

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Vliv temperace na 3D tištěné vzorky u polymerních materiálů

Influence of tempering on 3D printed samples from polymer material

AUTOR: Bc. Tomáš Krupka

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

**PRAHA 2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krupka** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **409556**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv temperace na 3D tištěné vzorky z polymerního materiálu**

Název diplomové práce anglicky:

**Influence of tempering on 3D printed samples from polymer material**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je příprava těles metodou 3D tisku ze zvoleného materiálu bez výplně a s výplní uhlíkovým vláknem a posouzení vlivu temperace na vybrané charakteristiky.

1. Rešerše z oblasti 3D tisku a následné temperace polymerních vzorků.
2. Zvolení parametrů tisku na základě rešerše.
3. Volba testování vzorků ve stavu po tisku a po zvolených podmínkách temperace.
4. Vyhodnocení získaných dat.
5. Závěr.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987. 306 s.  
[2] ERHARD, Gunter. Designing with plastics. Munich: Hanser, ©2006. xii, 517 s. ISBN 3-446-22590-0.  
[3] OSSWALD, Tim A. et al. International plastics handbook: the resource for plastics engineers. Munich: Hanser, ©2006. xvii, 902 s. ISBN 1-56990-399-9.  
[4] Odborné články – vyhledání je součástí diplomové práce.  
[5] Firemní literatura.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D. ústav materiálového inženýrství FS**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....  
podpis autora

## **Anotace**

Diplomová práce na téma vliv teploty na 3D tištěné vzorky z polymerního materiálu představuje informace o aditivních technologiích používaných pro 3D tisk polymerních materiálů. Zvláště pak technologií fused deposition modeling (FDM) a materiálu glykolem modifikovaný polyethyltereftalát (PETG) a kompozitem PETG s uhlíkovým vláknem a možnostmi tepelného zpracování výtisku z nich vyrobených. Dále se práce zabývá výrobou zkušebních tělísek z PETG a PETG s uhlíkovým vláknem a jejich žíháním při různých teplotách. Následně jsou provedeny zkoušky mechanických vlastností. Závěr práce tvoří porovnání mechanických vlastností obou materiálů a dosažených změn po žíhání.

## **Klíčová slova**

3D tisk, aditivní technologie, Fused deposition modeling, FDM, polymerní materiály, filament, glykolem modifikovaný polyethyltereftalát, PETG, PET-G, kompozitní materiály s polymerní maticí, vláknová výztuž, uhlíkové vlákno, žíhání

## **Annotation**

The thesis on the effect of tempering on 3D printed polymer material samples presents information on additive technologies used for 3D printing of polymer materials. In particular, fused deposition modelling (FDM) technology and the material glycol modified polyethylene terephthalate (PETG) and PETG-carbon fibre composite and the possibility of heat treating prints made from them. Furthermore, the work deals with the fabrication of PETG and PETG with carbon fibre test bodies and their annealing at different temperatures. Subsequently, mechanical properties tests are performed. The thesis concludes with a comparison of the mechanical properties of the two materials and the changes obtained after annealing.

## **Keywords**

3D print, additive technology, Fused deposition modeling, FDM, polymer materials, filament, polyethylene terephthalate glycol, PETG, PET-G, composite materials with polymers matrix, fiber reinforcement, carbon fiber, annealing

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval mé vedoucí práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za odbornou pomoc při přípravě procesu, za cenné rady a odborné připomínky, kterými mě obohatila v průběhu tvorby mé diplomové práce.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A	počáteční průřez zkušebního tělesa	[mm <sup>2</sup> ]
a <sub>cN</sub>	vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m <sup>2</sup> ]
ABS	akrylonitrilbutadienstyren	
ASA	akrylonitril-styren-akrylát	
b	šířka zkušebního tělesa	[mm]
b <sub>N</sub>	šířka zkušebního tělesa pod vrubem	[mm]
Δb	změna šířky zkušebního tělesa	[mm]
BJ	binder jetting	
CAD	počítačem podporované projektování	
CDLP	continuous digital light printing	
CH <sub>2</sub>	methylen	
DLP	digital light printing	
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie	
E <sub>c</sub>	energie spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa	[J]
E <sub>f</sub>	modul pružnosti v ohybu	[MPa]
ε <sub>f</sub>	deformace ohybem	[-]
ε <sub>f1</sub>	deformace ohybem 0,0005	[-]
ε <sub>f2</sub>	deformace ohybem 0,0025	[-]
ε <sub>tb</sub>	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
F <sub>m</sub>	první maximální síla na křivce	[kN]
F <sub>M</sub>	maximální použitá síla	[N]
FDM	fused deposition modeling	
h	výška zkušebního tělesa	[mm]
Δh	změna výšky zkušebního tělesa	[mm]
HIPS	houževnatý polystyrén	
HDPE	vysokohustotní polyethylen	
L	počáteční vzdálenost mezi čelistmi	[mm]
L <sub>0</sub>	počáteční délka zkušebního tělesa	[mm]
ΔL <sub>0</sub>	změna délky zkušebního tělesa	[mm]
ΔL <sub>b</sub>	přírůstek vzdálenosti mezi čelistmi při přetržení	[mm]
LDPE	nízkohustotní polyethylen	

MJ	materiál jeting	
MJF	multi jet fusion	
PA	polyamid	
PA12	polyamid 12	
PAN	polyakrylonitril	
PC	polykarbonát	
PEEK	polyetherketon	
PEI	polytherimid	
PETG	glykolem modifikovaný polyethyltereftalát	
PETG-CF	glykolem modifikovaný polyethyltereftalát plněný skelnými vlákny	
PPS	polyfenylensulfid	
PS	polystyren	
POM	polyoxymetylén	
PLA	kyselina polymléčná	
PVC	polyvinylchlorid	
$\rho$	hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{f1}$	napětí v ohybu při deformaci $\epsilon_{f1}$	[MPa]
$\sigma_{f2}$	napětí v ohybu při deformaci $\epsilon_{f2}$	[MPa]
$\sigma_{fM}$	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
$\sigma_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
s	průhyb	[mm]
SiC	karbid křemíku	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	nitrid křemičitý	
SLA	sterolitografie	
SLS	selective laser sintering	
STL	trojrozměrná povrchová geometrie	
T	Teplota	[°C]
t	čas	[h]
T <sub>g</sub>	teplota skelného přechodu	
T <sub>m</sub>	teplota tání	
T <sub>sintering</sub>	teplota slinování	
TiO <sub>2</sub>	oxid titaničitý	



# Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretická část.....	12
2.1	3D tisk polymerních materiálů.....	12
2.2	Technologie 3D tisku.....	13
2.3	Polymerní materiály pro 3D tisk technologií FDM.....	17
2.3.1	Akrylonitrilbutadienstyren.....	18
2.3.2	Kyselina polymléčná.....	19
2.3.3	Polykarbonát.....	20
2.3.4	Polyethylentereftalát a Polyethylentereftalát modifikovaný glykolem....	20
2.4	Kompozitní materiály pro technologii FDM.....	21
2.4.1	Skelná vlákna.....	23
	Výroba skelných vláken.....	23
2.4.2	Uhlíková vlákna.....	24
2.5	Metody FDM tisku kompozitních materiálů.....	30
2.5.1	Metody jednoho extruderu.....	30
2.5.2	Metody dvou extruderů.....	31
2.5.3	Metoda zavedení vlákna v tiskové hlavě.....	32
2.6	Žíhání výtisků z polymeru.....	33
	Způsoby ohřevu.....	35
3	Experimentální část.....	37
3.1	Příprava vzorků.....	37
	Parametry tisku.....	37
3.2	Rozměrové a objemové změny po žíhání.....	40
3.2.1	Rozměrové změny při tisku a po žíhání.....	40
3.2.2	Změna hustoty.....	43
3.2.3	Pozorování povrchových změn.....	45
3.2.4	Pozorování průřezu vzorku vytvořením fólie.....	46
3.3	Zkouška DSC – Diferenciální skenovací kalorimetrie.....	47

3.4	Stanovení tahových vlastností .....	48
3.4.1	Zkouška tahem – filament.....	50
3.4.2	Zkouška tahem – tištěné vzorky.....	52
3.5	Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy .....	54
3.6	Stanovení ohybových vlastností.....	56
4	Hodnocení a diskuse.....	62
5	Závěr .....	64
6	Literatura .....	65
7	Seznam použitých obrázků .....	71
8	Seznam tabulek .....	73

# 1 Úvod

Dnešní doba klade stále větší požadavky na snižování nákladů a rychlost výroby. Toto vede k velkému rozmachu aditivních technologií. Díky nim je možné rychle a levně prototypovat díly následně vyráběné jinými technologiemi či zavádět rychle nové díly do výroby s minimální náklady. Aditivní technologie mohou pracovat jak s kovovými, tak polymerními materiály. Nejrozšířenější metodou 3D tisku polymerních materiálů je pro svou jednoduchost a nízké pořizovací náklady v dnešní době technologie fused deposition modeling (FDM). Při FDM jsou díly vytvářeny po jednotlivých vrstvách pomocí tiskové hlavy, která klade roztavený polymer na tiskovou podložku.

Nevýhodou dílů vyrobených technologií FDM jsou jejich výrazně nižší mechanické vlastnosti oproti tradičním metodám jako je například vstřikování. Dále je také u tištěných výrobků velká anizotropie vlastností. Toto je zapříčiněno již z podstaty technologie, kdy je díl vrstven a v tomto směru dosahuje zásadně horších mechanických vlastností. Naopak výhodou je možnost výroby dílů s vnitřní výztuží, která není v podobě plného materiálu.

Jedním ze způsobů, jak zlepšit vlastnosti vyrobených dílů je použití polymerních kompozitních materiálů. Nejčastěji využívané výztuže jsou momentálně v podobě krátkých skelných nebo uhlíkových vláken. Avšak je otázkou, zda zlepšení vlastností vyváží výrazně vyšší ceny kompozitních materiálů.

Další možností je žíhání tištěných vzorků. To je standardně provádělo nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ .

## **Cíl diplomové práce**

Tato práce se bude zabývat hlavně 3D tiskem technologií FDM a filamenty, glykolem modifikovaný polyethyltereftalátem (PETG) a kompozitem PETG s 20hm% uhlíkových vláken. Z těchto materiálů budou vytištěny zkušební tělesa pro zkoušky mechanických vlastností.

Následně budou tělesa žíhána a provedeny zkoušky mechanických vlastností. Výsledky budou vyhodnoceny, zda je výhodné využití kompozitního PETG oproti PETG bez výplně. Vyhodnocení žíhání jako dokončovací operace pro zlepšení či změně vlastností po žíhání a zda budou tyto změny v takové míře, že by znamenaly možnost úpravy nastavení tisku při zachování vlastností a tím úspora času a materiálu.

## 2 Teoretická část

V teoretické části bude seznámení s technologiemi aditivní výroby a materiály v nich. Možností využití kompozitních polymerů a způsobu jejich 3D tisku. Další kapitola bude věnována žíhání a jejich vlivu na 3D tištěné díly.

### 2.1 3D tisk polymerních materiálů

3D tisk se využívá pro vytváření prototypů a funkčních součástí. Technologie spočívá v kladení jednotlivých 2D vrstev do finální podoby dílu. Každá tato vrstva představuje řez finálním výrobkem. Pro toto je využíváno polymerních materiálů ve formě kapaliny, struny (filamentu) nebo prášku. Pro získání funkčního dílu se využívá CAD modelu, který je následně přenesen na digitální soubor popisující geometrii trojrozměrného objektu. Obvykle se využívá souboru typu STL. Poté se pomocí softwaru převede soubor STL do kódu (G-code), který obsahuje nastavení tiskárny, materiálu a hlavně trasu tiskové hlavy, kterou bude opisovat při vytváření jednotlivých 2D vrstev. [1] [2]

Výhody přípravy vzorku, dílu, výrobku pomocí 3D tisku:

- Tvarová složitost nezvyšuje dramaticky cenu
- Relativně nízké náklady zavedení výroby nového dílu
- Možnost individualizace každého dílu
- Nízké náklady na první kus
- Nízké náklady ve fázi prototypování s rychlou zpětnou vazbou
- Žádné speciální nástroje, formy
- Možnost výroby montážních sestav (integrace dílů)
- Rychle se rozšiřující množství použitelných materiálů

Nevýhody

- Horší mechanické vlastnosti a anizotropie mechanických vlastnosti
- Nižší konkurenceschopnost s rostoucí sériovostí výroby
- Omezená přesnost výroby (rozměry i geometrické tolerance)
- Kvalita povrchu (drsnost, textura)
- Nutnost postprocesingu (odstranění podpor, dokončování povrchu)
- Množství parametrů pro odladění výrobního procesu

## 2.2 Technologie 3D tisku

Technologie 3D tisku můžeme rozdělit dle používaného materiálu na 3D tisk kovových a nekovových materiálů. Tato práce se zaměří na technologii 3D tisku nekovových materiálů, hlavně polymerních. Dále zde bude výběr nejvyužívanějších metod používaných v praxi, který bude blíže popsán. [1]

Technologie 3D tisku nekovových materiálů dále můžeme rozdělit dle technologie nanášení materiálu. [2]

**Fotopolymerizace** je technologie, při které dochází k vytvrzování fotopolymerů pomocí záření různých vlnových délek, nejčastěji UV záření. Zářením se postupně vytvrzují vrstvy fotopolymerů. Příkladem těchto technologií jsou:

SLA – Stereolithography

DLP – Digital light printing

CDLP – Continuous digital light procesing

**Material jetting** je technologie spočívající v nanášení fotopolymeru pomocí tiskové hlavy na tiskovou podložku. Následně je fotopolymer vytvrzen zářením, nejčastěji UV zářením. Příkladem těchto technologií jsou:

MJ – Material jetting

BJ – Binder jetting

**Powder bed fusion** je technologie spočívající v nanesení vrstvy základního materiálu ve formě prášku na tiskovou podložku a následně pomocí tepelného zdroje (termální tisková hlava, laser atd.) se speče požadovaná vrstva. Příkladem těchto technologií jsou:

MJF – Multi jet fusion

SLS - Selective laser sintering

**Extruze materiálu** je prováděna pomocí tiskové hlavy. Materiál je přiváděn do tiskové hlavy v podobě polotovaru (nejčastěji ve formě struny, takzvaného filamentu), kde je taven a poté je extrudován na tiskovou podložku v jednotlivých vrstvách po předem určené dráze. Nejpoužívanější technologií je:

FDM – Fused deposition modeling

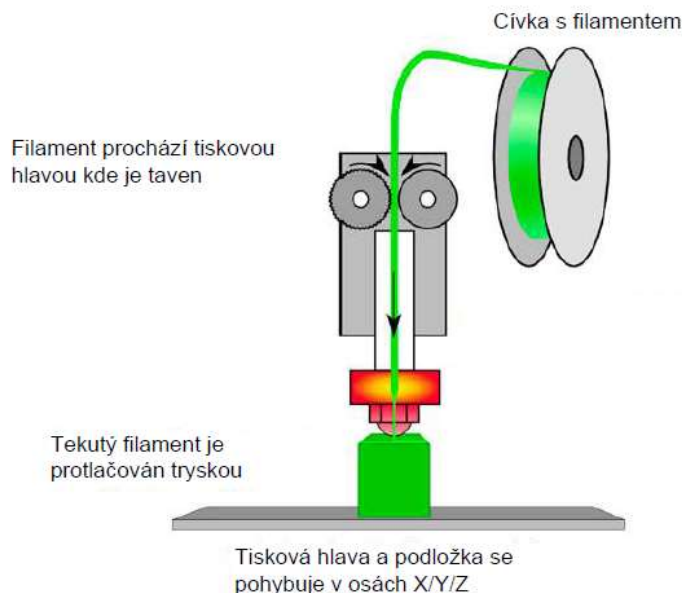
### 2.2.1.1 FDM – Fused deposition modeling

Metoda FDM patří mezi aditivní technologie, kde je materiál jednotlivých vrstev nanášen pomocí extruze. Tato metoda byla vyvinuta S. Scottem Crumpem, který spoluzakládal firmu Stratasys [3]. V posledních letech metoda FDM zažívá výrazný rozmach pro svoji

jednoduchost, relativní rychlost a šetrnost tisknutí prototypů a výrobků. Také z důvodu výrazného snížení pořizovacích nákladů u takzvaných hobby 3D tiskáren.

Pro tuto technologii se používají termoplasty. Materiál prochází tiskovou hlavou, kde je zahříván nad teplotu tání (u amorfních materiálů nad teplotu viskózního toku), a poté je v tekuté formě vytlačen skrz trysku a nanášen na tiskovou podložku, kde je ochlazován okolním prostředím a přechází do tuhého stavu. Po nanesení jedné vrstvy se tisková hlava posune o výšku jedné vrstvy a tiskne další. [4]

Konstrukce tiskárny se liší dle výrobce. Některé jsou konstruované tak, že tisková podložka provádí pohyb v ose X a Y a tisková hlava v ose Z, to jsou tzv. kartézské tiskárny. Schéma kartézské tiskárny je na obrázku č. 1. Jiné například mají pevnou tiskovou podložku a tisková hlava koná všechny pohyby v osách X, Y a Z, tzv. delta tiskárny. Tiskárny mohou mít různé parametry a tím dosahovat různých parametrů tisku, jako je rychlost tisku, rozlišení, přesnost atd..



Obrázek 1 Konstrukce FDM tiskárny [5] - filament

### 2.2.1.2 SLA - Stereolitografie

Vynález této technologie je připisován dvěma lidem, prvním je japonský vynálezce Dr. Hideo Kodama a druhým je tým A. Le Mehaute, O. de Witte, J. C. André a Ch. W. Hull, kteří si patentovali název „stereolitografie“ v roce 1984. Tato technologie je jedna z nejpřesnějších, kdy přesnost tisku může být teoreticky jedna molekula použitého materiálu. [4]

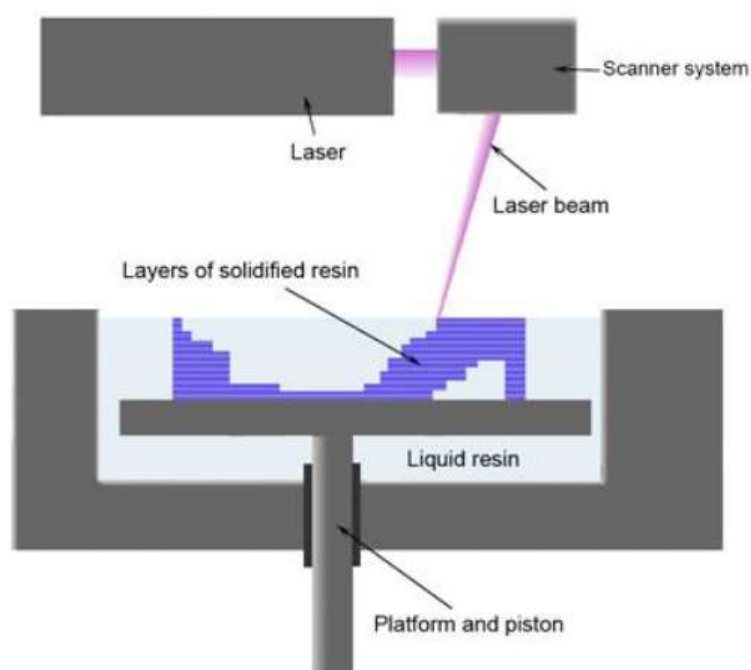
Princip této technologie spočívá v přeměně kapalného fotopolymeru, což je speciální typ plastu, který reaguje na světlo. Materiál je v nádobě s tiskovou podložkou, ta vytváří vrstvu

přibližně o velikosti 4 - 300  $\mu\text{m}$ . Pomocí UV záření je vykreslen výsledný tvar dané vrstvy na podložku a fotopolymer je vytvrzen. Pro vytvrzení fotopolymeru můžeme využít různé zdroje světla.

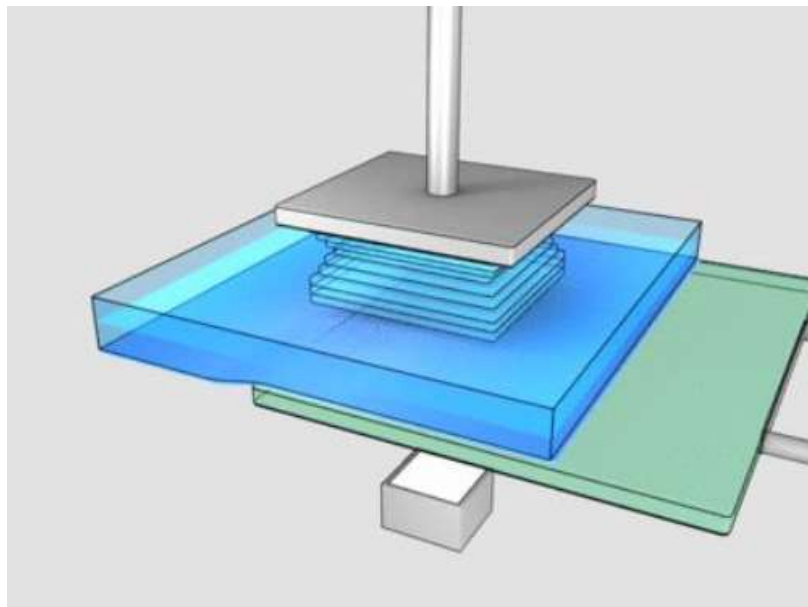
Tabulka 1 Způsob vytváření u stereolitografie

Technologie	Způsob vytváření
SLA	UV laserem
DPL	UV diodou
MSLA	UV diodou přes LCD display

Poté se tisková podložka posune o jednu vrstvu a proces se opakuje. V praxi se využívají dvě konstrukce tiskáren, buď je tisková podložka umístěna dole a sjíždí (obrázek č. 2) nebo je nahoře a vyjíždí (obrázek č. 3). [5]



Obrázek 2 SLA s podložkou dole, Scanner system – skenovací systém, Laser beam – laserový paprsek, Layers of solidifier resin – vrstvy vytvrzené pryskyřice, Liquid resin – tekutá pryskyřice, Platform and piston – Tisková podložka a píst [2]



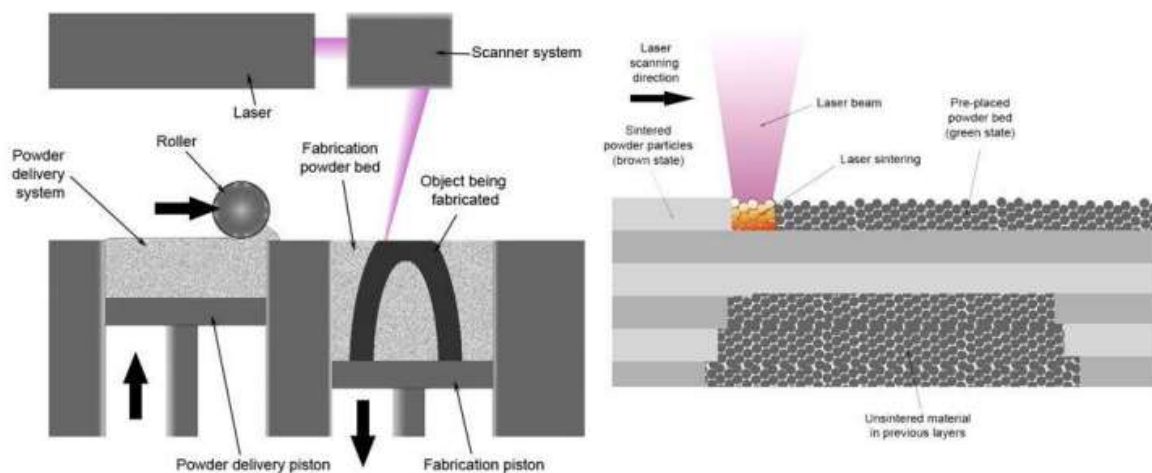
*Obrázek 3 SLA s podložkou nahoře [2]*

### **2.2.1.3 SLS – Selective laser sintering**

Tato technologie je založena na spékání práškového termoplastického materiálu. Prášek je pomocí nanašeče rozprostřen ve vrstvě ze zásobníku na tiskovou podložku. Materiál je v zásobníku přehřát na teplotu těsně pod teplotu tání a po nanesení vrstvy je pomocí laseru teplota zvýšena nad teplotu tání a tím je vrstva spečena a proces se opakuje.

Výhodou této metody je, že není potřeba žádných podpor, celý tiskový prostor může být vyplněn výtiskem a tím se výrazně zrychlí tisk. Nevýhodou je nemožnost tisku uzavřených komor a horší kvalita povrchu. Schéma metody je na obrázku č. 4.

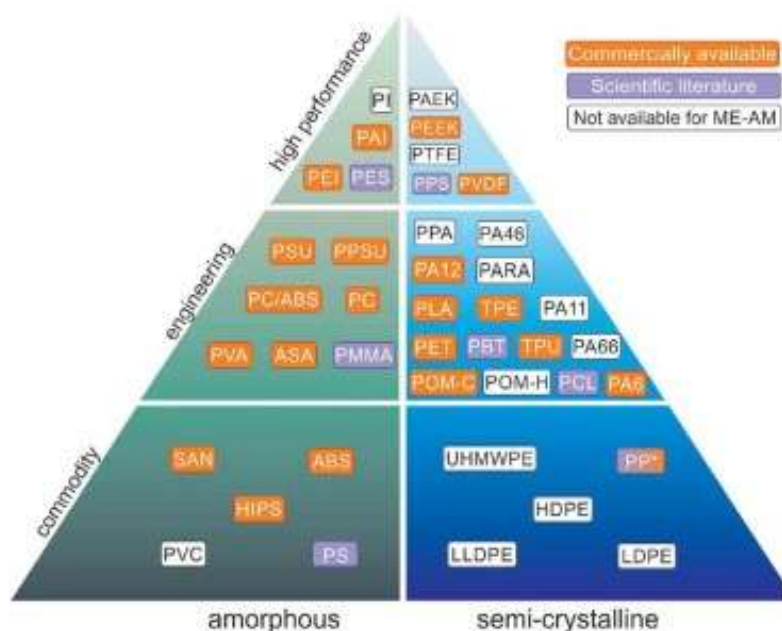




Obrázek 4 Schéma technologie SLS, Scanner system – systém skeneru, Powder delivery systém – zásobníková komora prášku, Roller – rozprostírací válec, Fabrication powder bed – výrobní tisková komora, Object being fabricated – vyráběný výrobek, Powder delivery piston – píst zásobníkové komory, Fabrication piston – píst výrobní komory [6]

### 2.3 Polymerní materiály pro 3D tisk technologií FDM

Materiály využívané pro metody FDM jsou termoplasty, jelikož hlavním předpokladem pro tuto technologii je schopnost materiálu opakovaně přecházet z pevného stavu na kapalný a zpět. Výhodou těchto materiálů je jejich jednoduchá recyklovatelnost, méně nebezpečné chemické složení, snadná hromadná výroba. [2] Přehled užívaných materiálů je na obrázku č. 5, zkratky na obrázku jsou k nalezení v seznamu zkratk.



Obrázek 5 Přehled užívaných materiálů pro FDM, zkratky jsou k nalezení v seznamu zkratk, Amorphous – amorfní, semi-crystalline – semikrystalické, commodity – komoditní, engineering – inženýrské, high performance – s vysokým výkonem, commercialy available – komerčně dostupné, scientific literature – ve vědecké literatuře [7]

Filament je k dostání bývá navinut na cívce ve dvou standardních průměrech (1,75 mm a 2,85 mm). Cena materiálu se pohybuje od stovek korun za kilogram u standardních materiálů jako PLA, ABS, HIPS až po jednotky tisíc za kilogram u konstrukčních materiálů jako PA, PEEK, PPS nebo kompozitních materiálů plněných karbonovými nebo kevlarovými vlákny. Výběr materiálu je závislý hlavně na jeho následném použití. Dle toho vybíráme parametry mechanických vlastností (mez pevnosti, modul pružnosti v tahu, rázová houževnatost atd.), umístění (UV stabilita, odolnost vyšším teplotám,). A v neposlední řadě design, barva a možnosti povrchových úprav výtisku. V tabulce č. 2 níže jsou uvedeny mechanické vlastnosti výběru používaných materiálů. [8]

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů používaných pro FDM tisk [9]

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Vrubová Houževnatost [kJ/m <sup>2</sup> ]	Modul pružnosti v ohybu [GPa]	Celková tažnost [%]
ABS	42,1	2,13	11	2,34	7
PET	85,2	3,25	3,5	2,96	20
PETG	53,9	2,21	7,6	2,14	50
PC	65,5	2,38	14	2,38	110
PPS	59,9	3,31	-	2,99	4
PLA	33	2,52	-	-	2,7
HIPS	24	1,65	1,12	1,91	52

### 2.3.1 Akrylonitrilbutadienstyren

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je vysoce využívaný konstrukční plast v technických odvětvích díky svým vlastnostem. Převážně se používá na výrobu obalů, krytů a prototypování. V automobilovém průmyslu se používá, jak pro díly v interiéru, tak exteriéru. Pro zlepšení mechanických vlastností slouží ABS jako matrice pro kompozity. Nejčastěji se vyztužuje skleněnými vlákny, uhlíkovými vlákny nebo se kombinuje s jinými plasty v podobě vrstveného kompozitu. [10]

ABS je amorfní termoplast tvořený dlouhými butadienovými řetězci, který je kopolymerovaný s řetězci styrenu a akrylonitrilu. Díky této akrylonitrilové složce má materiál vyšší chemickou odolnost (vůči kyselinám a olejům) a díky styrenu má lepší akustické vlastnosti a dobře odolává elektrostatickému náboji. Nevýhodou heterogenního složení je jeho neprůhlednost a navlhavost. [11]

Tisk ABS na FDM tiskárnách je poměrně náročný. Materiál díky vyšší teplotě zpracování je náchylný na tepelný šok během extruze, a tím jsou zapříčiněné deformace a separace tištěných vrstev. Pro zabránění těchto jevů je výhodné tisknout v uzavřené komoře, kterou tisková podložka vyhřeje a sníží tepelný rozdíl mezi okolním prostředím a extrudovaným materiálem. Výhodou ABS je možnost vyhlazování povrchu pomocí acetonových par, příklad takto vyhlazeného dílu je na obrázku č.6. [11]

Tabulka 3 Výhody a nevýhody použití ABS

Výhody	Nevýhody
Odolný mechanickému opotřebení	Deformace během tisku
Odolný vůči teplotě	Biologicky nerozložitelný plast na bázi ropy
UV stabilní	Špatná přilnavost k tiskové podložce
Možnost vyhlazování acetonem	Toxické výpary při tisku, karcinogenní
Nízká cena	Náročnější tisk



Obrázek 6 Vlevo – výrobek z ABS – Vpravo výrobek z ABS vyhlazený pomocí acetonových par [12]

### 2.3.2 Kyselina polyléčná

Kyselina polyléčná (PLA) je polyester, který je biokompatibilní a biologicky odbouratelný. Tento materiál je vyráběn z obnovitelných zdrojů, jako kukuřice a cukrová třtina. Materiál je velmi levný a vhodný na tisk díky své nízké teplotě tisku (215 °C). Nevýhodou je ztráta mechanických vlastností za zvýšených teplot, již okolo 60 °C. Proto je výborný pro začátky experimentování s 3D tiskem. Výborně přilne k tiskové podložce. Materiál nemá dobré mechanické vlastnosti, a tudíž se nehodí pro technické aplikace, vhodný je pro vzhledové vzorky a nenáročné aplikace. [8]

Tabulka 4 Výhody a nevýhody použití PLA

Výhody	Nevýhody
Nenáročný tisk	Křehkost
Průmyslově biodegradabilní	UV nestabilní
Tvrdość	Nízká teplotní odolnost
Cena	

### 2.3.3 Polykarbonát

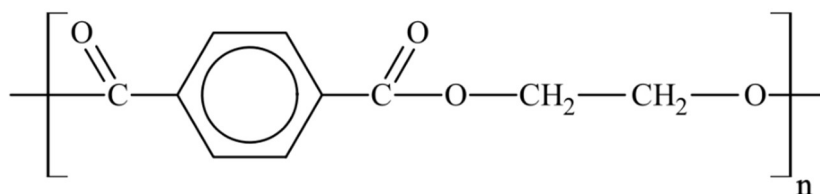
Polykarbonát (PC) je průhledný amorfni termoplast s výbornými mechanickými vlastnostmi, odolává dobře dynamickému namáhání. Je to navlhavý plast, což ale nemá vliv na mechanické vlastnosti a díky vysoké teplotě skelného přechodu (150 °C) je vhodný pro aplikace právě při vyšší teplotě. Díky své průhlednosti je vyžívaný hlavně v optice, stavebnictví a automobilovém průmyslu atd. [8] [13]

Tabulka 5 Výhody a nevýhody použití PC

Výhody	Nevýhody
Vysoká tahová odolnost a houževnatost	Špatná přilnavost k podložce
Elektroizolační vlastnosti	Deformace při tisku
Průhlednost	Navlhavý
Vysoká teplotní odolnost	Při tisku uvolňuje škodlivé látky

### 2.3.4 Polyethyltereftalát a Polyethyltereftalát modifikovaný glykolem

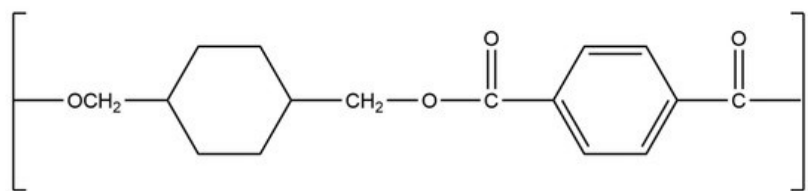
Polyethyltereftalát (PET) je jeden z nejpoužívanějších polymerů na světě, v textilním odvětví se setkáme s názvem polyester, kdy je využívan jako vlákno pro výrobu textilie. Jedná se o semikrystalický polymer. Alifatický polyester je získávaný polykondenzací monomerů kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Má výborné izolační vlastnosti. Nejčastěji je využívan v potravinářství a odvětví obalových materiálů. Tento materiál je výborný pro plnění různou výztuží, jako je skleněné či uhlíkové vlákno, které výrazně zvyšují mechanické vlastnosti PET.



Obrázek 7 Strukturni vzorec PET [14]

PET modifikovaný glykolem (PETG) se přidáním glykolu se materiál stává amorfni. Modifikací glykolem je dosaženo lepších mechanických vlastnostmi a materiál má nižší nasákavost než samotný PET. Materiál má dobré teplotní vlastnosti, je odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům. PETG je relativně jednoduchý materiál pro tisk oproti ABS a ASA. Využívan

je v potravinářském průmyslu a v elektrotechnice (dielektrikum ve vysoce výkonných fóliových kondenzátorech a jako polymerní elektroda).



Obrázek 8 Strukturální vzorec PETG [15]

Na první pohled není možné poznat rozdíl mezi PET a PETG. Tyto dva materiály jsou ovšem rozdílné již na molekulární úrovni. PET je kombinací dvou monomerů, PETG má stejné dva monomery, ale také obsahuje glykol, díky kterému má polymer jiné chemické vlastnosti. PETG je méně křehký a poddajnější než PET. Stejně tak má lepší odolnost oproti nárazům a odolnost za vyšších teplot. [16]

Tabulka 6 Výhody a nevýhody použití PETG

Výhody	Nevýhody
Malá teplotní roztažnost	Možnost stringování
Pevný a houževnatý	Náchylný na poškrábání
Nenavlhavý	Náchylný k oxidaci
Snadný tisk	Biologicky nerozložitelný
Odolný vůči nárazům	

## 2.4 Kompozitní materiály pro technologii FDM

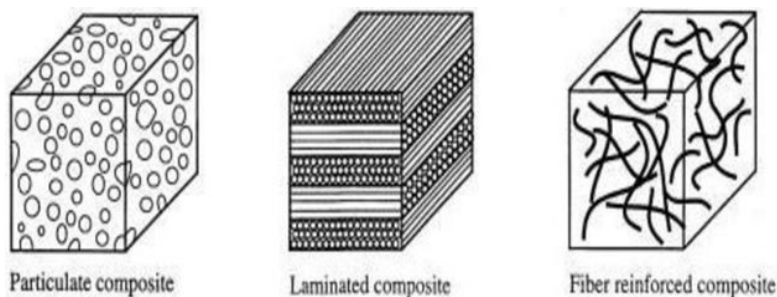
Vlastnosti kompozitu kombinují vlastnosti matrice, v tomto případě termoplastu a výztuže. U kompozitních termoplastických materiálů je složité předpovídat jejich chování. Na rozdíl od kovů, které jsou izotropní. Vlastnosti jsou různé u matrice a výztuže, též záleží na orientaci výztuže a na následných sílách působících na ně. Toto může vést k nepředpokládanému chování, jelikož vztahy mezi působící silou a deformací jsou složitější. Teplotní změny v kompozitech mají složitější průběh než u jednotlivých složek. [17]

Kompozity mohou obsahovat výztuž různých rozměrů. Dělí se na makrokompozity a mikrokompozity. Ve strojírenství jsou využívány standardně mikrokompozity, kde velikost kompozitní výztuže jsou v řádu mikrometrů. Ukázka druhů výztuží je na obrázku č. 9. Kompozity lze dělit dle tvaru výztuže:

*Kompozity s vláknovou výztuží* – výztuž je ve tvaru vláken. Dále je můžeme dělit dle jejich orientace vláken na jednosměrná, více směrná a s nahodilým uspořádáním.

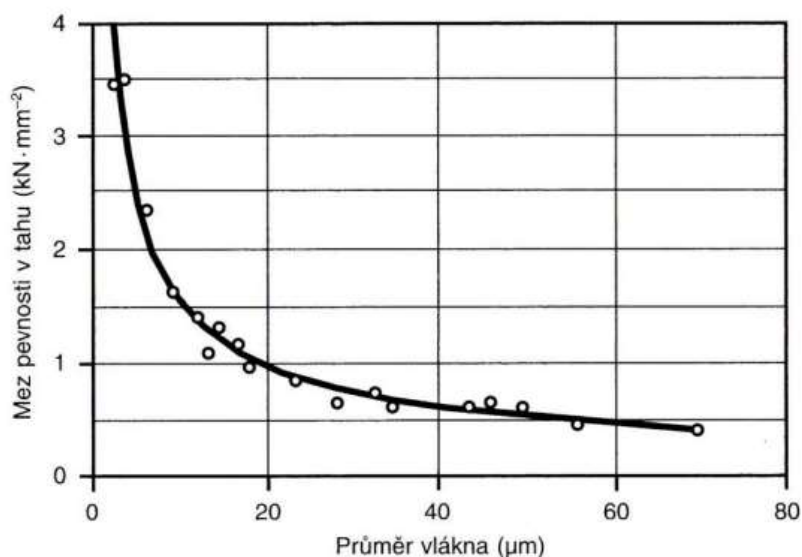
*Kompozity s částicovou výztuží* – výztuž je ve tvaru částic. Důležité pro vlastnosti kompozitů je rovnoměrnost rozložení výztuže v matrici.

Dalším druhem kompozitu je tzv. strukturní kompozit. Tyto kompozity se skládají z vrstev jednotlivých materiálů.



Obrázek 9 Ukázka geometrie výztuže, Particulate composite-částicový kompozit, Laminated composite-strukturní kompozite, Fiber reinforced composite-vláknové kompozity [18]

Nejčastěji jsou využívány výztuže ve formě vláken, jelikož vykazují vyšší pevnost než částicové výztuže. Pevnost vláken je nepřímo úměrná jejich průměru. Pevnost roste se zmenšujícím průměrem, což je dáno tím, že se snižuje vliv vad vláken (obrázek č. 10).



Obrázek 10 Vliv průměru vlákna na mez pevnosti v tahu [19]

Vlákná se nejčastěji používají skleněná, uhlíková, keramická nebo kovová. Skleněná vlákna jsou vyráběna tažením z taveniny. Skleněná vlákna jsou velice křehká a abrazivní, proto jsou povlakována. Jejich velikou výhodou je nízká cena oproti ostatním materiálům. Uhlíková vlákna jsou krystalická s vysokou hodnotou modulu pružnosti, dobrou teplotní odolností a

nízkou hustotou. Díky těmto vlastnostem jsou využívána v oblastech letectví, kosmonautice a automobilovém průmyslu.

#### **2.4.1 Skelná vlákna**

Skelné vlákno je využíváno v kompozitních materiálech pro své dobré vlastnosti, jako je nehořlavost, odolnost povětrnostním vlivům, korozi a většinou kyselin. Má také dobré mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti umožňují velmi široké využití skelných vláken.

V kompozitech se využívají skelná vlákna E, S, C, D, AR, L, S-Q. [19]

E-vlákna: Jsou skelná vlákna z bezalkalické skloviny. Jsou výborným elektroizolantem s vysokou propustností pro záření. Tato vlákna momentálně zauímají až 90 % výroby. Pro vyšší chemickou odolnost jsou E-vlákna vyráběna bez příměsi oxidu boru ( $B_2O_3$ ).

S-vlákna: Mají vyšší obsah  $SiO_2$ ,  $MgO$  a  $Al_2O_3$ . Tyto vlákna dosahují o 40-70 % vyšší pevnost v tahu a modul pružnosti. Standardně se tyto vlákna využívají v kompozitech s epoxidovou maticí.

C-vlákna: Vlákna se zvýšenou odolností proti kyselinám a proti chemickým agresivním látkám. Na druhou stranu mají nižší pevnost a jejich mechanické vlastnosti klesají se zvyšující se teplotou.

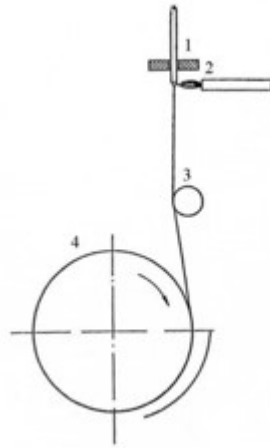
AR-vlákna: Vlákna s vyšší odolností v alkalických prostředích.

L-vlákna: Tato vlákna obsahují oxid olova. Jsou proto využívána v aplikacích, kde je třeba stínění rentgenového záření.

#### **Výroba skelných vláken**

Skelná vlákna se standardně vyrábějí tažením z trysek nebo skleněných tyčinek. Výroba tažením z trysek probíhá tak, že sklený polotovár je roztaven v pícce, která má na dně rošt s velkým množstvím otvorů, kterými protéká tavenina, ta je zachytávána, následně natahována a již ve formě vláken navíjena na buben.

Další způsob je tažení ze skleněných tyčinek. Nejjednodušším způsobem je tažení dle Lujiena de Brunfauta. Jeho technologie spočívá v upevnění skleněných tyčinek o průměru 4 mm a délce 1 - 2 m. Tyčinky jsou konstantně posunovány do tavicí zóny, kde se jejich konec natavuje a z těchto roztavených konců jsou vytahována jednotlivá skleněná vlákna a navíjejí se na buben. Vlákno prochází cestou plstí, která je nasycena lubrikační tekutinou. Takto se dají vyrobit vlákna průměrné tloušťky 10  $\mu m$  a izolační vlákna tloušťky 25  $\mu m$ . Schéma uvedené metody je naznačeno na obrázku č. 11 níže. [20]



Obrázek 11 Mechanické tažení skleněných tyčinek. 1- skleněné tyčinky, 2 - plynový hořák, 3 - lubrikační váleček, 4 - navíjecí buben [20]

## 2.4.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou relativně moderním materiálem, i když první zmínka o uhlíkovém vlákne je z roku 1879, kdy byla bavlněná niť z karbonizovaného uhlíku použita pro výrobu vlákna do žárovek. Většího rozšíření se uhlíková vlákna dočkala v 50. a 60. letech 20. století, byla objevena vlákna z karbonizovaného hedvábí a dále byla objevena vlákna na bázi prekurzorů polyakrylonitridu a smoly.

Uhlíková vlákna se vyznačují lepším poměrem vlastností k ceně než jiné vláknové materiály. Například sklolaminát je levnější, ale vlastnosti má výrazně horší. Uhlíková vlákna se vyznačují zvýšenou tepelnou vodivostí, vysokou odolností proti opotřebení a vysokou pevností. Dále jsou vlákna využívána pro svoji schopnost dodatečné mazivosti díky vlastnosti uhlíku, který má vrstevnatou strukturu. [21]

### 2.4.2.1 Dělení uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna lze dělit dle jejich způsobu výroby nebo dle mechanických vlastností.

#### Dělení dle způsobu výroby

Dle způsobu výroby se vlákna dělí na vyrobená karbonizací prekurzorových vláken a na vlákna syntetizována přímo z uhlovodíkového plynu, jako je například metan. Vlákna vyráběná karbonizací z prekurzorových vláken lze dělit dle použitého prekurzoru. [22]

#### **Prekurzorová vlákna na bázi polyakrylonitridu (PAN)**

V současnosti se asi 90 % veškeré výroby uhlíkových vláken na bázi prekurzorů vyrábí z polyakrylonitridu. Tato vlákna jsou z ekonomického hlediska nejvýhodnější vzhledem k jejich mechanickým vlastnostem a dalším výhodám.



### ***Prekurzorová vlákna na bázi smoly***

Jedná se o druhý nejpoužívanější způsob výroby prekurzorových vláken. Smoly vznikají jako vedlejší produkt při koksování, v ocelářském průmyslu nebo rafinérském průmyslu. Ve srovnání s vlákny PAN jsou v případě výroby vláken s ultra vysokým modulem v tahu levnější.

### ***Prekurzorová vlákna na bázi hedvábí***

Tento typ vláken není velmi rozšířený, a to převážně kvůli horším vlastnostem v porovnání s ostatními. Jejich jedinou výhodou je velice malá schopnost přenosu tepla. [23]

### **Dělení dle mechanických vlastností**

Uhlíková vlákna můžeme dělit dle jejich mechanických vlastností, a to na vlákna nižších a vyšších mechanických vlastností.

#### ***Uhlíková vlákna nižších mechanických vlastností***

Jako uhlíková vlákna nižších mechanických vlastností řadíme ta, která mají pevnost v tahu nižší než 1 GPa a modul pružnosti nižší než 100 GPa.

Využívají se převážně jako tepelná izolace, u levných výrobků jako elektromagnetické stínění nebo výztuž do betonu. [21] [22]

#### ***Uhlíková vlákna vyšších mechanických vlastností***

Vlákna s vyššími mechanickými vlastnostmi jsou ta, která dosahují pevnosti v tahu 2-7 GPa a modulu pružnosti 230-900 GPa. Patří sem převážně vlákna na bázi PAN, na bázi smol a vlákna charakteru whiskerů (VGCF). Dále můžeme tato vlákna rozdělit do podkategorií. [21] [22]

- HT Fibers (High Tencile Fibres) – Vysokopevná vlákna se vyznačují modulem pružnosti v tahu 230-300 GPa a pevností v tahu 3-4 GPa. U novějších vláken dokážeme získat výrazně vyšší pevnost v tahu (až 7 GPa) při zachování modulu.
- IM Fibers – (Intermediate Modulus Fibres) – Středně modulová vlákna se vyznačují modulem pružnosti nad 290 GPa a pevností v tahu vyšší než 4 GPa.
- HM Fibers – (High Modulus fibre) – Vysokomodulová vlákna se vyznačují modulem pružnosti nad 400 GPa a pevností v tahu 2,4-4 GPa.
- UHM Fibers – (Ultrahigh Modulus Fibres) – Vlákna se super vysokým modulem se vyznačují modulem nad 550 GPa a pevností v tahu 2,4-4 GPa. U těchto vláken je pevnost v tahu přibližně stejná jako u vysokomodulových vláken

### 2.4.2.2 Výroba uhlíkových vláken

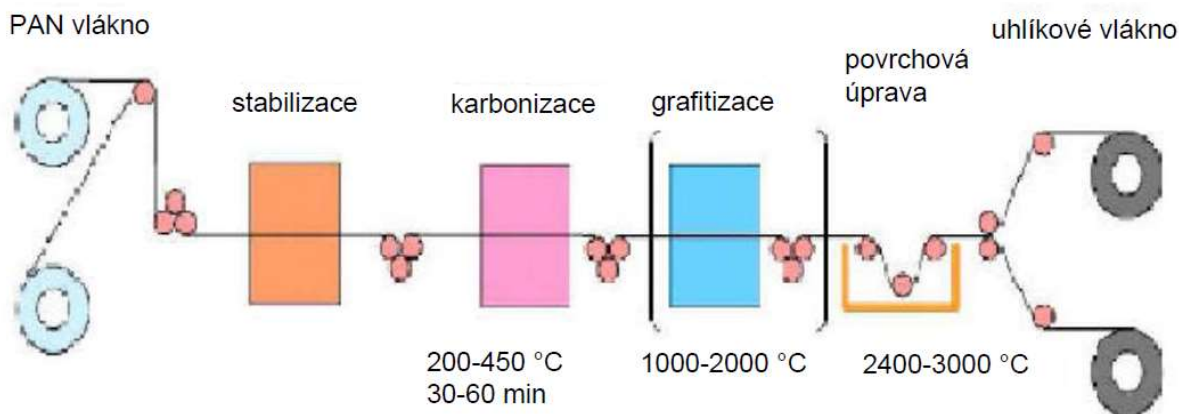
Uhlíková vlákna není možno vyrábět stejným způsobem jako například kovová, skleněná, polymerní nebo křemenná. Jelikož uhlík netaje, není tažný a je dokonce odolný vůči rozpouštědlům. Proto se uhlíková vlákna vyrábí řízenou pyrolýzou organických prekurzorů anebo katalytickým rozkladem plynných uhlovodíků. Vlákna je možno vyrábět z různých prekurzorů, jako jsou prekurzory na bázi PAN, smoly, celulózy, hedvábí. Tyto materiály obsahují vysoké procento uhlíku a je tedy možné je převést na grafitový materiál. Další možností výroby vláken charakteru whiskerů je pomocí katalytického rozkladu plynných uhlovodíků. [21] [22]

#### Výroba uhlíkových vláken z prekurzoru Polyakrylonitrilu (PAN)

Vlákna na bázi PAN vykazují pevnost v tahu 1,8 – 2,3 GPa a modul pružnosti v tahu 220-265 GPa. Tato vlákna jsou velice často využívána v pokročilejších kompozitních materiálech, a to kvůli vlastnostem jako je vysoký modul pružnosti, odolnost vysokým teplotám, poměr hmotnosti a pevnosti vlákna, elektrická a tepelná vodivost a také odolnost vůči chemikáliím.

Jako prekurzor je použito akrylové vlákno, které musí mít speciální vlastnosti. Základní podmínkou pro získání vlákna s nejvyšší pevností a modulem pružnosti v tahu je uspořádání silných vazeb atomů uhlíku ve směru vlákna.

Proces výroby vlákna je znázorněn na obrázku č. 12. Jednotlivé části budou popsány podrobněji níže. [21] [24]

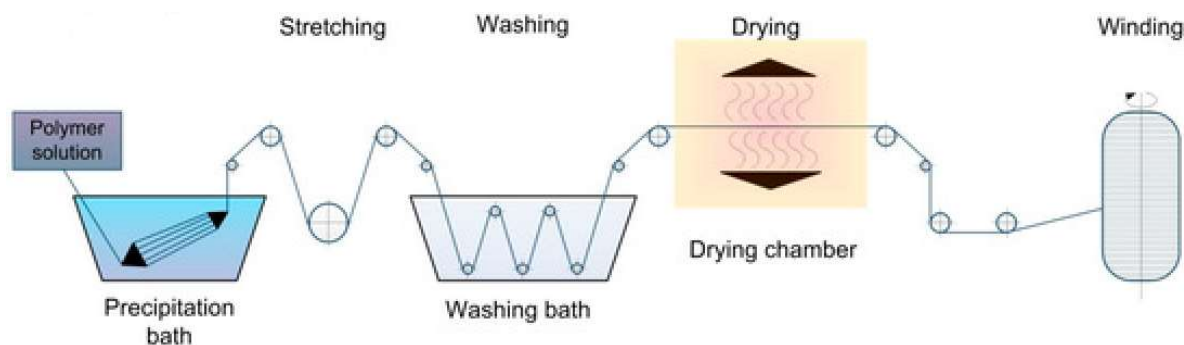


Obrázek 12 Schéma výroby uhlíkových vláken z prekurzoru na bázi PAN [25]

#### Příprava prekurzoru (PAN vlákno)

Výchozí materiál se upravuje tavným zvlákňováním nebo zvlákňováním v tavném roztoku takovým způsobem, že je roztok polymeru vytlačován soustavou složenou z 1000 – 3000 jednotlivých trysek. Následně se tato vlákna tvoří v precipitační lázni nebo

v proudu teplého vzduchu. Jedná se o důležitý krok v procesu, jelikož PAN se rozkládá ještě před dosažením teploty tání a tomu je zabráněno pomocí lázně. Následuje promývání pro odstranění zbytků rozpouštědla. Vlákno je poté vytahováno na požadovaný rozměr v atmosféře vodní páry. Tento proces probíhá pod napětím, aby se zajistila orientace molekul ve směru osy vlákna. Výsledný modul pružnosti a pevnosti závisí na dokonalosti orientace ve vláknech.



Obrázek 13 Schéma výroby PAN vlákna (polymer solution-roztok polymeru, Precipitation bath-precipitační lázeň, stretching-vytahování, washing bath-promývací lázeň, drying chambre-sušící komora, winding-navájení) [25]

### **Stabilizace**

Před samotnou karbonizací je potřeba, aby ve vláknech vznikla teplotně stabilní zesíťovaná struktura. Toho je docíleno zahřáním na 200–450 °C po dobu 20-30 minut. Toto je prováděno na vzduchu a ve vláknech dochází ke vzájemnému zesíťování makromolekul kyslíkovými můstky, které zamezují měknutí během karbonizace.

### **Karbonizace**

V tomto kroku se převádí prekurzorové vlákno na uhlíkové vlákno. V inertní dusíkové atmosféře je vlákno zahřáto na 1000–1400 °C. Díky absenci kyslíku vlákno nemůže hořet a dochází ke katalytickému spalování nebo promývání, tím je docíleno toho, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje kolem 85–95 % uhlíku.

### **Grafitizace**

Grafitizace je prováděna taktéž v inertní dusíkové nebo argonové atmosféře při teplotách 2400–3000 °C. V tomto kroku je zvyšován obsah uhlíku až na 99 % a více. Také vzniká uspořádaná grafitická struktura a tím roste tuhost vláken, naopak ale dochází k poklesu pevnosti. Toto je zapříčiněno růstem mikrokystalů a tím i růstem defektů mezi nimi.

### **Povrchová úprava**

Povrchové úpravy vlákna jsou důležité z důvodu správného fungování kompozitu. Při zatěžování kompozitu jsou síly pomocí matrice přenášeny z jednoho vlákna na druhé. Toho je ale dosaženo pouze za předpokladu, když má vlákno s matricí dostatečnou vazbu, tohoto se

docílí právě pomocí povrchových úprav vlákna. Avšak při moc silné vazbě se kompozit stává křehkým. Povrchové úpravy můžeme rozdělit na oxidační a neoxidační.

Oxidace vláken se provádí buď v plynné fázi, nebo v kapalně fázi. Pro oxidaci v plynné fázi se používá více či méně kyslíkem obohacený vzduch nebo inertní atmosféra. Oxidace v kapalně fázi probíhá za přítomnosti celé řady oxidačních činidel (např. kyselina dusičná). Další možností je oxidaci provádět anodicky, což je způsob vhodný při kontinuální výrobě vláken. Při této metodě je vlákno použito jako anoda ve vhodném elektrolytu. Hlavním důvodem povrchových úprav je vytvoření aktivních kyslíkatých ploch a drsnějšího povrchu, které zlepšují soudržnost matrice a vlákna.

Mezi neoxidační metody řadíme whiskerizaci. Jedná se o metodu, kdy dochází k růstu miniaturních krystalů na povrchu vlákna (zejména SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nebo TiO<sub>2</sub>). Což vede ke zvětšení povrchu vlákna a zlepšení vazby s matricí.

### **Výroba uhlíkových vláken z prekurzoru na bázi mezofázových smol**

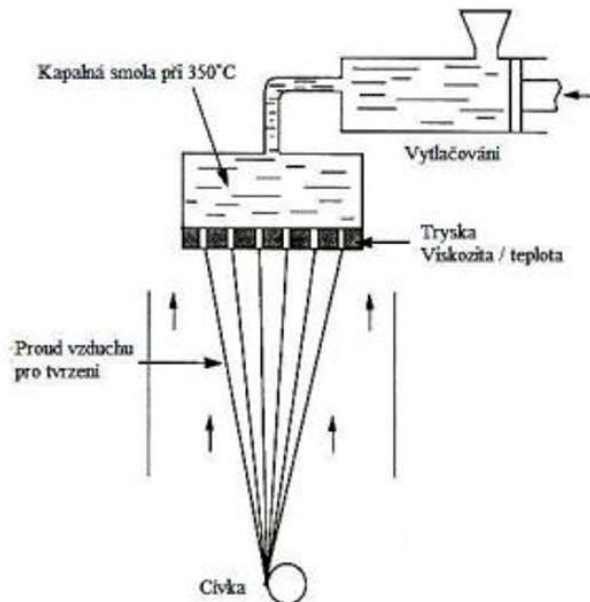
Prekurzory u tohoto druhu výztuže jsou černouhelné, ropné smoly, dále smoly vyráběné pyrolýzou aromatických sloučenin nebo polyvinylchloridu (PVC). Oproti vláknům z PAN mají tato vlákna vyšší výtěžnost při karbonizaci (až 80 %). Zpracování je velice podobné procesu zpracování PAN vláken. [24] [17]

#### ***Příprava mezofázových smol***

Smola je nejprve filtrována pro zbavení veškerých minerálních a dalších netavitelných příměsí. Během celého procesu je smola udržována v teplotě mezi 300-450 °C. Tímto je izotropní smola transformována na mezofázovou. Důležitou vlastností je vysoký obsah mezofáze, která je schopna se snadno orientovat při spřádání.

#### ***Termosetování a spřádání***

Mezofázová smola se zvlákňuje pod tlakem inertního plynu, v monofilamentní nebo multifilamentní zvlákňovací trysce, která je složena z velkého počtu kapilárních kanálků o průměru 3-4 mm. Smola je zahřáta na 300-450 °C v inertní atmosféře nebo oxidační kapalině, tímto je způsobena stabilizace a oxidační zesíťení. Je důležité, aby vlákna byla natahována při navíjení, díky tomu je zaručena orientace struktury, která je uspořádána rovnoběžně s osou vlákna, a jednotnost vláken. Schéma spřádání je na obrázku č. 14.



Obrázek 14 Schéma spřádání vláken na bázi smol [21]

### **Stabilizace, karbonizace, grafitizace a povrchová úprava**

Tyto procesy jsou víceméně stejné jako u výroby vláken na bázi PAN. Jenom s tím rozdílem, že vlákna na bázi smol dosahují vysoce orientované struktury.

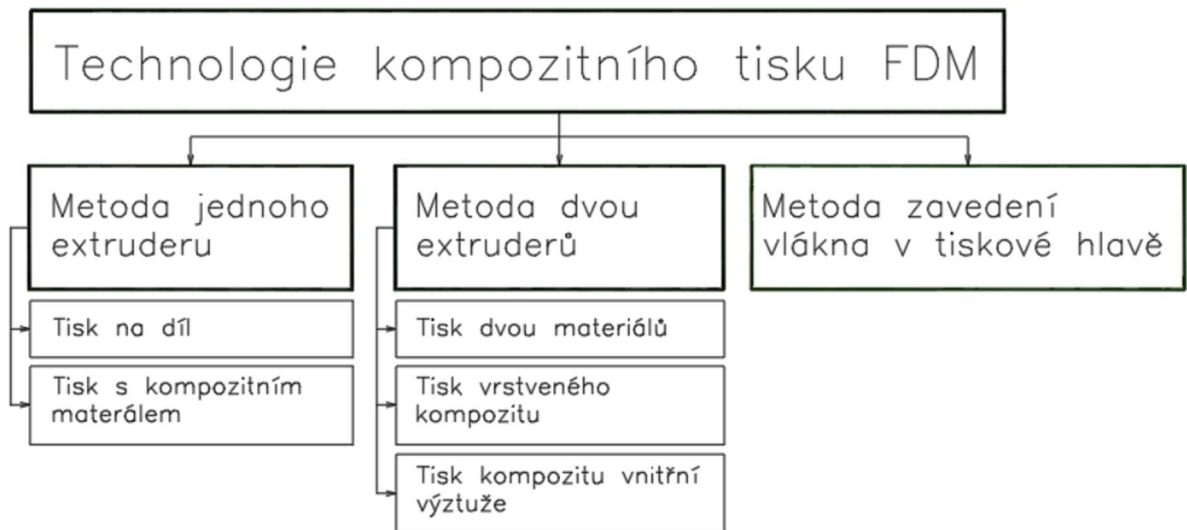
#### **2.4.2.3 Porovnání uhlíkových vláken na bázi PAN a mezofázových smol**

Cena vláken na bázi PAN se v poslední době snižuje, ale stále je poměrně vysoká oproti vláknům z mezofázových smol. A to hlavně díky ceně základního materiálu, jelikož pro mezofázové smoly je základní materiál získáván jako vedlejší produkt při zpracování uhlí či ropných produktů.

Dalším rozdílem je karbonizace, při které se účinnost u vláken z PAN pohybuje kolem 50 % a u mezofázové smoly dosahujeme až 80 %.

## 2.5 Metody FDM tisku kompozitních materiálů

Metody tisku kompozitních materiálů technologií FDM můžeme rozdělit dle použité technologie extruderu. Rozdělení je znázorněno na obrázku níže. [26] [27]



Obrázek 15 Metody FDM tisku kompozitních materiálů

### 2.5.1 Metody jednoho extruderu

Metody tisku kompozitu pomocí jednoho extruderu řadíme mezi nejjednodušší, které se dají realizovat se standardními „hobby“ tiskárnami čili není potřeba speciálních tiskáren nebo rozšíření pro kompozitní tisk.

#### 2.5.1.1 Tisk na díl

Tato metoda spočívá v tisku vrstvy polymerního materiálu na povrch jiného dílu, ten může být například z keramiky, kovových materiálů, dřeva atd.. Tímto je na dílu vytvořeno něco jako povlak. Touto metodou vyrobený díl se skládá z více materiálů, kde ale původní materiál tvoří majoritní část objemu výrobku. Velikou nevýhodou této metody je tvar základního dílu, jelikož je potřeba ho rozdělit na jednotlivé povrchy, které se tisknou v různých krocích. Tímto omezením není dosaženo kontinuálního tisku, a je potřeba tisk zastavovat mezi jednotlivými kroky. [26]

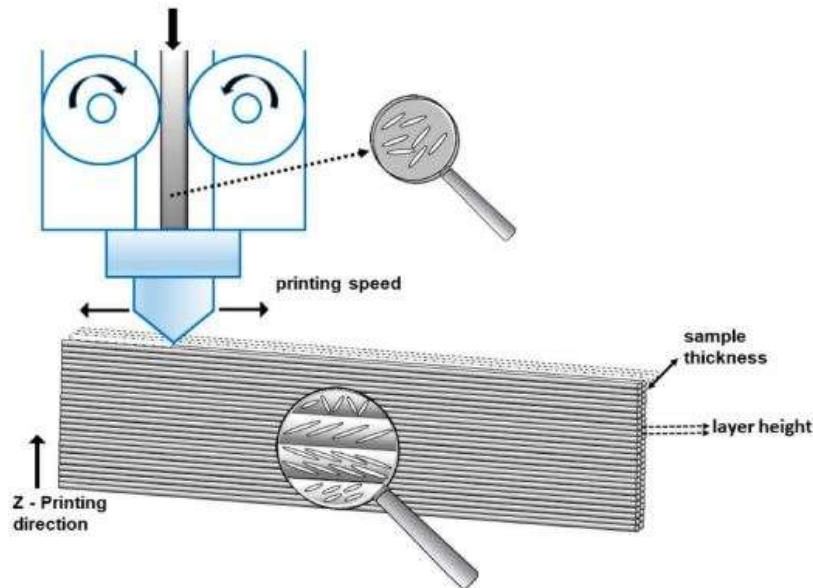
#### 2.5.1.2 Tisk s kompozitním materiálem

Tato metoda se nijak neliší od standardního tisku polymerních materiálů metodou FDM, pouze spočívá ve využití filamentu, který v sobě má výztuž, schéma metody je na obrázku č. 16. Výztuž se využívá v podobě částic, krátkých nebo kontinuálních vláken.

Omezením této metody je hlavně dostupnost jednotlivých filamentů. Momentálně je k dostání omezené množství materiálů a typů výplní. Dostupné kompozity by se daly rozdělit

na technické a designové. Mezi technické bychom mohli zařadit ty s výplní s uhlíkovým, skleněným či kevlarovým vláknem. Designové jsou například s výztuží v podobě částic dřeva nebo kovu (bronz, měď, mosaz).

Pro správný tisk filamentu je zásadní velikost výplně a tření výplně v trysce. Při překročení určité velikosti nebo tření výplně dochází k ucpávání trysky nebo špatného průtoku tryskou a to způsobuje defekty tisku. Kvůli tření výplně v trysce dochází k rychlejšímu opotřebení a následnému vlivu na přesnost tisku, proto je doporučováno místo standardní mosazné trysky využít tvrzenou ocelovou. [27] [28]



Obrázek 16 Schéma tisku kompozitního materiálu, printing speed-rychlost tisku, printing direction-směr tisku, layer height-výška vrstvy, sample thickness-šířka vzorku [29]

## 2.5.2 Metody dvou extruderů

Selektivní tisk dvou různých materiálů je novější metodou používanou pro multimateriální tisk. Tohoto můžeme dosáhnout buď využitím dvou extruderů, nebo systémem jednoho extruderu s možností změny filamentu. Ukázka používaných vzorů je na obrázku č. 17.

### Tisk dvou materiálů

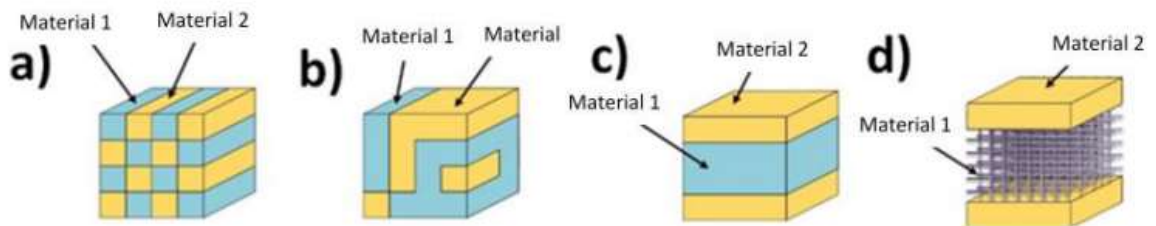
Tisk dvou materiálů je výhodný z toho důvodu, že již při návrhu dílu je možné ovlivnit vlastnosti výsledného dílu správným rozložením materiálu. Nevýhodou této metody jsou tiskové defekty při změně materiálu.

### Tisk vrstveného kompozitu

Tisk vrstveného materiálu spočívá v tisku materiálu, kdy se střídají pravidelně vrstvy jednoho a druhého materiálu.

### Tisk kompozitu vnitřní výztuže

Tato metoda spočívá v tisku vnějších ploch jedním materiálem a vnitřní výztuže druhým. Toto rozdělení je potřeba udělat již při vytvoření programu pro tiskárnu. Pro tvar vnitřní výplně se nejčastěji využívá tvaru hexagonálních buněk, čtvercových buněk nebo ve tvaru pláství. [26]

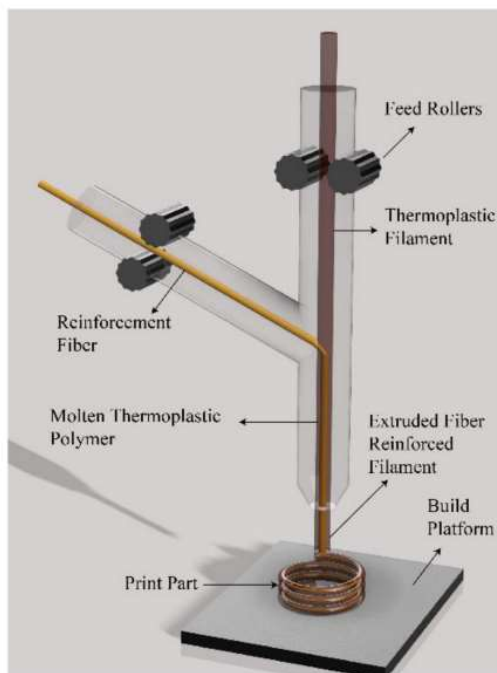


Obrázek 17 Ukázka vzorů tištěných pomocí metody dvou extruderů, a) Tisk dvou materiálů symetrický b) Tisk dvou materiálů nesymetrický c) Tisk vrstveného polymeru d) Tisk kompozitu vnitřní výztuže [26]

### 2.5.3 Metoda zavedení vlákna v tiskové hlavě

Tato metoda je využívána pro kompozitní tisk s kontinuálním vláknem. V tomto případě je vlákno i filament dodáváno do extruderu odděleně. Pro lepší spojení vlákna a filamentu je vlákno před kontaktem s filamentem přehřáto. V extruderu dochází k plastifikaci filamentu a v tu chvíli je podavačem přidáváno vlákno. Dále již tisk probíhá jako u standardního FDM tisku. Ukázka metody na obrázku č. 18. [27] [28]

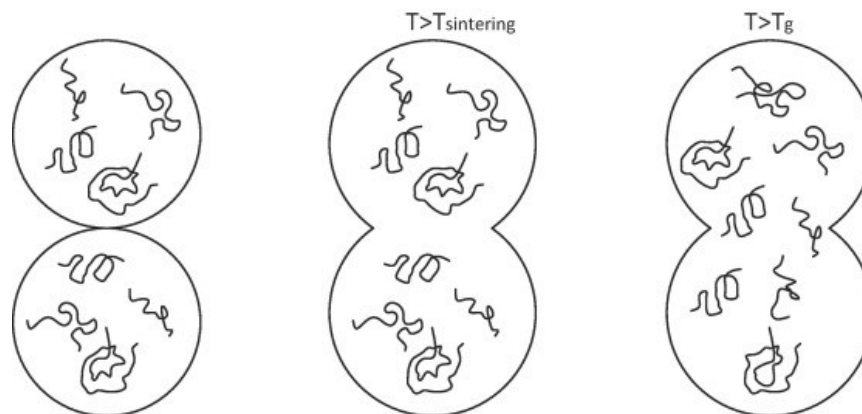




Obrázek 18 Ukázka metody impregnace ve trysce, Reinforcement fiber-vlákna výztuže, Feed Rollers-podavač filamentu, Thermoplastic filament-termoplastický filament, Molten thermoplastic filament-roztavený termoplastický filament, Extruded fiber reinforced filament-extrudovaný filament vyztužený vlákny, Print part-vytisknutá součást, build platform-tisková podložka [27]

## 2.6 Žhání výtisků z polymeru

Nevýhodou polymerů je jejich špatná tepelná vodivost. Při metodě FDM materiál prochází extruderem, kde je rychle roztaven a následně rychle chlazen. V důsledku toho dochází ke vzniku nehomogenních teplotních oblastí během chlazení, a tím vzniká následné vnitřní pnutí a dochází ke špatné difúzní mezivrstevní vazbě. Před tisknutím je struktura materiálu z velké části amorfní a neuspořádaná. Ochlazením se u semikrystalických polymerů struktura přetvoří do krystalické podoby, ale díky velké rychlosti ochlazení nedojde ke krystalizaci v celém objemu. U amorfních materiálů dochází při tisku ke spojení jednotlivých vrstev, které probíhá ve třech fázích, jak je naznačeno na obrázku č. 19. Prvně dojde k dotyku jednotlivých povrchů, následně při teplotě nad kritickou teplotou slinování  $T_{sintering}$  dojde ke spojení vrstev. Při poslední fázi dochází k difúznímu spojení polymerních řetězců při teplotě nad  $T_g$ . Toto je znázorněno na obrázku č. 19. Ochlazování probíhá při tisku technologií FDM rychle a není vždy dostatečný čas pro difúzní spojení, což vede ke slabší mezivrstevní vazbě [30].



Obrázek 19 Schéma vytvoření spojení jednotlivých vrstev, vlevo - dotek povrchů, uprostřed - růst krčku, difuzní spojení při teplotě nad  $T_g$  [30]

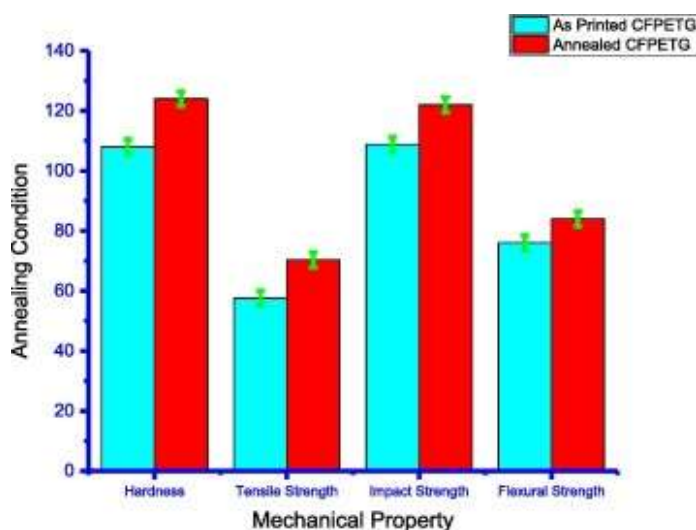
Při žíhání amorfních a semikrystalických materiálů dochází ke zlepšení mezivrstevné vazby. Při zahřátí nad  $T_g$  dojde k difuznímu spojení polymerních řetězců, ke kterým nedošlo v takové míře kvůli rychlému ochlazení při tisku. U amorfních polymerů je toto jediný proces, díky kterému dochází ke zlepšení mechanických vlastností při žíhání [30].

U semikrystalických materiálů je prováděno žíhání také pro zvýšení podílu krystalické fáze v materiálu. Materiál je zahřát nad teplotu skelného přechodu ( $T_g$ ) a nesmí překročit teplotu tání ( $T_m$ ). Tepelné žíhání spustí proces nukleace polymeru, který dále napomáhá růstu existujících krystalů. Díky zmenšující se amorfní části, a kvůli rostoucí krystalické části, která má uspořádanější strukturu, je materiál stabilnější, a to zvláště za zvýšených teplot. Dosažení určitého podílu krystalické fáze záleží na teplotě a času žíhání. Tyto dva parametry jsou v nepřímé úměrnosti. Teplota žíhání by však neměla překročit teplotu tání. Nad ní by mohlo dojít ke snížení podílu krystalické fáze a porušení krystalické integrity. Při zatěžování ve směru kolmo na vrstvy má proces difuzního spojení výrazně větší vliv na mechanické vlastnosti než proces zvýšení krystalické fáze v materiálu [31] [30].

Výsledky nedávných studií naznačují, že vzorky vyrobené aditivními technologiemi vykazují po žíhání zlepšení mechanických vlastností [32] [33] [34] [35] [36] [37].

Například při žíhání PLA vzorků dospěli Wach a spol. k závěru, že pevnost v ohybu a tlaku se zvýšila. Při žíhání na  $130\text{ °C}$  po dobu 300 s bylo zvýšení pevnosti v ohybu až 58 % a pevnost v tlaku po žíhání na  $140\text{ °C}$  po dobu 400 s až 40 % [35]. V podobné práci Rangisetty a Peel zkoumali vliv žíhání na vzorky z PLA, ABS a PETG vyztužené uhlíkovými vlákny. Vzorky žíhali na teplotu  $5\text{ °C}$  nad teplotou  $T_g$ . Pevnost v tahu, Youngův modul a pevnost v ohybu vykazují po žíhání zlepšení u PETG a PETG s uhlíkovým vláknem. Naopak u ABS a ABS s uhlíkovým vláknem nedošlo k žádnému zlepšení, v některých případech došlo ke zhoršení. Vzorky z PLA vykazovaly zlepšení v ohybových vlastnostech, ale v tahových nedošlo k žádnému zlepšení.

Stejně tak pozorovali rozdíly ve zlepšení při různém tvaru výplně [33]. K podobným výsledkům dospěl i Kumar který zkoumal PETG a PETG s uhlíkovým vláknem, žíhaný 5 °C nad teplotu  $T_g$ . Zlepšení mechanických vlastností v tomto případě bylo 20 % u vzorků se 100% výplní. Což lze vidět na obrázku 20 a 21 níže [34].



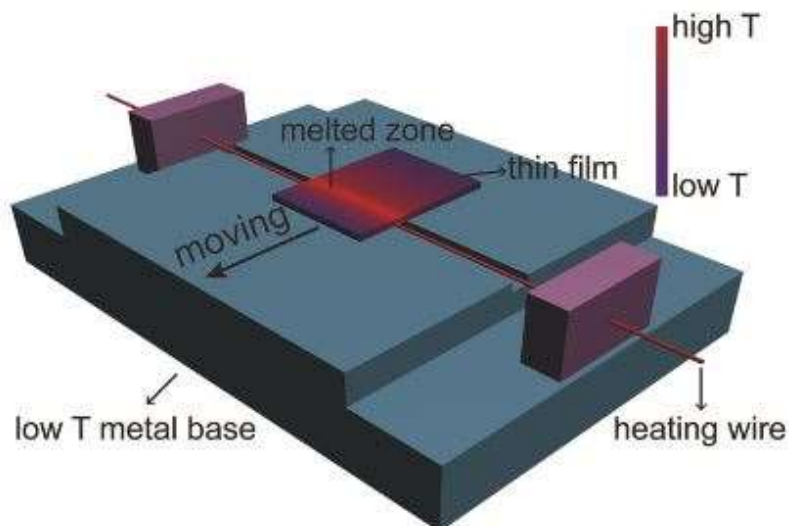
Obrázek 20 Mechanické vlastnosti vzorku z PETG s uhlíkovým vláknem se 100% vnitřní výplní bez žíhání a po žíhání [34]

## Způsoby ohřevu

Žíhání je prováděno např. v peci, pomocí rozpouštěcích par [36], lokálně při zónovém žíháním [38] nebo fototermálním žíháním. [39]

Velice jednoduchou metoda je žíhání v peci, kdy je teplo přenášeno z povrchu do středu dílu. Což je ale problém u většiny využívaných termoplastů, jelikož mají špatnou teplotní vodivost. Kvůli tomu je potřeba díly zahřívat do dlouhou dobu, což ale není žádoucí z ekonomického hlediska. Žíhání pomocí rozpouštěcích par je prováděno v atmosféře rozpouštěcích par. Rozpouštědlo je zahřáto na teplotu dostatečnou pro vypaření. U dílů po žíhání v horkých rozpouštěcích parách dochází k relaxaci polymerových řetězců, až je dosaženo rovnovážné struktury. Tato metoda je prováděna za nižších teplot než v peci, za pomoci rychle vypařujících se rozpouštědel. Toto zabraňuje nežádoucím degradačním jevům při ohřevu na vyšší teplotu.

Zónové žíhání bylo původně navrženo pro žíhání kovových materiálů, v současné době je tato metoda využita také pro polovodičové polymery. Narozdíl od žíhání v peci, kdy je díl zahříván po celém povrchu naráz, je zde díl zahříván pouze zónově a jednosměrně pomocí topného drátu. Tento způsob by se mohl dle Xue a spol. využít při kontinuální výrobě polovodičových polymerů [38]. Schéma této metody je znázorněno na obrázku č. 21 níže.



Obrázek 21 Zónové žíhání, high T-vysoká T, low T-nizká T, low T metal base-ocelová podložka nízká T, heating wire-topný drát, melted zone-roztavená část, thin film-tenký film [38]

Phototermální žíhání je prováděno integrováním phototermálních materiálů do polymeru a poté je povrch ozářen laserem. To vede k zahřátí phototermálních částic v materiálu. Toto například využil Viswanath a spol. ve své práci, kdy žíhal polyethylenový oxidický film obohacený částicemi zlata. Světelné záření bylo změněno v termální energii díky povrchovému plazmovému efektu [40].

### 3 Experimentální část

Experimentální část se bude zabývat přípravou testovacích těles technologií FDM a jejich žíháním. Na těchto tělesech budou provedeny mechanické zkoušky.

#### 3.1 Příprava vzorků

Pro porovnání vlastností 3D tištěných těles byl použit filament materiálu glykolem modifikovaný polyethyltereftalát (PETG) a filament PETG, kde jsou přidána uhlíková vlákna, kterých je 20 hm%. Konkrétně se jednalo o dvojice materiálů od společnosti Plasty Mladeč, PETG - Černá (Datasheet v Příloze 1, dále jen PETG) a PETG CFJet carbon – Černá (Datasheet v Příloze 2, dále je PETG-CF), oba filameny byly o průměru 1,75 mm. Testovací tělesa byla vytištěna na dvou FDM tiskárnách Original Prusa i3 MK3S [41] s tiskovou tryskou velikosti 0,4 mm.

##### Parametry tisku

V programu PrusaSlicer byli nastaveny tiskové parametry a následně vytvořeny G-code programy pro tiskárnu, které obsahují nastavení tisku, filamentu a dráhy tiskové hlavy.

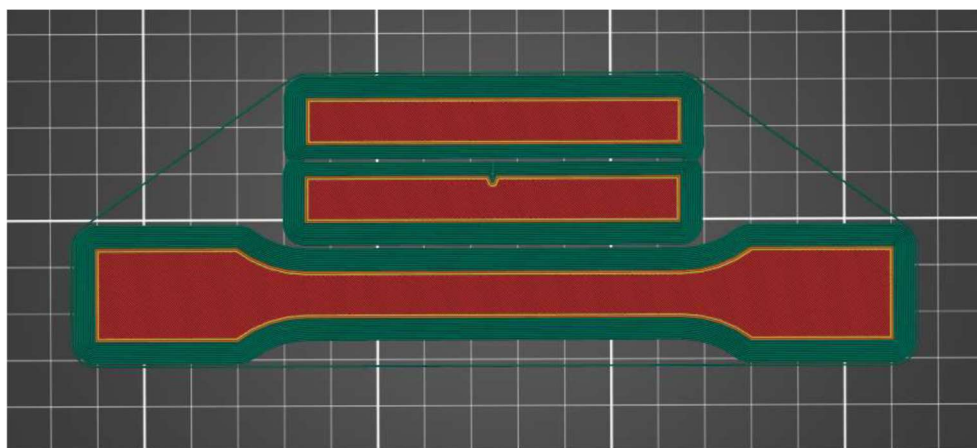
Jako první bylo potřeba stanovit teplotní parametry při tisku, aby vyhovovaly oběma materiálům, a tím mohly být výsledky následných zkoušek co nejvíce porovnatelné. Výrobce uvádí teplotu trysky při tisku mezi 220-250 °C a teplotu podložky 80-90 °C. Proto byly parametry prvních testovacích tisků nastaveny na teplotu trysky 240 °C a teplota podložky 80 °C. Při těchto parametrech docházelo k oddělení první vrstvy od tiskové podložky a taktéž ke špatnému spojení mezi jednotlivými tištěnými vrstvami.

Pro odstranění problému se spojením jednotlivých vrstev je potřeba, aby byl zajištěn plynulejší průchod materiálu tryskou a také jeho tekutost po průchodu tryskou. Toto bylo zajištěno zvýšením teploty trysky. Dále pro lepší přilnavost první vrstvy je potřeba zvýšit teplotu podložky při tisku první vrstvy. Při druhém testovacím tisku byly zvýšeny teploty trysky na 255 °C a podložky při tisku první vrstvy na 90 °C a tisku dalších vrstev na 80 °C. Při tomto nastavení již proběhl tisk v pořádku.

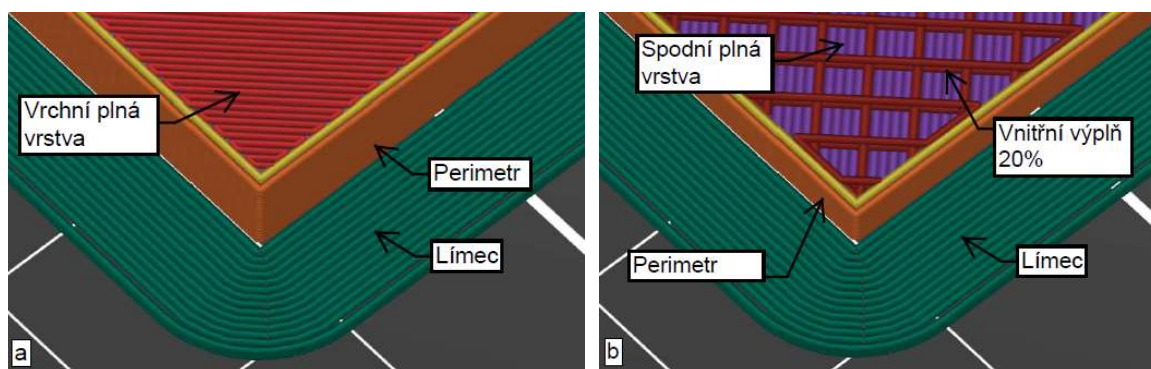
Další parametry tisku byly nastaveny s ohledem na defaultní nastavení tiskárny, aby bylo docíleno vlastností, které by odpovídaly běžnému používání takovýchto typů FDM tiskáren. Pro dosažení lepší přilnavosti s podložkou je použito takzvaného „límce“ o šířce 5 mm. Jedná se o vytištěnou pomocnou první vrstvu kolem výtisku, která zabraňuje kroucení výtisku při chladnutí a oddělení od podložky. Perimetr je množství souvislých obvodových drah

u výtisku a byl nastaven na hodnotu 2. Vnitřní výplň byla zvolena přímočará, jelikož je to jediná výplň, kterou je možné tisknout při nastavení 100 % výplně. Výška vrstvy byla nastavena na 0,2 mm což je (dle Průši) při průměru trysky 0,4 mm optimální velikost pro poměr rychlosti tisku, přesnosti výtisku a tištěných detailů. Počet vrchních a spodních plných vrstev, které byly tištěny v celistvé ploše, bylo 5. Pro zkoušky byly vytvořeny 3 sady zkušebních tělísek s různou vnitřní výplní, 20 %, 60 % a 100 %.

Tělíska pro zkoušku tahových vlastností, vrubové houževnatosti metodou Charpy a ohybových vlastností byly vytištěny s různým směrem pokládání jednotlivých vrstev, jedna sada byla vytvořena v úhlu 45° k delší straně vzorku a druhá sada s úhlem 90° k delší straně vzorku. Toto bylo provedeno pro potvrzení, zda následné zkoušky proběhnou tak, že je bude možno správně vyhodnotit. Zkoušky u obou sad proběhly v pořádku a byly vybrány vzorky pod úhlem 45°, které se více podobají skutečnému užití, jelikož takto zhotovené vzorky odolávají zatížení různými směry, viz obrázek č. 23 a 24.



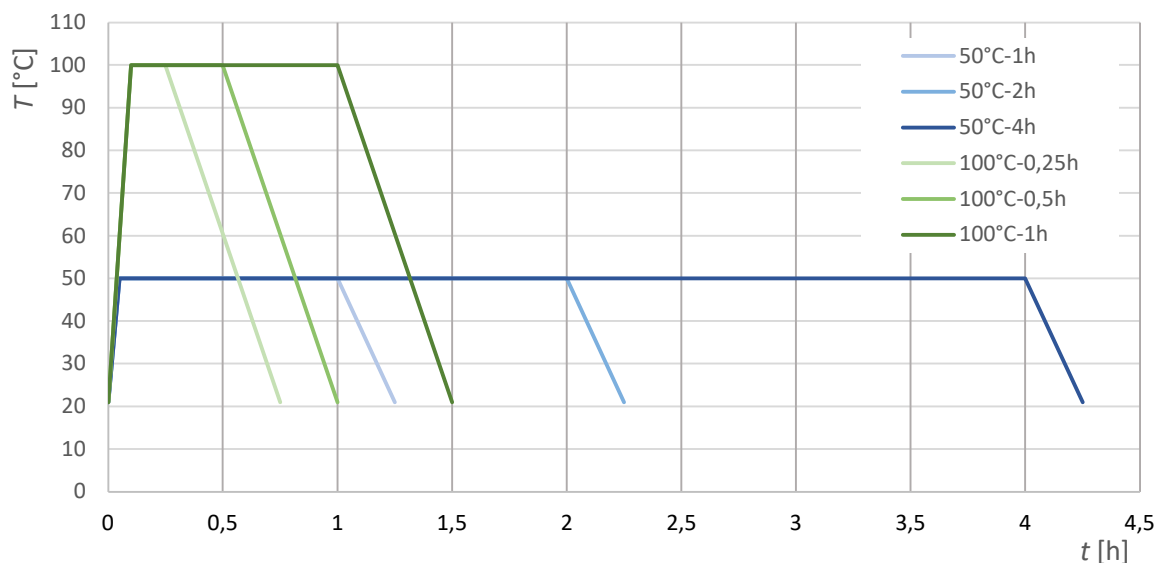
Obrázek 22 Slicované díly v programu PrusaSlicer



Obrázek 23 a) Detail slicovaného tělíska v celé tloušťce b) Detail slicovaného tělíska v půlce tloušťky s pohledem na 20% výplň

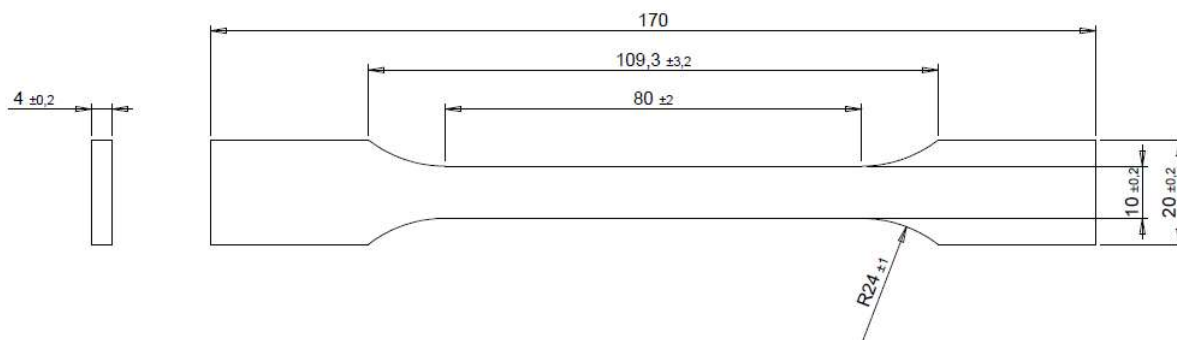
Parametry žihání byly vybrány na základě DSC zkoušky, o které bude pojednáno níže. Teplota skelného přechodu  $T_g$  u materiálů PETG byla naměřena 80 °C a u PETG-CF také 80 °C.

Teplota vysokoteplotního žíhání byla stanovena na  $100\pm 2$  °C, což je dostatečně vysoko na to, aby bylo bezpečně zajištěno překročení  $T_g$ . Nízkoteplotní žíhání bylo stanoveno na teplotu  $50\pm 2$  °C. Hlavním cílem nízkoteplotního žíhání bylo určení, zda i pod teplotou  $T_g$  dojde ke zlepšení mechanických vlastností, jak popisuje předešlá rešerše, nebo naopak ke zhoršení, což by naznačovalo, že u dílů z PETG nebo PETG-CF by nebyly zaručeny mechanické vlastnosti po vystavení vyšším teplotám, například na slunci. Žíhání probíhalo v elektrické pídce, poté byla tělíska vytažena a ponechána na vzduchu. Pro obě teploty byly stanoveny tři časy žíhání. Teplotní křivky jsou znázorněny na obrázku č. 24.

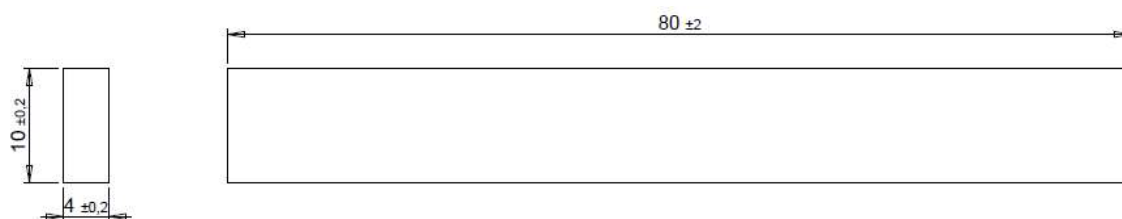


Obrázek 24 Teplotní křivky žíhání

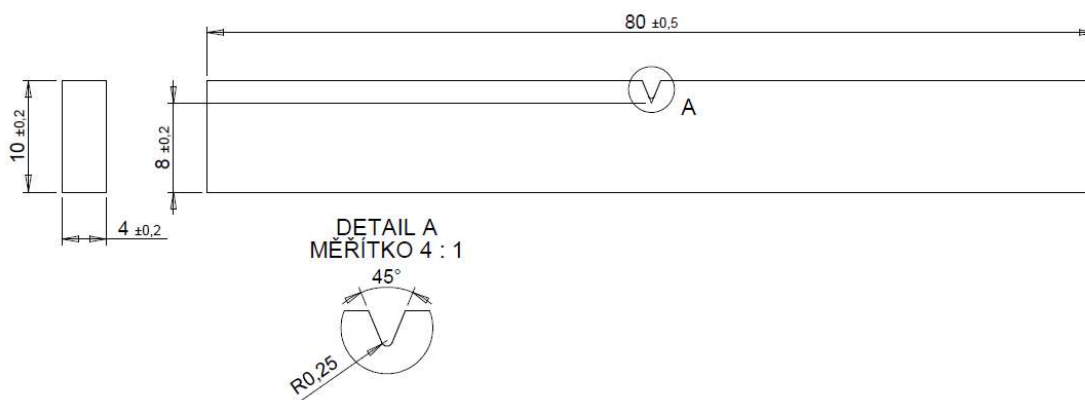
Zkušební tělíska byla vymodelována v programu CAD (SolidWorks). Tisk těles pro zkoušku tahových vlastností plastů proběhla dle ČSN EN ISO 527-2 [42] typ 1A. Tisknuty byly sady po třech kusech vedle sebe. Tělesa pro zkoušku ohybových vlastností plastů byla vytvořena dle ČSN EN ISO 178 [43]. Tělesa pro zkoušku vrubové houževnatosti metodou Charpy byly vytvořeny dle ČSN EN ISO 179-1 [44] a vrubem typu A. Vrub byl vytištěn, jelikož následné vytvoření vrubu není možné z důvodu nižší procentuální výplně u některých sad tělísek. Výkresy tělísek pro zkoušky jsou na obrázcích č. 25, 26 a 27.



Obrázek 25 Těleso typu 1A pro zkoušku tahových vlastností



Obrázek 26 Těleso pro zkoušku ohybových vlastností



Obrázek 27 Těleso pro zkoušku rázové houževnatosti s vrubem typu A

## 3.2 Rozměrové a objemové změny po žíhání

Během žíhání může docházet ke změnám rozměrů a vnitřní struktury vzorků. U žíhání nad teplotou  $T_g$  dochází k měknutí materiálu, a poté k většímu spojení jednotlivých vrstev, což vede k rozměrovým změnám.

### 3.2.1 Rozměrové změny při tisku a po žíhání

Výrobce tiskárny uvádí přesnost tisku 0,1 mm v ose Z a 0,3 mm v osách X a Y. Na vtištěných tělískách byly naměřeny nepřesnosti tisku v osách X a Y +0,1 mm a v ose Z



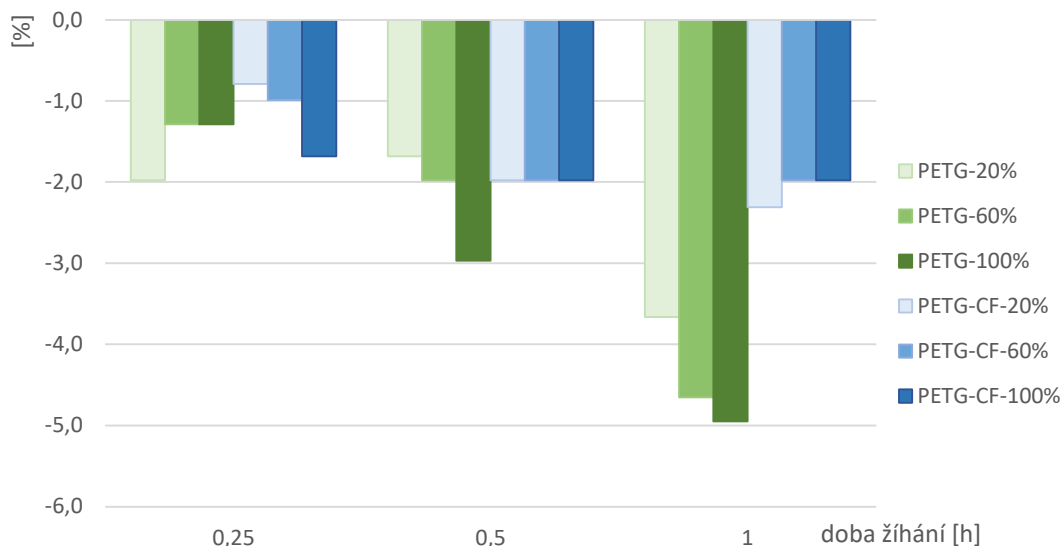
+0,2 mm. V osách X a Y toto odpovídá přesnosti udávané výrobce tiskárny, ale v ose Z je nepřesnost dvojnásobná. Rozměrové změny byly měřeny u všech těles pro zkoušky. Pro statistické vyhodnocení byly použity vzorky pro zkoušku vrubové houževnatosti. Vzorky byly proměřeny pomocí posuvného měřítka s přesností na 0,1mm, s přihlédnutím na přesnost tiskárny a zkušenosti s tiskem by přesnější měření nebylo více vypovídající, avšak výsledky v tabulce 7 a na grafu na obrázku č. 28 a 29 jsou zaokrouhlena na 2 desetinná místa, aby i takto malé změny mohli být vyhodnoceny. Fotografie vzorků po žíhání jsou uvedeny v příloze č. 5. Měřeno bylo 3-6 tělísek od každé sady. V tabulce níže jsou zaneseny hodnoty změn rozměrů pro šířku  $b$ , výšku  $h$  a délku  $L_0$ . Při nízkoteplotním žíhání nebyly naměřeny žádné rozměrové změny.

Při vysokoteplotním žíhání již došlo k rozměrovým změnám. Z tabulky č. 7 lze vyčíst, že při zvyšující se době žíhání dochází k větším změnám. Vliv na změny má také velikost vnitřní výplně. Obecně lze říci, že čím větší je procentuální výplň tím větší jsou rozměrové změny, i když jsou zde i výjimky. To znamená že na změny rozměrů má pravděpodobně větší vliv materiál, a ne dutiny v tělískách jak bylo zpočátku předpokládáno. PETG má většinou přibližně dvakrát větší směrodatnou odchylku měření než PETG-CF, což znamená, že změny rozměrů jsou u tohoto materiálu méně predikovatelné.

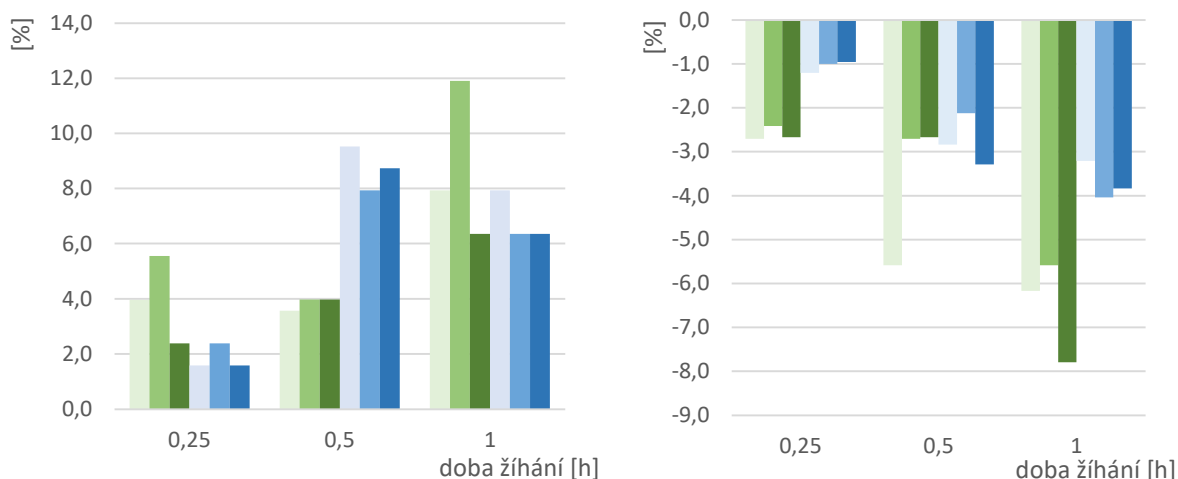
Tabulka 7 Změny rozměrů při vysokoteplotním žihání na 100 °C

Původní rozměry	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$L_o$ [mm]
	10,1	4,2	80,1
Doba žihání - 0,25h			
Materiál - vnitřní výplň	$\Delta b$ [mm]	$\Delta h$ [mm]	$\Delta L_o$ [mm]
PETG-20%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,17 ± 0,05	- 2,17 ± 0,33
PETG-60%	- 0,13 ± 0,05	+ 0,23 ± 0,05	- 1,93 ± 0,21
PETG-100%	- 0,13 ± 0,05	+ 0,10 ± 0,00	- 2,13 ± 0,05
PETG-CF-20%	- 0,08 ± 0,04	+ 0,05 ± 0,05	- 0,78 ± 0,19
PETG-CF-60%	- 0,10 ± 0,00	+ 0,10 ± 0,00	- 0,80 ± 0,22
PETG-CF-100%	- 0,17 ± 0,05	+ 0,10 ± 0,00	- 0,93 ± 0,09
Doba žihání - 0,5h			
	$\Delta b$ [mm]	$\Delta h$ [mm]	$\Delta L_o$ [mm]
PETG-20%	- 0,17 ± 0,05	+ 0,15 ± 0,05	- 4,47 ± 1,70
PETG-60%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,17 ± 0,07	- 2,17 ± 0,54
PETG-100%	- 0,30 ± 0,08	+ 0,17 ± 0,05	- 2,13 ± 0,21
PETG-CF-20%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,40 ± 0,00	- 2,27 ± 0,68
PETG-CF-60%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,33 ± 0,05	- 1,70 ± 0,54
PETG-CF-100%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,37 ± 0,05	- 2,63 ± 0,94
Doba žihání - 1h			
	$\Delta b$ [mm]	$\Delta h$ [mm]	$\Delta L_o$ [mm]
PETG-20%	- 0,37 ± 0,05	+ 0,33 ± 0,05	- 4,93 ± 1,67
PETG-60%	- 0,47 ± 0,05	+ 0,50 ± 0,08	- 4,47 ± 1,23
PETG-100%	- 0,50 ± 0,08	+ 0,27 ± 0,09	- 6,23 ± 2,22
PETG-CF-20%	- 0,23 ± 0,05	+ 0,33 ± 0,09	- 2,57 ± 0,34
PETG-CF-60%	- 0,20 ± 0,08	+ 0,27 ± 0,05	- 3,23 ± 0,73
PETG-CF-100%	- 0,20 ± 0,00	+ 0,27 ± 0,05	- 3,07 ± 1,04

V grafech na obrázcích č. 28 a 29 níže je znázorněna procentuální změna rozměrů vůči nežíhaným vzorkům. Tělíška po žihání zmenšila svoji šířku a délku. Naopak u výšky došlo ke zvětšení. Nedošlo tedy ke zmenšení celého vzorku ale pouze ke zmenšení dvou delších rozměrů. Zdali je toto jediný faktor nebo hraje roli umístění vzorku při tisku a žihání, takže ke zmenšení dochází pouze v ose X a Y a zvětšení v ose Z, by si žádalo další testování. Obecně lze z grafů vyčíst, že u PETG-CF dochází přibližně k polovičním rozměrovým změnám u šířky a délky oproti PETG při žihání po dobu jedné hodiny. Při kratším žihání je rozdíl mezi PETG a PETG-CF menší. U výšky došlo u PETG-CF při žihání po dobu 0,5h k dvojnásobné změně oproti PETG a následně ke srovnání u 1 hodiny. Toto chování nemá žádný zjevný důvod a odporuje zjištění u ostatních délkových rozměrů. U takto malých změn ale lze toto připsat chybám měření či nepřesnosti tisku.



Obrázek 28 Graf procentuální změny během žihání na 100 °C šířky b



Obrázek 29 Graf procentuální změny během žihání na 100 °C výšky h (vlevo), délky L (vpravo)

Díly s vysokým poměrem rozměrů jsou náchylné na kroucení během žihání. Toto je zapříčiněno vnitřním napětím, které je zaneseno do vzorku při tisku a relativně rychlým chladnutím, během žihání je toto napětí uvolněno a vzorek mění tvar.

### 3.2.2 Změna hustoty

Hustota vzorku byla měřena elektronickým hustoměrem Alfa Mirage SD-200L. Měření probíhá tak, že vzorek byl prvně zvážen na vzduchu a následně v destilované vodě známé teploty. Z těchto dvou hodnot je následně vypočítána hustota.

Hustota polotovaru uváděná výrobcem u PETG tak u PETG-CF je 1,27 g/cm<sup>3</sup>. Změřená hustota je u PETG 1,277 g/cm<sup>3</sup> a u PETG-CF 1,286 g/cm<sup>3</sup>, což přibližně odpovídá udávaným hodnotám. Hustota vzorků vzrůstá se zvětšující hodnotou vnitřní výplně. I když byla vnitřní

výplň 20%, 60% a 100%, celková hustota vzorků byla výrazně vyšší díky perimetru, spodní a horní plné vrstvě. Tělíška s 20% vntířní výplní vykazovala celkovou hustotu kolem 67 % hustoty polotovarů, s 60% výplní měla celkovou hustotu kolem 82 %. Tělíška se 100% výstuží přibližně 95 % hustoty polotovarů. Tento přibližně 5% rozdíl pravděpodobně zapříčiněn technologií tisku, kdy byly jednotlivé vrstvy pokládány na sebe a vznikaly mezi nimi mezery, více v kapitole 3.2.4 Pozorování průřezu vzorku pomocí fólie. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 8.

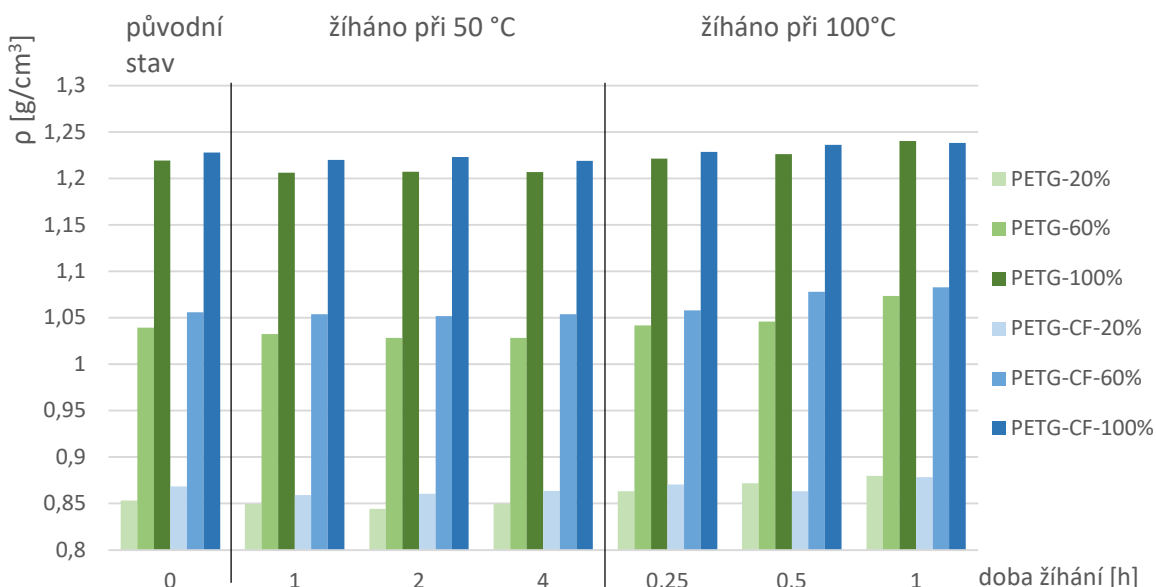
Tabulka 8 Hustota  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>] po žihání PETG/PETG-CF

Vnitřní výplň [%]	bez žihání	50°C-1h	50°C-2h	50°C-4h
20	0,853 / 0,868	0,849 / 0,859	0,844 / 0,861	0,850 / 0,863
60	1,039 / 1,056	1,032 / 1,054	1,028 / 1,052	1,028 / 1,054
100	1,219 / 1,228	1,206 / 1,220	1,207 / 1,223	1,207 / 1,219

Vnitřní výplň [%]	bez žihání	100°C-0,25h	100°C-0,5h	100°C-1h
20	0,853 / 0,868	0,863 / 0,870	0,872 / 0,863	0,880 / 0,878
60	1,039 / 1,056	1,042 / 1,058	1,046 / 1,078	1,073 / 1,083
100	1,219 / 1,228	1,221 / 1,229	1,226 / 1,236	1,240 / 1,238

Z grafu níže je patrné, že mírné změny byly způsobeny, jak u nízkoteplotního žihání, tak u žihání nad teplotou  $T_g$ . U nízkoteplotního žihání došlo u PETG i PETG-CF k mírnému snížení hustoty. U PETG-CF se 100% výplní průměrně o 0,5 % u 20% a 60% o 1 %. U PETG to bylo přibližně 1 % u všech typů výplní. Avšak takto malé změny mohou být zapříčiněny chybou měření, jelikož byl měřen pouze jeden vzorek. U žihání nad teplotou  $T_g$  došlo naopak ke zvýšení hustoty, s rostoucí dobou žihání vzrůstala i hustota vzorků. Při žihání po dobu 0,25 hodiny bylo u obou materiálů zvýšení přibližně o 0,2 procenta. Při delší době žihání byla změna u PETG větší než u PETG-CF. Při nejdelším žihání po dobu 1 hodiny se změna u PETG-CF pohybovala kolem 1,5 % u výplní 20% a 60% a u 100% výplně 1 %, kdežto PETG vykazuje změny u 20% a 60% výplně přibližně 3 % a u 100% výplně těsně nad 1,5 %.

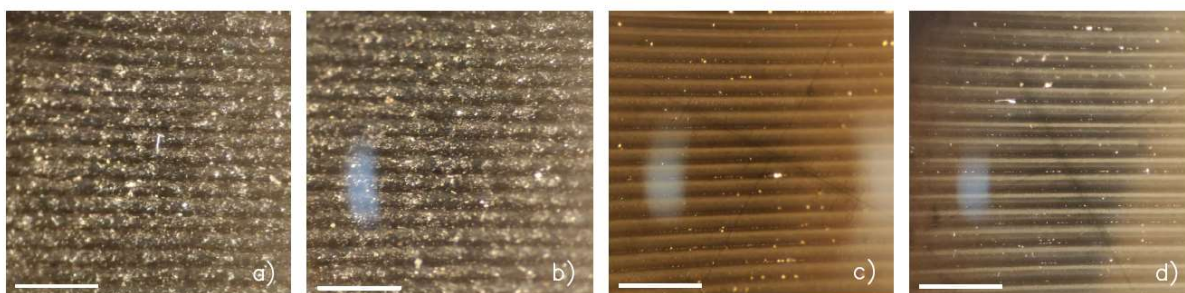


Obrázek 30 Graf změny hustoty při žihání

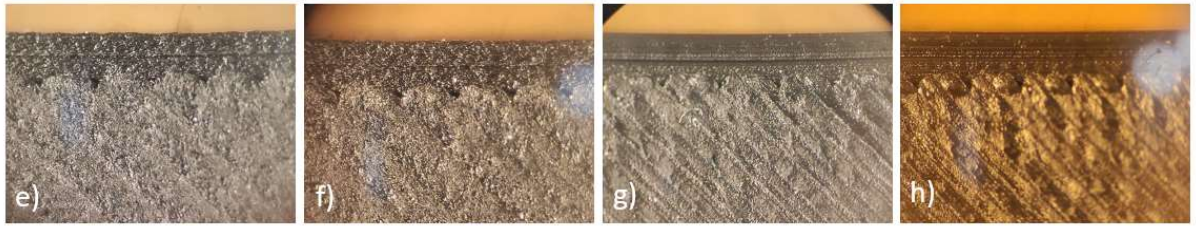
Z grafu na obrázku č. 30 a tabulky (8) výše je patrné, že stejně jako u rozměrových změn je PETG přibližně dvakrát náchylnější na změny hustoty než PETG-CF.

### 3.2.3 Pozorování povrchových změn

Pozorování povrchových změn probíhalo na stereomikroskopu SZP 11-T ZOOM. Na snímcích níže (obrázek č. 31 a 32) je porovnání ploch perimetru a vrchní plné vrstvy. Jsou zde vloženy pouze snímky tělísek pro srovnání, která nebyla žihána a která byla žihána na 100 °C po dobu 1 hodiny. Celá sada snímků je vložena v Příloze č. 3 a Příloze č. 4. Při žihání nedošlo k žádným viditelným změnám na ploše vrchní plné vrstvy. Toto naznačuje, že teplota žihání není tak vysoká, aby došlo k výrazné tekutosti vnějších ploch a povrchovým změnám. Na snímcích plochy perimetru jsou vidět rozměrové změny popsané v kapitole 3.2.1, kdy na snímcích žíhaných tělísek je přibližně o půl vrstvy méně.



Obrázek 31 Detail plochy perimetru a) PETG-CF-XX°C b) PETG-CF-100°C-1h c) PETG-XX-XX°C d) PETG-XX-100°C-1h, bílá úsečka je 1 mm

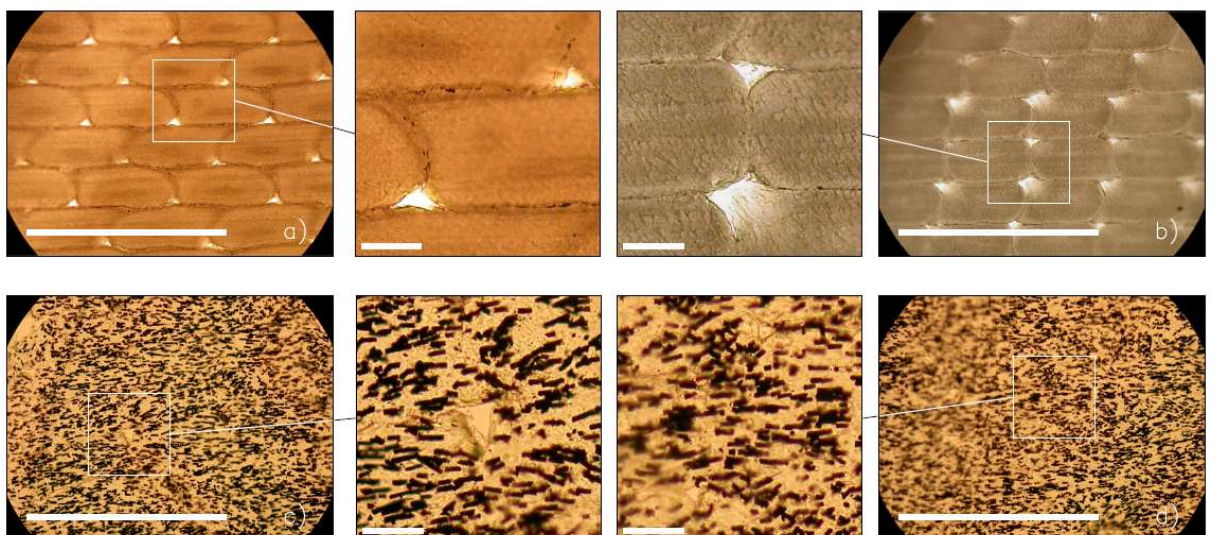


Obrázek 32 Detail vrchní plné vrstvy e) PETG-CF-XX°C f) PETG-CF-100°C-1h g) PETG-XX-XX°C h) PETG-XX-100°C-1h

### 3.2.4 Pozorování průřezu vzorku vytvořením fólie

Pro pozorování průřezu byly ze vzorků pro zkoušku ohybových vlastností vytvořeny fólie a osazeny do mikroskopických sklíčků, ty byly pozorovány pomocí polarizačního světelného mikroskopu Nikon Eclipse ME600 vybaveným CCD kamerou. Folie byly vytvořeny z tělísek se 100% vnitřní výplní, která nebyla žíhána, a která byla žíhána na 100 °C po dobu 1 hodiny. Na snímcích níže (obrázek č. 33) je patrné že i 100% výplň neznamená, že tělísko bude v celém průřezu homogenní. Vliv velikosti dutin se též projevil při měření hustoty, blíže je popsáno v kapitole 3.2.2 Změna hustoty.

Při porovnání jednotlivých snímků je na první pohled patrné, že u PETG-CF jsou mezery mezi vrstvami oproti PETG obtížněji rozeznatelné, viz detailní snímky. Mírné zmenšení mezivrstevních dutin lze vidět, jak žíhaného vzorku PETG tak PETG-CF. Což je příčinou zvýšení hustoty při žíhání. Obrazová analýza není v tomto případě pro přesné změření dutin u vzorků vypovídající, jelikož není možné získat zcela přesné dvojice pro porovnání a mezery nejsou přesně ohraničené na snímcích.



Obrázek 33 Průřez vzorku a) PETG-XX-XX°C b) PETG-XX-100°C-1h c) PETG-CF-XX°C d) PETG-CF-100°C-1h, bílá úsečka na celkových fotkách je 1 mm, na detailech 0,1 mm

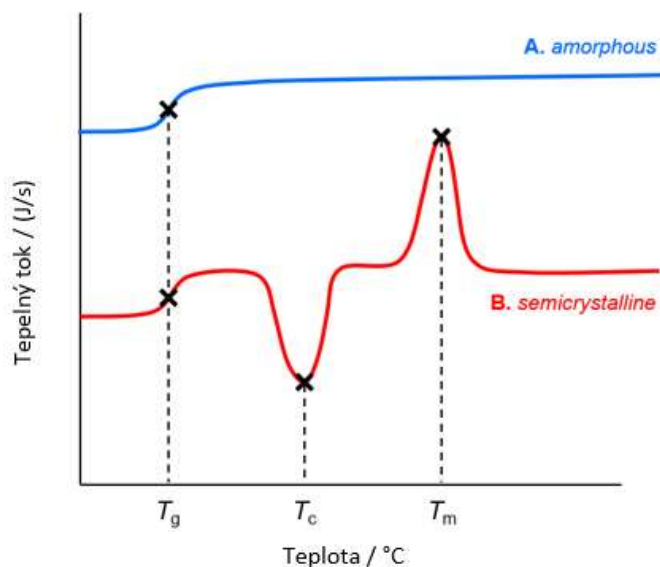
U PETG-CF jsou zcela jasně viditelná na snímcích uhlíková vlákna. Obrazovou analýzou pomocí programu ImageJ bylo změřeno plošné procentuální zastoupení uhlíkových vláken v materiálu. Plošné procentuální zastoupení uhlíkového vlákna z obrazové analýzy vychází  $25 \pm 2$  %, pro změřené objemového podílu by bylo zapotřebí udělat obrazovou analýzu ve dvou na sebe kolmých rovinách a poté by bylo možné dopočítat a porovnat podíl vláken vůči podílu udávaným výrobcem. Ten uvádí, že materiál PETG-CF má 20% hmotnostní podíl uhlíkových vláken. Na obrázku č. 34 je ukázkový snímek z prováděné obrazové analýzy.



Obrázek 34 Ukázka obrazové analýzy vzorku PETG-CF

### 3.3 Zkouška DSC – Diferenciální skenovací kalorimetrie

Diferenciální skenovací kalorimetrie je metodou pro zjištění tepelných vlastností materiálů. Metoda spočívá v konstantní rychlosti ohřívání a chlazení dvou misek. Jedna obsahuje vzorek a druhá je prázdná (referenční). Během zkoušky je zaznamenáván tepelný tok do nádob a poté zaznamenán rozdíl tepelného toku mezi jednotlivými nádobami. Výsledkem je závislost tepelného toku na teplotě. Způsob odečítání charakteristických teplot je byl znázorněn na obrázku č. 35.



Obrázek 35 Schéma DSC grafu, Amorphous – amorfní, semicrystalline – semikrystalický,  $T_g$  - teplota skelného přechodu,  $T_c$  - teplota dokrystalizace,  $T_m$  - teplota tání

Filamenty byly žíhány stejně jako zkušební tělíska. Zkouška DSC byla prováděna na stroji Netzsch-Gerätebau GmbH - STA 409 PC Luxx Simultaneous thermal analyzer. Jeden odebraný vzorek byl zahříván do teploty 280 °C pro zjištění teploty skelného přechodu a pro zjištění, zda nedochází ke změnám tepelného toku při takto vysokých teplotách. Následně byly vzorky zahřívány už jen do teploty 230 °C dle doporučení. Teploty  $T_g$ , které byly odečteny z grafů, jsou uvedeny v tabulce č. 9. PETG i PETG-CF se po žíhání zvýšila teplota skelného přechodu o přibližně 2 °C. Toto je pravděpodobně způsobeno přeuspořádáním molekul polymeru při zahřívání neboli strukturální relaxací, a tím snížením vnitřního pnutí, které je dílu vneseno předchozím tiskem [45].

Tabulka 9 Teploty  $T_g$  [°C] získané zkouškou DSC žíhaného a nežíhaného materiálu

materiál	nežíháno	50°C-1h	50°C-2h	50°C-4h	100°C-0,25h	100°C-0,5h	100°C-1h
PETG	79,8	82,9	82,3	81,9	81,7	82,1	81,3
PETG-CF	80,0	81,0	81,5	81,6	81,1	81,8	81,5

### 3.4 Stanovení tahových vlastností

Zkouška tahových vlastností probíhala dle ČSN EN ISO 527 [46]. Zkouška byla prováděna na trhacím stroji ZD 10 od firmy Walter+bai ag na obrázku č. 36. Výsledkem měření je pracovní graf závislosti síly na prodloužení.





Obrázek 36 Trhací stroj ZD 10

Z pracovního grafu byly odečteny hodnoty maximální síly  $F_m$  [kN] a prodloužení  $\Delta L_b$  [mm] při přetržení. Z těchto hodnot byly následně vypočítány hodnoty meze pevnosti  $\sigma_m$  [MPa] dle vzorce (1) a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení  $\varepsilon_{tb}$  dle vzorce (2).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A} \quad (1)$$

Kde

$\sigma_m$  je mez pevnosti, vyjádřená v megapascálech (MPa)

$F_m$  první maximum na křivce, vyjádřeno v newtonech (N)

$A$  počáteční průřez zkušebního tělesa, vyjádřený v milimetrech čtverečních (mm<sup>2</sup>)

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} \quad (2)$$

Kde

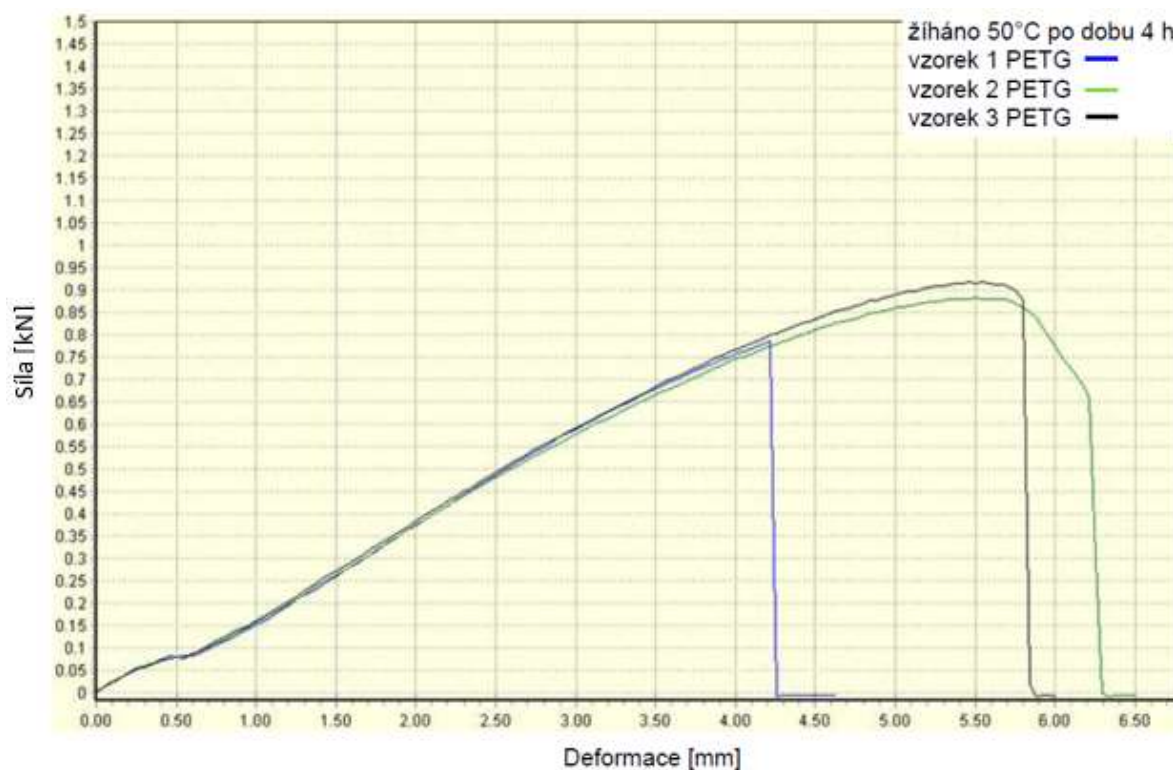
$\varepsilon_{tb}$  je jmenovité poměrné prodloužení při přetržení, vyjádřeno v procentech (%)

$\Delta L_b$  přírůstek vzdálenosti mezi čelistmi při přetržení, vyjádřen v milimetrech (mm)

$L$  počáteční vzdálenost mezi čelistmi, vyjádřená v milimetrech (mm)

Zkouška byla provedena na strunách a tištěných tělískách. Pro zkoušku tištěných zkušebních tělísek byly použity vzorky typu 1A, výkres a více informací ohledně zhotovení vzorku je v kapitole 3.1 Příprava vzorků. Vzorky byly zkoušeny v sadách po 3-6 kusech, jelikož

u některých vzorků došlo k porušení pravděpodobně z důvodu vnitřních vad. Ty jsou způsobeny technologií 3D tisku, kdy je běžně díl vyráběn postupně a tím vznikají nerovnoměrnosti uvnitř dílu. Na grafu tahové zkoušky (obrázek č. 37) níže je vidět, že jeden vzorek (modrá) byl porušen předčasně, a proto jsou tyto vzorky vědomě vyřazeny z výsledků. Ve zkoumaném případě šlo o získání hodnot po tepelném zpracování a je zřejmé, že při zahrnutí všech těchto výsledků by byl rozptyl velký a ovlivnila by se tím průměrná hodnota.



Obrázek 37 Ukázka tahové zkoušky s porušením kvůli vnitřním vadám

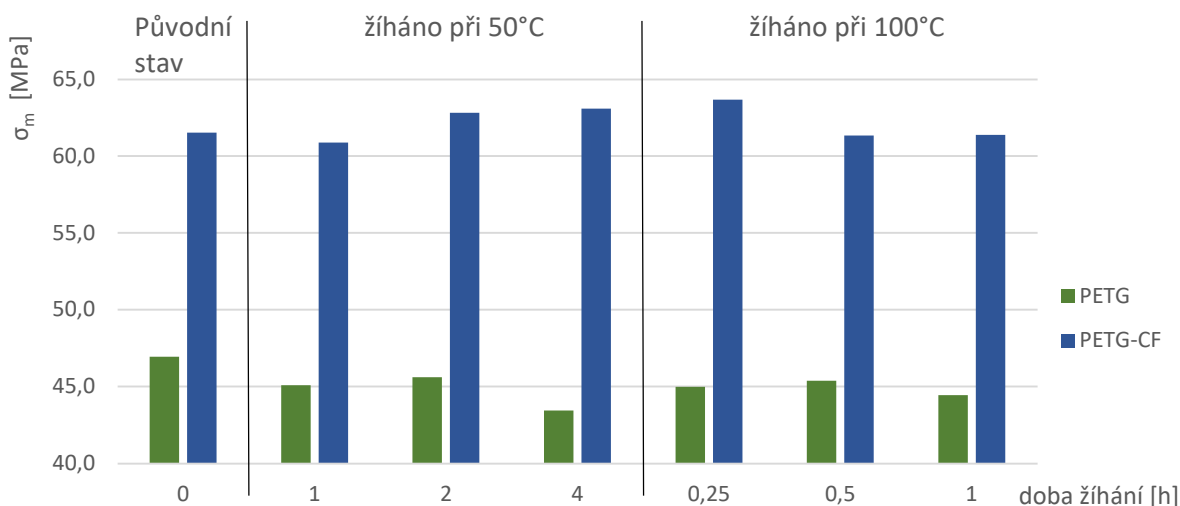
### 3.4.1 Zkouška tahem – filament

První sada zkoušek byla prováděna na filamentu. Průměr filamentu byl před zkouškou proměřen na setiny milimetru pro dosažení přesnějších výsledků. Změřené průměry odpovídají výrobcem udávaným rozměrem  $1,75 \pm 0,05$  mm. PETG vykazuje mez pevnosti asi o 25 % nižší než PETG-CF. Směrodatná odchylka u PETG je v průměru 1,1 MPa a u PETG-CF 1,5 Mpa, z čehož vyplývá že PETG má v tomto případě stabilnější výsledky.

Tabulka 10 Mez pevnosti  $\sigma_m$  [MPa] filamentu po žihání

	PETG	PETG-CF
nežiháno	46,9 ± 0,9	61,5 ± 0,7
50°C-1h	45,1 ± 0,5	60,9 ± 4,2
50°C-2h	45,6 ± 1,7	62,8 ± 1,8
50°C-4h	43,4 ± 2,8	63,1 ± 1,2
100°C-0,25h	45,0 ± 0,5	63,7 ± 0,1
100°C-0,5h	45,4 ± 0,7	61,3 ± 1,6
100°C-1h	44,4 ± 0,4	61,4 ± 0,5

Žihání na 50 °C nemělo výrazný vliv u PETG-CF. U PETG naopak došlo ke snížení meze pevnosti o přibližně 3 MPa, což je snížení pevnosti o přibližně 7 procent. Stejné výsledky byly pozorovány i při žihání na 100 °C, kdy u PETG-CF nedošlo k žádné změně a u PETG k ponížení o 2 MPa, což je přibližně 5 procent.



Obrázek 38 Graf hodnot meze pevnosti filamentu po žihání

Při zkoušce tahových vlastností u PETG došlo k vytvoření krčku, který se rozšiřoval přes celou délku zkušební vzorku. Zkouška byla ukončena při dosažení poměrného prodloužení 50%. Jmenovité poměrné prodloužení u PETG je tedy  $\epsilon_{tb} > 50\%$ . Pozširující se krček je k vidění na obrázku č. 39. U PETG došlo k přetržení vzorku a  $\epsilon_{tb}$  bylo přibližně 3 %.



Obrázek 39 Vzorek PETG s vytvořeným krčkem během tahové zkoušky

### 3.4.2 Zkouška tahem – tištěné vzorky

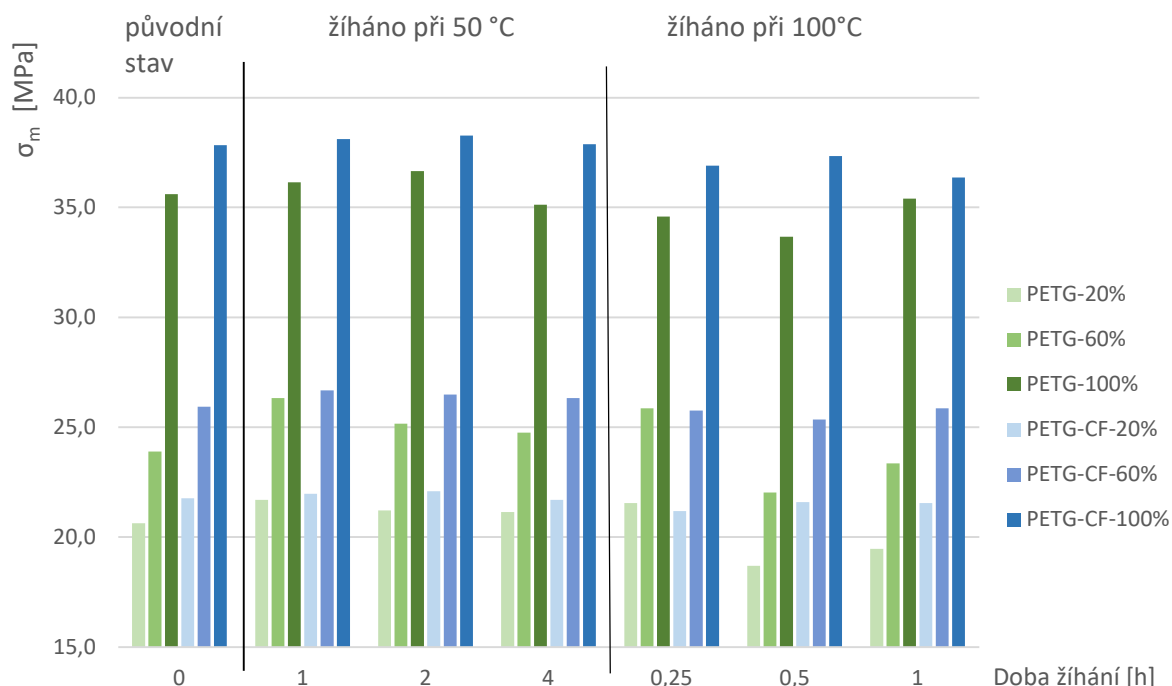
Zkušební tělesa z PETG-CF vykazují vyšší mez pevnosti než z PETG a to přibližně o 1-2 MPa, což je asi o 7 procent více. Dle očekávání se mez pevnosti snižuje se zmenšením vnitřní výplně. Toto snížení není zcela lineárně, to znamená, že již malé snížení procentuální vnitřní výplně zásadně sníží pevnost, a při dalším snižování výplně se pevnost snižuje čím dál pomaleji. U obou materiálů je snížení pevnosti při 60% výplni přibližně 33 % a u 20% výplně přibližně 43 %. Z tabulky 11 je patrné že u PETG vycházejí o něco vyšší směrodatné odchylky, což značí vyšší variabilitu výsledků

Tabulka 11 Mez pevnosti  $\sigma_m$  [MPa] tištěných tělísek po žihání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň)

	PETG-20%	PETG-60%	PETG-100%	PETG-CF-20%	PETG-CF-60%	PETG-CF-100%
nežiháno	20,6 ± 0,3	23,9 ± 2,1	35,6 ± 0,3	21,8 ± 0,2	25,9 ± 0,4	37,8 ± 0,6
50°C-1h	21,7 ± 0,4	26,3 ± 0,3	36,1 ± 0,6	22,0 ± 0,5	26,7 ± 0,8	38,1 ± 1,9
50°C-2h	21,2 ± 0,5	25,2 ± 0,8	36,7 ± 0,1	22,1 ± 0,2	26,5 ± 0,4	38,3 ± 0,7
50°C-4h	21,1 ± 0,1	24,8 ± 0,0	35,1 ± 0,9	21,7 ± 0,4	26,3 ± 0,3	37,9 ± 0,9
100°C-0,25h	21,6 ± 0,1	25,9 ± 0,4	34,6 ± 0,8	21,2 ± 0,7	25,7 ± 0,2	36,9 ± 0,2
100°C-0,5h	18,7 ± 0,3	22,0 ± 2,6	33,7 ± 0,9	21,6 ± 0,4	25,3 ± 0,2	37,3 ± 0,9
100°C-1h	19,5 ± 0,6	23,3 ± 0,8	35,4 ± 0,4	21,6 ± 0,1	25,9 ± 0,4	36,4 ± 0,2

Z grafu na obrázku č. 40 je zjevné, že tahové vlastnosti při žihání na 50 °C se u obou materiálů zvyšovaly přibližně do 2 hodin, u PETG až o 5 % a u PETG-CF o 2 %, při delším žihání již dochází ke snížení pevnosti. Pro zjištění, zda při delším žihání, než je 4 hodiny, dojde ke snížení až pod hodnoty nežíhaných tělísek je potřeba dalšího testování. Zvýšení meze pevnosti při nízkoteplotním žiháním je zapříčiněno pravděpodobně strukturní relaxací [45]. Nejpravděpodobnějším mechanismem tohoto děje je teorie Tooleho fiktivní teploty. Jedná se o teplotu, kdy je polymer ve stavu termodynamické rovnováhy. Při příliš rychlém ochlazení z teploty nad  $T_g$  je dosaženo strukturně nerovnovážného stavu [47].

Při žihání PETG-CF na 100 °C při všech žihacích časech došlo ke snížení nebo zachování hodnot meze pevnosti. Snížení bylo maximálně do 3 procent. U PETG došlo k většímu snížení pevnosti přibližně v rozmezí 5 - 8 %. Vysokoteplotní žihání má u amorfních materiálů vliv na mezivrstevní vazby. Při zkoušce tahových vlastností v tomto případě působí síly rovnoběžně s vrstvami, proto pravděpodobně dochází k mírnému poklesu meze pevnosti.

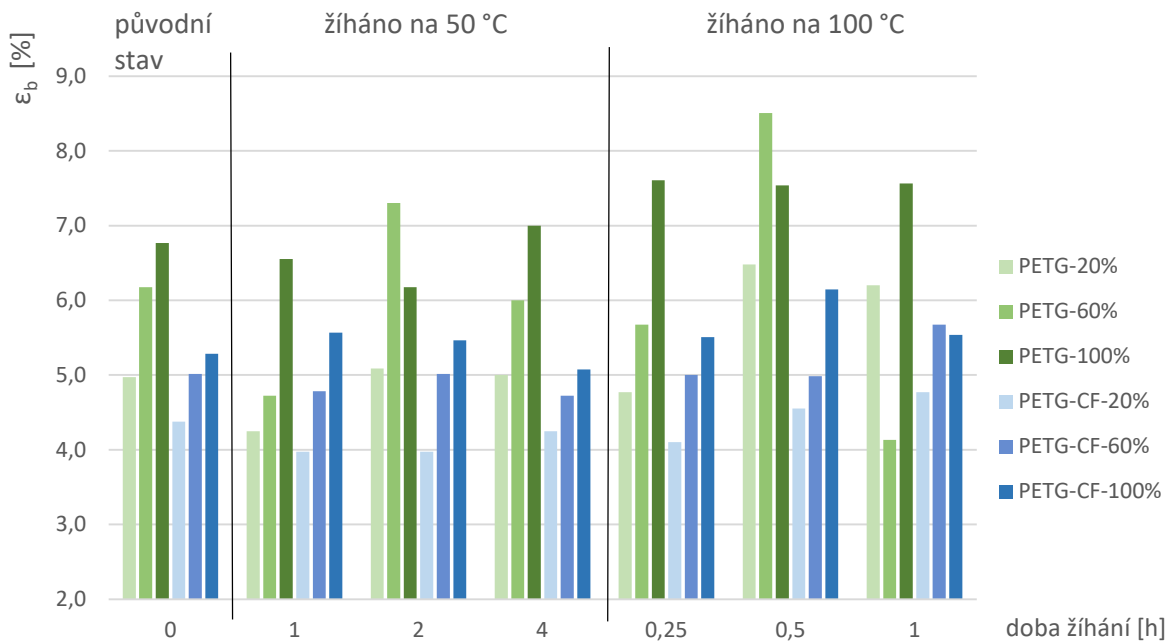


Obrázek 40 Graf hodnot meze pevnosti tištěných vzorků po žihání

Poměrné prodloužení roste se zvyšujícím se procentem vnitřní výplně. PETG vykazuje větší prodloužení při přetržení než PETG-CF přibližně o 20 %. Z tabulky č. 12 a grafu na obrázku č. 41 níže vyplývá, že při žihání na 50 °C nedochází k žádným významným změnám, maximálně 0,2-0,4 %. U žihání při 100 °C se u PETG zvýší prodloužení o 0,8-1 % a u PETG-CF o 0,5 % maximálně.

Tabulka 12 Poměrné prodloužení při přetržení  $\epsilon_{tb}$  [%] tištěných tělísek po žihání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň)

	PETG-20%	PETG-60%	PETG-100%	PETG-CF-20%	PETG-CF-60%	PETG-CF-100%
<b>nežiháno</b>	5,0 ± 0,3	6,2 ± 1,1	6,8 ± 1,3	4,4 ± 0,2	5,0 ± 0,2	5,3 ± 0,0
<b>50°C-1h</b>	4,2 ± 0,6	4,7 ± 0,4	6,6 ± 0,1	4,0 ± 0,1	4,8 ± 0,2	5,6 ± 0,3
<b>50°C-2h</b>	5,1 ± 0,0	7,3 ± 1,0	6,2 ± 0,1	4,0 ± 0,3	5,0 ± 0,4	5,5 ± 0,3
<b>50°C-4h</b>	5,0 ± 0,1	6,0 ± 0,0	7,0 ± 0,7	4,2 ± 0,6	4,7 ± 0,4	5,1 ± 0,0
<b>100°C-0,25h</b>	4,8 ± 0,1	5,7 ± 0,2	7,6 ± 0,7	4,1 ± 0,1	5,0 ± 0,3	5,5 ± 0,1
<b>100°C-0,5h</b>	6,5 ± 0,5	8,5 ± 1,8	7,5 ± 0,1	4,6 ± 0,2	5,0 ± 0,4	6,1 ± 0,2
<b>100°C-1h</b>	6,2 ± 0,4	4,1 ± 0,8	7,6 ± 0,5	4,8 ± 0,1	5,7 ± 0,2	5,5 ± 0,5

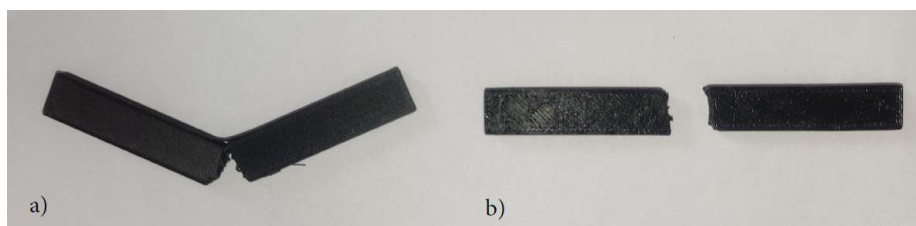


Obrázek 41 Graf poměrného prodloužení při přetržení

### 3.5 Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy

Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy bylo prováděno dle ČSN EN ISO 179-1 [44] přesné označení metody je ISO 179-1/1eA, čísla a písmena za lomítkem značí, typ zkušebního tělesa „1“ (výkres zkušebního tělesa je na obrázku 27), „e“ je směr rázu (kolmo na rozměr h), „A“ je typ vrubu. Zkouška probíhala za stálé teploty  $23 \pm 1$  °C. Testováno bylo 3-6 zkušebních těles dle velikosti směrodatné odchytky pro dosažení přesnějších výsledků. Přeražení probíhalo na stroji od firmy VEB werkstoffprüfmaschinen Leipzig. Použito bylo kladivo s energií 0,1 kpm.

Při přeražení byla odečtena ze stupnice spotřebovaná energie v kilopoundmetrech [kpm], ta byla následně převedena na energii  $E_c$  v joulech, z které byla pomocí vzorce (3) následně vypočítaná vrubová houževnatost  $a_{cN}$ . Všechna přeražení byla typu C (úplná přeražení, včetně kloubového přeražení H). Typy přeražení jsou na obrázku č. 42. U PETG došlo k přeražení typu H v 1 případech ze 77 zkoušek a u PETG-CF v 52 případech ze 78 zkoušek. Což je u PETG přibližně 1 % a u PETG-CF 67 %.



Obrázek 42 a) přeražení typu H b) přeražení typu C (úplné přeražení)

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h * b_N} * 10^3$$

(3)

Kde

$a_{cN}$  je vrubová houževnatost Charpy v kilojoulech na metr čtvereční (kJ/m<sup>2</sup>)

$E_c$  energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa (J)

$h$  tloušťka zkušební tělesa v milimetrech (mm)

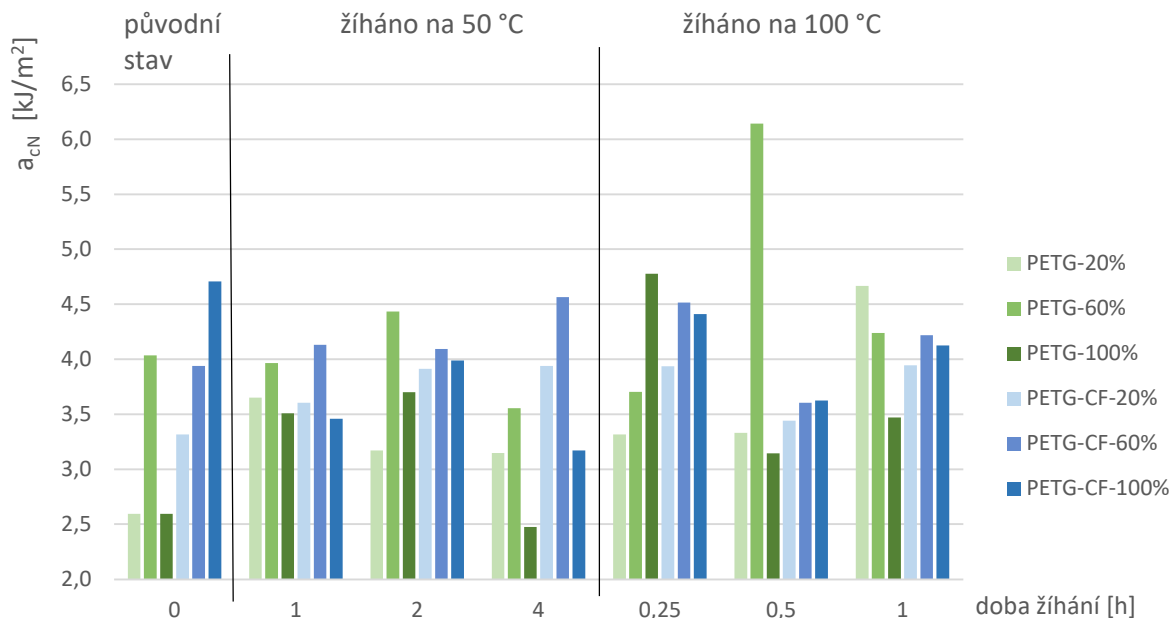
$b_N$  šířka zkušební tělesa pod vrubem v milimetrech (mm)

Z tabulky č. 13 níže je patrné, že PETG-CF má u většiny vzorků vyšší vrubovou houževnatost než PETG. Domnívám se, že při vrubové houževnatosti jsou výsledky hodně náchylné na různé vnitřní vady či změny, které nejsou odhalitelné před zkouškou a tím výsledky hodně nepřesné a nevyovídající. Toto je vidět jak na celkových výsledcích, tak na směrodatné odchylce v tabulce č. 13. U PETG-CF je směrodatná odchylka i tak přibližně poloviční oproti PETG.

Tabulka 13 Vrbová houževnatost Charpy  $a_{cN}$  [kJ/m<sup>2</sup>] po žihání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň)

	PETG-20%	PETG-60%	PETG-100%	PETG-CF-20%	PETG-CF-60%	PETG-CF-100%
<b>nežiháno</b>	2,6 ± 0,3	4,0 ± 0,3	2,6 ± 0,1	3,3 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,7 ± 0,2
<b>50°C-1h</b>	3,7 ± 1,0	4,0 ± 1,2	3,5 ± 0,5	3,6 ± 0,1	4,1 ± 0,1	3,5 ± 0,6
<b>50°C-2h</b>	3,2 ± 0,9	4,4 ± 1,1	3,7 ± 0,7	3,9 ± 0,2	4,1 ± 0,2	4,0 ± 1,0
<b>50°C-4h</b>	3,1 ± 1,2	3,6 ± 1,0	2,5 ± 0,3	3,9 ± 0,4	4,6 ± 0,2	3,2 ± 0,3
<b>100°C-0,25h</b>	3,3 ± 0,8	3,7 ± 1,0	4,8 ± 1,1	3,9 ± 0,4	4,5 ± 0,1	4,4 ± 0,5
<b>100°C-0,5h</b>	3,3 ± 1,8	6,1 ± 1,5	3,1 ± 1,4	3,4 ± 0,2	3,6 ± 0,5	3,6 ± 0,1
<b>100°C-1h</b>	4,7 ± 0,3	4,2 ± 1,0	3,5 ± 0,4	3,9 ± 0,2	4,2 ± 0,3	4,1 ± 0,9

Všechny výsledky u vysokoteplotního i nízkoteplotního žihání PETG-CF a PETG jsou neprůkazné a vykazují vysokou nestabilitu výsledků, jak je vidět z grafu na obrázku č. 43. Toto je pravděpodobně způsobeno nehomogenitou a vnitřními vadami zapříčiněnými technologií 3D tisku.



Obrázek 43 Graf vrubové houževnatosti po žíhání

### 3.6 Stanovení ohybových vlastností

Zkouška ohybových vlastností byla provedena dle ČSN EN ISO 178 [43]. Pro zkoušku bylo použito přednostní zkušební těleso, rozměrů  $L=80\pm 2$  mm,  $b=10\pm 0,2$  mm a  $h=4\pm 0,2$  mm, výkres zkušebního tělesa je vložen v kapitole 3.1 příprava vzorků. Zkouška byla provedena pouze na 1 vzorku z každé připravené série. Zkouška probíhala za teploty  $23\pm 1$  °C. Zkušební stroj byl použit univerzální víceúčelový stroj MTS Exceed® Model E42 (více informací v příloze č. 6), zobrazený na obrázku č. 44. Vzdálenost podpěr je  $L=64\pm 1$  mm dle rovnice (4) a poloměr trnu  $R_1=5\pm 0,2$  mm a poloměr podpěr  $R_2=5\pm 0,2$  mm. Zkušební rychlost  $v=5$  mm/min.

$$L = (16 * h) \pm 1 \quad (4)$$

Kde

$h$  je výška zkušebního tělesa





Obrázek 44 Univerzální víceúčelový stroj MTS Exceed® Model E42

Výstupem stroje je tabulkový záznam závislosti průhybu  $s$  [mm] a zatěžovací síly  $F$  [N]. Z těchto hodnot byly následně odečteny hodnoty maximální zatěžovací síly  $F_M$  a z ní vypočítána pevnost v ohybu  $\sigma_{fM}$  dle rovnice (5) níže.

$$\sigma_{fM} = \frac{3F_M L}{2bh^2}$$

(5)

Kde

$\sigma_{fM}$  je pevnost v ohybu v megapascalch (MPa)

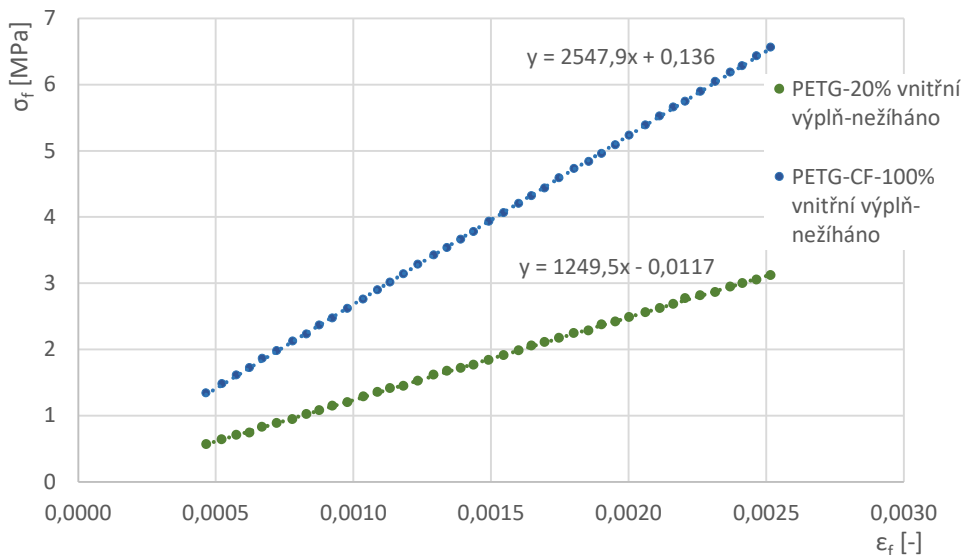
$F_M$  maximální použitá síla v newtonech (N)

$L$  vzdálenost podpěr, v milimetrech (mm)

$b$  šířka zkušebního tělesa v milimetrech (mm)

$h$  tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech (mm)

Z hodnot získaných při zkoušce byly dopočteny pevnosti v ohybu  $\sigma_f$  dle rovnice (5) a deformace ohybem  $\varepsilon_f$  dle rovnice (6). Tyto hodnoty byly vyneseny do grafu v rozsahu od  $\varepsilon_{f1} = 0,0005$  do  $\varepsilon_{f1} = 0,0025$ . Těmito body byla proložena lineární spojnice trendu (níže je uveden příklad grafu na obrázku č. 46 a následně bylo z rovnice spojnice trendu vypočítáno  $\sigma_{f1}$  a  $\sigma_{f2}$ . Tyto hodnoty byly dosazeny do vzorce (7) pro výpočet modulu pružnosti v ohybu.



Obrázek 45 Ukázka grafu pro výpočet modulu pružnosti v ohybu

$$\varepsilon_f = \frac{6 * s * h}{L^2}$$

(6)

Kde

$\varepsilon_f$  je deformace ohybem (-)

$s$  průhyb, v milimetrech (mm)

$h$  tloušťka zkušebního tělesa, v milimetrech (mm)

$L$  vzdálenost podpěr, v milimetrech (mm)

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}$$

(7)

Kde

$E_f$  je modul pružnosti v ohybu, v megapascalch (MPa)

$\sigma_{f1}$  napětí v ohybu, v megapascalch při deformaci  $\varepsilon_{f1}$  (MPa)

$\sigma_{f2}$  napětí v ohybu, v megapascalch při deformaci  $\varepsilon_{f2}$  (MPa)

$\varepsilon_{f1}$  deformace ohybem 0,0005 (-)

$\varepsilon_{f2}$  deformace ohybem 0,0025 (-)

Výsledky zkoušky ohybových vlastností v tabulce č. 14 ukazují, že tělíska z PETG-CF mají při vnitřní výztuži 20 % o přibližně 2 MPa vyšší pevnost v ohybu, než tělíska z PETG což je

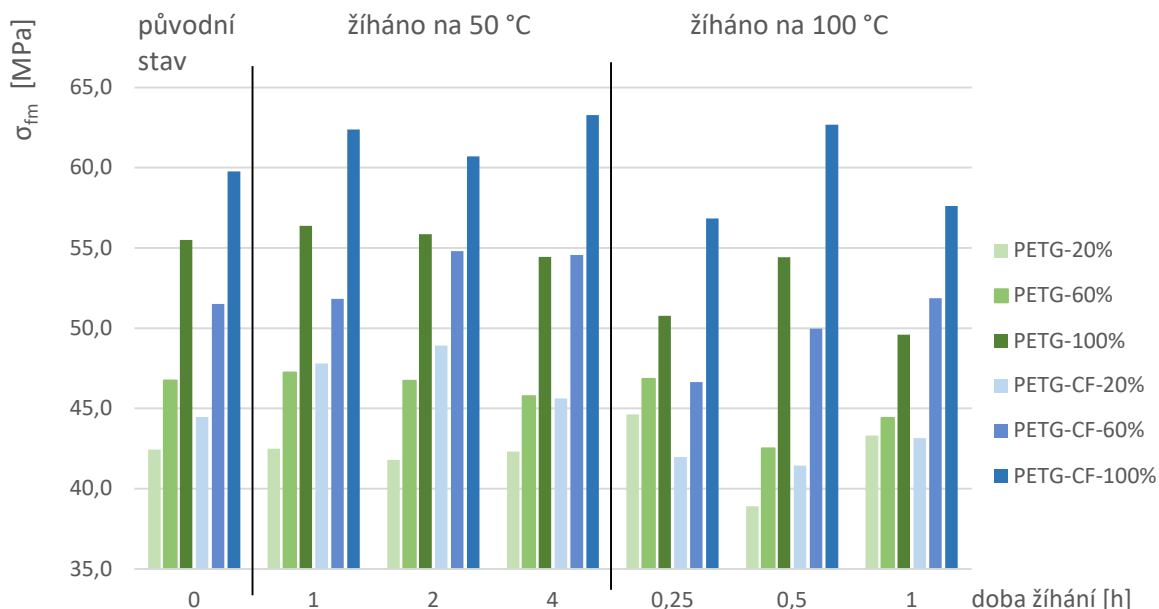
přibližně o 5 % více. U vnitřní výplně 60 % a 100% je pevnost u PETG-CF o přibližně 5 MPa větší, než u PETG což je asi o 9-10 % více. S klesající vnitřní výztuží klesá u obou materiálů pevnost. U PETG i PETG-CF se pevnost v ohybu oproti tělískám se 100% vnitřní výplní sníží o 15 % u 60% výplně a o 25 % u 20% výplně. Což při přihlédnutí k ušetřenému času a materiálu při tisku není tak výrazný pokles pevnosti v ohybu. Pokles u větších dílů by mohl být výraznější, jelikož perimetr, horní a spodní plná vrstva zaujímají menší část dílu.

Tabulka 14 Pevnost v ohybu po žíhání  $\sigma_{FM}$  [MPa] po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň)

	PETG-20%	PETG-60%	PETG-100%	PETG-CF-20%	PETG-CF-60%	PETG-CF-100%
<b>nežiháno</b>	42,4	46,7	55,5	44,5	51,5	59,8
<b>50°C-1h</b>	42,5	47,2	56,4	47,8	51,8	62,4
<b>50°C-2h</b>	41,8	46,7	55,9	48,9	54,8	60,7
<b>50°C-4h</b>	42,3	45,8	54,4	45,6	54,6	63,3
<b>100°C-0,25h</b>	44,6	46,8	50,8	42,0	46,6	56,8
<b>100°C-0,5h</b>	38,9	42,5	54,4	41,4	50,0	62,7
<b>100°C-1h</b>	43,3	44,4	49,6	43,2	51,9	57,6

Z grafu na obrázku č. 46 je patrné, že žíhání na 50 °C má vliv na pevnost převážně u PETG-CF a u PETG není pozorována žádná změna. U PETG-CF je při žíhání na 50 °C dosaženo největšího zvýšení pevnosti v ohybu při žíhání po dobu 2 hodin kdy u 20% vnitřní výplně bylo až 10 % u 60% a 100% výplně bylo dosaženo zvýšení maximálně 6 %. Při delším žíhání již dochází ke snížení oproti 2 hodinám.

U vysokoteplotního žíhání byly pozorovány změny u obou materiálů. U PETG-CF i PETG je pozorováno při žíhání po dobu 0,25 a 0,5 hodiny snížení pevnosti. Snížení činilo přibližně 2-3,5 MPa, což je 7-10 %. Kdežto při žíhání po dobu 1 hodiny došlo k mírné změně trendu a zlepšení pevnosti. Materiál se 100% vnitřní výplní vykazuje opačný trend. Do 0,5 hodiny dochází ke zvýšení pevnosti a následně k poklesu.



Obrázek 46 Graf pevnosti v ohybu po žihání

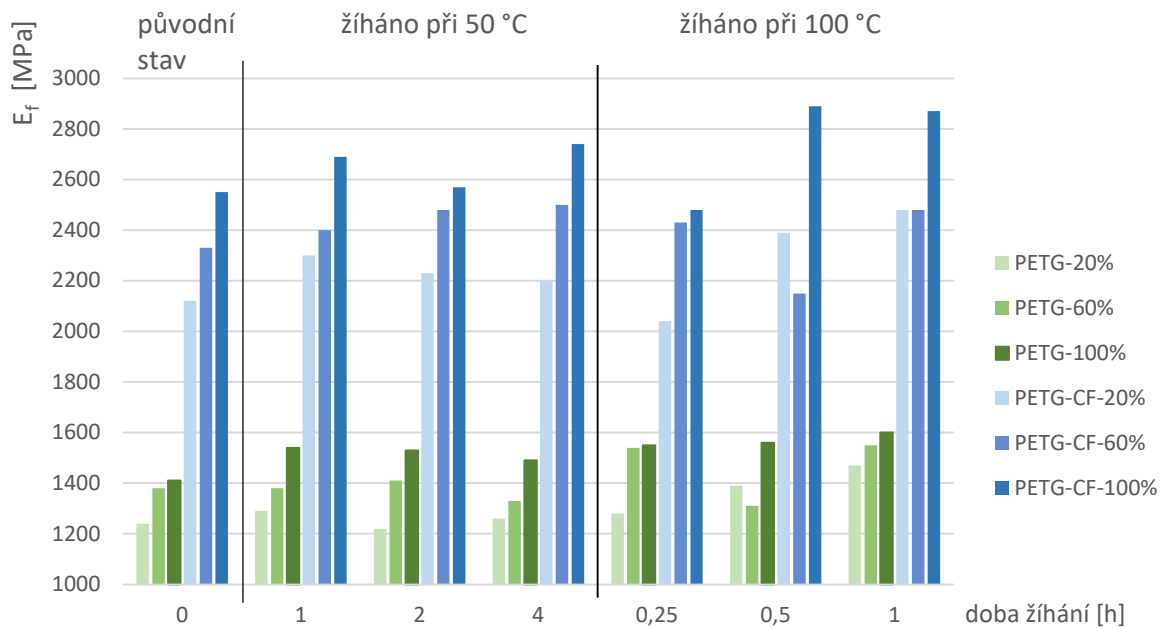
Z hodnot v tabulce 15 je patrné, že modul pružnosti v ohybu je výrazně vyšší u PETG-CF oproti PETG. PETG má modul pružnosti u všech hodnot vnitřních výplní o přibližně 900-1000 MPa, což je asi o 42 - 45 % méně. Při snižující se vnitřní výztuži se snižuje hodnota modulu pružnosti. U PETG je snížení při 60% vnitřní výztuži o 4 % a při 20% o 15 %. U PETG-CF je to přibližně o 7 % u 60% vnitřní výztuže a o 17 % u 20% vnitřní výztuže. Což není výrazný pokles vzhledem k ušetřenému času a materiálu stejně jako u pevnosti v ohybu.

Tabulka 15 Modul pružnosti v ohybu  $E_f$  [MPa] po žihání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň)

	PETG-20%	PETG-60%	PETG-100%	PETG-CF-20%	PETG-CF-60%	PETG-CF-100%
<b>nežiháno</b>	1240	1380	1410	2120	2330	2550
<b>50°C-1h</b>	1290	1380	1540	2300	2400	2690
<b>50°C-2h</b>	1220	1410	1530	2230	2480	2570
<b>50°C-4h</b>	1260	1330	1490	2200	2500	2740
<b>100°C-0,25h</b>	1280	1540	1550	2040	2430	2480
<b>100°C-0,5h</b>	1390	1310	1560	2390	2150	2890
<b>100°C-1h</b>	1470	1550	1600	2480	2480	2870

Z grafu na obrázku č. 47 níže je patrné, že při žihání došlo ke změnám u modulu pružnosti v ohybu. U PETG při žihání na 50 °C do 2 hodin modul zvýšil řádu jednotek procent, nejvíce u 100% výplně a to o 8 %, při delším žihání se modul již snižoval. PETG-CF taktéž vykazuje zvýšení u 100% a 60% výplně, kde došlo k postupnému zvýšení u všech časů a to přibližně o 7 %.

Při žihání na 100 °C materiál PETG vykazuje zvýšení modulu pružnosti v ohybu, který stoupá s časem žihání. Toto je pozorováno u všech typů vnitřních výplní, ale se stoupající hodnotou vnitřní výplně klesá procentuální zvýšení. U 100% a 60% výplně se jedná o přibližně 12 % zvýšení a u 20% výplně až o 18 %. U PETG-CF jsou výsledky přibližně stejné.



Obrázek 47 Graf modulu pružnosti po žihání

## 4 Hodnocení a diskuse

Cílem této práce bylo v teoretické části seznámení se s aditivními technologiemi, hlavně pak technologií FDM (Fused deposition modeling). Následně s polymerními materiály používanými v aditivních technologiích a kompozity z nich vyráběných. Blíže byl popsán materiál PETG a PETG-CF a možnost žihání takovýchto výrobků z nich vytištěných.

Experimentální část byla zaměřena na přípravu zkušebních tělísek pomocí 3D tisku. Zkušební tělíska byla vyrobena s třemi různými vnitřními výplněmi a to s 20%, 60% a 100% vnitřní výplní. Následně byla tělíska žihána v elektrické pídce. Teplota nízkoteplotního žihání byla stanovena na 50 °C a žihání probíhalo po dobu 1, 2 a 4 hodin. Vysokoteplotní žihání bylo zvoleno při teplotě 100 °C což je o 20 °C nad teplotou skelného přechodu  $T_g$ , která byla zjištěna u PETG i PETG-CF 80 °C.

Bylo zjištěno, že při **nízkoteplotním žihání** nedochází k rozměrovým změnám, ale hustota mírně poklesla, přibližně o 1% u obou materiálů. Takto nízké hodnoty mohou být pouze chyby měření, jelikož byla hustota měřena pouze na jednom vzorku.

Mírné zvýšení mechanických vlastností, byli pozorovány pouze do žihání po dobu 2 hodin. Při delším žihání mechanické vlastnosti klesaly. Mez pevnosti v tahu se u PETG zvýšila o 5 % a u PETG-CF o 2 %. Hodnoty poměrného prodloužení zůstaly prakticky stejné.

Žihání má větší vliv na pevnost v ohybu u PETG-CF než u PETG, zlepšení bylo pozorováno do 2 hodin. Zlepšení u PETG-CF dělalo přibližně 7 - 9 %, kdežto u PETG nedošlo k žádnému výraznému zlepšení. Modul pružnosti v ohybu vykazuje stejné chování jako pevnost v ohybu. Zlepšení bylo pouze do 2 hodin a maximálně do 8 % u PETG-CF, u PETG došlo ke zvýšení pouze u vzorků se stoprocentní výplní a to o 6 %. Změny dosažené při nízkoteplotním žihání jsou pravděpodobně způsobené relaxací materiálů. Materiál je kvůli rychlému zchlazení v nerovnovážném stavu a postupně jde k rovnovážnému, a pomocí žihání je tento proces urychlen. Nepravděpodobnějším vysvětlením tohoto jevu je teorie Tooleho fiktivní teploty.

U **vysokoteplotního žihání** byly naměřeny změny rozměrů. Zmenšení rozměrů bylo u šířky a délky tělísek, u výšky došlo ke zvětšení, je otázkou, zda zvětšení je vždy kolmo k tištěným vrstvám nebo je to způsobeno tím že to nejmenší rozměr. Se zvyšující se dobou žihání se změny zvětšovaly. Změny rozměrů u PETG bez uhlíkových vláken jsou přibližně dvojnásobné oproti PETG-CF. Vliv na změny rozměrů má procentuální hodnotou vnitřní výplně. Změření vyplývá že čím vyšší je hodnota vnitřní tím větší jsou změny. Zřejmě tedy dochází k změnám

v materiálu nebo jejich styku na ne k propadání do prázdných míst v tělísku. Také docházelo ke kroucení vzorků v důsledku uvolnění vnitřního napětí zaneseného do vzorku při tisku. Je možné, že by změny byly menší, kdyby žíhání probíhalo těsně nad teplotu  $T_g$  a ne 20 °C jak bylo prováděno. Tyto změny by při tisku velkých dílů a teplotě tiskové podložky, blížící se nebo překračující teplotě  $T_g$ , mohly mít vliv na rozměry výsledného dílu, jelikož spodní část vzorku je žíhána po celou dobu tisku.

Hustota vzorků se zvyšovala při vysokoteplotním žíhání s dobou žíhání, což je pravděpodobně důsledek vytvoření většího propojení jednotlivých vrstev a následnému difúznímu spojení polymerních řetězců, což lze vidět i při pozorování folie vytvořené z průřezu tělíska.

Vysokoteplotní žíhání vykazovalo různé změny při různých zkouškách. Mez pevnosti se jak u PETG, tak PETG-CF snížila oproti nežíhanému vzorku. U obou materiálů bylo snížení do 5 procent. Stejně výsledky vykazuje i pevnost v ohybu. Zvýšení modulu pružnosti v ohybu má stoupající tendenci s časem žíhání. U obou materiálů byl výsledek přibližně stejný. Zde se výrazně projevilo množství vnitřní výplně. Vnitřní výplň 100% a 60% vykazovala zlepšení o 12 % a u 20 procentní výplně až 18 %. Zvýšení vysokoteplotním žíháním je pravděpodobně zapříčiněno zvýšenou mezivrstevní soudržností, která vzniká díky růstu krčků mezi jednotlivými vrstvami a difúznímu spojení materiálu při zahřátí nad  $T_g$ , což lze vidět i na zvýšené hustotě tělísek.

Využití PETG s uhlíkovým vláknem vede ke zlepšení mechanických vlastností oproti využití čistého PETG. Avšak u pevnosti v ohybu je to pouze 10 % a u pevnosti v tahu pouze 6 %. Výrazný rozdíl je ale u modulu pružnosti v ohybu, kde PETG-CF dosahuje až dvojnásobných hodnot. Následné nízkoteplotní žíhání je vhodné i pro sjednocení vlastností v celém objemu, jelikož při tisku větších dílů je spodní část po celou dobu tisku zahřívána tiskovou podložkou, kdežto vrchní části ne. Toto lze provést bez nežádoucích změn na rozměrech.

Vysokoteplotní žíhání je vhodné při aplikacích, kdy je zapotřebí vysoký modul pružnosti a není třeba přesných rozměrů. Pro snížení dopadu rozměrových změn a výrazně vyšších hodnot modulu pružnosti je ideální využití PETG-CF. Při využití PETG-CF je dle rešerše výrazně nižší mezivrstevní soudržnost oproti PETG, kterou ale lze vysokoteplotním žíháním až 3krát zvýšit.

## 5 Závěr

- PETG-CF vykazuje pouze o 6 % vyšší pevnosti v tahu a o 10 % vyšší pevnost oproti PETG. S přihlédnutím k tomu že PETG-CF je přibližně 3krát dražší není tento nárůst nijak výrazný.
- Mechanické vlastnosti se zvyšují s rostoucí procentuální hodnotou vnitřní výplně.
- PETG-CF má dvakrát větší modul pružnosti v ohybu než PETG. Při aplikaci, kde je toto vyžadováno je použití kompozitu vhodnou volbou.
- Nízkoteplotní žíhání pod  $T_g$  zvýší hodnoty meze pevnosti v tahu až o 5 % u PETG a 2 % u PETG-CF. Mez pevnosti v ohybu byla zvýšena u PETG-CF až o 9%. Modul pružnosti se zvýšil přibližně o 8 % u PETG-CF. U PETG nedošlo ke změnám u ohybových vlastností
- Při nízkoteplotním žíhání nedochází k nežádoucím změnám rozměrů.
- Je pravděpodobné že nízkoteplotním žíháním by bylo možné docílit mechanických vlastností srovnatelných s nežíhaným dílem při nižší procentuální vnitřní výplni. Toto by při větších výrobních dávkách mohlo znamenat úsporu materiálu a času.
- Vysokoteplotní žíhání způsobilo pokles hodnot meze pevnosti v tahu a ohybu o přibližně 5 %.
- Naopak zvýšení modulu pružnosti v ohybu bylo 12-18 %.
- Vysokoteplotní žíhání těchto parametrů nepovažuji za výhodné, jelikož nedochází ke změnám, které by vyvážili rozměrové změny způsobené žíháním



## 6 Literatura

- ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG, ed. *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 1st Edition. ProQuest Ebook Central: Elsevier Science & Technology, 2018. ISBN 9780128121559.
- 1]
- BERÁNEK, Libor. *Aditivní a alternativní technologie (přednáška)*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2021.
- 2]
- CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, 2017. ISBN 978-981-3146-76-1.
- 3]
- HORVATH, Joan. A Brief History of 3D Printing. *Mastering 3D Printing*. Berkeley, CA: Apress, 2014, 3-10. ISBN 978-1-4842-0026-1. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4842-0025-4\_1
- 4]
- DESHMUKH, Kalim, Aqib MUZAFFAR, Tomáš KOVÁŘÍK, Tomáš KŘENEK, M. Basheer AHAMED a S. K. Khadheer PASHA. Fundamentals and applications of 3D and 4D printing of polymers: Challenges in polymer processing and prospects of future research. *3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials*. Elsevier, 2020, 527-560. ISBN 9780128168059. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816805-9.00017-X
- 5]
- 7 issues to look out for in metal 3d printing. In: *Www.engineering.com* [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/story/7-issues-to-look-out-for-in-metal-3d-printing>
- 6]
- HU, Chao a Qing-Hua QIN. Advances in fused deposition modeling of discontinuous fiber/polymer composites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2020, **24**(5). ISSN 13590286. Dostupné z: doi:10.1016/j.cossms.2020.100867
- 7]
- Prusament. In: *Https://prusament.com* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://prusament.com/#\\_ga=2.29477371.532181880.1652635125-1270850061.1616009519](https://prusament.com/#_ga=2.29477371.532181880.1652635125-1270850061.1616009519)
- 8]
- Plasty-mechanické vlastnosti* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
- 9]

- SAMYKANO, M., S. K. SELVAMANI, K. KADIRGAMA, W. K. NGUI, G. KANAGARAJ  
10] a K. SUDHAKAR. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing  
parameters. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.  
2019, , s. 2779-2796. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-03313-0
- ABS. In: *Www.simplify3d.com* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z:  
11] <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/abs/>
- KOČÍ, Jakub. Improve your 3D prints with chemical smoothing. In:  
12] *Blog.prusa3d.com* [online]. 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z:  
[https://blog.prusa3d.com/improve-your-3d-prints-with-chemical-smoothing\\_36268/](https://blog.prusa3d.com/improve-your-3d-prints-with-chemical-smoothing_36268/)
- YAP, Yee Ling, William TOH, Rahul KONERU et al. A non-destructive  
13] experimental-cum-numerical methodology for the characterization of 3D-printed  
materials—polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene (PC-ABS). *Mechanics of  
Materials*. 2019, **132**, 121-133. ISSN 01676636. Dostupné z:  
doi:10.1016/j.mechmat.2019.03.005
- Polyethylentereftal. In: *Www.wikiwand.com* [online]. [cit. 2022-06-19].  
14] Dostupné z: <https://www.wikiwand.com/cs/Polyethylentereftal%C3%A1t>
- NAFTALY, Mira, Gian SAVVIDES, Fawwaz ALSHAREEF, Patrick FLANIGAN,  
15] GianLuc LUI, Marian FLORESCU a Ruth Ann MULLEN. Non-Destructive Porosity  
Measurements of 3D Printed Polymer by Terahertz Time-Domain Spectroscopy.  
*Applied Sciences*. 2022, **12**(2). ISSN 2076-3417. Dostupné z:  
doi:10.3390/app12020927
- What is PETG. In: *Www.acmeplastics.com* [online]. [cit. 2022-06-19].  
16] Dostupné z: <https://www.acmeplastics.com/what-is-petg>
- GIBSON, Ronald F. *Principles of composite material mechanics*. 2nd ed. Boca  
17] Raton: CRC Press, 2007. Mechanical engineering series (Boca Raton, Fla.), 205. ISBN  
08-247-5389-5.
- Mechanical behavior of composite. In: *Www.bartleby.com* [online]. [cit. 2022-  
18] 05-31]. Dostupné z: <https://www.bartleby.com/subject/engineering/mechanical-engineering/concepts/mechanical-behavior-of-composite>

- EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd.  
19] Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Praha: SNTL-Nakladatelství  
20] technické literatury, 1981.
- LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým  
21] vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-860-7382-3.
- MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, 2005. ISBN  
22] 08-247-0983-7.
- Hybrid polymer composite materials: properties and characterisation*.  
23] Duxford: Woodhead Publishing, 2017. Woodhead Publishing series in composites  
science and engineering. ISBN 978-008-1007-884.
- JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*.  
24] Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- MUNZAROVÁ, Pavlína. *Uhlíkové kompozitní materiály s anorganickou maticí*.  
25] Liberec, 2008. Diplomová práce. TUL FT. Vedoucí práce Ing. Vladimír Kovačič.
- BRYLL, Katarzyna, Elżbieta PIESOWICZ, Paweł SZYMAŃSKI, Wojciech ŚLĄCZKA,  
26] Marek PIJANOWSKI a R. DAS. Polymer Composite Manufacturing by FDM 3D Printing  
Technology. *MATEC Web of Conferences*. 2018, **237**. ISSN 2261-236X. Dostupné z:  
doi:10.1051/mateconf/201823702006
- TÜMER, Eda Hazal a Husnu Yildirim ERBIL. Extrusion-Based 3D Printing  
27] Applications of PLA Composites: A Review. *Coatings*. 2021, **11**(4). ISSN 2079-6412.  
Dostupné z: doi:10.3390/coatings11040390
- FDM\_printing\_basics\_2. In: *Isd-soft.com* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné  
28] z: <https://isd-soft.com/tech-blog/enoh-we-have-a-3d-printer-in-the-office-or-fdm-printing-basics/>
- K., Palanikumar, Mudhukrishnan M. a Soorya Prabha P. Technologies in  
29] additive manufacturing for fiber reinforced composite materials: a review. *Current  
Opinion in Chemical Engineering*. 2020, **28**, 51-59. ISSN 22113398. Dostupné z:  
doi:10.1016/j.coche.2020.01.001
- SZUST, Agnieszka a Grzegorz ADAMSKI. Using thermal annealing and salt  
30] remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints. *Engineering Failure*

*Analysis*. 2022, **132**. ISSN 13506307. Dostupné z: doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105932

31] DONG, Ju, Xingyan HUANG, Pranjali MULEY et al. Carbonized cellulose nanofibers as dielectric heat sources for microwave annealing 3D printed PLA composite. *Composites Part B: Engineering*. 2020, **184**. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107640

32] VALVEZ, S., A.P. SILVA, P.N.B. REIS a F. BERTO. Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. *Procedia Structural Integrity*. 2022, **37**, 738-745. ISSN 24523216. Dostupné z: doi:10.1016/j.prostr.2022.02.004

33] RANGISETTY, Sridher a Larry D. PEEL. The Effect of Infill Patterns and Annealing on Mechanical Properties of Additively Manufactured Thermoplastic Composites. *Volume 1: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Mechanics and Behavior of Active Materials; Bioinspired Smart Materials and Systems; Energy Harvesting; Emerging Technologies*. American Society of Mechanical Engineers, 2017, -. ISBN 978-0-7918-5825-7. Dostupné z: doi:10.1115/SMASIS2017-4011

34] SATHISH KUMAR, K., R. SOUNDARARAJAN, G. SHANTHOSH, P. SARAVANAKUMAR a M. RATTEESH. Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM. *Materials Today: Proceedings*. 2021, **45**, 2186-2191. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.078

35] WACH, Radoslaw A., Piotr WOLSZCZAK a Agnieszka ADAMUS-WLODARCZYK. Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2018, **303**(9). ISSN 14387492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201800169

36] CHEN, Wenhui, Xiaolong ZHANG, Di TAN et al. Improvement in Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK Structure by Nonsolvent Vapor Annealing. *Macromolecular Rapid Communications*. 2022, **43**(7). ISSN 1022-1336. Dostupné z: doi:10.1002/marc.202100874

37] JAYANTH, N., K. JASWANTHRAJ, S. SANDEEP, N. Harish MALLAYA a S. Raghul SIDDHARTH. Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA.

*Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2021, **123**. ISSN 17516161. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmbbm.2021.104764

38] XUE, Guobiao, Yan ZHAO, Xikang ZHAO, Hanying LI a Jianguo MEI. Zone-Annealing-Assisted Solvent-Free Processing of Complementary Semiconducting Polymer Blends for Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Electronic Materials*. 2018, **4**(1). ISSN 2199-160X. Dostupné z: doi:10.1002/aelm.201700414

39] VISWANATH, Vidya, Somsubhra MAITY, Jason R. BOCHINSKI, Laura I. CLARKE a Russell E. GORGA. Enhanced Crystallinity of Polymer Nanofibers without Loss of Nanofibrous Morphology via Heterogeneous Photothermal Annealing. *Macromolecules*. 2016, **49**(24), 9484-9492. ISSN 0024-9297. Dostupné z: doi:10.1021/acs.macromol.6b01655

40] VISWANATH, Vidya, Somsubhra MAITY, Jason R. BOCHINSKI, Laura I. CLARKE a Russell E. GORGA. Thermal Annealing of Polymer Nanocomposites via Photothermal Heating: Effects on Crystallinity and Spherulite Morphology. *Macromolecules*. 2013, **46**(21), 8596-8607. ISSN 0024-9297. Dostupné z: doi:10.1021/ma401855v

41] Prusa3d\_manual\_mk3s\_cz\_3\_12. In: *Www.prusa3d.com* [online]. 2019 [cit. 2022-06-29]. Dostupné z: [https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d\\_manual\\_mk3s\\_cz\\_3\\_12.pdf?2#\\_ga=2.172866979.1270793186.1656526663-1270850061.1616009519](https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3s_cz_3_12.pdf?2#_ga=2.172866979.1270793186.1656526663-1270850061.1616009519)

42] ČSN EN ISO 527-2: *Plasty - stanovení tahových vlastností - část 2: zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.

43] ČSN EN ISO 178: *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.

44] ČSN EN ISO 179-1: *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2010.

45] GUO, Jun, Rui XIAO, Chuanshuai TIAN a Minqiang JIANG. Optimizing physical aging in poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018, **502**, 15-21. ISSN 00223093. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnoncrysol.2018.10.021

ČSN EN ISO 527: Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy.

46] Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

POMES, Benjamin, Emmanuel RICHAUD a Jean-François NGUYEN.

47] Polymethacrylates. *Materials for Biomedical Engineering*. Elsevier, 2019, 217-271.

ISBN 9780128168745. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-816874-5.00007-4

## 7 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Konstrukce FDM tiskárny [5] - filament.....	14
Obrázek 2 SLA s podložkou dole, Scanner system [2].....	15
Obrázek 3 SLA s podložkou nahoře [2] .....	16
<i>Obrázek 4 Schéma technologie SLS, [6] .....</i>	<i>17</i>
Obrázek 5 Přehled užívaných materiálů pro FDM [7].....	17
Obrázek 6 Vlevo – výrobek z ABS – Vpravo výrobek z ABS vyhlazený pomocí acetonových par [12] .....	19
Obrázek 7 Strukturní vzorec PET [14] .....	20
Obrázek 8 Strukturní vzorec PETG [15].....	21
Obrázek 9 Ukázka geometrie výztuže, [18] .....	22
Obrázek 10 Vliv průměru vlákna na mez pevnosti v tahu [19].....	22
Obrázek 11 Mechanické tažení skleněných tyčinek. 1- skleněné tyčinky, 2 - plynový hořák, 3 - lubrikační váleček, 4 - navíjecí buben [20] .....	24
Obrázek 12 Schéma výroby uhlíkových vláken z prekurzoru na bázi PAN [25] .....	26
Obrázek 13 Schéma výroby PAN vlákna [25] .....	27
Obrázek 14 Schéma spřádání vláken na bázi smol [21].....	29
Obrázek 15 Metody FDM tisku kompozitních materiálů.....	30
Obrázek 16 Schéma tisku kompozitního materiálu [29].....	31
Obrázek 17 Ukázka vzorů tištěných pomocí metody dvou extruderu, a) Tisk dvou materiálů symetrický b) Tisk dvou materiálů nesymetrický c) Tisk vrstveného polymeru d) Tisk kompozitu vnitřní výztuže [26] .....	32
Obrázek 18 Ukázka metody impregnace ve trysce, [27] .....	33
Obrázek 19 Schéma vytvoření spojení jednotlivých vrstev, vlevo - dotek povrchů, uprostřed - růst krčku, difuzní spojení při teplotě nad $T_g$ [30] .....	34
Obrázek 20 Mechanické vlastnosti vzorku z PETG s uhlíkovým vláknem se 100% vnitřní výplní bez žíhání a po žíhání [34] .....	35
Obrázek 21 Zónové žíhání [38] .....	36
Obrázek 22 Slicované díly v programu PrusaSlicer .....	38
Obrázek 23 a) Detail slicovaného tělíska v celé tloušťce b) Detail slicovaného tělíska v půlce tloušťky s pohledem na 20% výplň.....	38
Obrázek 24 Teplotní křivky žíhání .....	39

Obrázek 25 Těleso typu 1A pro zkoušku tahových vlastností.....	40
Obrázek 26 Těleso pro zkoušku ohybových vlastností .....	40
Obrázek 27 Těleso pro zkoušku rázové houževnatosti s vrubem typu A .....	40
Obrázek 28 Graf procentuální změny během žíhání na 100 °C šířky b.....	43
Obrázek 29 Graf procentuální změny během žíhání na 100 °C výšky h (vlevo), délky L (vpravo).....	43
Obrázek 30 Graf změny hustoty při žíhání.....	45
Obrázek 31 Detail plochy perimetru a) PETG-CF-XX°C b) PETG-CF-100°C-1h c) PETG-XX-XX°C d) PETG-XX-100°C-1h, bílá úsečka je 1 mm.....	45
Obrázek 32 Detail vrchní plné vrstvy e) PETG-CF-XX°C f) PETG-CF-100°C-1h g) PETG-XX-XX°C h) PETG-XX-100°C-1h.....	46
Obrázek 33 Průřez vzorku a) PETG-XX-XX°C b) PETG-XX-100°C-1h c) PETG-CF-XX°C h) PETG-CF-100°C-1h.....	46
Obrázek 34 Ukázka obrazové analýza vzorku PETG-CF .....	47
Obrázek 35 Schéma DSC grafu, Amorphous – amorfní, semicrystalline – semikrystalický, Tg - teplota skelného přechodu, Tc - teplota dokrystalizace, Tm - teplota tání.....	48
Obrázek 36 Trhací stroj ZD 10.....	49
Obrázek 37 Ukázka tahové zkoušky s porušením kvůli vnitřním vadám .....	50
Obrázek 38 Graf hodnot meze pevnosti filamentu po žíhání.....	51
Obrázek 39 Vzorek PETG s vytvořeným krčkem během tahové zkoušky .....	51
Obrázek 40 Graf hodnot meze pevnosti tištěných vzorků po žíhání.....	53
Obrázek 41 Graf poměrného prodloužení při přetržení.....	54
Obrázek 42 a) přeražení typu H b) přeražení typu C (úplné přeražení).....	54
Obrázek 43 Graf vrubové houževnatosti po žíhání.....	56
Obrázek 44 Univerzální víceúčelový stroj MTS Exceed® Model E42 .....	57
Obrázek 45 Ukázka grafu pro výpočet modulu pružnosti v ohybu.....	58
Obrázek 46 Graf pevnosti v ohybu po žíhání .....	60
Obrázek 47 Graf modulu pružnosti po žíhání .....	61



## 8 Seznam tabulek

Tabulka 1 Způsob vytvrzování u stereolitografie.....	15
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních materiálů používaných pro FDM tisk [9].....	18
Tabulka 3 Výhody a nevýhody použití ABS.....	19
Tabulka 4 Výhody a nevýhody použití PLA.....	20
Tabulka 5 Výhody a nevýhody použití PC.....	20
Tabulka 6 Výhody a nevýhody použití PETG.....	21
Tabulka 7 Změny rozměrů při vysokoteplotním žíhání na 100 °C.....	42
Tabulka 8 Hustota po žíhání PETG/PETG-CF.....	44
Tabulka 9 Teploty T <sub>g</sub> získané zkouškou DSC žíhaného a nežíhaného materiálu.....	48
Tabulka 10 Mez pevnosti filamentu po žíhání.....	51
Tabulka 11 Mez pevnosti $\sigma_m$ [MPa] tištěných tělísek po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň).....	52
Tabulka 12 Poměrné prodloužení při přetržení $\epsilon_{tb}$ [%] tištěných tělísek po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň).....	53
Tabulka 13 Vrubová houževnatost Charpy $a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ] po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň).....	55
Tabulka 14 Pevnost v ohybu po žíhání $\sigma_{fM}$ [MPa] po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň).....	59
Tabulka 15 Modul pružnosti v ohybu $E_f$ [MPa] po žíhání, první řádek (materiál-procentuální vnitřní výplň).....	60



## TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

**PETG FILAMENT**

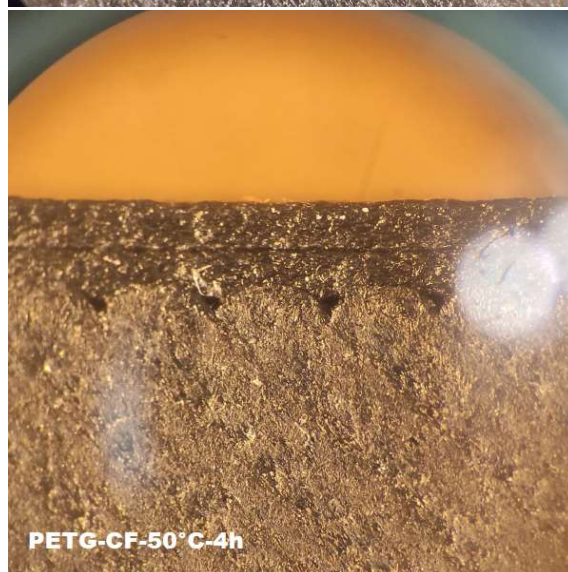
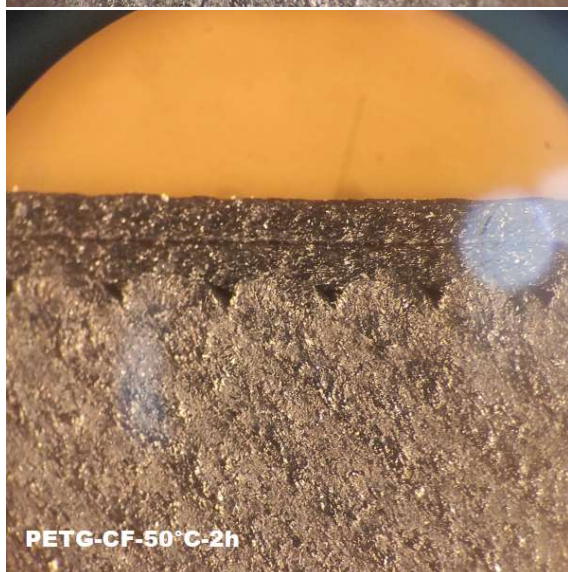
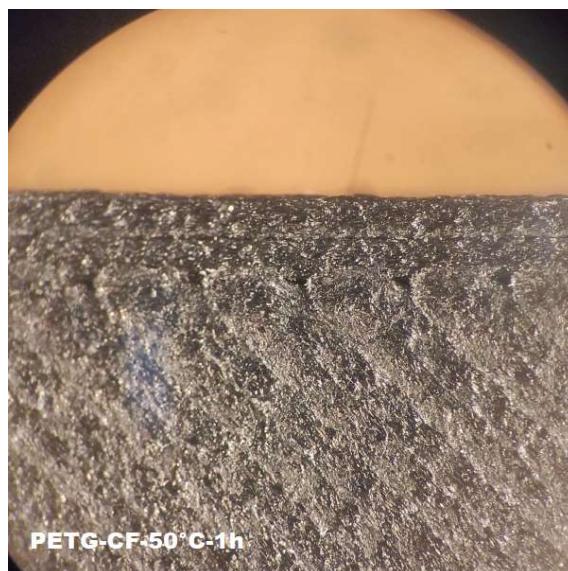
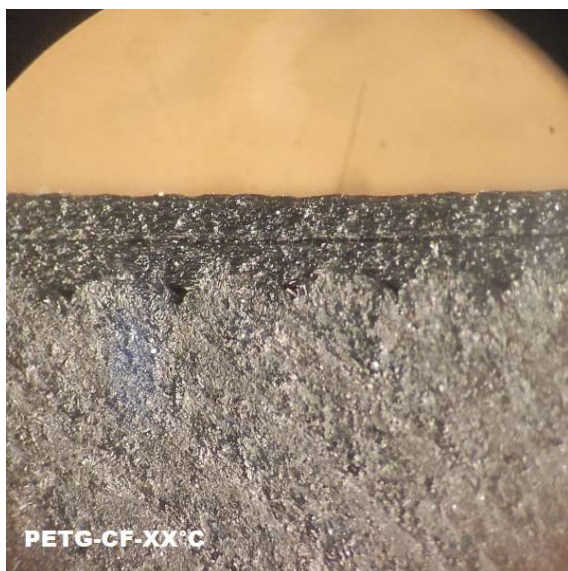
<b>Use</b>	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
<b>Material</b>	Polyetylentefthalat - polyester, petroleum product		
<b>Diameters</b>	1,75 or 2,90 mm		
<b>Tolerance</b>	± 0,05 mm		
<b>Weight</b>	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
<b>Packing</b>	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
<b>Colours</b>	views on web <a href="https://www.filament-pm.com/petg">https://www.filament-pm.com/petg</a>		
<b>Solvents</b>	Acetaldehyde, benzene		
<b>Printing Properties:</b>			
<b>Temperature HE</b>	230 – 250 °C		
<b>Temperature HB</b>	60 - 80 °C		
<b>Surface bed</b>	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
<b>Cooling print object</b>	YES		
<b>Nozzle</b>	All diameters		
<b>Printer space</b>	Open / Close		
<b>Material Properties:</b>			
<b>Thermal</b>	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
<b>Mechanical</b>	impact strength	ISO 179	11 kJ/m <sup>2</sup>
	flexural modulus	ISO 178	1880 MPa
<b>Physical</b>	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm <sup>3</sup>
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min

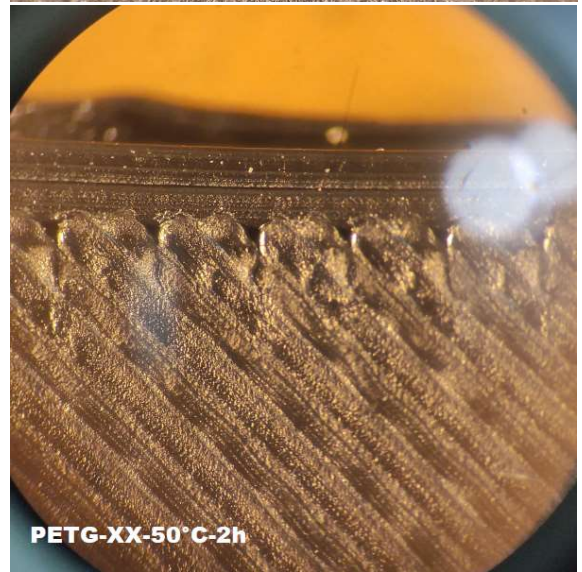
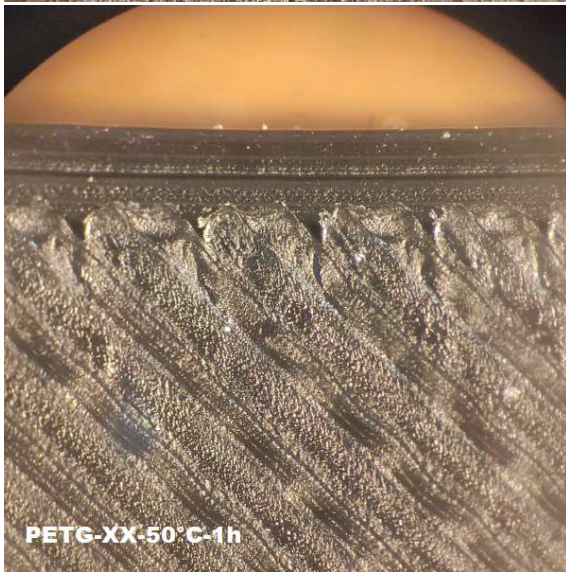
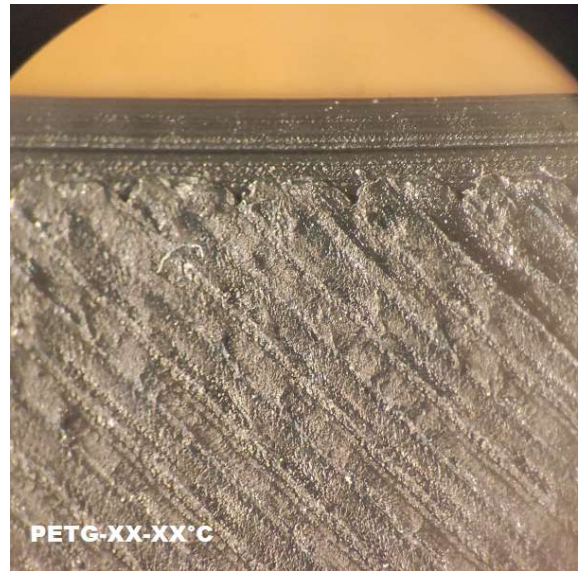
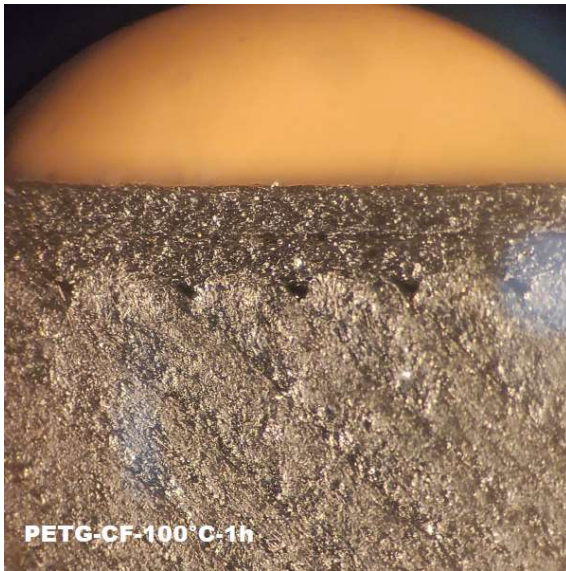


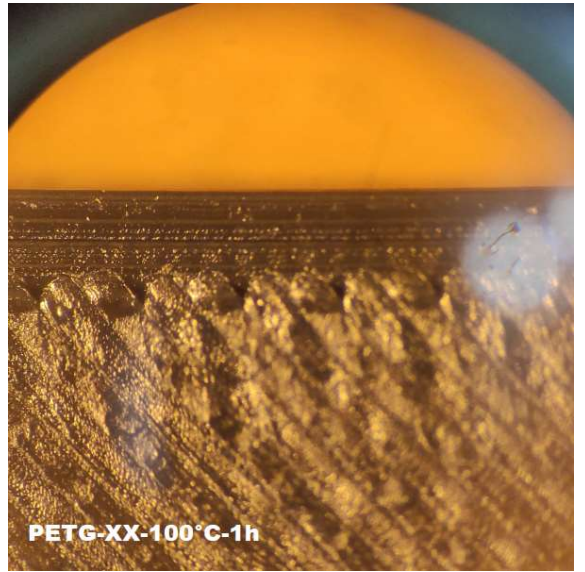
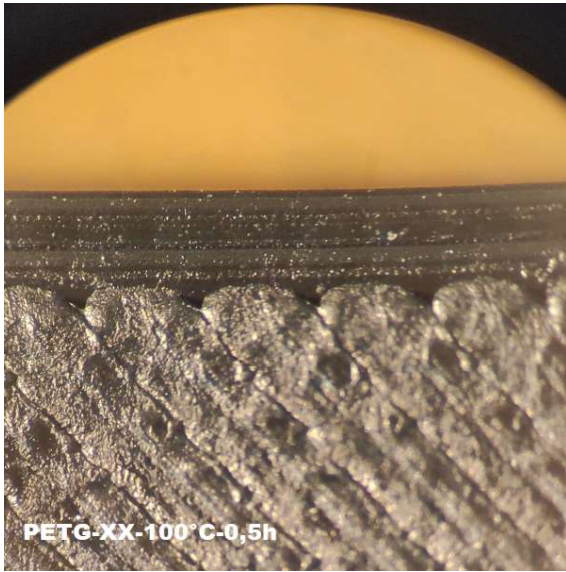
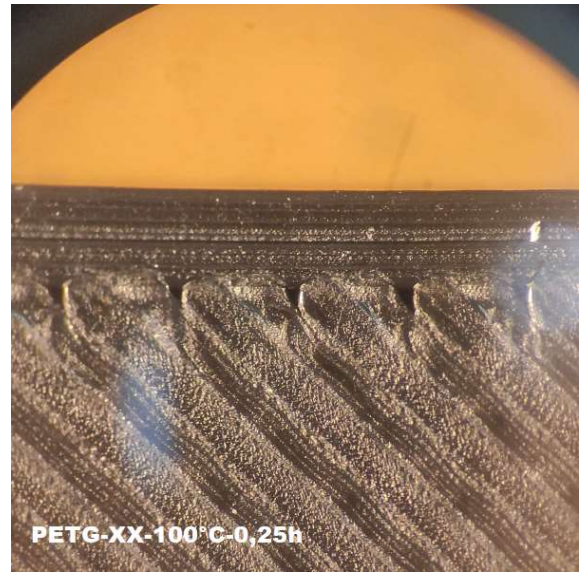
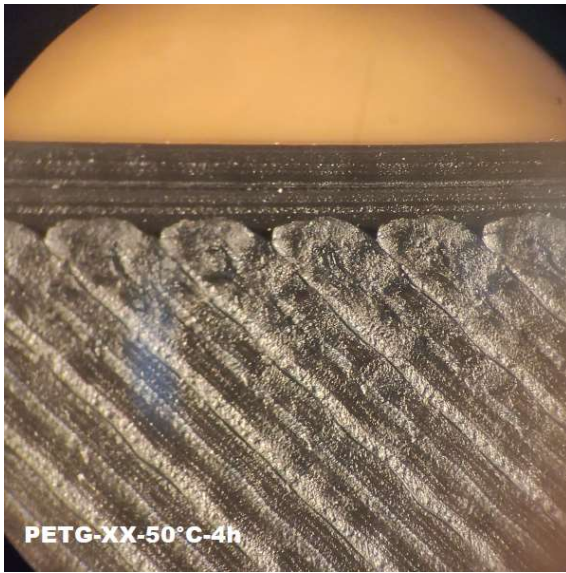
TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:  
**CFJet FILAMENT**

<b>Use</b>	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
<b>Material</b>	Polyetylentefthalat + 20% carbon fiber 0,15mm, petroleum product		
<b>Diameters</b>	1,75 mm		
<b>Tolerance</b>	± 0,1 mm		
<b>Weight</b>	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
<b>Packing</b>	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
<b>Colours</b>	views on web <a href="https://www.filament-pm.com/cfjet">https://www.filament-pm.com/cfjet</a>		
<b>Solvents</b>	Acetaldehyde, benzene		
<b>Printing Properties:</b>			
<b>Temperature HE</b>	220 – 250 °C		
<b>Temperature HB</b>	60 - 80 °C		
<b>Surface bed</b>	ultem, PET foil,		
<b>Cooling print object</b>	YES		
<b>Nozzle</b>	min 0,4 mm and more		
<b>Printer space</b>	Open / Close		
<b>Material Properties:</b>			
<b>Thermal</b>	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
<b>Mechanical</b>	impact strength	ISO 179	23 kJ/m <sup>2</sup>
	flexural modulus	ISO 178	2500 MPa
<b>Physical</b>	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm <sup>3</sup>
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min

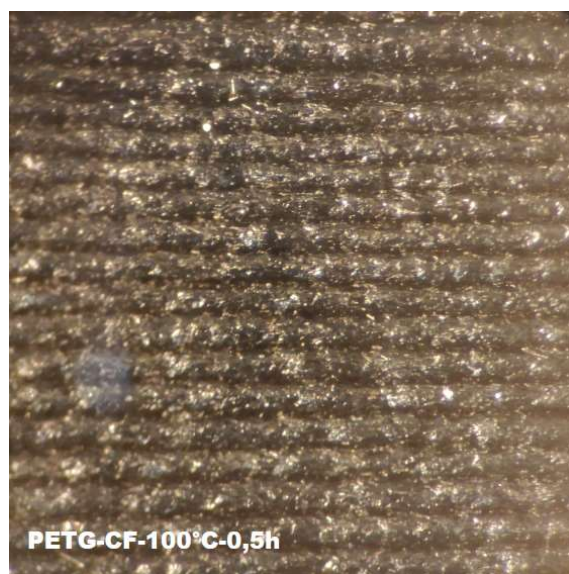
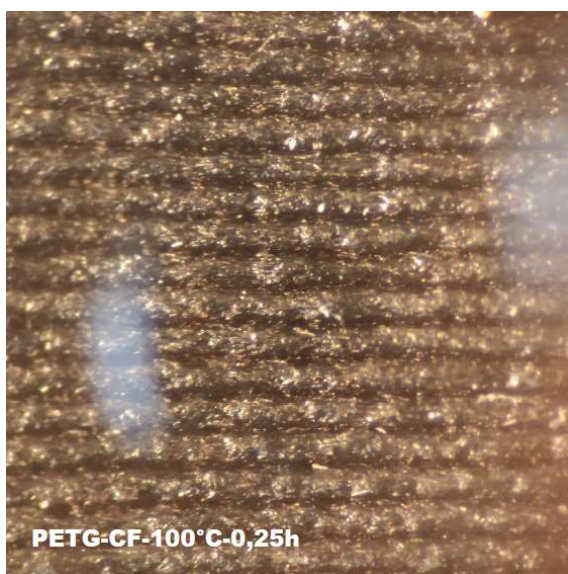
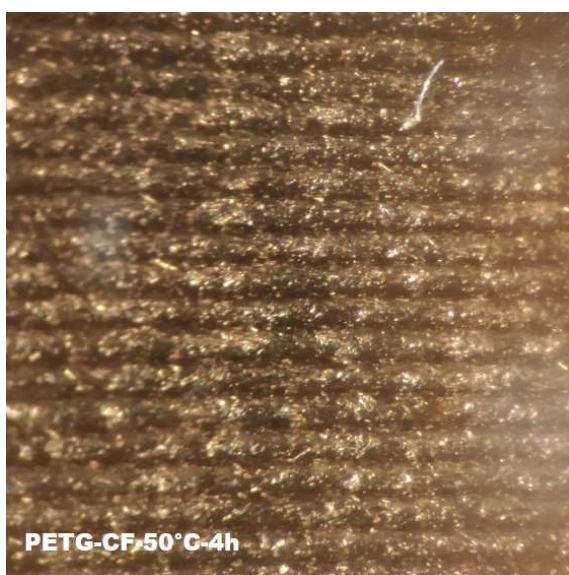
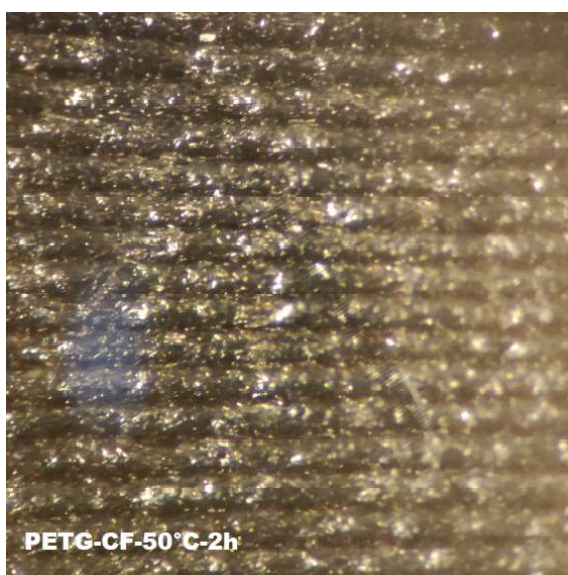
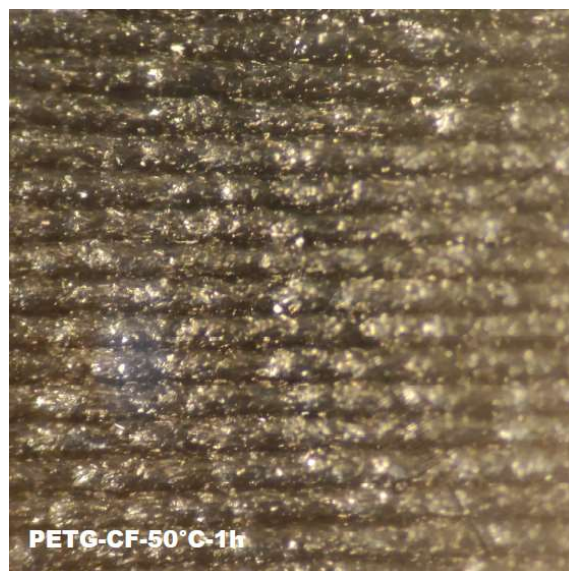
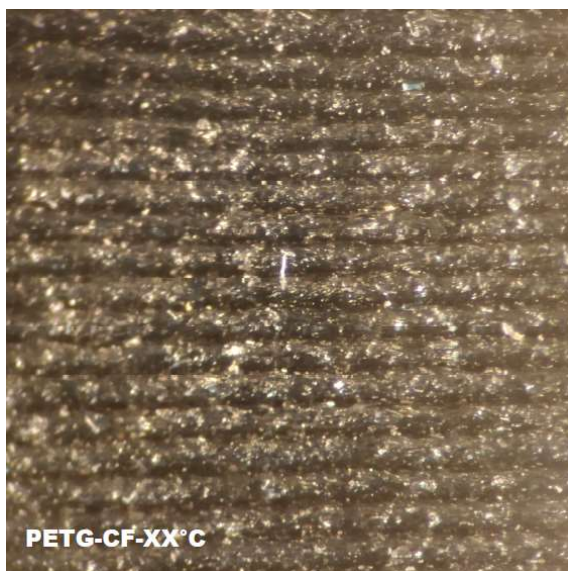
**Příloha 3**

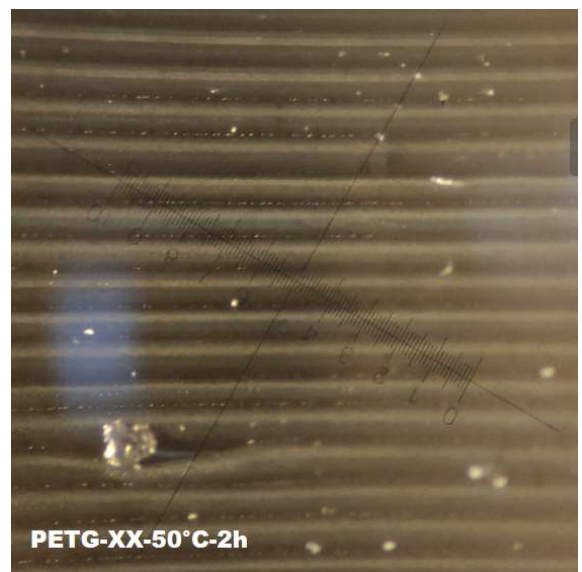
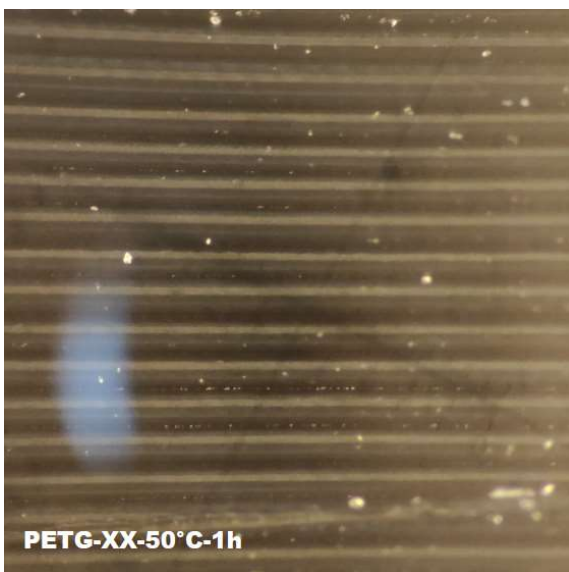
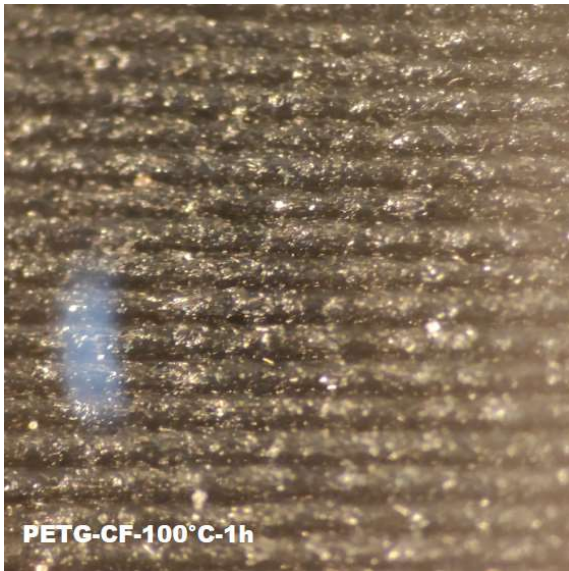




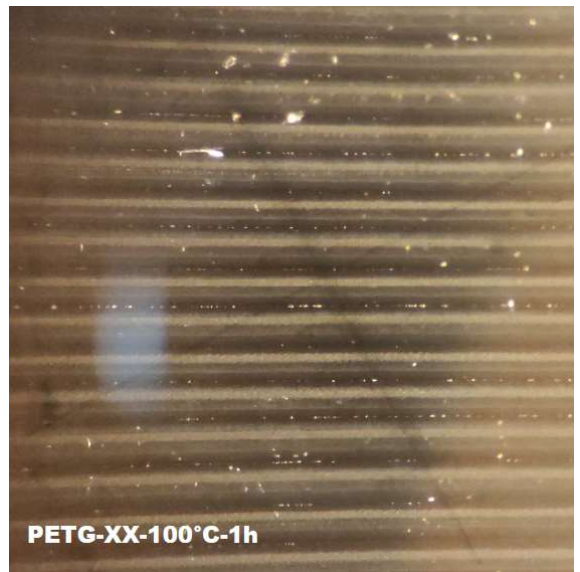
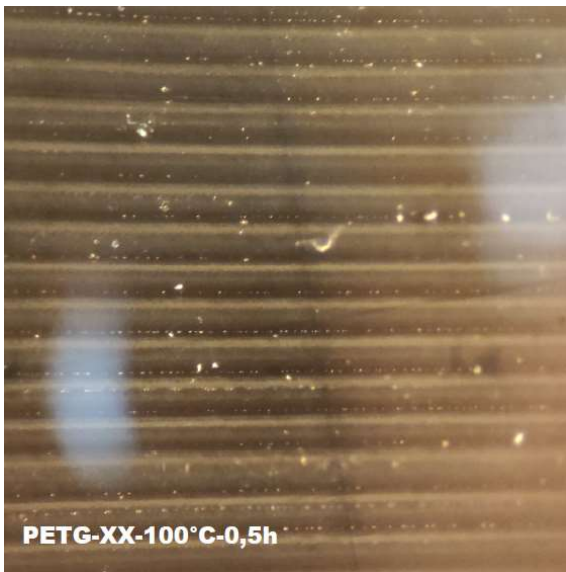
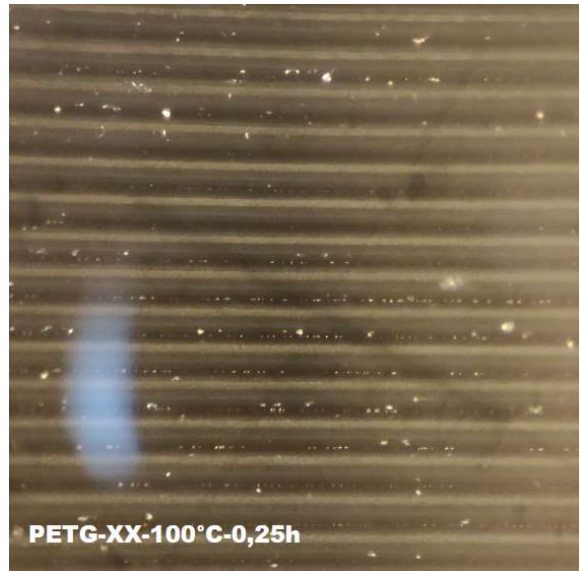
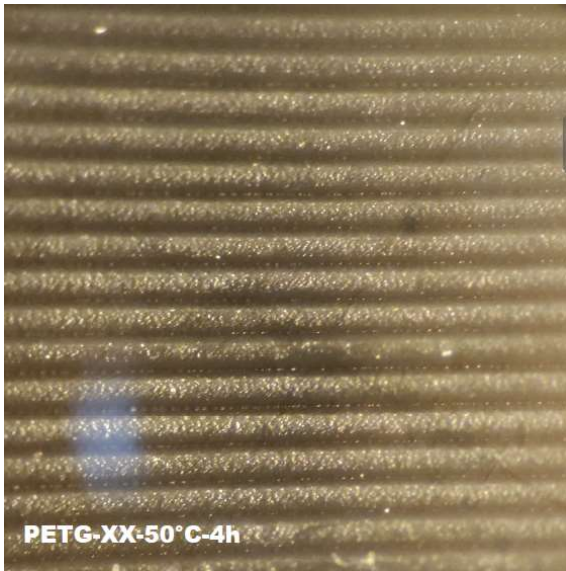


**Příloha 4**











## Příloha 6

### MTS Exceed Series 40 Specifications - Comparative

Model	E42,503*	E43,104	E43,504
<b>Maximum rated force capacity</b>	5 kN (1100 lbf)	10 kN (2200 lbf)	50 kN (11000 lbf)
<b>Force capacity options</b>	5 N, 10 N, 20 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1 kN, 2 kN, 5 kN 1 lbf, 2 lbf, 5 lbf, 10 lbf, 20 lbf, 45 lbf, 110 lbf, 220 lbf, 450 lbf, 1100 lbf	5 N, 10 N, 20 N, 50 N, 100 N, 200 N, 500 N, 1 kN, 2 kN, 5 kN, 10 kN 1 lbf, 2 lbf, 5 lbf, 10 lbf, 20 lbf, 45 lbf, 110 lbf, 220 lbf, 450 lbf, 1100 lbf, 2200 lbf	20 kN, 30 kN, 50 kN 4500 lbf, 6700 lbf, 11000 lbf
<b>Frame type</b>	Table top	Table top	Table top
<b>Test zones (single/dual)</b>	Single	Single	Single
<b>Maximum test speed</b>	508 mm/min (20 in/min)	508 mm/min (20 in/min)	508 mm/min (20 in/min)
<b>Minimum test speed</b>	0.001 mm/min (0.00004 in/min)	0.001 mm/min (0.00004 in/min)	0.001 mm/min (0.00004 in/min)
<b>Position resolution</b>	0.000051 mm (0.0000022 in)	0.000041 mm (0.0000016 in)	0.00006 mm (0.0000023 in)
<b>Vertical test space</b>	<i>Standard</i> 700 mm (27.6 in) <i>Extended</i> 1000 mm (39.4 in)	1000 mm (39.4 in) 1300 mm (51.2 in)	1000 mm (39.4 in) 1300 mm (51.2 in)
<b>crosshead travel</b>			
<b>Space between columns</b>	100 mm (3.94 in)*	340 mm (13.4 in)	420 mm (16.5 in)
<b>Frame height</b>	<i>Standard</i> 1300 mm (51.18 in) <i>Extended</i> 1600 mm (63.0 in)	1617 mm (63.7 in) 1917 mm (75.5 in)	1770 mm (69.7 in) 2070 mm (81.5 in)
<b>Frame width</b>	642 mm (25.28 in)	681 mm (26.81 in)	820 mm (32.3 in)
<b>Frame depth</b>	582 mm (22.91 in)	588 mm (23.15 in)	775 mm (30.5 in)
<b>Weight</b>	<i>Standard</i> 120 kg (265 lb) <i>Extended</i> 130 kg (287 lb)	120 kg (265 lb) 130 kg (287 lb)	325 kg (716 lb) 345 kg (761 lb)
<b>Power requirement</b>	Single-phase 200-240 V AC, 3 Amp 50/60 Hz, 600 W	Single-phase 200-240 V AC, 3 Amp 50/60 Hz, 600 W	Single-phase 200-240 V AC, 6 Amp 50/60 Hz, 1600 W

\* For single-column load frame this measurement denotes the distance from the center of the clevis to the front of the column cover.

