkoumání dopadů laserového gravírování na obrobenou plochu, její hloubku a tvar u vybraných polymerních materiálů.

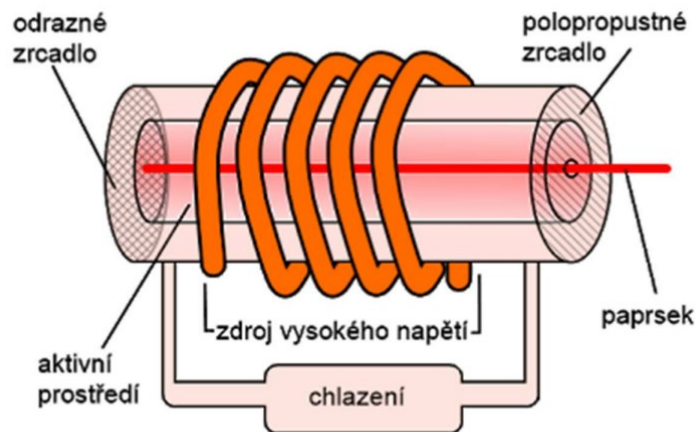
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

## 1.1 Princip a vlastnosti laseru

„Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, z něhož pochází název laser, je anglický výraz pro zesílení světelného paprsku. Laser je zařízení, které vysílá paprsek světla velké intenzity. Podstatou laseru je soustředit energii elektromagnetického záření viditelného světla do velmi malé oblasti obráběného předmětu. Tato energie se přeměňuje na teplo, což způsobuje zahřátí místa, kam laser paprsek směřuje. Tato teplota je výrazně vyšší než teplota tání obráběného materiálu. V důsledku toho dochází k roztavení a následnému odpaření materiálu v místě dopadu. [3; 4]

Energie, která má podobu elektronového vlnění, iontového záření či elektronového záření excituje (probouzí) atomy kapalně, tuhé nebo i plynné aktivní látky, kde následně vzniká inverzní stav. Když atomy této látky přecházejí do stavu základního, stimulovanou emisí vznikne monochromatické (jednobarevné) a koherentní (spojité) záření. Toto záření se již relativně snadno ovládá za pomoci optických čoček a zrcadel které lze vidět na Obr. 1. [3; 4]



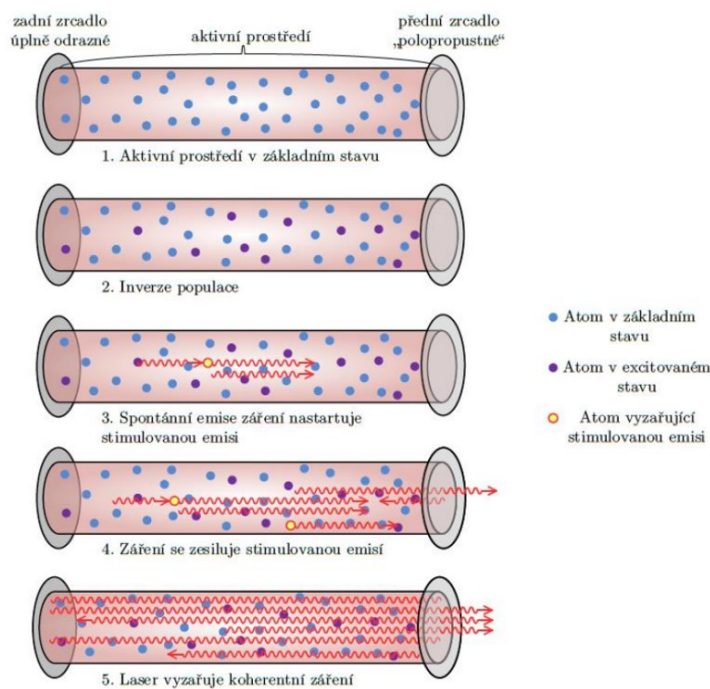
Obr. 1 Obecné schéma laseru [5]

Laserový paprsek má obvykle mnohem vyšší intenzitu než světlo, které ho vyprodukovalo, často až 100 000krát. Při využití laseru v technologických procesech jsou často paprsky, které jsou emitovány laserem, soustředěny pomocí optických čoček na velmi malou plochu obráběného materiálu (řádově 0,001 až 0,01 mm). Dopad těchto paprsků na povrch materiálu může způsobit extrémně vysokou teplotu, která může být dostatečná k roztavení nebo dokonce odpaření materiálu obrobku. [6]

### 1.1.1 Princip laseru

Princip fungování laseru spočívá v tom, že dodaná energie „vyrazí“ určité částice v atomu aktivního prostředí na dráhy s vyšší energetickou hladinou. Tyto částice však na těchto hladinách nezůstávají dlouho a při sestupu na nižší hladinu uvolňují přebytečnou energii ve formě fotonů. Pokud je vhodně umístíme, mohou podpořit další procesy, čímž se v aktivním prostředí postupně hromadí stále více fotonů. Abychom získali paprsek, musíme prostředí vhodně vytvořit. Nejběžnější je vytvoření válce, kde jedna strana je dokonale odrazivé zrcadlo a na opačném konci je zrcadlo polopropustné. Tímto uspořádáním jsou proudy fotonů posilovány odrazy mezi zrcadly, zatímco fotony směřující jinými směry jsou utlumovány. Výsledkem je výstupní paprsek, který vychází z polopropustného zrcadla. Takto vzniká koherentní, soustředěný světelný paprsek, který je charakteristický pro laserové zařízení. [6; 7]

Lavinový efekt vyobrazený na Obr.2 je jev, který se obvykle vyskytuje v polovodičových materiálech, zejména v polovodičových detektorech, kde se využívá k citlivému detekování slabých signálů, nebo polovodičových fotodiodách. Princip lavinového efektu spočívá v tom, že elektron, který je generován například absorpcí fotonu, může ionizovat několik dalších atomů nebo molekul v polovodiči, což způsobí tvorbu dalších elektronových párů. Tento proces se opakuje a vytváří lavinu nositelů náboje, což vede k zesílení původního signálu. [6; 7]



Obr. 2 Lavinový efekt [7]

### 1.1.2 Vlastnosti laseru

U indukované emise je velmi důležité, aby emitovaný (vyzařovaný) foton a přicházející foton měli stejnou fázi, frekvenci, polarizaci a totožný směr. Z toho vyplývají tři nejzákladnější vlastnosti laserů, kterými se velmi liší od ostatních běžných zdrojů záření. Těmito vlastnostmi jsou koherence, monochromaticita a kolimace (soustředění světelných paprsků do jednoho směru). [6; 7]

Díky těmto vlastnostem jsou lasery cenným nástrojem v mnoha různých aplikacích. Zejména v průmyslových aplikacích se laserový paprsek soustředí do malého bodu, aby se dosáhlo vysoké plošné hustoty energie potřebné pro zpracování daného materiálu (řezání, svařování, gravírování, kalení, vrtání). [7]

Opačným příkladem laseru je obyčejná žárovka. Ta generuje záření neuspořádaným způsobem a fotony mají různé vlnové délky a fáze. Fotony se navíc rozbíhají zcela náhodně všemi směry. [7]

#### **Výhody laserů ve srovnání s jinými zdroji energie:**

- není třeba používat běžné obráběcí stroje
- nízký tepelný účinek na oblast obrábění
- lze dosáhnout vysoké přesnosti
- vyžaduje méně času na seřízení a přípravu
- laserové obrábění lze v technických procesech automatizovat nebo robotizovat

#### **Mezi nevýhody laserů patří například:**

- vysoké náklady na pořízení laseru
- nízká účinnost při příkonu a výstupu zařízení (přibližně 10 %)
- údržba je náročnější a je třeba dodržovat přísné bezpečnostní předpisy [6]

#### **Jedinečné vlastnosti laseru**

**Monochromaticita** znamená že světlo v laserovém paprsku má téměř pouze jednu vlnovou délku. Je také rovnoběžný, což umožňuje jeho soustředění do intenzivního úzkého bodového svazku. [6]

**Ohyb** je lom světelných paprsků kolem objektu s ostrými hranami. Díky lomu může laserový paprsek dosáhnout mnohem dál než normální světlo, což vede k malému rozptylu laserového paprsku. [6]

**Zářivost** bývá často nazývána hustotou energie a měří se v jednotkách  $W/cm^2$ . V praxi jde o optický výkon, který není ovlivněn žádnou manipulací s optikou. Zářivost především závisí na rezonátoru a jeho konstrukci. [6]

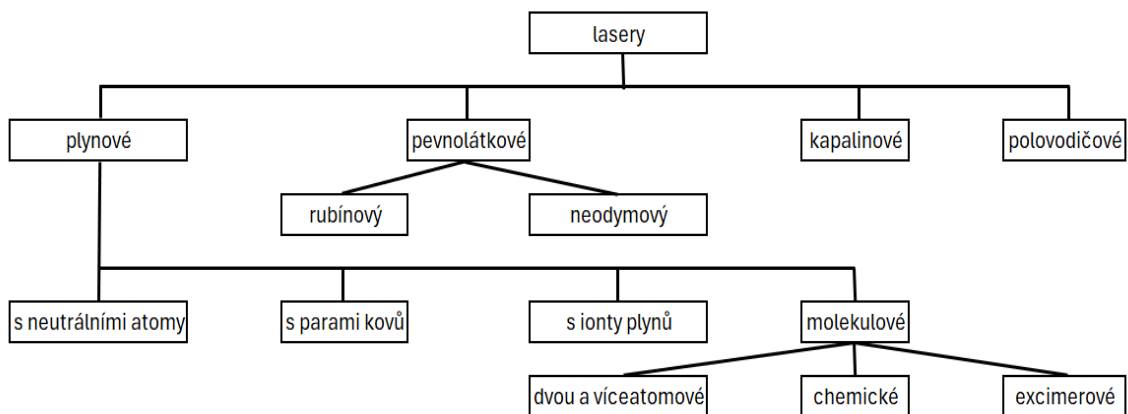
V **prostorově koherentním** paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku. V **časově koherentním** paprsku kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází ve směru šíření paprsku. [6]

## 1.2 Rozdělení laseru

Existuje spousta specifických typů laserů v závislosti na jejich konstrukci, aplikacích a vlastnostech. Můžeme je tak rozdělit podle různých kritérií:

### 1.2.1 Aktivní prostředí

Pro laser je možné jako aktivní látku neboli laserovací médium, použít velké množství materiálů s výjimkou kovů. Podrobnější rozdělení můžeme vidět na Obr.3. [8]



Obr. 3 Dělení laserů podle aktivního prostředí [9]

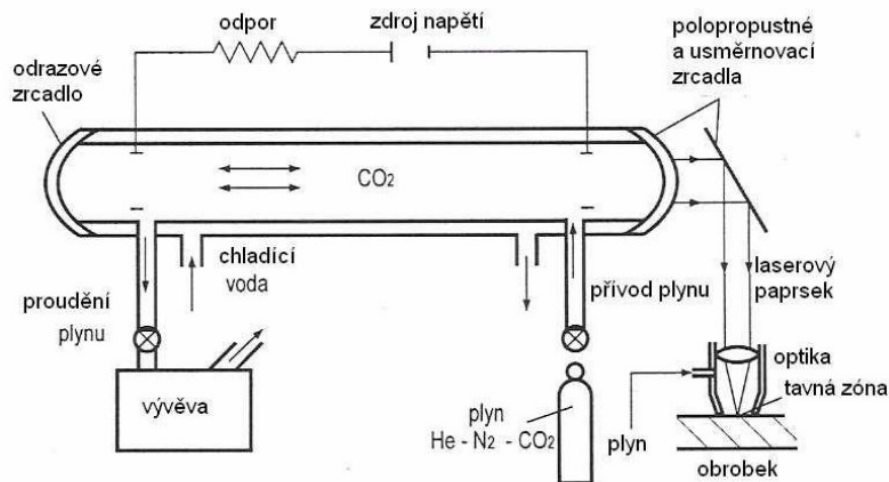
### Rozdělení podle skupenství aktivního prostředí:

- Plynové
- Pevnotátkové
- Kapalinové
- Polovodičové [8]

## Plynové lasery

Aktivním prostředím plynových laserů je plynná fáze. K buzení dochází elektrickým výbojem, opticky, radiofrekvenčními vlnami, chemickou reakcí, expanzí plynu a různými dalšími metodami. Ve většině případů pracují plynové lasery nepřetržitě, s výjimkou vysoce výkonných pulzních laserů. Díky jednotnému aktivnímu prostředí je laserový svazek dobře homogenní a divergence (odklon) je malá. Dosahuje se vysoké účinnosti laseru až několik desítek procent. Na druhé straně je však nízký výkon, který závisí na objemu aktivního média. Proto jsou výkonné lasery výrazně větší. [8; 10]

V praxi se nejčastěji používá CO<sub>2</sub> laser, jehož schéma je zobrazeno na Obr.7, s infračerveným zářením o vlnové délce 10 μm. Aktivní prostředí tvoří oxid uhličitý buzený elektrickým výbojem. Používají se k vrtání, řezání a svařování. Speciálními plynovými lasery jsou excimerové lasery. Aktivní médium tvoří molekuly vytvořené ze dvou různých molekul vzácných plynů pomocí svazku elektronů. Excimerové lasery jsou silným zdrojem ultrafialového záření. [8; 10]

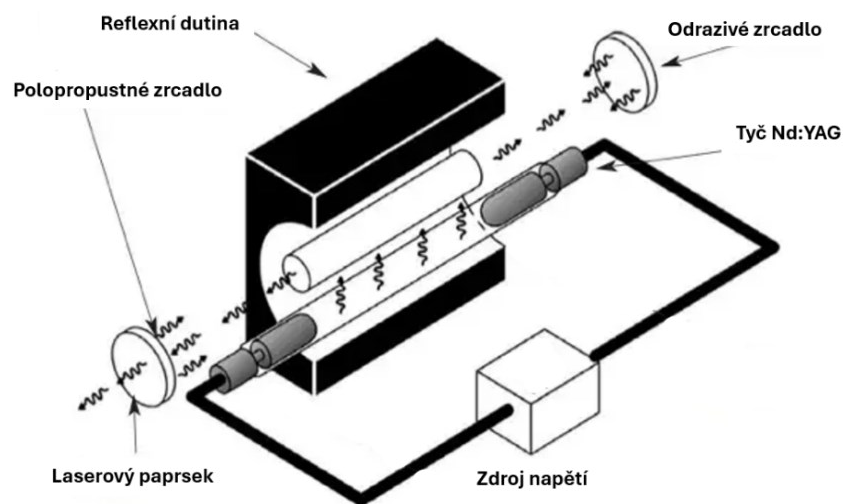


Obr. 4 Schéma plynového laseru [8]

## Pevnolátkové lasery

Aktivním prostředím je často pevná látka ve formě krystalů, skla nebo granátu, smíchaná s příslušnými ionty. Na rozdíl od plynových laserů je excitace obvykle optická. Může pracovat ve všech režimech a je flexibilní. Produkuje záření o vlnových délkách ve viditelné až infračervené oblasti. Hlavní výhodou těchto laserů je jejich nenáročnost na údržbu a pracovní podmínky. [6; 10]

Mezi nejběžněji používané pevnolátkové lasery patří Nd: YAG laser, vyobrazený na Obr.4 patří díky svým vlastnostem a širokému spektru aplikací. Nd: YAG je zkratka pro neodymový (Nd) dopovaný yttrium-aluminiový granát (YAG), což je typ krystalu používaného jako aktivní prostředí v mnoha laserových systémech. Neodym je příměs do krystalové mřížky YAG, což umožňuje vytváření laserových paprsků. YAG krystal poskytuje robustní mechanickou stabilitu a tepelnou odolnost. Laser může pracovat v kontinuálním i pulzním režimu. Tyto lasery se používají při generování zeleného světla, v lékařství jako skalpel a v průmyslových odvětvích pro vrtání, svařování a značení. [8]



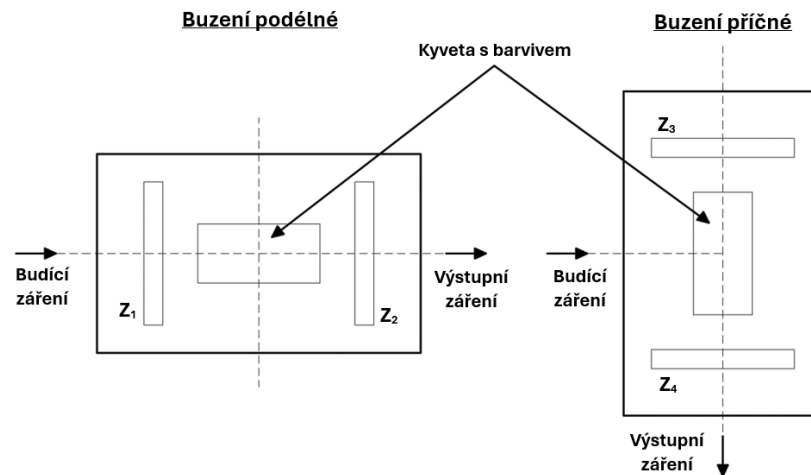
Obr. 5 Schéma pevnolátkového laseru [11]

### Kapalinové lasery

Kapalinové lasery využívají aktivního prostředí z roztoku organických barviv, které jsou dopované ionty zemin a buzené optickým zářením. Existují dva typy optické excitace těchto laserů: příčná a podélná viz Obr.5 na straně 17. Při příčném buzení se budící zařízení šíří kolmo na směr podélné osy otevřené dutiny barvicího laseru, zatímco při podélném buzení je směr buzení a generovaného záření stejný. [12]

Jednou z výhod těchto laserů je možnost spojitě přeladovat vlnovou délku záření pomocí změny barviv a nelineární optiky, což umožňuje dosáhnout širokého rozsahu vlnových délek od 300 nm do 1500 nm. Rhodamonový laser je příkladem, který generuje záření od zeleného po červené spektrum. Mezi nevýhody kapalinových laserů patří jejich toxicita a kratší životnost aktivního prostředí, což vedlo k snaze nahradit je laditelnými pevnolátkovými lasery. Kapalinové lasery jsou využívány zejména ve spektroskopii a v medicíně, například ve fotodynamické terapii. [12]



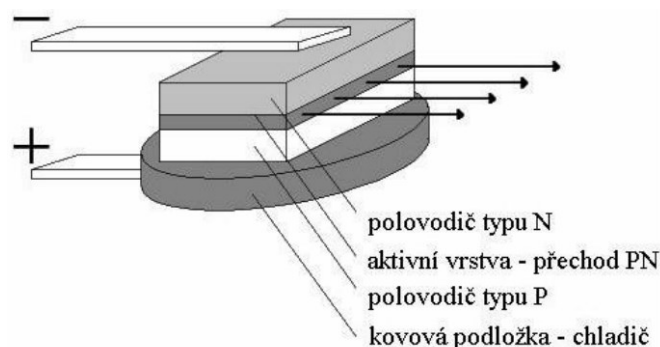


Obr. 6 Koherentní buzení barvivového laseru [12]

### Polovodičové lasery

Polovodičové lasery, známé také jako laserové diody, jsou běžným typem laserů s malými rozměry, což ovšem přináší větší rozptyl paprsku než u jiných typů laserů. Jsou velmi citlivé na změny teploty. Modulace paprsku je snadná změnou elektrického proudu, avšak mají nižší účinnost (obvykle 50 %). Mohou pracovat jak v kontinuálním, tak v pulsním režimu a při velmi kompaktním uspořádání dosahují relativně vysokých výkonů. Využívají se zejména v telekomunikacích, v počítačové technice a také jako čerpadla pro pevnolátkové lasery, čímž umožňují vytvoření malých a výkonných laserových generátorů. [8; 12]

Původní polovodičové lasery, známé jako injekční, využívaly vlastnosti PN přechodu, přičemž arsenik galitý se ukázal jako nejvhodnější materiál. Jedná se o strukturu, která vytváří rozhraní mezi dvěma vrstvami, jednu s nadbytkem kladných elektronových děr, označovanou jako typ P, a druhou s nadbytkem valenčních elektronů, označovanou jako typ N. Avšak jejich nevýhodou byla potřeba chlazení na extrémně nízkou teplotu okolo  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Navíc jejich výkon byl závislý na provozní teplotě. [8; 12]



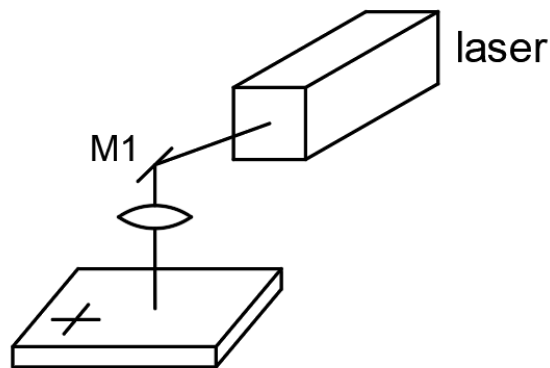
Obr. 7 Schéma uspořádání polovodičového laseru [13]

### 1.2.2 Konstrukční uspořádání

Z konstrukčního hlediska hraje důležitou roli způsob přenosu laserového paprsku z oscilátoru na obrobek. Podle konstrukce lasery dělíme podle velikosti opracované součástky, kvality laserového paprsku a rezné rychlosti na tři základní typy:

#### 1. Pevný laser a pohyblivý stůl

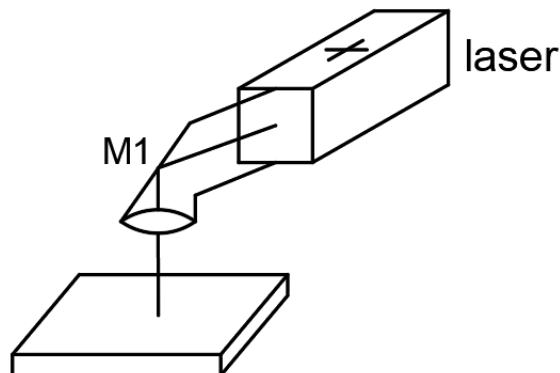
Konstrukce, ve které je laser pevně zabudován a pohyblivou částí je stůl, na kterém je pevně uchycen obrobek, jak lze vidět na Obr.8. Limitní je velikost, hmotnost a tvar výrobku. [8]



Obr. 8 Schéma pevného laseru a pohyblivého stolu [8]

#### 2. Pohyblivý laser a pevný stůl

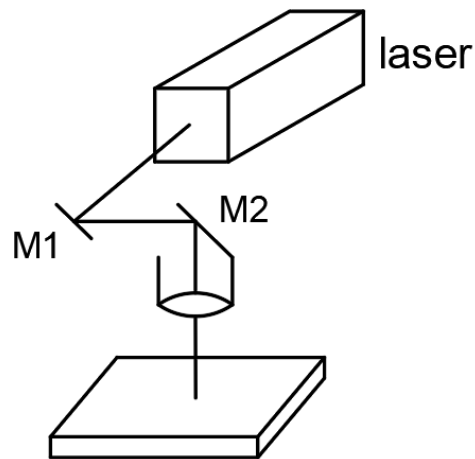
Konstrukce popsána na Obr.9, ve které je laser pohyblivou částí a stůl, na kterém je obrobek upevněn, je nehybný. Při tomto typu obrábění se používají převážně lehké laserové hlavy s nižší reznou rychlostí a obvykle nižším výkonem. V porovnání s předchozím způsobem obrábění je zde menší omezení týkající se hmotnosti a tvaru výrobku. [8]



Obr. 9 Schéma pohyblivého laseru a pevného stolu [8]

### 3. Pevný laser i stůl

Konstrukce, ve které zrcadla zajišťují pohyb paprsku, zatímco laserová hlava a obrobek jsou proti sobě fixně upevněny, jak je zobrazeno na Obr.10. Tento typ konstrukce má mnoho aplikací. Nabízí vysokou řeznou rychlost a úsporu místa, ale její nevýhodou je citlivost na vibrace a nutnost přesného nastavení (nežádoucí rozptyl laserového paprsku). [8]



Obr. 10 Schéma pevného laseru i stolu [8]

Dnes již existují systémy, které využívají CNC (Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem). Laserový paprsek může být také součástí robotického ramene, které umožňuje pětiosé obrábění. Tato metoda se používá pro obrábění, řezání, vrtání anebo svařování složitých tvarů. [8]

#### 1.2.3 Vlnová délka

Materiál, který tvoří aktivní prostředí laseru, ovlivňuje také jeho vlnovou délku ( $\lambda$ ), a tím i jeho použití.

- infračervené záření (IR)
- viditelné světlo
- ultrafialové záření (UV)
- rentgenové a gama záření (RTG)

Lasery na bázi CO<sub>2</sub> mají vlnovou délku ( $\lambda$ ) přibližně 10 600 nm, lasery Nd: YAG 1064 nm a dusíkové lasery (N) 337 nm. [14]

## 2 VYUŽITÍ LASERU

Mezi oblasti použití laserového paprsku patří obrábění, značení a popisování (gravírování) materiálů, nanášení povlaků, laserové svařování a navařování, přesné měření poloh a rozměrů součástí, tepelné zpracování a defektoskopie (nedestruktivní testování materiálů nebo součástí, které je schopno odhalit vady ve výrobku). Laser se nejvíce používá na řezání materiálu. [6; 8]

Některé typy laserů mají nevýhodu nízké účinnosti při přeměně energie, ovšem tuto nevýhodu vyvažuje vysoká kvalita laserového světla. Laser je však jedním z nejužitečnějších vynálezů a nástrojů současnosti, a proto je široce využíván v mnoha odvětvích. jako jsou:

- medicína – dermatologie, plastická chirurgie, operace očí, neurologie, urologie,
- mikroelektronika
- astronomie, geodézie, geofyzika – lasery se používají k měření vzdáleností mezi objekty (např. polohy družic, sledování drah, zkoumání zemětřesení)
- ekologie – měření znečištění ovzduší a identifikace znečišťovatelů
- výpočetní technika – tiskárny, kopírky
- spektroskopie – studium spektra látek
- jaderná fyzika
- vojenský průmysl – zaměřovací optiky na zbraních, laserové navádění
- průmyslové aplikace – svařování, vrtání, řezání, popisování, označování a kalení materiálů [12]

### 2.1 Využití laseru ve strojírenství

V oblasti strojírenství se laserová technologie začala využívat od druhé poloviny 60. let. Od té doby prošla laserová technologie neustálým rozvojem a inovacemi. Laserovou technologii definujeme jako způsob zpracování materiálu, který je založený na následujících principech:

- využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu
- interakci optického záření s materiálem [8; 10]

Základním přínosem laserových technologických operací je možnost zpracování materiálu bez mechanického kontaktu s výrobkem, což umožňuje zpracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. [10]

Obrobitelnost materiálu laserem závisí zejména na následujících vlastnostech:

- pohltivost materiálu, což je jeho schopnost absorbovat světelnou energii a přeměňovat ji na tepelnou energii
- odrazivost, která udává poměr mezi množstvím odražené energie a dopadající energií. [8; 10]

Vyšší kvalita zpracování materiálu bude dosažena v případě, že má materiál vysokou pohltivost, nižší tepelnou vodivost a nižší odrazivost. [8; 10]

#### **Výhody použití laseru ve strojírenství:**

- při obrábění nedochází ke styku s obrobkem
- ovlivněná oblast teplem je malá
- k obrábění není zapotřebí řezných sil
- proces obrábění je velmi přesný a rychlý
- řezná drážka je malá při toleranci až 0,05 mm
- lze vytvářet libovolné tvary bez použití nástroje
- řez může být proveden v libovolném směru
- proces obrábění je poměrně tichý a čistý
- díky optické soustavě může jeden zdroj působit na více pracovištích
- při vysoké rychlosti lze obrobit i materiály, které jsou jinak těžce obrobitelné
- snadné ovládání a regulace výkonu
- hustota energie a její koncentrace jsou velmi vysoké
- lze automatizovat proces výroby
- deformace a napětí v obrobeném materiálu jsou malé
- svary lze zhotovovat i na jinak těžko přístupných místech
- dokončovací operace po obrobení laserem jsou minimální [6; 8]

## 2.2 Metody obrábění

Pro obrábění jsou hojně využívány plynové CO<sub>2</sub> a také pevnolátkové lasery. Většinou se jedná o pulzně pracující lasery, spíše než kontinuální. Při řezání laserem je velmi přínosné, že se zlepšuje kvalita povrchu (drsnot a zbytkové napětí). [8]

Při zpracování kovů laserovým obráběním se operace dělí v procentuálním poměru přibližně takto: 38 % - řezání, 20 % - gravírování, 18 % - svařování, 18 % - tepelné zpracování, 6 % vrtání a ostatní. [6]

Laserová technologie má v průmyslových odvětvích nezastupitelné místo. Normalizace technologií zpracování materiálu laserem podle normy DIN 8580 je toho důkazem. Tato norma rozděluje laserové zpracování materiálů do šesti základních skupin uvedených v Tab.1.

*Tab. 1 Klasifikace technologií laserového opracování [8]*

<b>Primární tvarování</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stereolitografie</li> <li>• Spékání</li> </ul>
<b>Tváření</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tváření laserovým ohřevem (ohýbání)</li> </ul>
<b>Řezání</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Řezání (sublimační, tavné, s aktivním plynem)</li> <li>• Vrtání</li> <li>• Gravírování</li> <li>• LAM (Laser Assisted Machining)</li> <li>• Označování</li> </ul>
<b>Spojování</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Svařování</li> <li>• Pájení</li> </ul>
<b>Povlakování</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Povrchové legování</li> <li>• Plazma CVD</li> </ul>
<b>Tepelné zpracování</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalení</li> <li>• Žihání</li> <li>• Zpevňování</li> </ul>

### 2.2.1 Řezání

Při laserovém řezání se dosahují velmi úzké, přesné a hladké řezy bez okují. Hrany jsou kolmé i při větší tloušťce materiálu a většinou není potřeba další úpravy. Hloubka řezu závisí na výkonu laserového systému a na druhu řezaného materiálu.

Technologie řezání laserovým paprskem lze rozdělit do dvou metod: řezání materiálu v celé jeho tloušťce (například u plechů, překližek a jiných tenkých materiálů) a vytvoření drážky na povrchu materiálu a následné kontrolované prolomení, tato metoda se využívá zejména u křehkých materiálů, jako jsou keramika nebo sklo. Laserové řezání může probíhat třemi způsoby: tavným, oxidačním nebo sublimačním. [15; 16]

### 2.2.2 Vrtání

Vrtání laserem lze využít ve velkém spektru materiálů, včetně plastů, kovů, keramiky, skla, dřeva a dalších přírodních materiálů. Materiál na povrchu, který je vystaven paprsku, se odpařuje, což umožňuje paprsku proniknout hlouběji pod povrch. Během procesu vrtání se natavený materiál shromažďuje v otvoru a erozí se rozstříkuje po stěnách díry.

Velikosti vrtaných otvorů začínají na 0,1 mm. Tyto otvory se často využívají například v leteckém průmyslu. Vrtání je také běžné v elektrotechnickém průmyslu nebo v automobilovém průmyslu. Vrtané otvory nemusí být pouze kruhové, ale mohou mít i složitější tvary. Laserové vrtání je vhodné nejen pro běžné kovové a nekovové materiály, ale také pro těžkoobrobitelné materiály. Díra vrtaná laserem může dosáhnout hloubky až 50 mm. [8; 17]

### 2.2.3 Soustružení

Laserem lze v případě soustružení zcela nahradit mechanický nástroj. Na obrobek působí pouze laserový paprsek, což znamená, že se jedná o bezkontaktní obrábění, při kterém na obrobek nepůsobí žádná mechanická síla. Díky tomu se minimalizuje chvění těchto částí a výsledek je přesnější než u mechanického obrábění. Největší výhodou tohoto způsobu je možnost práce s velmi tvrdými a odolnými materiály, jako je keramika nebo kalená ocel. [8; 18]

#### 2.2.4 Gravírování

Využití laseru pro gravírování a značení povrchu materiálu je velmi efektivní. Laserová technologie nabízí mnoho výhod, jako je rychlost, flexibilita, přesnost a trvanlivost výsledků. Při gravírování pomocí laseru neexistují téměř žádná omezení tvaru obrazce, což umožňuje pracovat s širokou škálou materiálů. Tyto materiály zahrnují kalené kovy, nástrojové oceli, měď, hliník, zlato, nerezovou ocel nebo titan. Gravírování může produkovat od jednoduchých až po velmi složité tvary, často se provádí na již zakalených ocelích, jako jsou zápustky nebo vstříkovací formy. Principem tohoto procesu je odpařování materiálu z povrchu obrobku tam, kde dopadá laserový paprsek. [19; 20]

Nejběžnějšími typy laserů používanými pro značení materiálů z kovů a keramiky jsou pevnolátkové Nd: YAG lasery. Pro značení pryže nebo dřeva jsou obvykle využívány plynové CO<sub>2</sub> lasery. [19; 20]

Tento způsob využití laseru je široce používán v různých průmyslových odvětvích, od výroby razítek až po výrobu forem k odlévání. Základní operace gravírování se často omezuje na dvoudimenzionální značení, které zahrnuje hluboké značení materiálu. Pokud je však nutné provádět značení ve 2D nebo dokonce ve 3D, vyžaduje se vysoce kvalitní svazek a stroj vybavený systémem na posuv ohniska paprsku. To umožňuje vytváření složitějších a detailnějších značek a gravírů, které jsou nezbytné pro některé aplikace, jako jsou například složité geometrické tvary nebo trvalé značení s vysokou přesností. [19; 20]

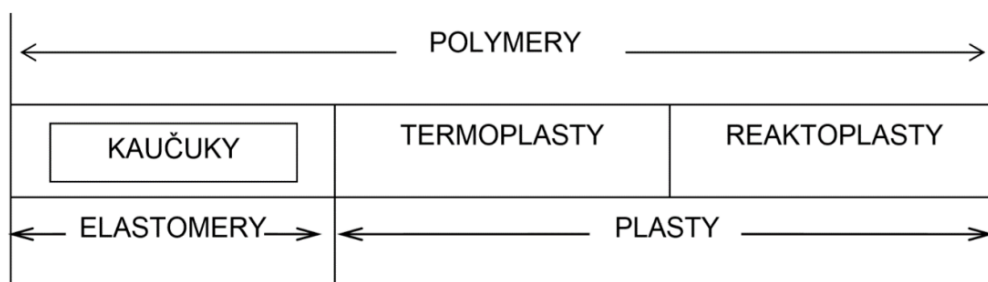


*Obr. 11 Odgravírovaná horní vrstva materiálu [21]*



### 3 POLYMERY

Polymery jsou látky s obrovskou rozmanitostí vlastností a mnoha možnostmi využití. Ve fázi výroby se vyskytují v pevném stavu, ale během zpracování mohou projít kapalnou fází. Polymery jsou obecně rozděleny do dvou hlavních skupin: elastomery a plasty. Elastomery se dále dělí na kaučuky, zatímco plasty se dělí na termoplasty a reaktoplasty. [22]



Obr. 12 Rozdělení polymerů [22]

Elastomery jsou charakterizovány vysokou elasticitou a snadnou deformovatelností, přičemž tyto deformace nejsou trvalé. Mezi elastomery patří kaučuky, které jsou základní surovinou pro výrobu pryže (gumy). [22; 23]

Plasty, jak název napovídá, jsou za vyšších teplot plastické a dobře tvarovatelné. Pokud jsou deformace po tepelném zpracování vratné, označujeme je jako termoplasty. V případě, že deformace není možné vrátit, jedná se o reaktoplasty. [22; 23]

Podle stupně uspořádanosti a struktury na molekulární úrovni se plasty dělí na amorfní a semikrystalické.

V amorfních plastech jsou makromolekuly uspořádány zcela nahodile, což znamená, že nemají pravidelnou krystalickou strukturu. Jsou charakteristické tvrdostí, křehkostí, vysokou pevností, modulem pružnosti a jsou vzhledem k nízkému indexu lomu transparentní. Součinitel teplotní roztažnosti ( $\alpha$ ) je menší než u semikrystalických plastů. Použitelnost je do teploty zeskenění ( $T_g$ ). Příklady amorfních plastů zahrnují polystyren (PS), polykarbonát (PC) a polymethylmetakrylát (PMMA). [22; 23]

Naopak u semikrystalických plastů dochází k určité míře uspořádání molekul do krystalických oblastí a část zůstává v amorfním stavu. Semikrystalické plasty mají obvykle lepší mechanické vlastnosti než amorfní plasty, jsou mléčně zakalené a mají větší index lomu. Použitelnost je do teploty tání ( $T_m$ ). Příklady semikrystalických plastů zahrnují polyethylen (PE), polypropylen (PP) a polyamidy (např. nylon). [22; 23]

### 3.1 Účinek laserového paprsku na polymerní materiály

Řezání nekovových materiálů (keramika, plasty a kompozitní materiály) zahrnuje tři základní mechanismy:

- kombinace tavení a smyku nebo stříhu (melt sparring) – je velmi účinný díky vysoké rychlosti řezání a vysoké kvalitě řezu, používá se také pro keramické materiály
- odpařování (vaporisation) – při tomto mechanismu se v místě řezu vytvoří pára, která vytváří velmi kvalitní řez, to je způsobeno teplotou řezu, která překračuje teplotu tání materiálu, výsledná plocha vypadá jako leštěná a tento mechanismus je typický pro polymethylmetakrylát, polyacetát a akryl
- chemická degradace – vysoká teplota v místě řezu způsobí porušení chemických vazeb a integrity materiálu, obrobene plochy jsou pokryty vrstvou uhlíku vzniklou jako důsledek řezání, tento mechanismus je typický pro dřevo, kompozitní materiály a některé plasty, jako je polyvinylchlorid (PVC) a polyuretan (PU) [23; 24]

Tepelná vodivost termoplastů je 100 až 1000krát menší než u kovů. To způsobuje, že plasty si udržují vysoké rozdíly teplot mezi vnější a vnitřní stranou materiálu. Fyzikální vlastnosti termoplastů se výrazně mění v různých teplotních intervalech. Hodnoty tepelné vodivosti ( $\lambda$ ), hustoty ( $\rho$ ) a měrné teplo ( $c_p$ ) jsou běžně vyjádřeny jako funkce teploty. [23; 24]

Stěny polymerních materiálů se postupně ochlazují po průchodu laserového paprsku, především díky radiaci tepla do okolí. Tepelný tok se dále šíří z místa řezu do materiálu prostřednictvím nestacionárního vedení tepla (teplota jednotlivých bodů teplotního pole se mění s časem). [23; 24]

### 3.2 Fázové stavy polymerů

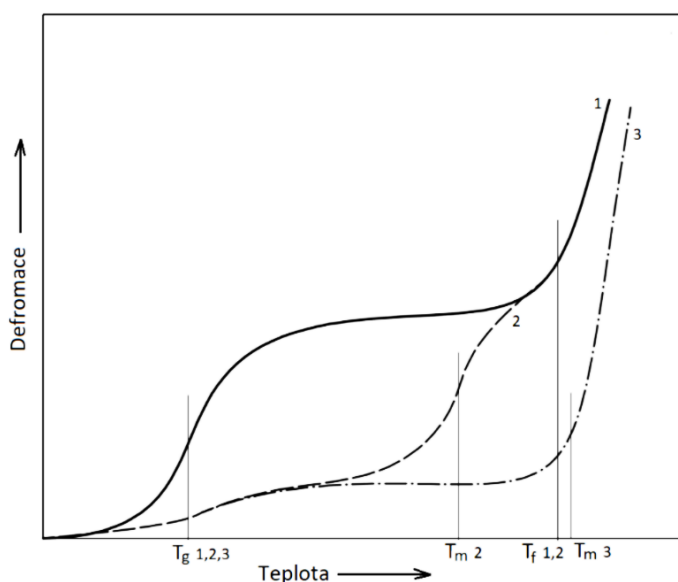
Vlastnosti polymerů jsou značně ovlivněny jejich chemickým složením, fázovým stavem a molekulovou hmotností. Díky vysoké molekulové hmotnosti mají polymery obvykle nezvykle vysoký bod varu, který překračuje teplotu jejich rozkladu, což znamená, že se v plynném stavu nevyskytují. Mohou existovat pouze v tuhém nebo kapalném stavu.

Pravidelné geometrické uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhé fázi označuje vysoce uspořádaný krystalický stav, zatímco prakticky neuspořádaný stav odpovídá sklovitému stavu, který připomíná kapalinu kvůli malé míře uspořádanosti polymerních řetězců. V tomto stavu se mohou vyskytovat všechny amorfnní látky. [22; 23; 24]

Polymery mají také charakteristický přechodový stav mezi sklovitým a kapalným, nazývaný kaučukovitý stav. V tomto stavu lze polymer poměrně snadno deformovat, ale nedochází k trvalému toku, což je typické pro plastické kapaliny. To znamená, že polymery mohou existovat ve čtyřech fázových stavech: krystalickém, sklovitém, kaučukovitém a plastickém. Který z těchto stavů převládá za běžných podmínek a jak široké jsou teplotní rozsahy těchto stavů, závisí především na chemickém složení a molekulové hmotnosti polymerní látky. [22; 23; 24]

Charakterizace zvláštních fázových stavů polymerů, tedy určení, jak dalece jsou amorfními kapalinami, tuhými látkami nebo krystalickými, je obtížná. Pro amorfní polymery je často klíčová teplota skelného přechodu ( $T_g$ ), zatímco krystalický polymer charakterizuje teplota tání ( $T_m$ ). [22; 23; 24]

Dalším způsobem, jak charakterizovat polymery, je pomocí termomechanických křivek, které vycházejí z deformace v závislosti na teplotě a čase při působení určité síly. Měření se provádí v co nejkratším teplotním rozmezí, což umožňuje získat charakteristickou termomechanickou křivku pro každý polymer. Například na Obr.13 můžeme vidět termomechanickou křivku, kde křivka 1 reprezentuje amorfní polymer a křivky 2 a 3 reprezentují dva různé krystalické polymery. Tato grafická reprezentace umožňuje porovnat chování různých typů polymerů při změně teploty a působení síly. [22; 23; 24]

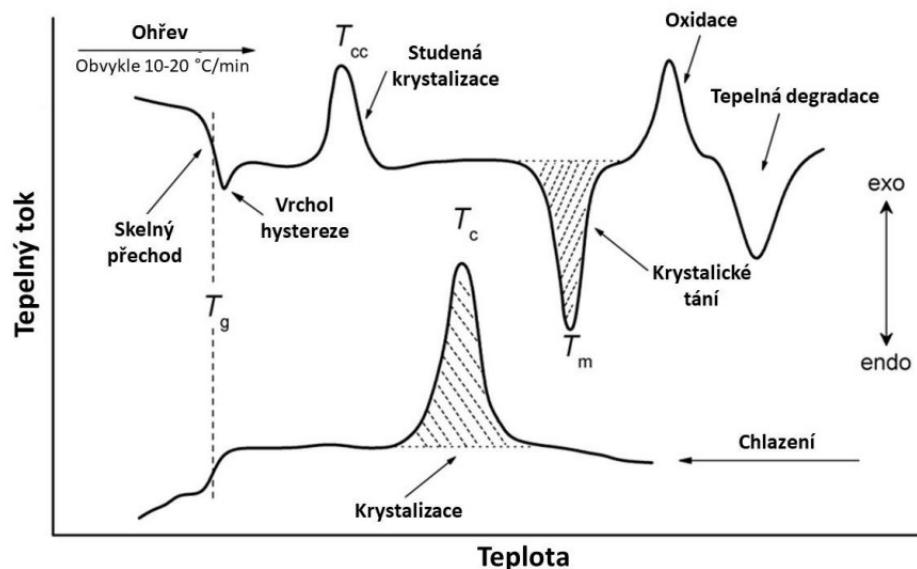


Obr. 13 Termomechanická křivka [22]

Teplota tání ( $T_m$ ) definuje oblast krystalického stavu, zatímco teplota skelného přechodu ( $T_g$ ) vymezuje oblast skelného (amorfního) stavu. Rozsah mezi teplotou skelného přechodu ( $T_g$ ) a toku ( $T_f$ ) charakterizuje kaučukovitou oblast. V této oblasti se deformace mění minimálně s teplotou a převážně je reverzibilní (vratná). V oblasti teploty toku ( $T_f$ ) dochází k náhlému a výraznému nárůstu deformace v důsledku viskózního toku, který je nevratný. Polymer se nad touto teplotou nachází v plastickém stavu. [22; 23; 24]

Některé polymery nemohou existovat ve všech třech amorfních fázových stavech. Tyto polymery mohou mít teploty skelného přechodu a toku vyšší než teplota rozkladu. Některé polymery mohou být charakterizovány pouze kaučukovitým a skelným stavem, nebo dokonce pouze skelným stavem, jako je tomu u celulózy. [22; 23; 24]

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) je významná technika pro studium fázových změn v polymerech. Tato metoda umožňuje získat důležité charakteristiky jako je teplota tání, teplota skelného přechodu, specifické teplo tání, krystalinita a další. Je také užitečná pro kontrolu procesů jako je vyžihání nebo vytvrzení polymerů. Při měření DSC se zaznamenává tepelný tok jako funkce teploty nebo času. Schématické křivky ohřevu a chlazení diferenční skenovací kalorimetrie typického polymeru jsou zobrazeny na Obr.14. [22; 23; 24]



Obr. 14 Schéma křivky ohřevu a chlazení diferenční skenovací kalorimetrie [25]

### 3.3 Vlastnosti použitých polymerů

Pro experiment bylo vybráno pět zástupců nejvíce používaných polymerů ve výrobním průmyslu, a to polyamid 6, polyoxymethylen, polypropylen, polymethylmethakrylát a polystyren. Přehled základních fyzikálních vlastností použitých materiálů jsou uvedeny v Tab.2. Jednotlivé polymery jsou poté popsány níže. [22]

Tab. 2 Základní fyzikální vlastnosti vybraných polymerů [22]

Materiál	Fáze přechodu	Parametry materiálů						
		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T_m$ [°C]	$T_g$ [°C]	E [Mpa]	Teplota použití [°C]		
						Max. krátkodobá	Max. dlouhodobá	Min. dlouhodobá
PA6	semikrystalický	1120	223	Zasucha 70 Zamokra 20	1050	140-180	80-110	-30
POM	semikrystalický	1420	178	-50	3100	110-140	90-110	-60
PP	semikrystalický	900	157-165	-15	1450	140	100	-10
PMMA	amorfní	1170-1200	-	110	3000-3300	85-100	65-90	-40
PS	amorfní	1050	-	98	2000	60-80	50-70	-10

#### 3.3.1 Polyamid 6 (PA6)

Polyamid 6 je nejčastěji používaným polyamidem, což je dáno dobrou dostupností suroviny, širokým spektrem aplikací a jednoduchou a ekonomicky výhodnou možností výroby, zpracování a recyklace. [22; 23]

PA6 je termoplastický polymer z rodiny polyamidů, který má několik vlastností. Má vysokou pevnost a tvrdost, což znamená, že je odolný vůči deformaci a ztrátě tvaru při použití v různých aplikacích. Díky své tvrdosti a pevnosti má dobrou odolnost proti opotřebení, což z něj činí vhodný materiál pro výrobu součástí vystavených opakovanému tření. Tento materiál je také relativně odolný vůči chemikáliím a má dobrou tepelnou odolnost, což znamená, že je stabilní při širokém rozmezí teplot. Polyamid 6 má dobrou mechanickou stabilitu a vysokou tažnou pevnost, jinými slovy, že je schopen udržet svou pevnost a tvar za různých podmínek zatížení. Dále má dobrou izolační schopnost a je snadno zpracovatelný materiál, který lze formovat pomocí různých technik zpracování, jako je vstřikování plastů, což usnadňuje jeho použití v různých průmyslových procesech. [22; 23]

### 3.3.2 Polyoxymethylen (POM)

Polyoxymethylen, známý také jako acetal nebo polyacetal, je technický termoplastický polymer na bázi formaldehydu a patří do skupiny polyacetalů. Je známý pro svou vysokou houževnatost, která se udržuje až do teploty  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [22; 23]

Polyoxymethylen má vynikající pevnost a tuhost, což z něj činí ideální materiál pro aplikace, které vyžadují odolnost proti deformaci. Dále má nízký koeficient tření, což ho činí vhodným pro plynulý pohyb v ložiskách a mechanismech. Je odolný vůči opotřebení a mnoha chemikáliím, a je tak vhodný pro různé prostředí a aplikace. Jeho dobré tepelné vlastnosti umožňují zachování pevnosti i při vysokých teplotách. Materiál je snadno zpracovatelný do různých forem, což umožňuje výrobu složitých geometrických tvarů. Díky nízké absorpci vody si udržuje mechanické vlastnosti i při expozici vlhkosti. Má také vysokou dimenzionální stabilitu a dobré elektrické izolační vlastnosti. Tyto charakteristiky činí z POM široce využívaný materiál v průmyslu, od automobilů až po elektroniku a lékařská zařízení. [22; 23]

### 3.3.3 Polypropylen (PP)

Polypropylen je významný polymer s širokou škálou použití, patřící do skupiny polyolefinů. Jedná se o semikrystalický termoplast. Je snadno svařitelný, dobře ohybatelný a zpracovatelný, avšak obtížně se lepí. Mezi podstatné vlastnosti polypropylenu patří jeho zdravotní nezávadnost. [22; 23]

Jedná se o lehký materiál s vysokou pevností a chemickou odolností. PP je také teplotně odolný a pružný, usnadňuje to tak jeho zpracování a tvarování pro různé účely. Díky své recyklovatelnosti a odolnosti vůči vlhkosti je polypropylen ekologicky šetrnou volbou pro mnoho produktů. Navíc jeho dobré izolační vlastnosti rozšiřují jeho použití do oblasti elektrotechniky a elektroniky. Tyto charakteristiky dělají z polypropylenu klíčový materiál pro výrobu obalů, kontejnerů, textilních vláken, automobilových součástí a mnoha dalších produktů. [22; 23]

### 3.3.4 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Polymethylmetakrylát je v technické praxi známý jako organické sklo. Jeden z mnoha typů je dodáván pod obchodním označením „Plexiglas“ (plexisklo), a tento název je často mylně používán jako obecný termín. Jedná se o amorfni termoplast. [22; 23]

PMMA má několik významných vlastností. Jedná se o materiál s vysokou průhledností (až 92 %), která je srovnatelná s křišťálem. To z něj dělá oblíbenou volbu pro různé aplikace, kde je žádoucí dobrá optická čistota. Má vysokou pevnost a tuhost, a to mu umožňuje odolávat deformaci. Dále má dobrou odolnost proti různým chemikáliím a UV záření, což ho činí vhodným pro různé venkovní aplikace. PMMA je snadno zpracovatelný, a to znamená, že lze snadno řezat, ohýbat, tvarovat a lepit. Díky nízké hmotnosti je snadný k manipulaci a má nižší náklady na dopravu. Má také dobrou teplotní stabilitu, jinými slovy, že si udržuje své vlastnosti i při vysokých teplotách. [22; 23]

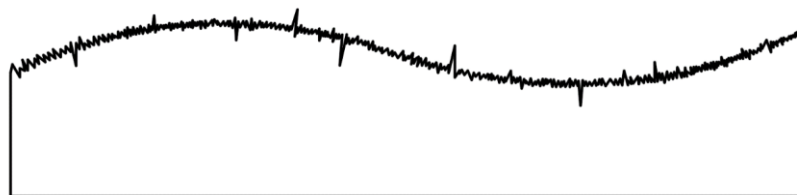
### 3.3.5 Polystyren (PS)

Polystyren patří mezi nejstarší syntetické polymery. Je to poměrně křehký a tvrdý polymer, který propouští z 90 % viditelné světlo. Má vysoký lesk a za běžných podmínek má dostatečnou odolnost vůči oxidaci, ale jeho použití ve venkovních prostředích není doporučeno, protože se pod vlivem slunečního záření žlutne a stává se křehkým v důsledku fotooxidace. [22; 23]

Polystyren je termoplastický polymer, který má několik charakteristických vlastností, jako například lehkost, což z něj dělá snadno manipulovatelný materiál pro různé aplikace. Dále má dobré izolační vlastnosti, které ho činí vhodným pro izolaci proti teplu, zvuku a vlhkosti ve stavebnictví. Navíc je relativně cenově dostupný, a tak se stává populární volbou pro výrobu široké škály produktů. Materiál lze snadno formovat do různých tvarů a velikostí pomocí různých technik zpracování. Díky své průhlednosti je PS vhodný pro použití v obalech nebo průhledných kontejnerech. Je sice náchylný k lámání pod nárazem a má nízkou pevnost v tahu, ale je odolný vůči chemikáliím, proto je využíván pro mnoho průmyslových aplikací. Polystyren lze recyklovat, což je důležité z hlediska životního prostředí a udržitelnosti. [22; 23]

## 4 JAKOST POVRCHU

Jakost povrchu je obecný termín, který popisuje geometrické odchylky povrchu od jeho ideálního tvaru. Její podoba je výsledkem způsobu obrábění, hloubky stop po nástroji a dalších faktorů. Zahrnuje prohlubně (jako jsou rýhy a trhliny), vyvýšeniny (jako jsou výběžky a otřepy), a také plošné nedokonalosti (jako je eroze a koroze). Podle velikosti nerovností se struktura povrchu člení do tří hlavních složek: základní profil, vlnitost a drsnost materiálu. [26; 27]



Obr. 15 Skutečný profil povrchu [27]

**Základní profil**, pokud vyloučíme drsnost a vlnitost. [27]



Obr. 16 Základní profil [27]

**Vlnitost** představuje rozměrnější nerovnosti, na které je přidána drsnost. Většinou jsou způsobeny kmitáním nebo deformací obrobku, případně pnutím v materiálu součásti. Vlnitost je připisována především vlastnostem obráběcího stroje, jako je nevyváženost brousícího kotouče, nepřesnosti vodicích šroubů, nedostatečná tuhost. [27]



Obr. 17 Vlnitost povrchu [27]

**Drsnost** povrchu představuje nejmenší nerovnosti, které vznikají v procesu výroby, například působením rezného nástroje nebo brousícího zrna. Řezný nástroj zanechává na povrchu stopy, a uspořádání těchto stop může mít periodický nebo náhodný charakter. [27]



Obr. 18 Drsnost povrchu [27]



#### 4.1 Kritéria hodnocení kvality povrchu po obrábění laserem

Na výslednou kvalitu povrchu obráběného laserovým paprskem mají zásadní vliv tři kritéria: řezné podmínky, materiál a kvalita řezu. [8]

##### Vliv řezných podmínek:

- výkon paprsku
- řezná rychlost (rychlost posuvu)
- šířka vytvořeného řezu
- druh paprsku a jeho mód
- ohnisková vzdálenost
- průměr zaostřeného paprsku
- úhel vychýlení paprsku (výsledkem průchodu paprsku materiálem)
- přídavný plyn (druh a tlak plynu) [8]

##### Vliv materiálu:

- fyzikálně – chemické vlastnosti materiálu
- typ materiálu (plech, sklo, kompozit ...)
- termo – fyzikální vlastnosti (tepelná vodivost, povrchové napětí, odrazivost ...)
- geometrie obrobku [8]

##### Vliv kvality řezu:

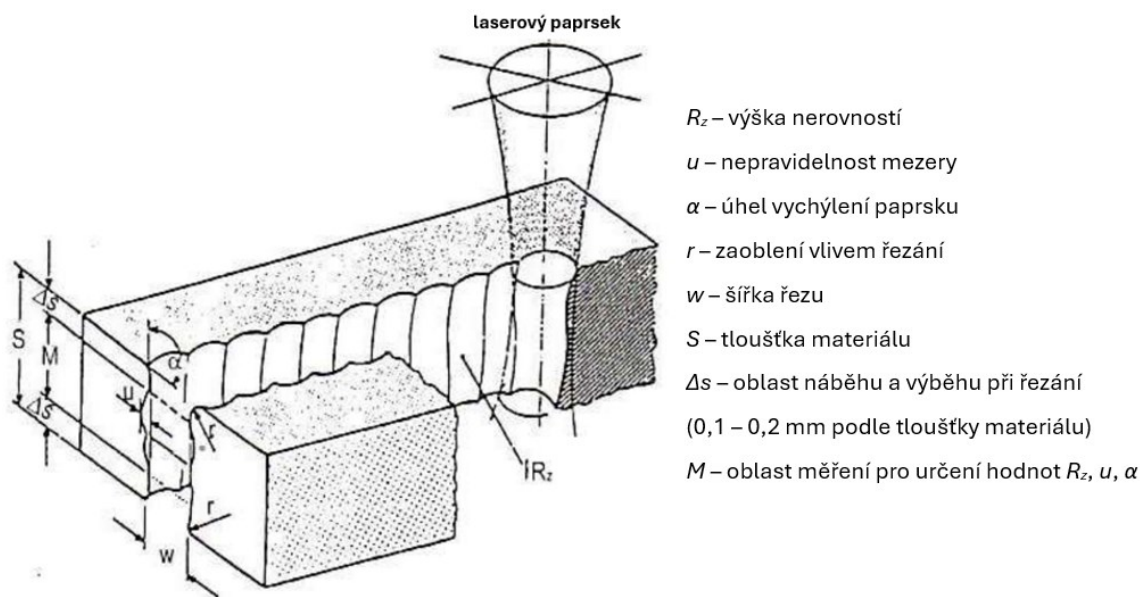
- šířka řezu
- zaoblení hrany vlivem řezání
- nepravidelnost hrany
- šířka tepelně ovlivněné vrstvy (poškození vrstvy)
- kuželovitost řezaného otvoru (rozdíl mezi šířkou na vstupu a výstupu paprsku)
- tvoření trhlin
- úbytek materiálu
- šířka kráteru

- vychýlení paprsku
- změna struktury povrchu materiálu
- zpevnění
- zbytkové napětí [8]

### Redukovaný počet parametrů a kvalitu řezu určuje:

1. **Charakteristika materiálu**, tloušťka HAZ (z anglického „Heat – affected zone“ neboli tepelně zasažená oblast) a tvoření mikrotrhlin
2. **Geometrické vlastnosti** (drsnost povrchu, zaoblení horní a dolní hrany řezu, přítomnost kapek stlačené vrstvy, frekvence a amplituda rýhování povrchu) [8]

Na Obr.19 je zobrazena oblast po řezání laserem a doporučené veličiny pro kvalitativní hodnocení kvality řezu. [8]



Obr. 19 Kritéria hodnocení povrchu po řezání laserem [8]

Pro jednotlivé druhy materiálů jako jsou plasty, kompozity, měkká ocel nebo třeba titan je charakterizována kvalita povrchu řezaného CO<sub>2</sub> laserem s podporou přídavného plynu následujícími veličinami:

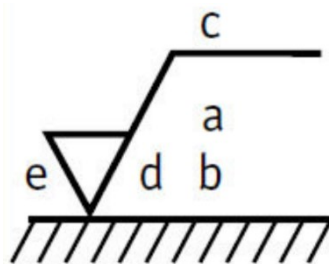
1. **Množství zbytkových otřepů** ve formě kapek nataveného a ztuhnutého materiálu na spodní části řezu
2. **Drsnost povrchu**
3. **Šířka řezu** [8]

Převážně se však kvalita povrchu po řezání laserovým paprskem nehodnotí drsnost povrchu, ale soustředí se spíše na HAZ a šířku řezu. [8]

Při řezání CO<sub>2</sub> laserem přídavný plyn O<sub>2</sub> zrychluje oxidační proces (při nižších rychlostech posuvu). Avšak se zvyšováním rychlosti proudění přídavného plynu se zhoršuje drsnost povrchu v důsledku tvoření výrazného rýhování. Naopak, při zvyšování rychlosti posuvu paprsku se povrchový ohřev stává plynulejším a dosahuje se hladšího povrchu. [8]

## 4.2 Drsnost povrchu

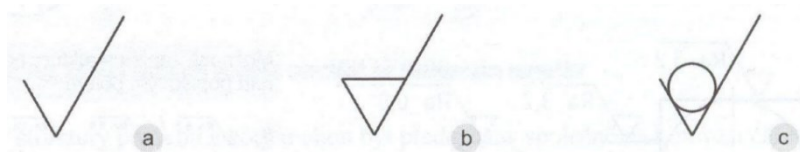
Drsnost se definuje jako soubor nerovností povrchu s poměrně krátkou vzdáleností, které vznikají během výroby nebo jsou jimi ovlivněny. Na každém povrchu lze nalézt mikronerovnosti, které vznikají stopami, jež zanechává nástroj nebo brusivo. Podle této definice drsnosti povrchu se nezahrnují vady, které se mohou na povrchu vyskytovat, jako jsou trhliny, praskliny, škrábance a podobné. Drsnost je důležitým faktorem pro mnoho aplikací, zejména tam, kde je důležitý přenos sil nebo interakce mezi dvěma povrchy, jako je například spojování, tření, těsnění nebo adheze. [28]



Obr. 20 Značení drsnosti na výkrese [29]

a – parametr drsnosti  $R_a$  s hodnotou [ $\mu\text{m}$ ], b – další požadavek [ $\mu\text{m}$ ], c – výrobní postup, d – požadavek na směr rýh, e – přídavek na obrábění [ $\text{mm}$ ]

Drsnost povrchu obrobené plochy se obvykle liší v příčném a podélném směru. Příčný směr je kolmý ke směru řezného pohybu, zatímco podélný směr je rovnoběžný s řezným pohybem. [26; 28]



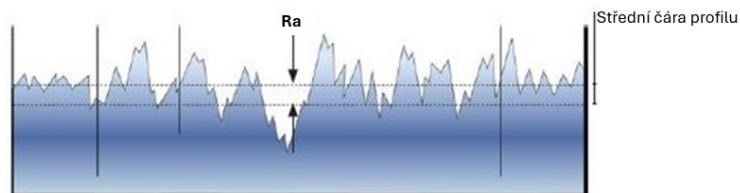
Obr. 21 Značky struktury povrchu [29]

a – obrobený i neobrobený, b – obrobený, c – neobrobený

V průmyslovém a inženýrském kontextu může být drsnost specifikována různými parametry, nejčastěji parametry určené R – profilem, kde mezi hlavní patří:

- **$R_a$  – střední výška nerovnosti profilu**

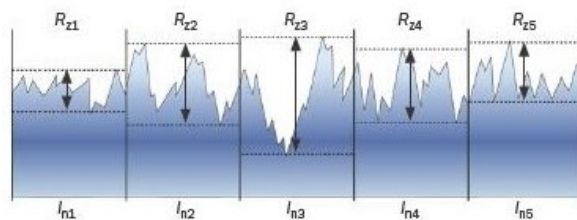
Střední aritmetická hodnota všech odchylek od střední úsečky profilu na vyhodnocované délce. [26]



Obr. 22  $R_a$  střední hodnota odchylek [26]

- **$R_z$  – maximální výška profilu (průměrná)**

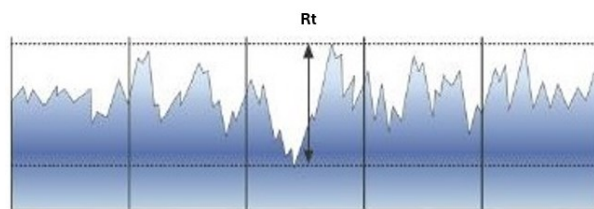
Výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů. [26]



Obr. 23  $R_z$  maximální výška profilu [26]

- **$R_t$  – celková výška profilu**

Celková výška profilu je dána součtem nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně na profilu [26]



Obr. 24  $R_t$  celková výška profilu [26]

V praktické části je zkoumáno, jakého povrchu bude dosaženo a do jaké hloubky bude odstraněn materiálů vybraných polymerů během procesu laserového gravírování při různých pracovních podmínkách.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE PRÁCE

Tato bakalářská práce se zaměřuje na vyhodnocení vlivu pracovních podmínek na jakost povrchu obrobeného laserem pomocí zařízení ILS 3 – NM na vybraných polymerních materiálech které jsou PP, PS, PA6, POM a pro porovnání výsledků bylo použito i PMMA.

Cíle práce:

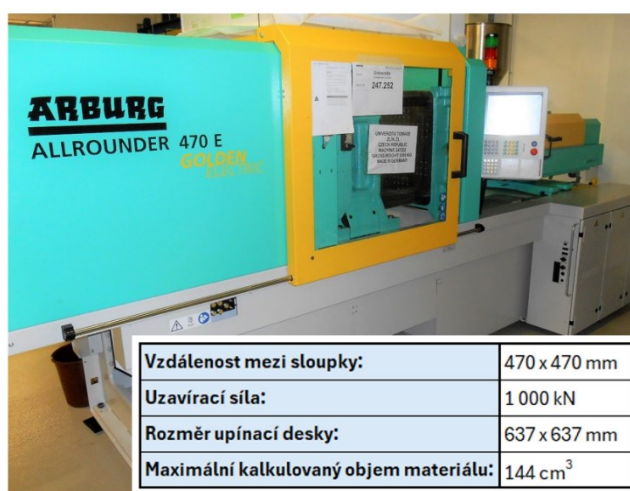
- příprava vzorků na experiment
- měření drsnosti
- měření hloubky po gravírování
- zpracování a vyhodnocení získaných dat

## 6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Vzorky pro experiment byly vyrobeny pomocí zařízení ILS 3 NM, laser s buzením CO<sub>2</sub>, ze zkušebních tělísek vyrobených pomocí vstřikovacího stroje.

### 6.1 Vstřikování tělísek

Tělíska použitá pro následnou výrobu vzorků byla vyhotovena na elektrickém vstřikovacím stroji od firmy Arburg, konkrétní typ Allrounder 470 E 1000–290 se specifikacemi uvedenými na Obr.25.



Obr. 25 Vstřikovací stroj Allrounder [30]

Pro výrobu zkušebních tělísek byly použity parametry vstřikovacího procesu dle Tab.3.

Tab. 3 Parametry vstřikovacího procesu zkušebních tělísek pro zhotovení vzorků

Parametry vstřikování		Materiál				
		PA6	POM	PP	PS	PMMA
Teplota topných pásem [°C]	1.pásmo (pod násypkou)	240	195	200	200	220
	2.pásmo	245	200	205	205	225
	3.pásmo	250	205	210	210	230
	4.pásmo	255	210	215	215	235
	5.pásmo (na konci šneku)	230	215	220	220	240
Teplota temperace [°C]		60	80	35	35	70
Vstřikovací tlak [bar]		350	600	500	500	600
Dotlak [bar]		300	500	400	400	500
Doba dotlaku [s]		20	20	20	20	20
Doba chlazení [s]		30	30	30	30	30
Vstřikovací rychlost [mm/s]		60	60	60	60	60
Dráha dávkování [mm]		70	70	70	70	70
Bod přepnutí [mm]		25	25	25	25	25
Dekomprese [bar]		10	5	2	3	5

## 6.2 Výroba vzorků pro experiment

Pro výrobu vzorků bylo použito laserové zařízení ILS 3 NM zobrazeno na Obr.26. Tento laserový systém je vhodný pro značení, gravírování a řezání různých druhů materiálů, jako jsou plasty, pryže, sklo, dřevo, kov nebo keramika. Zdrojem laserového záření je CO<sub>2</sub>, který má maximální výkon ( $P$ ) 100 W. Maximální řezná rychlost ( $v_f$ ) je 1 524 mm/s a je možno použít čočky o ohniskové vzdálenosti ( $f$ ) 1,5 ", 2 ", 2,5 " a 4 ". Ovládání laserového zařízení je pomocí softwaru Corel Draw. [31]



Obr. 26 Laserové zařízení

Tiskárna ILS 3 NM se připojuje k počítači stejně jako běžná tiskárna přes USB, LAN nebo paralelní port. V Tab.4 jsou uvedeny základní technická specifikace k tomuto zařízení. [31]

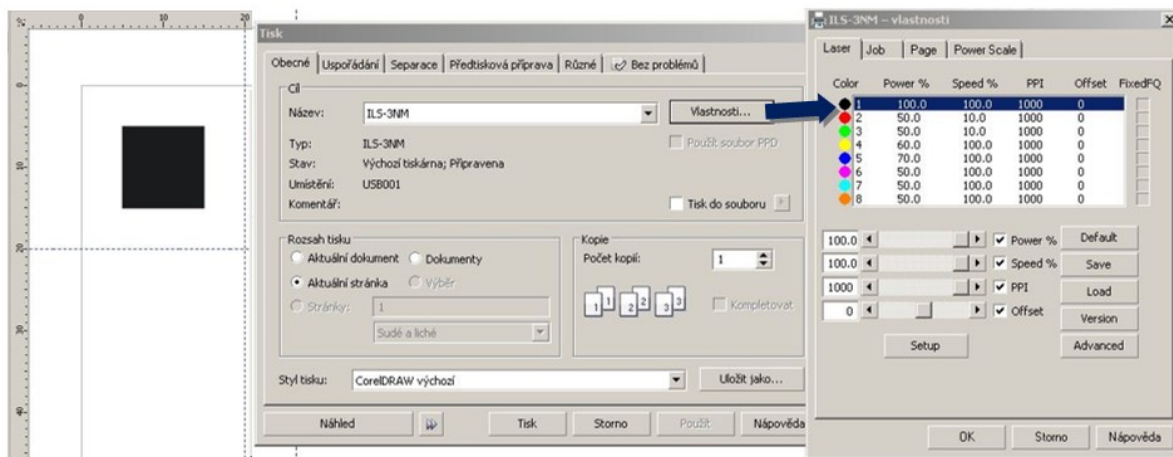
Tab. 4 Technické parametry laseru [31]

<b>Model</b>	ILS 3 NM - 100
<b>Zdroj laseru</b>	100 W, CO <sub>2</sub> laser
<b>Chlazení</b>	Vzduchové
<b>Maximální rychlost značení</b>	1524 mm/s
<b>Rozlišení</b>	1000; 500; 333; 250; 200; 166 DPI
<b>Vnější rozměry</b>	900 x 865 x 990 mm
<b>Pracovní plocha</b>	660 x 495 x 210 mm
<b>Hmotnost</b>	230 kg
<b>Osa z</b>	210 mm
<b>Vlnová délka</b>	10,6 μm
<b>Paměť</b>	64 MB
<b>Připojení odsávání</b>	vnější dmychadlo, ø135 mm
<b>Napájení</b>	250 V 50/60 Hz 10A
<b>Pracovní teplota</b>	15 - 35 °C



Laserové zařízení ILS 3 NM rozlišuje pouze 8 barev, proto v programu můžeme využívat pouze tyto barvy: černá, červená, zelená, žlutá, modrá, purpurová, azurová a oranžová. Účel použití těchto barev může být různý. Například pokud chceme vyřezávat různé oblasti materiálu o různých hloubkách, ušetřit čas vytvořením několika kopií najednou nebo kombinovat řezání a gravírování v jednom procesu.

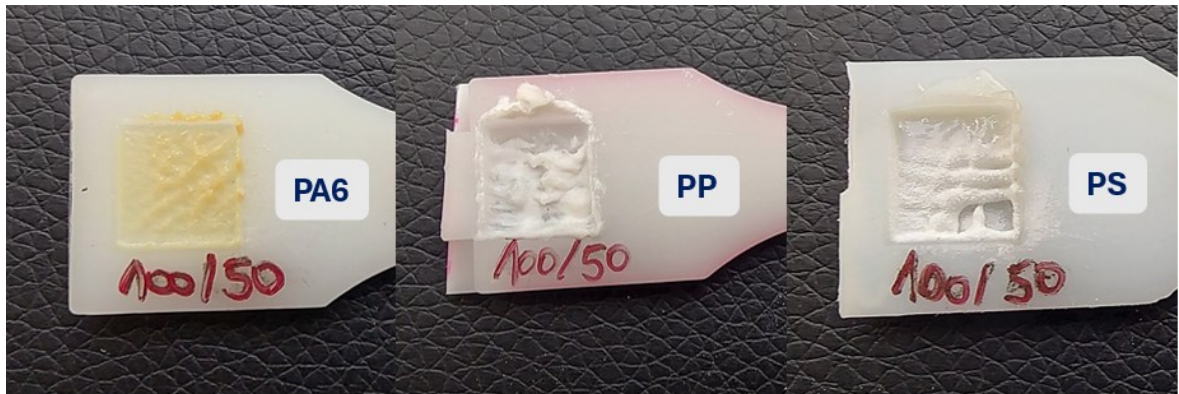
Pro naše potřeby bylo barev využito pro rozlišení oblastí s různými řeznými podmínkami. Před samotným tiskem bylo tedy potřeba zkontrolovat, popřípadě změnit, nastavení barev. Na Obr.27 vidíme že pro černou barvu byl tedy nastaven výkon 100 % (100 W) a řezná rychlost také 100 % (1 524 mm/s).



Obr. 27 Tvorba souboru pro obrábění

Pro vyhotovení vzorků byla proměnným parametrem řezná rychlost ( $v_f$ ), výkon ( $P$ ) zůstal pro všechny vzorky konstantní 100 % (100 W), parametr počet pulzů na palec ( $PPI$ ) byl nastaven na hodnotu 1 000 a pro řezání vzorků byla použita čočka s ohniskovou vzdáleností ( $f$ ) 1,5 ".

Pro každý polymer bylo ze začátku vytvořeno 5 vzorků, u kterých byly hodnoty řezné rychlosti nastaveny na 50 % (762 mm/s), 70 % (1 066,8 mm/s), 80 % (1 219,2 mm/s), 90 % (1 371,6 mm/s) a 100 % (1 524 mm/s) maximální řezné rychlosti. Po vizuální kontrole byly vyřazeny vzorky s řeznou rychlostí ( $v_f$ ) 50 %. Důvodem byl vznik velkých nerovností, v některých místech až hlubokých žlabů, na povrchu se v některých místech vyskytovaly spáleniny nebo po roztavení polymeru a jeho následném ztuhnutí vznikaly hrboly na okrajích vymezeného čtverce. Na Obr.28 na straně 42 můžeme pozorovat všechny zmíněné vady, pro finální posouzení jsou výrobky nepoužitelné. Vzorky vyhotovené s nastavenou řeznou rychlostí ( $v_f$ ) na 70 % a 80 % si byly velmi podobné, proto pro následné měření byly vybrány pouze vzorky se 70 % rychlostí.



Obr. 28 Vyřazené vzorky (řezná rychlost 50 %)

Pro měření byly použity vzorky s řeznou rychlostí 70 %, 90 % a 100 %. Byly vyhotoveny tři vzorky od každé z vybraných řezných rychlostí, celkově tedy 9 vzorků pro každý z polymerů, s výjimkou PMMA, jehož vzorky sloužily pouze ke srovnání, a z toho důvodu byly vyhotoveny pouze 3 provedení.

## 7 MĚŘENÍ

Při obrábění laserovým paprskem mají řezné podmínky vliv na chování a vlastnosti povrchu, jako například drsnost a hloubku gravírování. K měření těchto parametrů byly použity dva přístroje, které jsou popsány v následujících kapitolách. Naměřené hodnoty jsou zpracovány a vyhodnoceny v programu Excel.

### 7.1 Měření drsnosti

#### 7.1.1 Bezkontaktní drsnoměr Talysurf CLI 500

Přístroj od společnosti TAYLOR HOBSON – Talysurf CLI 500 (Obr.29) je určen k bezkontaktnímu měření drsnosti povrchů. Tento konkrétní typ je doporučován z hlediska ekonomické a prostorové efektivity. Talysurf CLI 500 má schopnost automatického měření, a tak může operátor provádět jiné úkoly během měření.



Obr. 29 Drsnoměr Talysurf [32]

Měřicí prostor o rozměrech 50x50x50 mm a délka posuvu 50 mm poskytují dostatečný rozsah pro měření většiny malých součástí. Základem přístrojového vybavení je program Talymap, který umožňuje analýzu dat získaných během měření. V Tab.5 na straně 44 jsou uvedeny základní technická specifikace k tomuto zařízení.

Tab. 5 Technické parametry drsnoměru [32]

<b>Prostor měření</b>	50x50x50 mm
<b>Délka posuvu</b>	50 mm
<b>Osové rozlišení</b>	5 $\mu$ m
<b>Rozměry zařízení</b>	500x310x450 mm
<b>Nosnost</b>	10 kg
<b>Hmotnost</b>	55 kg
<b>Rychlost měření</b>	30; 15; 10; 5; 1; 0,5 mm/s

### 7.1.2 Naměřené hodnoty

Provedené bezkontaktní měření drsnosti na zařízení Talysurf CLI 500 se nezdařilo kvůli povrchu vzniklém během obrábění, který se jevil jako naprosto neměřitelný. Chování polymeru po laserovém obrábění způsobilo, že na povrchu obrobeného materiálu nebyla zaznamenána prakticky žádná měřitelná drsnost a nebyla pozorována žádná členitost, jak bylo očekáváno u litých desek zkoumaných materiálů.

Je potřeba zmínit, že vzorky byly vyráběny technologií vstřikování, což mělo také vliv na výslednou strukturu i jeho chování při následném obrábění. Při vstřikování může docházet ke vzniku vnitřního pnutí, například zejména pokud dojde ke změně rychlosti ochlazování. Vstřikování nám také může ovlivnit orientaci molekul, nebo také způsobit mikrostrukturální změny v polymeru. Všechny tyto vlivy mají dopad na výslednou stabilitu, mechanické vlastnosti, ale také pevnost a tuhost vstřikovaného materiálu. Při následném laserovém obrábění mohou tyto mikrostrukturální změny vést k nerovnoměrnému odpařování materiálu, ke změně povrchové drsnosti nebo ke vzniku trhlin a deformací. [33]

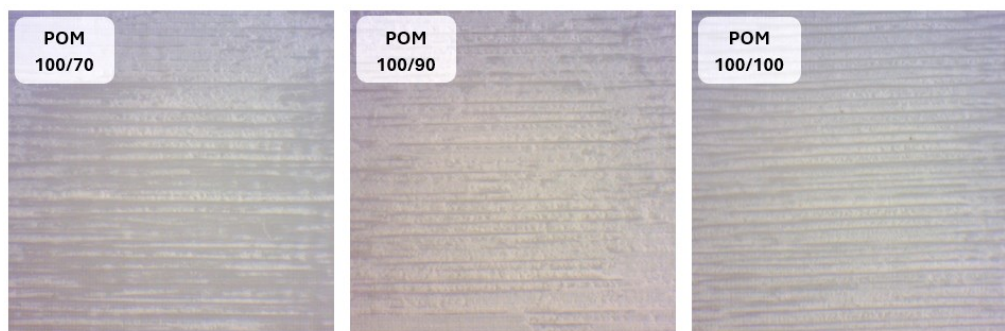
Posouzení drsnosti povrchu tak probíhalo pouze opticky bez přesného měření. K vyfocení výsledných povrchů byl použit mikroskop Carl Zeiss (Obr.30 strana 45) s10násobným zvětšením a digitálním snímačem obrazu. Toto zařízení disponuje makro a mikro zaostřováním, které nám umožňuje přesné doostření pozorovaného povrchu. K mikroskopu lze použít několik typů okulárů, například měřicího, a okuláru vybaveného fotoaparátem pro nasnímání pozorovaného povrchu do počítače. Zařízení je vybaveno také přídatnou lampou, která nám slouží k osvětlení vzorku, a tak i lepší vizualizaci detailů a zlepšení kontrastu obrazu. Získáme tak i kvalitnější a jasnější fotku vzorku pro porovnání a analýzu výsledného povrchu.



*Obr. 30 Mikroskop Carl Zeiss*

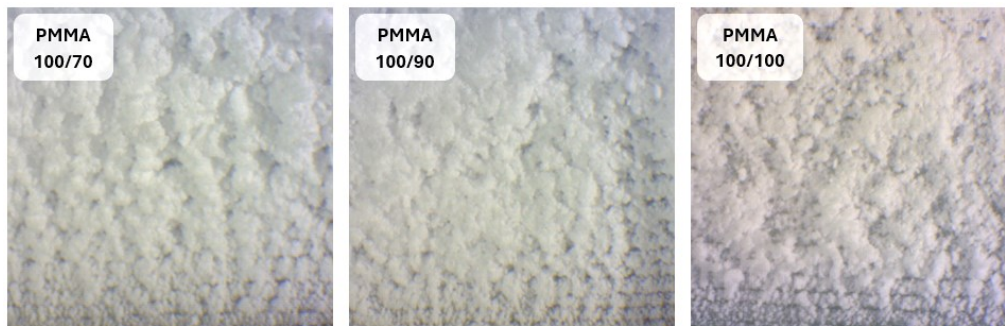
Na snímcích je vždy uvedena zkratka polymeru použitého pro výrobu vzorku a následně číselně vyjádřený výkon a řezná rychlost, obojí v procentech. Například 100/70 vyjadřuje použití 100 % výkonu (100 W) a 70 % řeznou rychlost (1 066,8 mm/s).

U použité čočky o ohniskové vzdálenosti ( $f$ ) 1,5 " je bod paprsku na pracovním povrchu menší než u vyšších ohniskových vzdáleností, a to vede k vytvoření detailnějších a jemnějších drážek. Zmiňované drážky můžeme nejlépe pozorovat na vzorcích polyoxymethylenu (POM), kde nám zároveň vznikl jemný prášek z neodpařeného zbytkového materiálu.



*Obr. 31 Snímky povrchu POM*

Ve větší míře je tento prášek pozorovatelný u vzorků z polymethylmetakrylátu (PMMA), jelikož pokryl téměř celou gravírovanou plochu. Tento jemný prášek se dá odstranit štětcem nebo vyšším tlakem vzduchu.



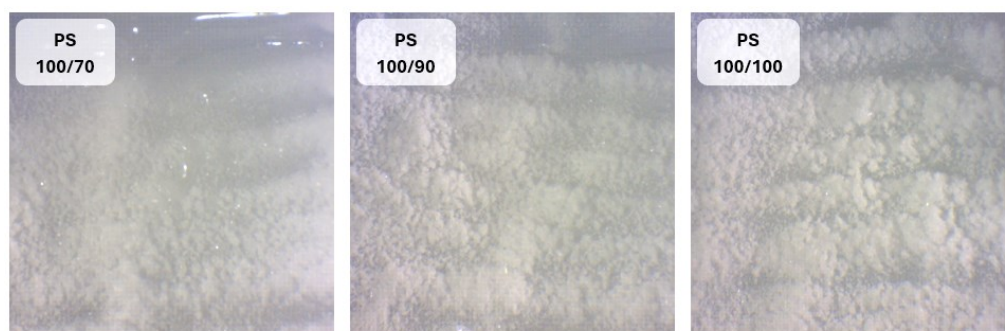
*Obr. 32 Snímky povrchu PMMA před očištěním*

Na následujícím obrázku je zobrazen povrch vzorku již po očištění, a můžeme tak pozorovat, že čím vyšší je řezná rychlost, tím jemnější je povrch, a vygravírované drážky jsou méně rozlišitelné, v některých místech až splývají.



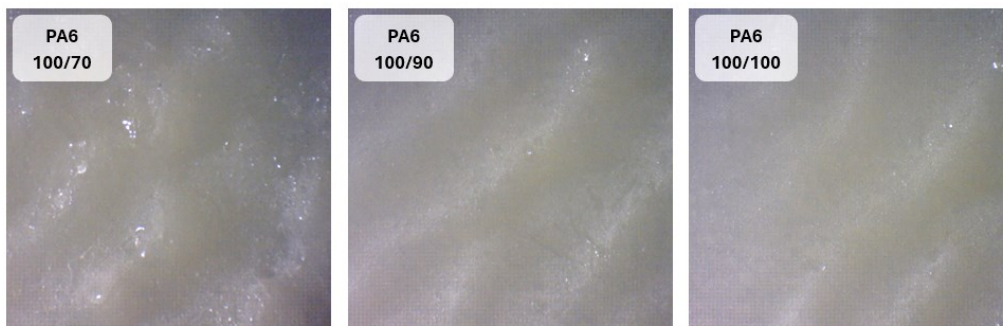
*Obr. 33 Snímky povrchu PMMA po očištění*

U vzorků z polystyrenu (PS) nemůžeme pozorovat tak detailní a jemné drážky, jelikož v průběhu obrábění se materiál neodpařoval ale pouze se roztavil a následně ztuhl. Vznikl nám tak hladký vlnitý povrch pokrytý menšími krystalky přebytečného materiálu.



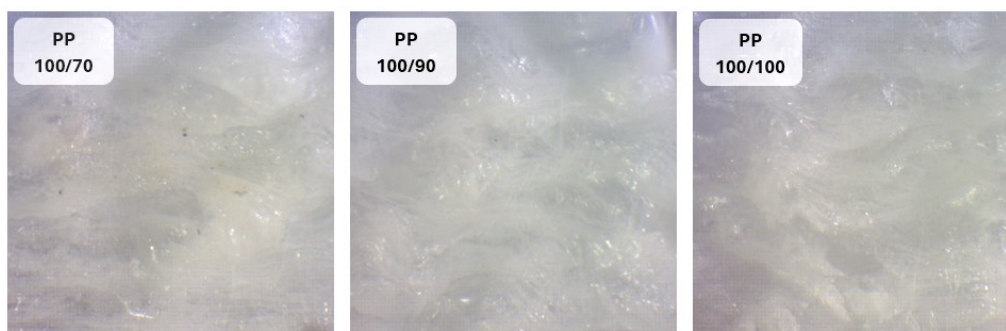
*Obr. 34 Snímky povrchu PS*

Podobného výsledku bylo dosaženo u polyamidu 6 (PA6), kde ovšem nevznikají žádné drážky po obrábění. Lze pozorovat pouze hladký povrch, vzniklý roztavením a následným ztuhnutím polymeru, a změnu barvy způsobenou spáleninami.



*Obr. 35 Snímky povrchu PA6*

K velkým deformacím došlo u polypropylenu (PP). Povrch je velmi členitý, v některých místech se vytvořily prohlubně a převážně na okrajích, ale i v prostoru uvnitř vymezeného čtverce se vytvořili hrbolky nataveného materiálu.



*Obr. 36 Snímky povrchu PP*

## 7.2 Měření hloubky

### 7.2.1 Úchylkoměr ID – H0530

Hloubka byla měřena pomocí digitálního úchylkoměru ID – H0530 (Obr.37 strana 48) od společnosti Mitutoyo. Je vhodné pro měření hloubky materiálu s vysokým rozlišením a přesností. Tento úchylkoměr má digitální displej pro zobrazení naměřených hodnot a umožňuje externí záznam dat pomocí mini procesoru DP – 1 VR. [34]



Obr. 37 Digitální úchylkoměr

Zařízení má rozlišitelnost 0,001 mm a číslicový krok 0,0005 mm, což je minimální změna, kterou dokáže zaznamenat. Rozsah měření je od 0 do 30 mm a je prováděn pomocí drátové spouště. V Tab.6 jsou uvedeny základní technická specifikace k tomuto zařízení. [34]

Tab. 6 Technické parametry úchylkoměru [34]

<b>Model</b>	ID - H
<b>Displej</b>	LCD
<b>Rozměrová měřitelnost</b>	30,4 mm
<b>Rozlišitelnost</b>	0,001 mm
<b>Číslicový krok</b>	0,0005 mm
<b>Měřicí síla</b>	$\leq 2$ N
<b>Maximální rychlost odezvy</b>	1000 m/s
<b>Napájení</b>	Síťový adaptér 6V DC, 2A

### 7.2.2 Naměřené hodnoty

Každý ze vzorků byl změřen 10krát pomocí jehlového doteku a následně 10krát pomocí plochého doteku. Tyto hodnoty byly následně statisticky vyhodnoceny v programu Excel, kdy z těchto dat byl vypočítán průměr ze vztahu (1), směrodatná odchylka ze vztahu (2) a medián ze vztahu (3).



**Aritmetický průměr ( $\bar{x}$ )** je součet všech hodnot vydělený jejich počtem. U normálního rozdělení dat se hodnota aritmetického průměru rovná hodnotě mediánu.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

$n$  – počet prvků v souboru

$x_i$  – hodnota prvku ze souboru

**Směrodatná odchylka ( $\sigma$ )** určuje, jak moc jsou hodnoty odchýleny od průměru hodnot. Zároveň je rovna odmocnině z rozptylu, který udává, jak moc jsou hodnoty ve sledovaném souboru rozptýleny.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$\sigma$  – směrodatná odchylka

$n$  – počet prvků v souboru

$x_i$  – hodnota prvku ze souboru

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

**Medián ( $Me$ )**, neboli střední hodnota, je hodnota, která se nachází přesně uprostřed ve skupině seřazených hodnot. Znamená o tedy že polovina posuzovaných hodnot je menší než medián a druhá polovina větší než medián.

$$Me = \frac{[x_{n/2} + x_{(n/2)+1}]}{2} \quad (3)$$

$Me$  – medián

$x$  – soubor dat

$n$  – počet prvků v souboru

Jak bylo zmíněno již v předešlé kapitole, pro vyhotovení vzorků zůstal výkon ( $P$ ), parametr počet pulzů na palec ( $PPI$ ) a ohnisková vzdálenost ( $f$ ) čočky konstantní, proto v následujících tabulkách a grafech nijak nefigurují.

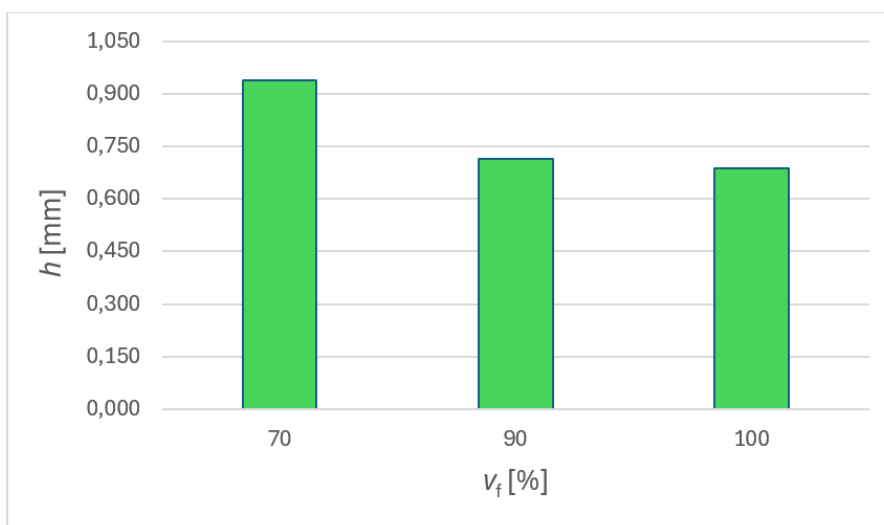
## 1. Vzorky PMMA

Naměřené hodnoty hloubky ( $h$ ) měřené jehlovým dotekem jsou uvedeny v Tab.7 a v Tab.8 (strana 51) jsou hodnoty měřené dotekem plochým. Vzorky z PMMA sloužily pouze ke srovnání, a z toho důvodu byly vyhotoveny pouze 3 provedení, a to pro 70 %, 90 % a 100 % z maximální řezné rychlosti.

Tab. 7 Hloubka vzorků PMMA (jehlový dotek)

PMMA	$v_f$ [%]		
	70	90	100
Číslo měření	$h$ [mm]		
1	0,955	0,722	0,659
2	0,931	0,765	0,680
3	0,906	0,683	0,704
4	0,883	0,693	0,695
5	0,940	0,722	0,665
6	0,969	0,708	0,694
7	0,914	0,692	0,695
8	0,908	0,700	0,690
9	0,977	0,734	0,709
10	0,985	0,719	0,681
$\bar{x}$	0,937	0,714	0,687
$\sigma$	0,034	0,024	0,016
$Me$	0,936	0,714	0,692

Z grafu vytvořeného z průměrných hodnot hloubky a řezné rychlosti vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí se hloubka gravírování zmenšuje.



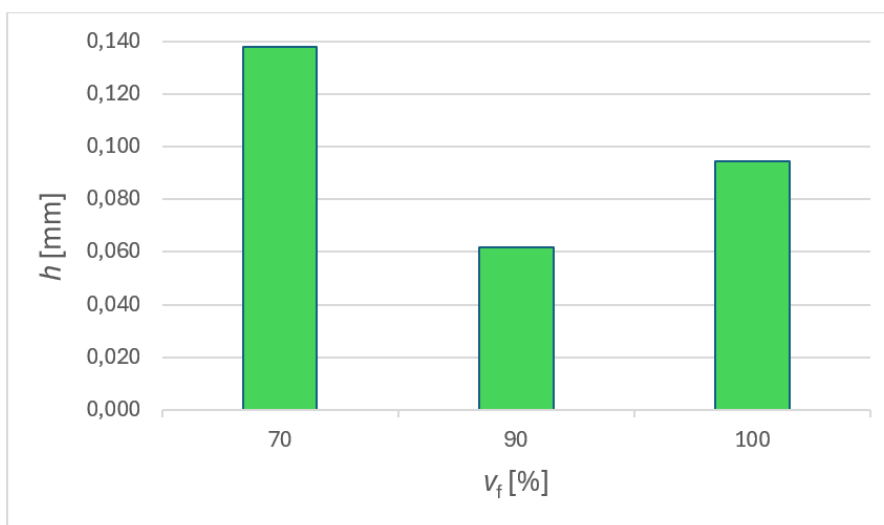
Obr. 38 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PMMA (jehlový dotek)

V Tab.8 můžeme vidět několik minusových hodnot, a to z toho důvodu, že na povrchu vzorku vznikly hrboly vyšší, než je referenční výška vzorku. Pokud tedy přiložíme plochý dotek na tento hrbol, změříme jej a odečteme od něj referenční výšku, získáme hodnotu v mínusu.

Tab. 8 Hloubka vzorků PMMA (plochý dotek)

PMMA	$v_f$ [%]		
	70	90	100
Číslo měření	$h$ [mm]		
1	0,169	0,036	-0,120
2	0,206	0,050	-0,136
3	-0,098	0,046	0,138
4	-0,086	0,049	0,144
5	0,204	0,059	0,150
6	0,188	0,064	0,132
7	0,178	0,072	0,152
8	0,185	0,079	0,153
9	0,218	0,062	0,166
10	0,216	0,100	0,167
$\bar{x}$	0,138	0,062	0,095
$\sigma$	0,122	0,019	0,118
$Me$	0,187	0,061	0,147

V grafu můžeme vidět, že změna tvaru doteku při měření má velký vliv na výsledky. V tomto případě nemůžeme tak jasně vidět trend, kdy se zvyšující se řeznou rychlostí se hloubka gravírování zmenšuje z Obr.38 na straně 50.



Obr. 39 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PMMA (plochý dotek)

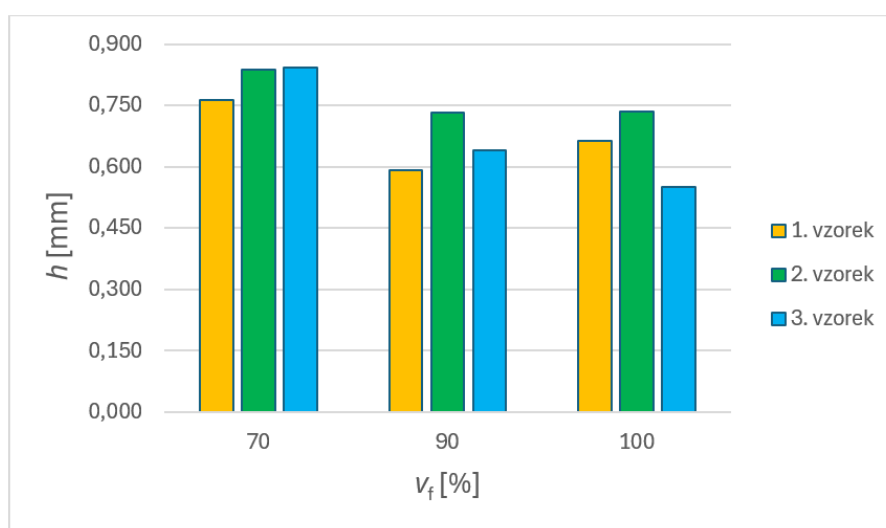
## 2. Vzorky PS

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro měření zbývajících polymerů byly vyhotoveny tři vzorky od každé z vybraných řezných rychlostí (70 %, 90 % a 100 %), celkově tedy 9 jak můžeme vidět v Tab.9.

Tab. 9 Hloubka vzorků PS (jehlový dotek)

PS	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	0,876	0,489	1,001	0,558	0,619	0,702	0,451	0,704	0,552
2	1,079	0,562	0,902	0,619	1,264	0,716	0,564	0,918	0,607
3	1,064	0,684	0,631	0,785	0,830	0,658	0,684	0,689	0,623
4	0,662	1,081	0,822	0,572	0,638	0,659	0,664	0,717	0,645
5	0,300	1,032	1,098	0,745	0,849	0,107	0,654	0,621	0,477
6	0,929	0,694	0,859	0,281	0,721	0,764	0,696	0,691	0,561
7	0,784	0,972	0,581	0,827	0,773	0,450	0,612	0,662	0,564
8	0,389	1,098	1,092	0,580	0,209	0,813	0,798	0,654	0,530
9	0,539	1,187	0,860	0,259	0,677	0,816	0,767	0,928	0,495
10	1,008	0,581	0,587	0,689	0,735	0,728	0,746	0,777	0,447
$\bar{x}$	0,763	0,838	0,843	0,592	0,732	0,641	0,664	0,736	0,550
$\sigma$	0,280	0,261	0,193	0,193	0,260	0,215	0,103	0,107	0,064
$Me$	0,830	0,833	0,860	0,600	0,728	0,709	0,674	0,698	0,557

Následující graf je tvořený z průměrných hodnot hloubky pro všechny 3 vzorky od každé řezné rychlosti.



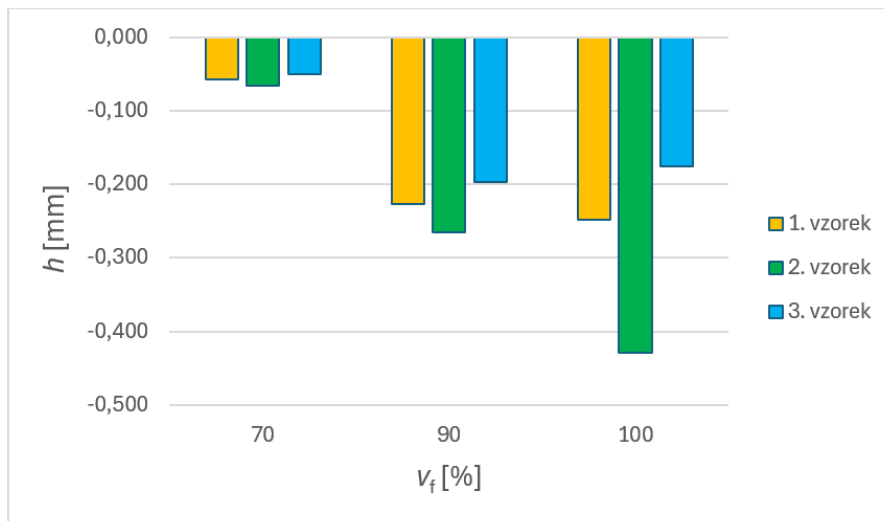
Obr. 40 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PS (jehlový dotek)

Při měření plochým dotekem se opět projeví hrboly, které převyšovaly referenční výšku. Z toho důvodu se opět pohybujeme v minusových hodnotách.

Tab. 10 Hloubka vzorků PS (plochý dotek)

PS	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	-0,053	-0,008	-0,028	-0,313	-0,276	-0,169	-0,262	-0,453	-0,115
2	-0,052	-0,058	-0,062	-0,202	-0,253	-0,190	-0,264	-0,454	-0,096
3	-0,055	-0,099	-0,010	-0,202	-0,254	-0,291	-0,251	-0,452	-0,214
4	-0,053	-0,016	-0,095	-0,298	-0,326	-0,288	-0,252	-0,461	-0,315
5	-0,045	-0,023	-0,050	-0,200	-0,257	-0,161	-0,257	-0,452	-0,087
6	-0,129	-0,011	-0,079	-0,198	-0,235	-0,198	-0,255	-0,454	-0,092
7	-0,048	-0,101	-0,080	-0,226	-0,281	-0,158	-0,252	-0,451	-0,404
8	-0,047	-0,071	-0,029	-0,198	-0,217	-0,183	-0,255	-0,458	-0,117
9	-0,054	-0,122	-0,060	-0,188	-0,333	-0,149	-0,254	-0,205	-0,155
10	-0,043	-0,151	-0,011	-0,249	-0,222	-0,182	-0,174	-0,452	-0,164
$\bar{x}$	-0,058	-0,066	-0,050	-0,227	-0,265	-0,197	-0,248	-0,429	-0,176
$\sigma$	0,025	0,051	0,030	0,045	0,040	0,051	0,026	0,079	0,106
$Me$	-0,053	-0,064	-0,055	-0,202	-0,256	-0,183	-0,255	-0,453	-0,136

Z grafu na Obr.41 můžeme pozorovat, že čím vyšší je řezná rychlost tím vyšší se tvoří nerovnosti a hrboly.



Obr. 41 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PS (plochý dotek)

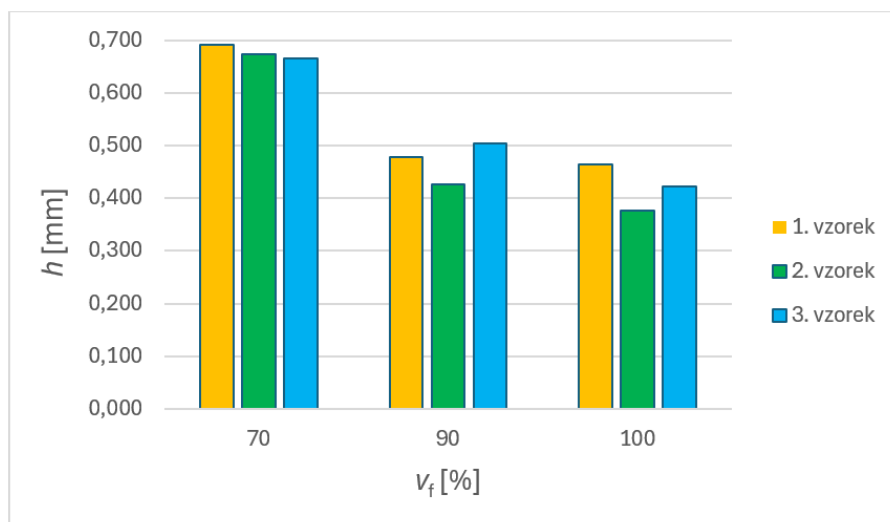
### 3. Vzorok PA6

U vzorků z PA6 bylo opět vyhotoveno 9 vzorků, 3 pro každou z použitých řezných rychlostí. Naměřené hloubky jehlovým dotekem jsou zobrazeny v Tab.11.

Tab. 11 Hloubka vzorků PA6 (jehlový dotek)

PA6	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	0,813	0,733	0,594	0,346	0,287	0,586	0,466	0,369	0,456
2	0,705	0,775	0,681	0,544	0,537	0,439	0,323	0,310	0,454
3	0,648	0,533	0,833	0,521	0,352	0,418	0,535	0,269	0,280
4	0,710	0,682	0,564	0,372	0,514	0,490	0,479	0,269	0,349
5	0,740	0,764	0,495	0,523	0,260	0,561	0,413	0,413	0,445
6	0,468	0,583	0,814	0,578	0,293	0,577	0,576	0,465	0,357
7	0,534	0,712	0,712	0,517	0,506	0,618	0,407	0,359	0,505
8	0,754	0,750	0,590	0,564	0,502	0,566	0,546	0,481	0,400
9	0,802	0,511	0,514	0,547	0,531	0,399	0,495	0,390	0,508
10	0,742	0,685	0,845	0,276	0,485	0,384	0,393	0,445	0,464
$\bar{x}$	0,692	0,673	0,664	0,479	0,427	0,504	0,463	0,377	0,422
$\sigma$	0,112	0,097	0,132	0,106	0,114	0,088	0,079	0,077	0,074
$Me$	0,725	0,699	0,638	0,522	0,494	0,526	0,473	0,380	0,450

Na Obr.42 můžeme opět vidět, že se zvyšující se řeznou rychlostí se hloubka gravírování zmenšuje.



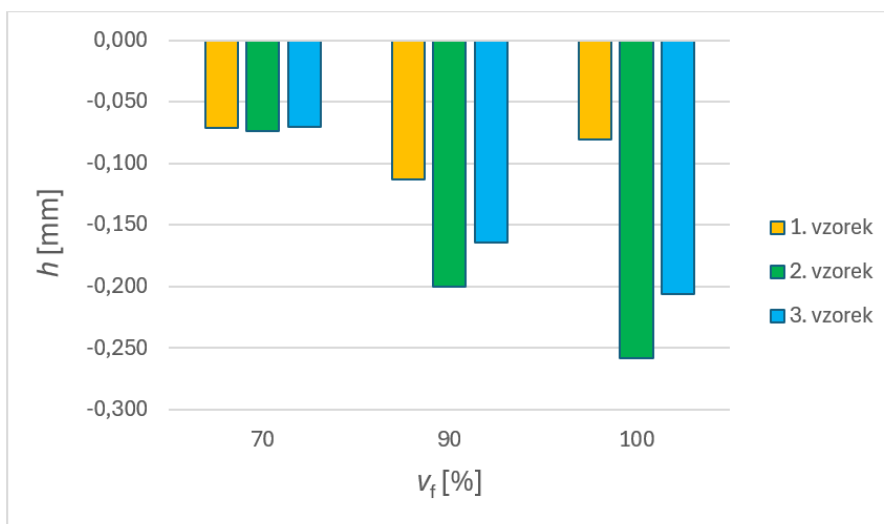
Obr. 42 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PA6 (jehlový dotek)

Při měření vzorků plochým dotekem se opět projevila velká nerovnost povrchu, která je lépe znázorněná v grafu na Obr.43.

Tab. 12 Hloubka vzorků PA6 (plochý dotek)

PA6	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	-0,075	-0,077	-0,068	-0,111	-0,198	-0,164	-0,085	-0,253	-0,207
2	-0,063	-0,095	-0,075	-0,114	-0,201	-0,167	-0,080	-0,261	-0,206
3	-0,064	-0,066	-0,057	-0,116	-0,200	-0,174	-0,085	-0,259	-0,212
4	-0,077	-0,067	-0,062	-0,113	-0,207	-0,162	-0,072	-0,257	-0,203
5	-0,080	-0,068	-0,077	-0,109	-0,195	-0,162	-0,081	-0,254	-0,205
6	-0,073	-0,065	-0,079	-0,112	-0,202	-0,168	-0,082	-0,256	-0,204
7	-0,068	-0,079	-0,055	-0,113	-0,197	-0,161	-0,085	-0,262	-0,201
8	-0,073	-0,092	-0,067	-0,114	-0,201	-0,161	-0,072	-0,259	-0,210
9	-0,062	-0,067	-0,064	-0,110	-0,200	-0,164	-0,082	-0,256	-0,200
10	-0,076	-0,065	-0,100	-0,116	-0,201	-0,163	-0,083	-0,260	-0,215
$\bar{x}$	-0,071	-0,074	-0,070	-0,113	-0,200	-0,165	-0,081	-0,258	-0,206
$\sigma$	0,006	0,011	0,013	0,002	0,003	0,004	0,005	0,003	0,005
$Me$	-0,073	-0,068	-0,068	-0,113	-0,201	-0,164	-0,082	-0,258	-0,206

Z grafu můžeme opět vyčíst, že čím vyšší je řezná rychlost tím vyšší se tvoří nerovnosti a hrboly.



Obr. 43 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PA6 (plochý dotek)

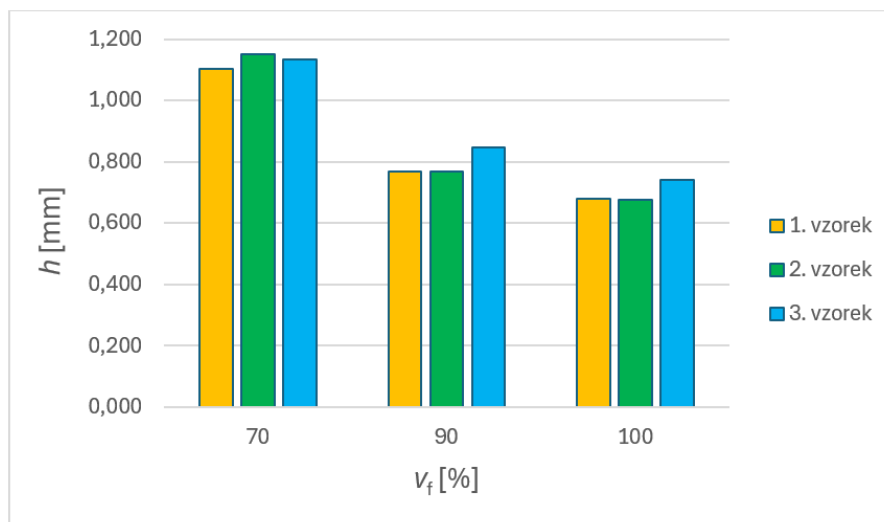
## 4. Vzorky PP

V Tab. 13 jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubek pomocí jehlového doteku.

Tab. 13 Hloubka vzorků PP (jehlový dotek)

PP	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	1,251	1,146	1,349	0,761	0,824	0,866	0,936	0,718	0,651
2	1,187	1,226	1,015	0,885	0,970	0,968	0,771	0,804	0,521
3	1,131	1,055	1,346	0,671	0,767	0,808	0,393	0,664	0,791
4	1,045	1,209	1,216	0,803	0,645	0,975	0,813	0,705	0,811
5	1,179	1,178	0,980	0,876	0,592	0,843	0,629	0,728	0,730
6	1,215	1,380	0,849	0,682	0,808	0,769	0,666	0,803	0,836
7	1,279	0,948	1,133	0,792	0,765	0,877	0,785	0,658	0,775
8	0,869	0,979	1,278	1,036	0,549	0,861	0,746	0,356	0,807
9	0,939	1,158	0,825	0,234	1,031	0,680	0,560	0,619	0,727
10	0,947	1,236	1,336	0,945	0,721	0,823	0,510	0,722	0,769
$\bar{x}$	1,104	1,152	1,133	0,769	0,767	0,847	0,681	0,678	0,742
$\sigma$	0,145	0,129	0,204	0,219	0,153	0,087	0,162	0,127	0,094
$Me$	1,155	1,168	1,175	0,798	0,766	0,852	0,706	0,712	0,772

Průměrné hodnoty naměřených hloubek a jednotlivé řezné rychlosti jsou z tabulky opět pro lepší představu převedeny do grafu na Obr.44.



Obr. 44 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PP (jehlový dotek)

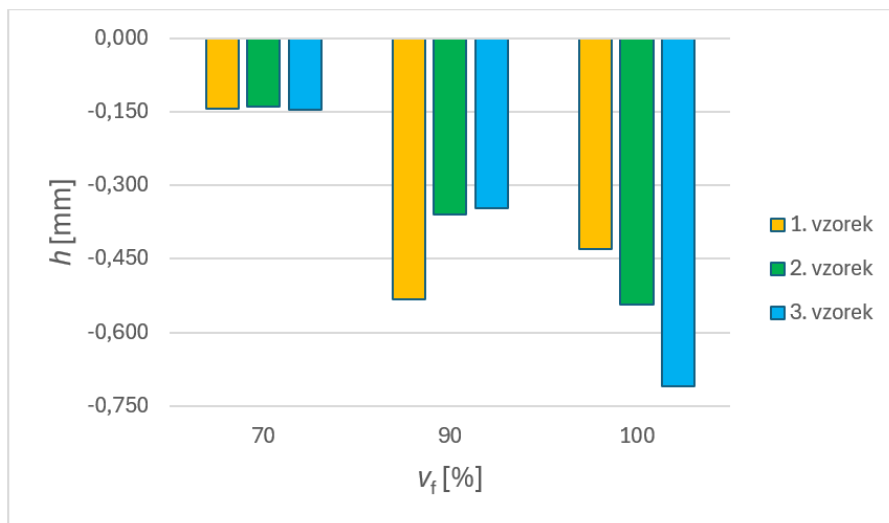


V Tab. 13 jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubek pomocí plochého doteku.

Tab. 14 Hloubka vzorků PP (plochý dotek)

PP	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	-0,048	-0,202	-0,221	-0,587	-0,421	-0,336	-0,427	-0,549	-0,718
2	-0,050	-0,054	-0,268	-0,506	-0,318	-0,349	-0,434	-0,548	-0,717
3	-0,125	-0,268	-0,051	-0,507	-0,330	-0,343	-0,436	-0,549	-0,717
4	-0,442	-0,162	-0,173	-0,569	-0,440	-0,354	-0,431	-0,536	-0,714
5	-0,048	-0,048	-0,070	-0,503	-0,319	-0,397	-0,433	-0,543	-0,643
6	-0,048	-0,092	-0,157	-0,582	-0,316	-0,337	-0,429	-0,543	-0,715
7	-0,194	-0,232	-0,075	-0,500	-0,356	-0,337	-0,431	-0,543	-0,716
8	-0,186	-0,157	-0,131	-0,501	-0,352	-0,339	-0,428	-0,542	-0,714
9	-0,043	-0,075	-0,091	-0,587	-0,434	-0,337	-0,428	-0,538	-0,717
10	-0,265	-0,110	-0,226	-0,490	-0,316	-0,337	-0,424	-0,538	-0,713
$\bar{x}$	-0,145	-0,140	-0,146	-0,533	-0,360	-0,347	-0,430	-0,543	-0,708
$\sigma$	0,131	0,077	0,075	0,042	0,052	0,019	0,004	0,005	0,023
$Me$	-0,088	-0,134	-0,144	-0,507	-0,341	-0,338	-0,430	-0,543	-0,716

V grafu opět vidíme, stejně jako u PA6 a PS, že nerovnosti měly velký vliv na výsledné měření plochým dotekem.



Obr. 45 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PP (plochý dotek)

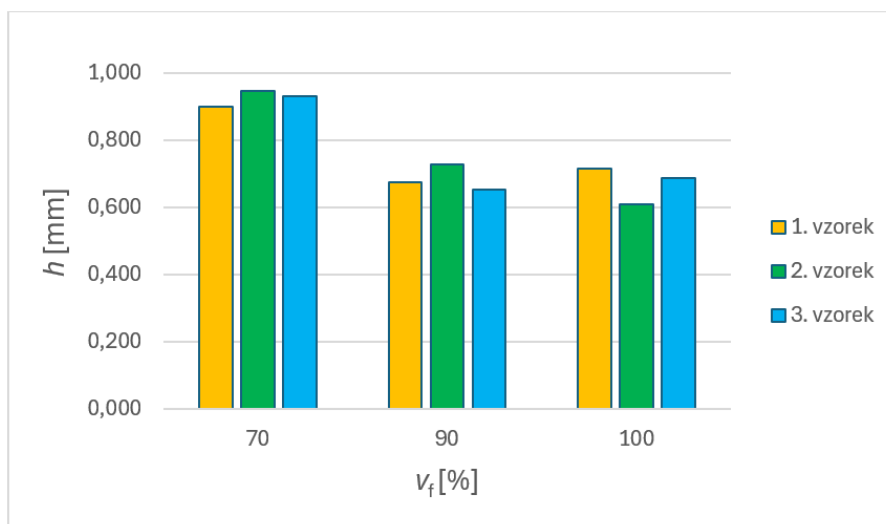
## 5. Vzorek POM

Vzorky z POM se velmi podobají vzorkům vyrobených z PMMA, a to jak vizuálně, tak i v naměřených hodnotách.

Tab. 15 Hloubka vzorků POM (jehlový dotek)

POM	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	0,905	1,003	0,858	0,654	0,726	0,659	0,700	0,609	0,681
2	0,896	0,954	0,934	0,692	0,756	0,647	0,726	0,597	0,692
3	0,931	1,008	1,001	0,675	0,730	0,658	0,737	0,617	0,691
4	0,912	1,064	0,953	0,658	0,732	0,658	0,731	0,635	0,665
5	0,884	0,851	0,851	0,654	0,670	0,631	0,698	0,594	0,683
6	0,911	0,882	1,051	0,696	0,730	0,659	0,703	0,591	0,702
7	0,903	0,943	0,864	0,681	0,741	0,655	0,717	0,606	0,680
8	0,904	0,841	0,984	0,683	0,746	0,645	0,711	0,608	0,701
9	0,878	1,005	1,017	0,678	0,732	0,661	0,709	0,620	0,708
10	0,886	0,931	0,815	0,699	0,727	0,664	0,721	0,618	0,691
$\bar{x}$	0,901	0,948	0,933	0,677	0,729	0,654	0,715	0,610	0,689
$\sigma$	0,016	0,074	0,081	0,017	0,023	0,010	0,013	0,014	0,013
$Me$	0,904	0,949	0,944	0,680	0,731	0,658	0,714	0,609	0,691

Na Obr.46 je patrné, že s postupným zvyšováním rychlosti řezání dochází ke zmenšení hloubky gravírování.



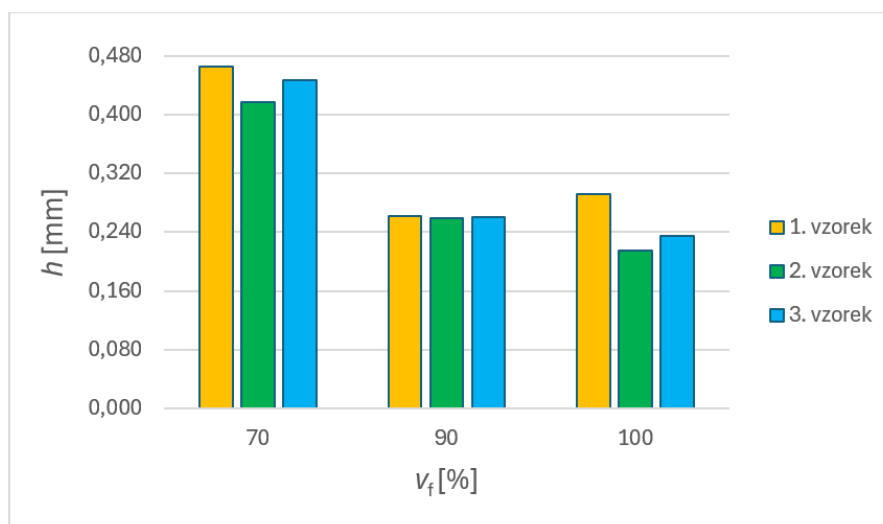
Obr. 46 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků POM (jehlový dotek)

U těchto vzorků nebyly pozorovány větší nerovnosti na obrobeném povrchu, proto se v naměřeném souboru nevyskytují žádné mínusové hodnoty.

Tab. 16 Hloubka vzorků POM (plochý dotek)

POM	$v_f$ [%]								
	70			90			100		
	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Číslo měření	$h$ [mm]								
1	0,340	0,341	0,485	0,283	0,275	0,260	0,303	0,211	0,261
2	0,347	0,430	0,474	0,260	0,286	0,263	0,303	0,219	0,301
3	0,502	0,442	0,410	0,235	0,185	0,261	0,302	0,220	0,131
4	0,492	0,373	0,341	0,282	0,172	0,252	0,321	0,191	0,294
5	0,484	0,438	0,435	0,267	0,319	0,263	0,300	0,222	0,281
6	0,505	0,473	0,424	0,261	0,321	0,257	0,303	0,220	0,132
7	0,503	0,415	0,398	0,243	0,279	0,260	0,303	0,224	0,131
8	0,475	0,341	0,503	0,271	0,279	0,262	0,237	0,221	0,261
9	0,503	0,437	0,485	0,263	0,193	0,257	0,305	0,197	0,298
10	0,503	0,478	0,514	0,258	0,278	0,262	0,241	0,222	0,252
$\bar{x}$	0,465	0,417	0,447	0,262	0,259	0,260	0,292	0,215	0,234
$\sigma$	0,065	0,049	0,055	0,015	0,055	0,003	0,028	0,012	0,073
$Me$	0,497	0,434	0,455	0,262	0,279	0,261	0,303	0,220	0,261

Nerovnosti se tedy při měření plochým dotekem neprojeví, a tak v grafu můžeme pozorovat stejné výsledky jako u doteku jehlového kdy se hloubka snižuje se zvyšující se řeznou rychlostí.



Obr. 47 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků POM (plochý dotek)

## 8 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

I přes počáteční neúspěch v měření drsnosti na zařízení Talysurf CLI 500 se podařilo vytvořit snímky jednotlivých vzorků, a následně je, byť jen opticky mezi sebou porovnat.

Na první pohled byly nejjemnější a nejdetailnější drážky po obrábění vytvořeny u vzorků z POM, kde se však při bližším pozorování nalézal jemný prášek způsobený špatným odpařováním zbytkového materiálu. Tento prášek, avšak ve větší míře, se objevil i u vzorků z PMMA, kde bylo provedeno odstranění pomocí štětce, a po očištění byly pozorovatelné taktéž detailní drážky které se více zjemňovaly se zvyšující se řeznou rychlostí. Mírné náznaky drážek po obrábění se daly pozorovat u vzorků z PS, ale tím že se materiál neodpařoval ale pouze se roztavil a následně ztuhl, vznikala hladký a vlnitý s menšími krystalky zbytkového materiálu. U vzorků z PA6 byl povrch taktéž vlnitý a hladký a místy se objevovaly změny barvy způsobené spáleninami. Nejčlenitější povrch byl pozorován z vzorků z PP. V některých místech se tvořily prohlubně a ve vymezeném čtverci se náhodně tvořily hrbolky nataveného materiálu.

Celkově lze říci, že vlivem změn v mikrostruktuře polymeru způsobených vstřikováním a laserovým obráběním dochází k rozmanitým změnám v povrchových vlastnostech materiálu, což má významný dopad na jeho chování a využitelnost v praxi.

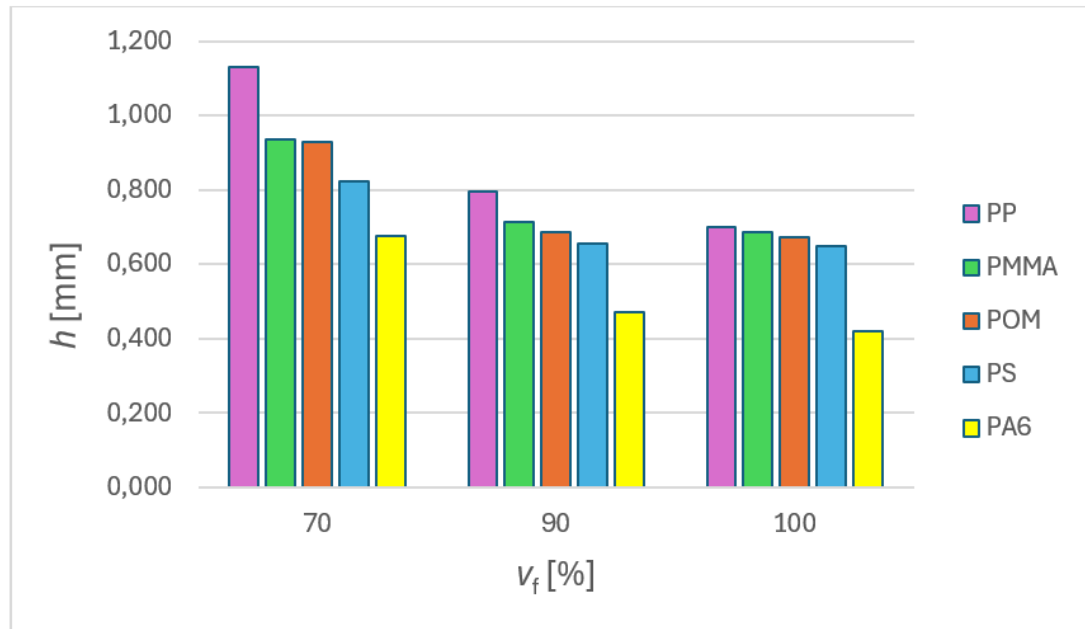
Hloubka byla měřena pomocí digitálního úchylkoměru ID – H0530, kdy byl každý ze vzorků měřen 10krát pomocí jehlového doteku a 10krát pomocí plochého doteku. Z výsledků měření hloubky je patrné že při konstantním výkonu a s rostoucí řeznou rychlostí se hloubka vygravírované oblasti zmenšuje.

V následující tabulce jsou uvedeny vybrané řezné rychlosti a průměrné hodnoty hloubky gravírování pro jednotlivé polymery měřené jehlovým dotekem.

Tab. 17 Hloubky v závislosti na řezné rychlosti

Materiál	vf [%]		
	70	90	100
	h [mm]		
PP	1,129	0,794	0,700
PMMA	0,937	0,714	0,687
POM	0,927	0,687	0,671
PS	0,821	0,655	0,650
PA6	0,676	0,470	0,421

Hodnoty z Tab.17 na straně 60 byly zpracovány do grafu (Obr.48), ve kterém lze jasně pozorovat, že s rostoucí řeznou rychlostí se snižuje hloubka gravírování. Dále je patrné, že největší hodnota hloubky gravírování je dosažena u vzorků z PP, zatímco nejmenší hodnota je u vzorků z PA6.



Obr. 48 Porovnání dosažené hloubky v závislosti na řezné rychlosti

## ZÁVĚR

Příprava vzorků probíhala na laseru ILS 3NM, kdy bylo potřeba nejdříve vytvořit soubor v programu CorelDraw a následně nastavit pracovní podmínky. Pro všechny vzorky byla použita čočka s ohniskovou vzdáleností 1,5“, výkon (100 W) a parametr PPI (1 000) zůstaly konstantní a proměnným parametrem byla řezná rychlost. Laserový paprsek měl u různých materiálů odlišné účinky, které závisely především na vlastnostech zpracovávaného materiálu. Byl zkoumán vliv obrábění laserovým paprskem na hloubku odstraněné plochy polymerních materiálů PMMA, PS, PA6, PP a POM, které byly připravovány ze vstříkovaných zkušebních tělísek.

Po testování pracovních podmínek pro gravírování byly po vizuální kontrole vyřazeny nepoužitelné vzorky, a pro následné měření byly ponechány vzorky s nastavenou řeznou rychlostí na 70 % (1 066,8 mm/s), 90 % (1 371,6 mm/s) a 100 % (1 524 mm/s). Byly vyhotoveny tři vzorky od každé z vybraných řezných rychlostí, celkově tedy 9 vzorků pro každý z polymerů, s výjimkou PMMA, kde byl vyroben pouze 1 vzorek pro každou z řezných rychlostí, celkově 3, z toho důvodu, že tyto vzorky sloužili pouze pro porovnání s dalšími polymery.

Měření drsnosti povrchu na zařízení Talysurf CLI 500 nebylo možné provést z důvodu neměřitelného povrchu vzniklém během obrábění, na kterém nebyla zaznamenána měřitelná drsnost. Drsnost bylo možné vyhodnotit pouze pomocí snímků pořízených na mikroskopu CarlZeiss a 10násobným zvětšením. U vzorků z POM a PMMA vznikl na povrchu jemný prášek, který se však dal odstranit jemným štětcem. Po očištění bylo na obráběném povrchu možné pozorovat drážky vytvořené laserovým paprskem, které byly jemnější čím vyšší byla řezná rychlost. Materiály PS a PA6 se během obrábění roztavily a po následném ztuhnutí vznikl vlnitý a hladký povrch. U PS byl povrch pokrytý menšími krystalky zbytkového materiálu a u PA6 se měnila barva povrchu díky vzniklým spáleninám. Materiál PP byl po obrobení velmi členitý, vznikaly velké deformace, tvořily se prohlubně a zároveň v některých místech hrbolky nataveného materiálu. Tyto různorodé změny ve struktuře obráběného povrchu byly pravděpodobně způsobeny použitím vstříkovaných polymerů. Nejlépe obrobený povrch byl vytvořený na vzorcích z PMMA, ale velmi podobných výsledků bylo dosaženo i u vzorků z POM. Naopak nejhoršího povrchu bylo dosaženo u PP, jehož povrch po obrobení byl velmi členitý a tvořený hrbolky nataveného materiálu.

Hloubka byla měřena pomocí digitálního úchylkoměru ID – H0530 použitím jehlového a následně plochého doteku. Vyhodnocování bylo provedeno v programu Excel, kde byla naměřená data zpracována do tabulek a následně byly z průměrných hodnot vytvořeny grafy pro lepší vizualizaci vzniklého trendu. Při porovnání výsledků z měření jehlovým dotekem a výsledků z měření plochým dotekem lze pozorovat značné rozdíly. Ploché doteky se obvykle používají pro měření předmětů s kulovými konci nebo měření vnějších průměrů, proto nebyly velmi vhodné pro vyhodnocování plochých povrchů v tomto výzkumu. Avšak díky měření plochým dotekem bylo zjištěno, že polymery PS, PA6 a PP mají po gravírování velmi členitý povrch s hrboly, které převyšovaly referenční výšku vzorku, a proto u těchto polymerů vznikly grafy s negativními hodnotami. Naopak jehlový dotek byl pro měření vzniklých vzorků velmi vhodný a poskytl nám větší přesnost při měření malých detailů. Používají se pro měření rovinných ploch a pro měření složitých geometrií. Z výsledků měření hloubky je patrné že při konstantním výkonu a s rostoucí řeznou rychlostí se hloubka vygravírované oblasti zmenšuje. Při porovnání naměřených hloubek bylo největších hodnot dosaženo u vzorků z PP, a naopak nejmenších u vzorků z PA6.

Laserovací zařízení je výrobcem definováno pro obrábění polymerního materiálu PMMA. Při budoucím testování by se mělo zvážit použití jiného zařízení, které by lépe vyhovovalo požadavkům pro práci s ostatními použitými polymerními materiály. Na základě pozorovaných výsledků se rovněž doporučuje vyhnout se používání vstříkovaných vzorků, aby se minimalizovaly možné komplikace a zkreslení v experimentálních výsledcích.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Lasery pro průmysl*. online. In: MM Průmyslové Spektrum. 2008. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>. [cit. 2024-05-15].
- [2] NIELSEN, S.E. Laser material processing of polymers. online. *Polymer Testing*. 1983, roč. 3, č. 4, s. 303-310. ISSN 01429418. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(83\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0142-9418(83)90015-6). [cit. 2024-05-15].
- [3] BÍLEK, Ondřej a LUKOVICS, Imrich. *Výrobní inženýrství a technologie*. Vyd. 1. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [4] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.
- [5] *Laser*. online. In: Fyzika 007. 2015. Dostupné z: <https://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosv%C4%9Bta/laser>. [cit. 2024-04-29].
- [6] GELETA, Vojtech. *Progresívne technológie obrábania*. 1.vydanie. *Edícia vysokoškolských učebníc*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013. ISBN 978-80-227-3997-9.
- [7] *Základní princip laseru a jejich dělení*. online. In: Lao.cz. 2013. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>. [cit. 2024-04-15].
- [8] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [9] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN 80-214-2264-5.
- [10] *Nekonvenční metody obrábění 4.díl*. online. In: MM Průmyslové Spektrum. 2008. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil>. [cit. 2024-04-29].
- [11] *Some Useful Detailed Characteristics on The Laser Welding Technology*. online. In: Quora. 2019. Dostupné z: <https://ofweekb2b.quora.com/Some-Useful-Detailed-Characteristics-on-The-Laser-Welding-Technology>. [cit. 2024-04-29].
- [12] VRBOVÁ, Miroslava; JELÍNKOVÁ, Helena a GAVRILOV, Petr. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01108-9.
- [13] Laserové diody – Část 3. Typy LD. *Světlo*. 2021, roč. 2021, č. 6, s. 76.
- [14] *Laser Systems for Optical Microscopy*. online. In: . 2020. Dostupné z: <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/techniques/microscopylasers/>. [cit. 2024-04-29].
- [15] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. 1. vyd. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
- [16] *A Deep Dive Into Laser Cutter Speed And Power*. online. In: Makezine.com. 2019. Dostupné z: <https://makezine.com/article/digital-fabrication/laser-cutting-digital-fabrication/a-deep-dive-into-laser-cutter-speed-and-power/>. [cit. 2023-10-04].
- [17] *Laserové vrtání*. online. In: Lintech. 2017. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-vrtani/>. [cit. 2024-04-29].
- [18] MORÁVEK, Rudolf. *Nekonvenční metody obrábění*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-518-9.



- [19] *Gravírování*. online. In: Lintech. 2017. Dostupné z: <https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/laserove-gravirovani/>. [cit. 2024-04-29].
- [20] *Značení a gravírování laserem*. online. In: MMSpektrum. 2020. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/znaceni-a-gravirovani-laserem>. [cit. 2024-04-29].
- [21] *Chybí vám na klávesnici česká diakritika? Nechte si ji dodělat laserovým gravírováním*. online. In: Jablíčkář. 2020. Dostupné z: <https://jablickar.cz/chybi-vam-na-klavesnici-ceska-diakritika-dodejte-si-ji-laserovym-gravirovanim/>. [cit. 2024-04-29].
- [22] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 9788070807880.
- [23] MLEZIVA, Josef a ŠŇUPÁREK, Jaromír. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN isbn80-85920-72-7.
- [24] *Termické analýzy*. online. In: Ufmi.ft.utb.cz. 2020. Dostupné z: [https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_06.pdf](https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_06.pdf). [cit. 2024-04-15].
- [25] ISAYEV, Avraam I (ed.). *Encyclopedia of Polymer Blends*. online. Wiley, 2016. ISBN 9783527319312. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9783527653966>. [cit. 2024-04-29].
- [26] *Měření jakosti povrchu obrobku*. online. In: Sandvik Coromant. 2020. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece-surface-measurement>. [cit. 2024-04-29].
- [27] *Měříte správně strukturu povrchu?*. online. In: MMSpektrum. 2022. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merite-spravne-strukturu-povrchu>. [cit. 2024-04-30].
- [28] *Měření drsnosti*. online. In: M&B Calibr. 2021. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>. [cit. 2024-04-30].
- [29] *Surface roughness pictorial representation method*. online. In: Keyence. 2021. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/line/flow.jsp>. [cit. 2024-04-29].
- [30] *Stroje a zařízení pro zpracování plastů*. online. In: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická. 2020. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/stroje-a-zarizeni-pro-zpracovani-plastu/>. [cit. 2024-05-01].
- [31] *Intelligent Laser System III-NM Operation Manual*. online. In: LTTcorp. 2020. Dostupné z: [https://www.lttcorp.com/upload/2020\\_09\\_032/20200903152414nzqrp8CLt2.pdf](https://www.lttcorp.com/upload/2020_09_032/20200903152414nzqrp8CLt2.pdf). [cit. 2024-05-01].
- [32] *Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřicí ústředny*. online. In: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická. 2020. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojovevybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje/>. [cit. 2024-05-06].
- [33] *Technologie vstřikování plastů*. online. In: Publi. 2015. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>. [cit. 2024-05-13].
- [34] *Digitální úchylkoměry ID-H*. online. In: Mitutoyo. 2018. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs\\_CZ/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/543-561D/datasheet.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/543-561D/datasheet.xhtml). [cit. 2024-05-06].

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\lambda$	[nm]	Vlnová délka
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní roztažnost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$c_p$	[J/kg <sup>1</sup> ·K <sup>1</sup> ]	Měrné teplo
$T_g$	[°C]	Teplota skelného přechodu
$T_m$	[°C]	Teplota tání
$T_f$	[°C]	Teplota toku
$E$	[Pa]	Modul pružnosti v tahu
$P$	[W]	Výkon
$v_f$	[mm/s]	Řezná rychlost
$f$	["]	Ohnisková vzdálenost
$h$	[mm]	Hloubka gravírování
CO <sub>2</sub>		Oxid uhličitý
DSC		Diferenční skenovací kalorimetrie
HAZ		Tepelně zasažená oblast
PPI		Počet pulzů na palec
PU		Polyuretan
PVC		Polyvinylchlorid
PP		Polypropylen
PS		Polystyren
PA6		Polyamid 6
POM		Polyoxymethylen
PMMA		Polymethylmetakrylát

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Obecné schéma laseru [5] .....	11
<i>Obr. 2</i> Lavinový efekt [7] .....	12
<i>Obr. 3</i> Dělení laserů podle aktivního prostředí [9] .....	14
<i>Obr. 7</i> Schéma plynového laseru [8] .....	15
<i>Obr. 4</i> Schéma pevnolátkového laseru [11].....	16
<i>Obr. 5</i> Koherentní buzení barvivového laseru [12] .....	17
<i>Obr. 6</i> Schéma uspořádání polovodičového laseru [13] .....	17
<i>Obr. 8</i> Schéma pevného laseru a pohyblivého stolu [8] .....	18
<i>Obr. 9</i> Schéma pohyblivého laseru a pevného stolu [8] .....	18
<i>Obr. 10</i> Schéma pevného laseru i stolu [8].....	19
<i>Obr. 11</i> Odgravírovaná horní vrstva materiálu [21].....	24
<i>Obr. 12</i> Rozdělení polymerů [22] .....	25
<i>Obr. 13</i> Termomechanická křivka [22].....	27
<i>Obr. 14</i> Schéma křivky ohřevu a chlazení diferenční skenovací kalorimetrie [25].....	28
<i>Obr. 15</i> Skutečný profil povrchu [27] .....	32
<i>Obr. 16</i> Základní profil [27] .....	32
<i>Obr. 17</i> Vlnitost povrchu [27].....	32
<i>Obr. 18</i> Drsnost povrchu [27].....	32
<i>Obr. 19</i> Kritéria hodnocení povrchu po řezání laserem [8].....	34
<i>Obr. 20</i> Značení drsnosti na výkrese [29].....	35
<i>Obr. 21</i> Značky struktury povrchu [29] .....	35
<i>Obr. 22</i> Ra střední hodnota odchylek [26] .....	36
<i>Obr. 23</i> Rz maximální výška profilu [26].....	36
<i>Obr. 24</i> Rt celková výška profilu [26].....	36
<i>Obr. 25</i> Vstřikovací stroj Allrounder [30] .....	39
<i>Obr. 26</i> Laserové zařízení.....	40
<i>Obr. 27</i> Tvorba souboru pro obrábění .....	41
<i>Obr. 28</i> Vyřazené vzorky (řezná rychlost 50 %) .....	42
<i>Obr. 29</i> Drsnoměr Talysurf [32].....	43
<i>Obr. 30</i> Mikroskop Carl Zeiss .....	45
<i>Obr. 31</i> Snímky povrchu POM.....	45
<i>Obr. 32</i> Snímky povrchu PMMA před očištěním .....	46
<i>Obr. 33</i> Snímky povrchu PMMA po očištěním .....	46
<i>Obr. 34</i> Snímky povrchu PS.....	46

---

<i>Obr. 35 Snímky povrchu PA6</i> .....	47
<i>Obr. 36 Snímky povrchu PP</i> .....	47
<i>Obr. 37 Digitální úchylkoměr</i> .....	48
<i>Obr. 38 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PMMA (jehlový dotek)</i> .....	50
<i>Obr. 39 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PMMA (plochý dotek)</i> .....	51
<i>Obr. 40 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PS (jehlový dotek)</i> .....	52
<i>Obr. 41 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PS (plochý dotek)</i> .....	53
<i>Obr. 42 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PA6 (jehlový dotek)</i> .....	54
<i>Obr. 43 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PA6 (plochý dotek)</i> .....	55
<i>Obr. 44 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PP (jehlový dotek)</i> .....	56
<i>Obr. 45 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků PP (plochý dotek)</i> .....	57
<i>Obr. 46 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků POM (jehlový dotek)</i> .....	58
<i>Obr. 47 Závislost hloubky na řezné rychlosti u vzorků POM (plochý dotek)</i> .....	59
<i>Obr. 48 Porovnání dosažené hloubky v závislosti na řezné rychlosti</i> .....	61

**SEZNAM TABULEK**










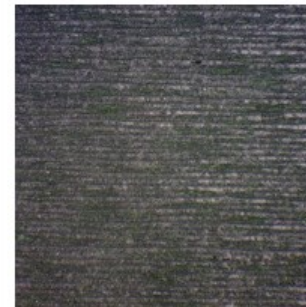

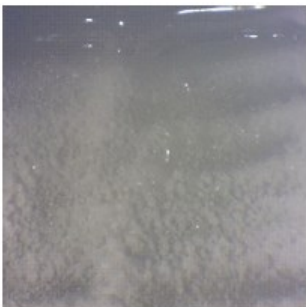



<i>Tab. 1 Klasifikace technologií laserového opracování [8]</i> .....	22
<i>Tab. 2 Základní fyzikální vlastnosti vybraných polymerů [22]</i> .....	29
<i>Tab. 3 Parametry vstřikovacího procesu zkušebních tělísek pro zhotovení vzorků</i> .....	39
<i>Tab. 4 Technické parametry laseru [31]</i> .....	40
<i>Tab. 5 Technické parametry drsnoměru [32]</i> .....	44
<i>Tab. 6 Technické parametry úchylkoměru [34]</i> .....	48
<i>Tab. 7 Hloubka vzorků PMMA (jehlový dotek)</i> .....	50
<i>Tab. 8 Hloubka vzorků PMMA (plochý dotek)</i> .....	51
<i>Tab. 9 Hloubka vzorků PS (jehlový dotek)</i> .....	52
<i>Tab. 10 Hloubka vzorků PS (plochý dotek)</i> .....	53
<i>Tab. 11 Hloubka vzorků PA6 (jehlový dotek)</i> .....	54
<i>Tab. 12 Hloubka vzorků PA6 (plochý dotek)</i> .....	55
<i>Tab. 13 Hloubka vzorků PP (jehlový dotek)</i> .....	56
<i>Tab. 14 Hloubka vzorků PP (plochý dotek)</i> .....	57
<i>Tab. 15 Hloubka vzorků POM (jehlový dotek)</i> .....	58
<i>Tab. 16 Hloubka vzorků POM (plochý dotek)</i> .....	59
<i>Tab. 17 Hloubky v závislosti na řezné rychlosti</i> .....	60

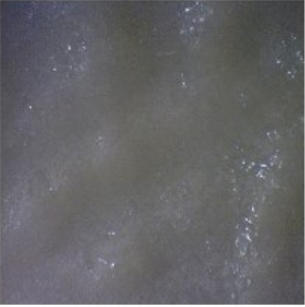









## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Snímky povrchů po gravírování

Příloha P II: Hodnoty naměřené na úchylkoměru

# PŘÍLOHA P I: SNÍMKY POVRCHŮ PO GRAVÍROVÁNÍ

	$v_f$ [%]				
	50	70	80	90	100
PMMA neočistěné					
PMMA očistěné					
PS					

	$v_f$ [%]				
	50	70	80	90	100
<b>PA6</b>					
<b>PP</b>					
<b>POM</b>	