Vlastnosti polymerních materiálů vhodných pro technologii FDM

Michal Antel

Bakalářská práce
2020

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

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

Jméno a příjmení:	**Michal Antel**
Osobní číslo:	**T17171**
Studijní program:	**B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Technologická zařízení**
Forma studia:	**Prezenční**
Téma práce:	**Vlastnosti polymerních materiálů vhodných pro technologii FDM**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Připravte vzorky technologií FDM z odlišných polymerních materiálů.
3. Změřte vybrané vlastnosti polymerních materiálů.
4. Vyhodnoťte a porovnejte výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

GRIESER, Franz. PLA vs ABS: Filaments for 3D Printing Explained & Compared. In: PLA vs. ABS. [online]. Německo: All3DP, 2014 Dostupné z: https://all3dp.com/pla-abs-3d-printer-filaments-compared/.
MALOCH, Jaroslav, Eva HNÁTKOVÁ, Milan ŽALUDEK a Petr KRÁTKÝ. Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Samples. Materials Science Forum. 2018, 919, 230-235. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.230. ISSN 1662-9752. Dostupné také z: https://www.scientific.net/MSF.919.230.
RYAN C.DIZON, John, et al. Additive Manufacturing: Mechanical characterization of 3D-printed polymers[online]. 2018.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Martina Hřibová, Ph.D.**
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně dne 17. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA

BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

…….
podpis studenta

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je charakterizovat základní typy materiálů, ze kterých se vyrábí filament pro FDM technologii 3D tisku.

V teoretické části jsou představeny aditivní technologie 3D tisku, požadavky na materiál a použití nejrozšířenějších filamentů. Dále jsou popsány vybrané mechanické zkoušky a způsoby pozorování strukturních vlastností materiálu.

Praktická část popisuje mechanické zkoušky provedené na trhacím stroji. Struktura materiálů byla pozorována metodou RTG difrakce. Chování materiálů při vystavení tepelným změnám bylo provedeno pomoci diferenciální skenovací kalorimetrie. Měření bylo prováděno na pěti typech filamentu. Výsledky byly vyhodnoceny a srovnány s hodnotami deklarovanými výrobci.

Klíčová slova: 3D tisk, Polymerní materiály, Filamenty, Mechanické zkoušky, RTG, DSC

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to characterize the basic types of materials used for filaments production for FDM technology of 3D printing.

The theoretical part introduces additive 3D printing technologies, material requirements and the use of the most common filaments. Selected mechanical tests and methods of characterization of the material structural properties are described.

The practical part describes mechanical testing performed on a tearing machine. The structure of the material was observed by X-ray diffraction. The behavior of the material exposed to thermal treatment was performed by differential scanning calorimetry. The measurements were performed on five types of filaments. The results were evaluated and compared with the values declared by the manufacturers.

Keywords: 3D print, Polymer materials, Filamens, Mechanical test, RTG, DSC

Poděkování:

Děkuji tímto mé vedoucí bakalářské práce paní doc. Ing. Martině Hřibové, Ph.D. za vedení, cenné rady, připomínky, vynaložený čas, ochotu a pomoc při měření práce. Také bych rád poděkoval panu Ing. arch. Martinu Hřibovi za informace a rady ohledně dané problematiky. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při měření mechanických vlastností. Mé poděkování patří mé rodině a blízkým za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD **9**

I TEORETICKÁ ČÁST **10**

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU **11**

1.1 HISTORIE 11

1.2 TYPY 3D TISKU 12

1.2.1 Stereolitografie (SLA) 12
1.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM) 12
1.2.3 Selective Laser Sintering (SLS) 14
1.2.4 Selective Laser Melting (SLM) 14
1.2.5 Binder Jetting (BJ) 15
1.2.6 Digital Light Processing (DLP) 16
1.2.7 Material Jetting (MJ) 16
1.2.8 Laminated Object Manufacturing (LOM) 17

2 MATERIÁLY PRO FDM TISK **18**

2.1 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU PRO FDM TISK 18

2.2 POŽADAVKY NA FILAMENT 18

2.2.1 Teplotní požadavky 3D tisku 19
2.2.2 Pevnostní požadavky 19
2.2.3 Strukturní požadavky 20

2.3 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY 21

2.3.1 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) 21
2.3.2 Polylaktid (PLA) 21
2.3.3 Polyethylentereftalát (PET) 23
2.3.4 Polyamidy (PA) 24
2.3.5 Akrylonitril-styren-akryl (ASA) 25
2.3.6 Polykarbonát (PC) 25
2.3.7 Flexibilní materiály 25
2.3.8 Speciální polymery 26
2.3.9 Podpůrné materiály 26

2.4 APLIKACE 3D TISKU 27

2.4.1 Stavebnictví 27
2.4.2 Výroba a prototypy 27
2.4.3 Medicína 28
2.4.4 Textilní průmysl 28
2.4.5 Automobilový průmysl 28
2.4.6 Výroba zbraní 28
2.4.7 Vesmírný 3D tisk 29
2.4.8 Enviromentální použití 29
2.4.9 Vzdělávání a výzkum 29
2.4.10 Domácí tisk 29

3 VYBRANÉ METODY ZKOUŠEK FILAMENTU **30**

3.1 DIFERENCIÁLNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC) 30
3.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA 32
3.3 OHYBOVÁ ZKOUŠKA 34
3.4 RENTGENOVÁ ANALÝZA 36
II PRAKTICKÁ ČÁST 38
4 CÍL PRÁCE 39
5 PŘÍPRAVA A ZKOUŠKY VZORKŮ 40
5.1 TECHNICKÉ LISTY POUŽITÝCH FILAMENTŮ 40
5.1.1 ABS-T 40
5.1.2 PLA 40
5.1.3 PETG CF 41
5.1.4 PETG-XT 41
5.1.5 Smartfil Nylstrong 41
5.2 POUŽITÉ METODY ZKOUŠEK 42
5.2.1 RTG difrakční analýza 42
5.2.2 Diferenciální skenovací kalorimetrie 42
5.2.3 Tahová zkouška filamentu 42
5.2.4 Ohybová zkouška tělísek 43
6 VÝSLEDKY A DISKUZE 44
6.1 VÝSLEDKY ANALÝZY RTG 44
6.1.1 ABS-T 44
6.1.2 PLA 44
6.1.3 PETG CF 45
6.1.4 PETG-XT 45
6.1.5 Smartfil Nylstrong 46
6.1.6 Vyhodnocení RTG analýzy 46
6.2 VÝSLEDKY DSC 47
6.2.1 ABS-T 47
6.2.2 PLA 48
6.2.3 PETG CF 48
6.2.4 PETG-XT 49
6.2.5 Smartfil Nylstrong 50
6.2.6 Vyhodnocení diferenciální skenovací kalorimetrie 50
6.3 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY 51
6.3.1 ABS-T 51
6.3.2 PLA 52
6.3.3 PETG CF 52
6.3.4 PETG-XT 53
6.3.5 Smartfil Nylstrong 53
6.3.6 Vyhodnocení tahové zkoušky 54
6.4 VÝSLEDKY OHYBOVÉ ZKOUŠKY 54
6.4.1 ABS-T 55
6.4.2 PLA 55
6.4.3 PETG CF 56

6.4.4 PETG-XT 57
6.4.5 Smartfil Nylstrong 57
6.4.6 Vyhodnocení ohybové zkoušky 58
ZÁVĚR 59
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 60
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 65
SEZNAM OBRÁZKŮ 68
SEZNAM TABULEK 70

ÚVOD

Technologie 3D tisku je v dnešní době rychle rozvíjející se technologii. 3D tisk se stává cenově dostupnější k získání prototypů či konečných výrobků oproti konvekčním způsobům. Velké firmy s výrobou plastových či kovových dílů vidí budoucnost aditivní technologii, která zajistí rychlou výrobu prototypů součástek nebo konečných výrobků bez náročnosti na formu či jiné nákladné stroje. V posledních letech došlo k rozšíření 3D tiskáren díky cenové dostupnosti do domácího prostředí. Domácí 3D tiskárny nezaberou mnoho místa a může je obsluhovat téměř kdokoliv.

Rozvoj 3D tisku a jeho uplatnění roste, proto bylo nutné charakterizovat základní typy materiálů a specifikovat jejich možnosti a omezení použití.

Obsahem této práce je představení technologii 3D tisku od historie až po současné využití ve spoustě průmyslových odvětví. Představí polymerní materiály běžně používané při tisku a jejich využití. Pro vhodně zvolený materiál na výrobek jsou v této bakalářské práci definovány požadavky na filament. V praktické části této práce jsou vypsány důležité hodnoty z technických listů filamentů, specifikovány podmínky analýzy RTG a DSC a mechanických vlastností zkoušek na ohyb a tah. Pomocí domácí 3D tiskárny byly vytvořeny vzorky, které byly následně společně s filamenty zkoušeny. Pomocí těchto metod byly charakterizovány vlastnosti materiálu a porovnány s vlastnostmi deklarovanými výrobci. Charakterizace vlastností jednotlivých filamentů umožňuje jejich výhodnější využití.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

3D tisk často označovaný jako aditivní výroba spočívá v návrhu objektu pomocí softwaru a vytvoření objektu 3D tiskárnou. 3D tiskárna přidává postupně vrstvy materiálu plastů, prášků, vláken, papírů a jiných hmot, dokud se nevytvoří tvar objektu. [1]

1.1 Historie

První zmínka o 3D tisku je z konce osmdesátých let 20. století v Japonsku, dříve nazývaná technologií Rapid Prototyping. Technologie byla vytvořena za účelem levného a rychlého vytvoření modelu průmyslových výrobků. První patent principu 3D tisku vyšel roku 1986, a to pro stereolitografický přístroj Chaelese Hulla. [2]

Během následujících let vznikaly nové technologie 3D tisku. Roku 1992 byla představena technologie Selektivního laserového slinování (SLS). Tato technologie laserově spéká práškový materiál místo tekutého polymeru. Dále vznikly technologie LOM (Laminated Object Manufacturing), SGC (Solid Grounding Curing) a další. Tyto technologie byly pro domácí použití příliš drahé a nedokonalé. V devadesátých letech 20.století se mimo prototypy již vývoj 3D tisku zajímal o výrobu nástrojů a konečných výrobků. Vznikly technologie Rapid Tooling (RT), Rapid Casting (RC) a Rapid Manufacturing (RM). [2,3]

Roku 1999 byl poprvé vytištěný lidský orgán, který byl úspěšně implantován do lidského těla. Vytištěný implantát do močového měchýře byl potažen živou tkání a tělo jej přijmulo bez problémů. V následujících letech lékaři vytiskli funkční ledviny či náhradní končetiny. Roku 2004 Adrian Bowyer vytvořil projekt RepRap open source, tedy návodů otevřených veřejnosti pro sestavení, vylepšení 3D tiskáren a jejich reprodukci. Díky tomuto projektu mohli uživatele na svých tiskárnách vytisknout součásti 3D tiskárny nebo celou tiskárnu. Později se z RepRap tiskáren odvíjela komerční produkce. V roce 2000 byla představena technologie SLM (Selective Laser Melting), ovšem její komerční využití nastalo až roku 2006 a to kvůli možnosti tisku předmětu z více materiálů. Jako první využila společnost MakerBot projektu RepRap a začala produkovat tiskárny pro domácí využití. [3]

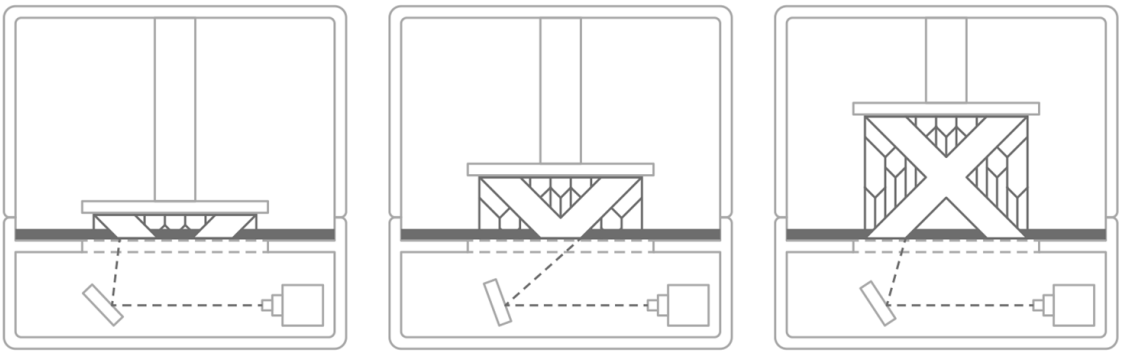
Technologie 3D tisku se stále rozvíjí. Již byly zkonstruovány bezpilotní letouny či vozidla vytvořené primárně 3D technologií. Dnes je možné tisknou nepřeberné množství materiálů například kovy zlata a stříbra k výrobě šperků či betonu k stavbě budov. Medicína využívá 3D tisku pro zubní protézy, robotické končetiny, kostní náhrady a jiné implantáty. [3]

1.2 Typy 3D tisku

1.2.1 Stereolitografie (SLA)

SLA je jedna z prvních technologii 3D tisku. Technologie je založená na naplnění nádoby tekutým tiskovým materiálem a z průhledného dna nádoby vyzařuje UV (ultrafialové) světlo, které způsobí ztuhnutí (zesíťování) malé vrstvy materiálu na spodní části posuvného mechanismu. Tahle část se posunuje směrem nahoru a UV laser může vytvrdit další vrstvu. Tyto cykly se opakují až do kompletní podoby tištěného objektu. Jako tiskový materiál se používá fotopolymer. Pro dohotovení výrobku je obvykle nutné dodatečné síťování pomocí UV pro získání maximální pevnosti materiálu. Zároveň je nutné vyčistit nádobu od neztvrdlé pryskyřice pomocí rozpouštědla například izopropylalkohol. [1,4,5]

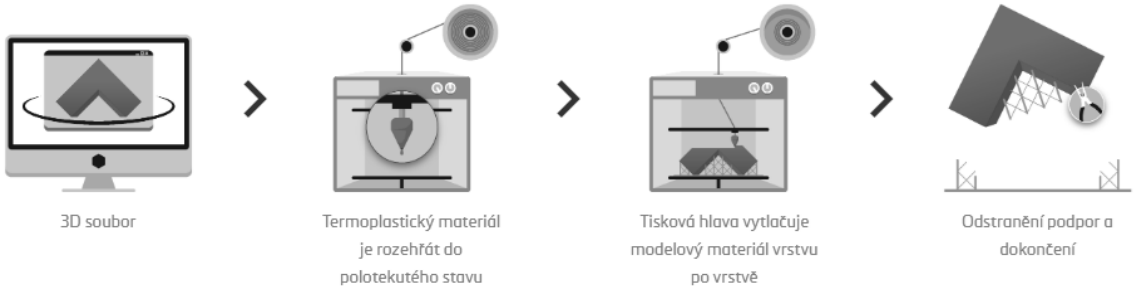
Běžně se technologie SLA využívá pro výrobu malé součástky i dnes. Je to jedna z technologii 3D tisku pro vysoce kvalitní výrobek. Cena tiskáren se v současnosti pohybuje od 1000 eur pro levné verze stolní tiskárny až po několik desítek tisíc eur pro průmyslové profesionální stroje. Tiskárna Mammoth dokáže vytisknout součástku větší než 2 metry. [4]



Obr. 1 Princip tisknutí výrobků technologii SLA rozmítacím zrcátkem [5]

1.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM je nejrozšířenější aditivní technologii 3D tisku na světě, hlavně díky cenové dostupnosti. Někdy je tato technologie označována jako FFF, tedy Fused Filament Fabrication. Principem technologie je nanášení roztaveného polymerního materiálů vytlačovací hlavou na souřadnicemi zvolené místo na podložku tiskárny. Po dokončení základní první vrstvy se vytlačovací tryska posune dle souřadnic v prostoru a vrstvu výše a nanáší materiál na vrstvu předešlou. Tento proces se opakuje, dokud není předmět hotový. [5,6]



Obr. 2 Postup výroby objektu technologii FDM [7]

Nejběžnějším vytlačovaným materiálem jsou termoplasty zpracované do tenké struny tedy filamentu. Výhodou je velký výběr polymerního materiálů a barev výsledného výrobku, rychlost a jednoduchost. Při tisku technologii FDM je nutné zajistit požadavky, které specifikují materiál. Je nutné zvolit správnou teplotu extruderu a podložky tiskárny, rychlost pohybů a rychlost vytlačování filamentu a také sílu ventilátoru chlazení. Běžná velikosti plochy pro tisk FDM je 200 x 200 x 200 mm u domácích tiskáren, u průmyslových může být až 1000 x 1000 x 1000 mm. Výška jedné vrstvy je 50 až 400 mikrometrů. Čím menší výška vrstvy bude, tím může být dosažen hladší povrch. Rychleji se ovšem vytiskne objekt s vyššími vrstvami. [6]

Během chladnutí výtisku dochází ke smršťování materiálu daného tepelnou roztažností použitého materiálu. Pokud není optimalizované chlazení dle typu materiálu, hrozí deformace výrobku. Deformaci výrobku lze předejít například konstrukcí výrobku. Ostré rohy a masivní bloky materiálu více tíhnou k deformaci. Další deformace tištěného objektu vzniká například nepřilnavostí první vrstvy k podložce tiskárny nebo rychlostmi tisku. [6]

U tisku FDM je velmi důležitá přilnavost mezi nanesenými vrstvami. Tryska vytlačí termoplast a zároveň nataví předchozí vrstvu. Pevnost takového spoje je vždy menší než pevnost samotného materiálu, což je třeba brát v potaz při návrhu výrobku. [6]

Pro výtisk složitějších členitých objektů je možné použit techniku vytlačování podpůrného materiálu, který má funkci nosného materiálu během tisku a následně se odstraní rozpouštědlem. [1,5] Podpěry v podobě druhotného polymerního materiálu, který se po dokončení odstraní, drží materiál výrobku například v převisech. Povrch výrobku, kde byl podpůrný materiál použit, má horší kvalitu. Použití podpůrného materiálů prodražuje výrobek, kvůli časové náročnosti a ceně filamentu podpěrného materiálu. [5,6]

Pro snížení spotřeby materiálu, doby tisku a zamezení deformací tištěného objektu se výrobky konstruují jako skořepina a výplň v podobě voštin či žeber způsobí neúplnou výplň. [6]

Technologie FDM je vhodná pro výrobu prototypů a funkčních dílů za nízkou cenu a krátkou dobu. V porovnáním s ostatními výrobními technologiemi má FDM nejnižší rozměrovou přesnost, za to odpovídající rychlosti tisku. Na výrobcích jsou známky vrstev, které je možné minimalizovat dalším zpracováním. Dokončovací práce jako leštění, tmelení, broušení, nátěry, sváření či pokovování, jsou voleny dle možností použitého materiálu. [6]

1.2.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Technologii SLS je aditivní technologii pro výrobu prototypů a konečných předmětů. Její princip spočívá ve spékání prášku. Materiál v prášku se z vyhřívaného zásobníku nanáší v tenké vrstvě stěrači na plochu desky 3D tiskárny. Na nanesenou vrstvu materiálu působí výkonný laser v místech budoucího objektu a slinuje v daném místě částice prachu první vrstvy. Po dokončení slinování první vrstvy nanesou stěrače ze zásobníku další souvislou vrstvu materiálu a proces slinování se opakuje. Slinuté vrstvy tvoří celistvý objekt. Jako podpůrný materiál u této technologie funguje neslinutý práškový materiál, kvůli tomu je možné vytvářet komplikované členité objekty. [5,8] SLS technologie se stává postupně cenově dostupnější, hlavně díky propadnutí patentu. [5]

Pro tisk SLS je vhodným materiálem polyamid s příměsí železa, wolframu, uhlíku či wolframu. Technologie se využívá pro pohyblivé součástky, sochy, prototypy či finální produkty. [8]

1.2.4 Selective Laser Melting (SLM)

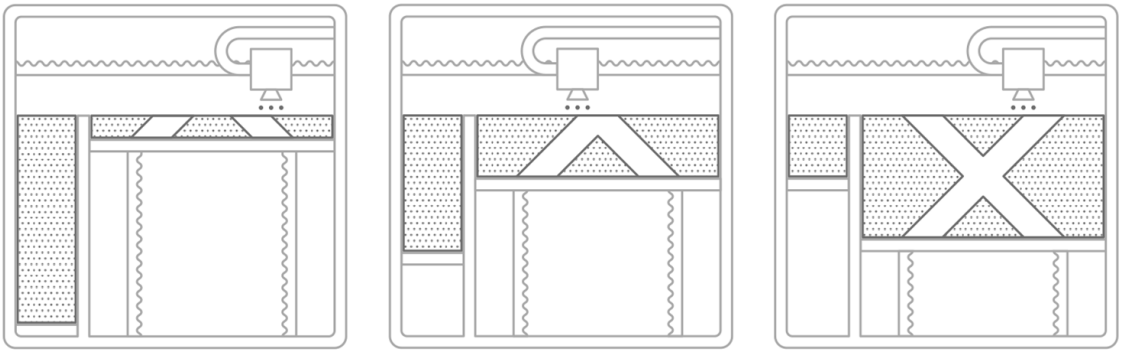
Technologie SLM spočívá, stejně jako SLS, ve spékání práškového materiálu laserem. V případě SLM je materiálem kovový prášek, který se přímo slinuje. Nejčastěji se využívá prášek hliníku, nerezové oceli a titanu. Stejně tak jako SLS nanáší materiál na podložku 3D tiskárny ve velmi tenké vrstvě a laser způsobí slinutí v požadovaném místě. Velká výhoda je za malý čas vytvořený pevný objekt o složitých geometriích. Jeho rozměrová přesnost je udávaná na 0,1 mm. Je nutné ovšem počítat s materiálovým pnutím kovů během chladnutí. Díly jsou po tisku dále zpracovávány na desce 3D tiskárny pro zamezení deformací. Technologie je využívaná v leteckém a automobilovém průmyslu nebo třeba v zubním lékařství. Ve srovnání s ostatními technologiemi je SLM jedna z nejdražších. [5]

1.2.5 Binder Jetting (BJ)

Pro tisk materiálů jako jsou kovy, písky, keramika je vhodná technologie Binder Jetting. Technologie spočívá v nanášení malých kapiček pojiva na práškové lože. Pojivo nanesené v místě budoucího objektu slepí práškové částečky a tvoří vrstvu po vrstvě podobu objektu. [5,9]

Stejně jako u technologie SLS nanese stěrač tenkou vrstvu prášku na plochu 3D tiskárny. Následně nad plochou projíždí trysková jednotka, která selektivně nanáší kapky pojiva a spojuje částice prášku. Po dokončeni první vrstvy se plošina posune dolů a stěrač nanese novou práškovou vrstvu ke slepení pojivem. Po dokončení požadovaných vrstev pro tisk, zůstává výrobek v prášku a nechá se vytvrdit pro získání pevnosti. Poté se objekt vyjme stlačeným vzduchem a očistí se od přebytečných práškových částic. [9]

Velikost každé kapičky je 80 mikrometrů, což zajistí i dobrou kvalitu barevného tisku barevným pigmentem. Dle použitého práškové materiálu je důležité i dodatečné tepelné zpracování. Kovové části žíhat, barevné výrobky je možné natřít akrylem pro prodloužení životnosti barev. Bez následného zpracování má výrobek špatné mechanické vlastnosti. Vytisknuté pískové formy pro odlévání je obvykle možné použít ihned. [5,9]



Obr. 3 Princip tisku výrobku technologii BJ [5]

Pro celobarevný tisk se využívá prášek na bázi sádry či PMMA s tekutým pojivem. Tisk je doplněný od druhou tryskovou hlavu s pigmentem. Písek je vhodný s pojivem pro rychlé zhotovení forem a jader s velkou přesností na detaily. V případě tisku kovových materiálů je kovový prášek vázán polymerem, kvůli kterému má výrobek špatné mechanické vlastnosti. Vytvrzený a očištěný výrobek od přebytečného prachu je nutné vložit do pece, kde se odstraní pojivo. Po odstranění pojiva má objekt malou hustotu. Jeho mechanické

vlastnosti se zlepší po infiltraci dutin bronzem, což vede k nižší pórovitosti a zvýšení pevnosti. Dále je možné slinování ve vysokoteplotní peci, kde dojde ke slinování. [5]

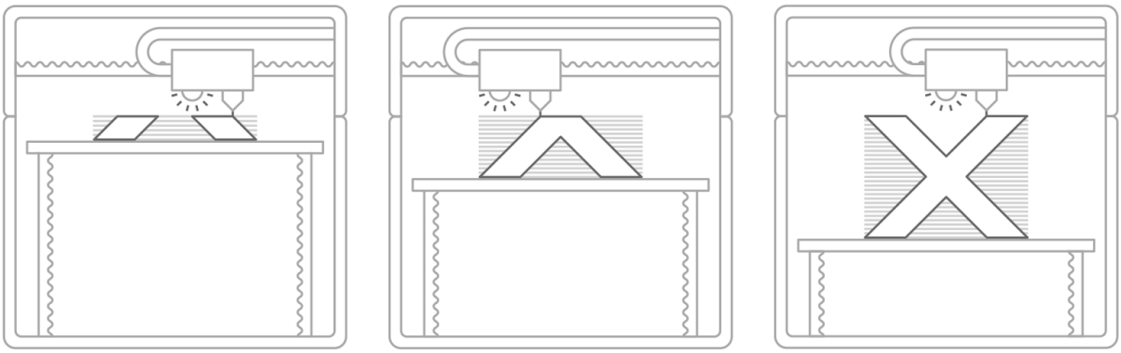
Stroje technologie Binder Jetting jsou objemné ve srovnání s ostatními stroji pro 3D tisk, proto je vhodné efektivně využít celý prostor pro tisk větším množstvím objektů současně. [9]

1.2.6 Digital Light Processing (DLP)

Stejně jako u technologie SLA tiskne DLP pomocí světelných paprsků. V případě DLP jde o projektor, který zpevní celou jednu vrstvu zábleskem najednou. Každá tato vrstva je tvořená z obrazu, který se skládá ze malých pixelů. Na rozdíl od SLA, kde je použit laserový paprsek, je u této technologie použita dioda LED nebo lampa UV (Ultra Violet). [5]

1.2.7 Material Jetting (MJ)

Technologie Material Jetting vznikla na principu inkoustové tiskárny. Narozdíl od inkoustové tiskárny, tryska této 3D tiskárny tryská stovky malých kapiček fotopolymeru lineárně, které poté vytvrdí UV světlem. Po vytvrzení jedné vrstvy se podložka tiskárny sníží a tloušťku jedné vrstvy a cyklus se opakuje, až do konečné podoby objektu. [5]



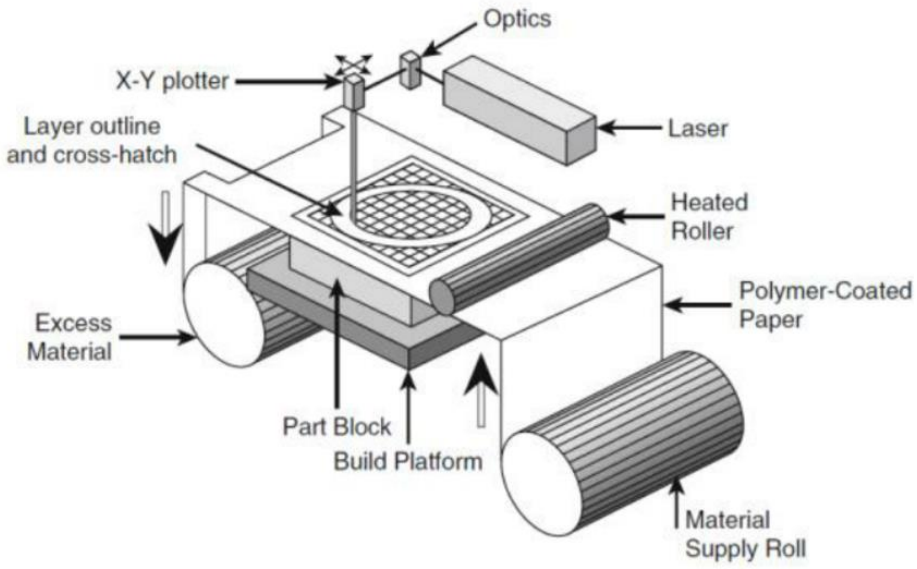
Obr. 4 Princip tisku předmětu technologii MJ [5]

Oproti jiným aditivním technologiím 3D tisku se objekt tiskne bodově nikoliv slinováním či nanášení filamentu. Tiskárny typu MJ ukládají materiál rychlým lineárním způsobem a jsou schopny tisknout několik objektu naráz bez vlivu na rychlost sestavení. Důležité je správné uspořádání objektů v prostoru, které zajistí rychlejší výrobu objektů. Objekty tištěné technologii MJ vyžadují podporu, která se tiskne současně a následně se po tisku odstraní pomocí rozpouštědel. Velkou výhodou MJ technologie je tisk vícebarevných objektů. [5]

1.2.8 Laminated Object Manufacturing (LOM)

LOM je technologie lepení vrstev folie plastu, papíru ale i kovu na sebe. Umožňuje tisk velkoplošných objektů za relativně nízké náklady. Technologie LOM není tak rozšířená jako třeba SLA, kvůli nižší rozměrové přesnosti. Dle použitého materiálu je nutné další zpracování. V případě kovu musí následovat slinování. V případě papíru je nutno zamezit absorbovaní vlhkosti nátěrem či lakem. Vlhkost v papíru by vedla k bobtnání výrobku a jeho rozměrové nestabilitě. Nejčastěji používaný je levný recyklovatelný papír. Dále vhodný je deska slepená z práškového kovu, který se dále slinuje k nabytí lepších vlastností. [10]

Proces laminování začíná v tenké folii navinuté na válci. Tloušťka této folie odpovídá tloušťce jedné vrstvy tisku. Folie opatřená lepidlem se se rozmotá na plošinu tiskárny a upne se na druhém konci od válců k navíjení odpadního zbytku. Na plochu tiskárny působí laserový paprsek, který sleduje obrysy dané vrstvy výrobku. Po laminování jedné vrstvy laminovacím válcem následuje pohyb plochy 3D tiskárny dolů a posunutí folie válci a řezaní další vrstvy. Opakované vrstvení této fólie vzniká výrobek. [10]



Obr. 5 Schéma tisku pomocí technologie LOM [11]

2 MATERIÁLY PRO FDM TISK

Není možné určit, který materiál pro tisk technologii FDM je nejlepší. Každé použití výrobku si žádá jiné vlastnosti tiskového materiálu. Dříve byly pro FDM tisk k dispozici pouze dva polymerní materiály PLA (Polylaktid) a ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). V dnešní době je na trhnu nespočet materiálů pro použití na FDM tisk. Jak polymery čisté, tak kompozitní materiály s různými příměsi, jsou hojně využívány ve většině průmyslových odvětvích. [12]

2.1 Charakteristické vlastnosti materiálu pro FDM tisk

Materiály jsou běžně tříděny podle požadavků na mechanickou odolnost, vzhledovou kvalitu a možnosti výroby. Aby bylo možné zvolit materiál pro daný výrobek vhodně, je důležité zohlednit všechny jeho vlastnosti. [12]

2.2 Požadavky na filament

Typ filamentu pro FDM tisk se volí, dle využití výrobku a jeho požadovaných vlastnostech:

Náročnost tisku: Určuje, jak komplikované je z materiálu tisknout. Do této kategorie patří přilnavost první vrstvy k podložce tiskárny, rychlost a přesnost tisku.

Vizuální kvalita: Hodnotí, jak dobře vypadá vytisknutý hotový objekt.

Izotropie (přilnavost) vrstev: Vypovídá o přilnavosti jednotlivých vrstev materiálu. Špatnou přilnavostí mezi jednotlivými vrstvami se označuje jako delaminace. Čím lepší izotropie je, tím je více stejnorodý předmět.

Recyklovatelnost: Vypovídá o recyklovatelnosti či rozložitelnosti materiálu.

Mechanické vlastnosti: Udává, kterým mechanickým vlastnostem musí výrobek odolávat. Jedná se především o odolnost proti tahání, maximální délka protažení objektu před přetržením, odolnost proti náhlému nárazu a maximální možná teplota, které je možný výrobek odolávat, než začne měknout a deformovat se.

Odolnost proti dalším vlivům: Odolnost proti slunečnímu záření a venkovním podmínkám, vlhkosti, otěru a dalším. [12]

2.2.1 Teplotní požadavky 3D tisku

Teplota je jedním ze zásadních faktorů pro správný tisk FDM. Důležitá je teplota tání (T_m), skelného přechodu (T_g), viskozitního toku (T_f) polymerního materiálu a dále teploty nastavené na 3D tiskárně jako teplota trysky a podložky 3D tiskárny. [13]

Teplota skelného přechodu se vyskytuje u amorfních i semikrystalických termoplastů. Pod touto teplotou se materiál nachází ve sklovitém stavu a polymer je tvrdý, křehký a vykazuje vysoký modul pružnosti. Naopak nad T_g je ve stavu kaučukovitém a nabývá na pružnosti. [13]

Pokud se bude amorfní polymer dále zahřívat, tak postupně ztrácí své elastické vlastnosti. V bodě T_f přichází o elastické vlastnosti úplně a mění se na taveninu. [14]

Semikrystalický termoplast také měkne nad teplotou T_g až do bodu teploty tání. Při této teplotě dochází k rozpadu krystalické struktury a polymer přestupuje z tuhého měkkého stavu do kapalného. [14]

Pro tisk technologii FDM je důležité znát tyto teploty. Nad teplotou tání a viskozitního toku je polymer vhodný pro zpracování, proto se nastavuje tryska 3D tiskárny nad tyto teploty. Teplotu skelného přechodu je dobré znát pro nastavení teploty tiskové podložky, která se nastavuje nižší, než je teplota T_g tisknutého polymeru, z důvodu snížení rizika deformace výrobku. [13]

2.2.2 Pevnostní požadavky

Pevnost tištěných objektů je možné zajistit několika způsoby a je nutné zvolit správný. Nejjednodušší způsob pro tisk pevnějších výrobků je upravit procento výplně, výšky vrstev a šířku vytlačování profilu. [15]

Je jisté, že při 100 % výplni je dosažena nejvyšší dosažitelná pevnost. Ovšem takové plnění není efektivní na výrobu. Výrobek je těžký a tiskne se příliš dlouho. Je proto vhodné výplň optimalizovat žebry. Při 50 % plnění ovlivní množství žeber pevnost více než tloušťka menšího počtu žeber. Zásadní pro pevnost je i tloušťka obvodu výrobku, z důvodu, že většina namáhajících sil bude vždy působit z vnějšku. [15]

V případě zvětšení tloušťky vrstvy tisku, tím že se zvýší vytlačovací tlak, se zrychlí tisk objektu, zvýší pevnost jedné vrstvy. Tenčí vrstvy naopak mají lepší kvalitu povrchu, kvůli menším mezerám. Výška vrstvy 0,1 mm zajistí i lepší natavení k předchozím vrstvám.

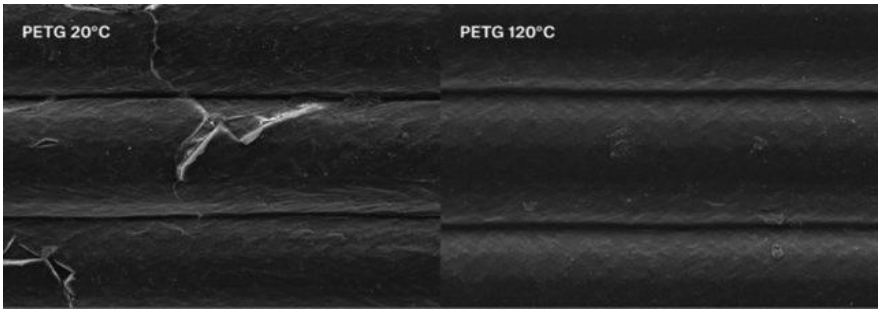
Natavení vrstev mezi sebou má zásadní vliv na pevnost. Proto je vhodné optimalizovat i chlazení tisku. Pokud materiál a geometrie výrobku umožní tisk bez chlazení, je vhodné tisknou bez něj. Chlazení snižuje natavení k předchozí vrstvě a tím i zhoršuje pevnost výrobku. U některých materiálů může absence chlazení způsobit zhoršení kvality povrchu výrobku. [15] Způsob a parametry zpracovaní mají velký vliv na pevnost v tahu a ohybu. V případě tenké vrstvy a vysoké teploty zpracování roste mechanická odolnost, ale hrozí větší deformace během tisku. Je proto nutné optimalizovat chlazení. [16]

2.2.3 Strukturní požadavky

Vnitřní struktura polymeru ovlivňuje tepelnou a mechanickou odolnost. Většina používaných materiálů pro 3D tisk jsou polymery s dlouhými opakujícími se molekulárními řetězci. Struktura polymeru je buď amorfní (chaoticky uspořádaná) nebo semikrystalická (částečně uspořádaná). Většina tištěných objektů je amorfní. Nahodilá struktura polymeru negativně ovlivňuje odolnost, pevnost a pevnost v tahu. Krystalické struktury jsou obvykle tvrdší a pevnější. [17]

Pro transformaci amorfní struktury do semikrystalické by bylo nutné, aby teplota dosáhla bodu tání. Při teplotách nad teplotou tání se uvolňují molekulární struktury a molekuly se začnou volně pohybovat. Při teplotách pod skelným přechodem jsou molekuly příliš tuhé na pohyb. [17]

Některé polymery je možní žíhat a dosáhnout tak na povrchu tištěného objektu teploty tání, kdy je vytištěný objekt stálý na tvar, ale jeho povrch je měkký, což umožní na molekulární úrovni změny zlepšující jeho strukturální stabilitu. Žíháním se sloučí tiskové vrstvy a daný objekt zpevní. Materiál se během žíhaní smršťuje a deformuje, je proto důležité najít optimální dobu a teplotu žíhání. [17]



Obr. 6 Výrobek z materiálu PETG před a po temperování [15]

2.3 Používané materiály

2.3.1 Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

Akrylonitrilbutadienstyren je amorfní termoplastický kopolymer, který se průmyslově vyrábí ze 3 monomerů – akrylonitrilu (10-30 %), butadienu do 50 % a styrenu (45-70 %). Akrylonitril zajišťuje chemickou odolnost. Butadien získávaný jako druhořadý materiál při výrobě ethylenu se přidává pro zlepšení houževnatosti a snadná zpracovatelnost ABS je umožněna díky monomeru styrenu. [18,19]

ABS materiál je teplotně stálý při nízkých i vysokých teplotách a dobře snáší i změny teplot. Je houževnatý, tuhý, pevný a snadno opracovatelný. Výhodou ABS je chemická odolnost proti kyselinám, zásadám a olejům, špatně odolává aromatickým a halogenovaným uhlíkům a alkoholům. Je zdravotně nezávadný a málo nasákavý. [19,20] Špatně vzdoruje povětrnostním vlivům, snadno hoří, ale některé typy ABS jsou samozhášivé. Není toxický ani karcinogenní. Výhodou je i téměř 100% recyklovatelnost. Mechanické, tepelné a další vlastnosti lze vylepšit přimícháním jiných polymerů např. PA, PBT, PC. [18] ABS je neprůhledný, ale je prodáván v široké škále barev použitím pigmentů. [20]

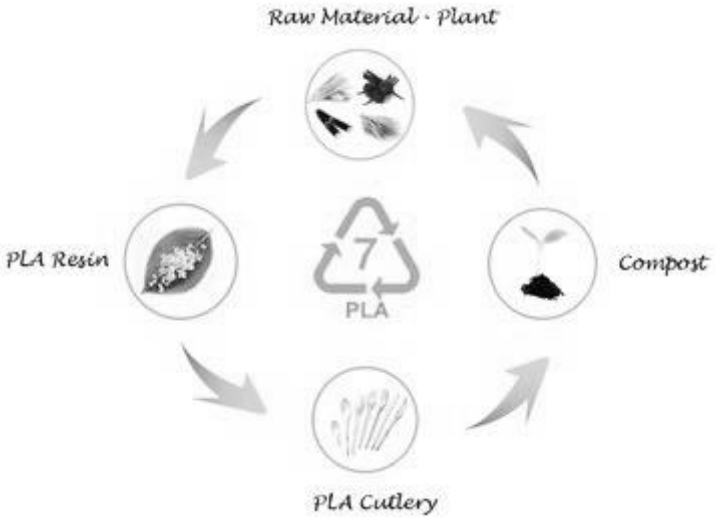
Díky fyzikálním vlastnostem ABS má široké využití v automobilovém průmyslu na kryty panelů, opěradel, i funkčních součástek, u kterých je ABS vhodnou náhradou za kov. [18] Dále je v elektrospotřebičích jako kryty vysavače, vnitřnosti lednice, kryty mobilních telefonů. Kancelářské potřeby, kufry, zahradní nástroje, hračky, stavebnice LEGO a řada sportovního vybavení je vyrobena také z materiálu ABS. [18,20,21]

ABS je jedním z nejpoužívanějších materiálů pro FDM tisk. Je vhodný pro tisk prototypů. Jeho teplota tání je kolem 210°C. Navíc je možné, kvůli vysoké zpracovatelské teplotě 270 °C, ABS dále opracovávat-brousit, vrtat, řezáním, lepením. [18,19] Při tisku je nutné zajistit teplotu extrudéru 220–275 °C a korigovat nárazové změny teploty okolí kvůli materiálovému pnutí během tisku. Kvůli smršťování je vhodné tisknou menší díly na vytemperovanou podložku 100–130 ºC. [19]

2.3.2 Polylaktid (PLA)

Na rozdíl od termoplastů vyrobených z ropy je semikrystalický, biodegradabilní PLA z obnovitelného zdroje. Vyrábí se ze škrobů tapioky, kukuřice, nebo cukrové třtiny. Suroviny se namelou a oddělí se škrob, který se smíchá s enzymy nebo kyselinou

a zahřejí se. Vznikne glukóza, která je schopna fermentovat na kyselinu mléčnou a ta dále polymerovat na PLA. [22]



Obr. 7 Cyklus PLA [22]

Mechanické vlastnosti PLA jsou v porovnání s ostatními termoplasty používanými pro FDM technologii dobré. [22] Teplotně stálý je do 55 °C a teplota tání je nižší než u ABS, tedy 180°C. PLA je hořlavý materiál. [22,23] Jeho barevné spektrum díky pigmentům může být široké. Navíc může být PLA poloprůhledný a lesklejší než ABS. V běžných uživatelských podmínkách je stálý, ale ve volné přírodě a při vystavení vlhkosti se rozkládá za cca 50 dnů. [23]

PLA se využívá ve zdravotnictví, například pro fixaci kostí jako kloubní implantáty, destičky, šrouby. Jelikož je biologicky rozložitelný i v těle, má velký potenciál v tkáňové medicíně. PLA je vhodný jako obalový materiál a je schválený pro kontakt s potravinami. PLA se vyskytuje i oboru stavebnictví v izolačních materiálech, kobercích. V textilním průmyslu je snaha polyesteru recyklovatelným, lehčím a prodyšnějším PLA. [22]

PLA je možno zpracovávat vytlačováním, vstřikováním, tvářením za tepla a také je velkým konkurentem ABS pro FDM tisk. [22] Díky nižší teplotě tání než další termoplasty pro FDM technologii, je možné jej tisknou při teplotě 180-210 °C. Podložku tiskárny není třeba temperovat, běžně stačí pokojová teplota. Nižší teplota zpracování sníží riziko pnutí. [23] Naopak vyšší teplota při zpracování způsobí degradaci materiálu. Proto bychom během tisku měli zajistit odvětrání i přes to, že není toxický, protože uvolňování částí degradovaných řetězců během tisku může být zdraví škodlivé. PLA je vhodné uchovávat v obalu a chránit před vlhkostí, kterou pohlcuje. [22]

2.3.3 Polyethylentereftalát (PET)

Nejhojněji používaný plast ve světě je polyethylentereftalát, používaný jak v semikrystalickém, tak amorfním stavu. PET je alifatický polyester získávaný polykondenzací monomerů kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. PET lze zpracovávat vytlačováním, tvarováním či spřádat do vlákna. Často se využívá možnosti směsí s jinými termoplasty a epoxidy pro zlepšení požadovaných vlastností. Z polymerů je to polyethylen, polypropylen, polykarbonát akrylonitril-butadien-styren a z epoxidu polyesterové a fenolické pryskyřice, elastomery a kaučuky. [24,25]

PET má velice dobré mechanické, chemické a tepelné vlastnosti. Je odolný proti mechanickému poškození nárazy. Je odolný proti slabým kyselinám, olejům, alkoholům a rozpouštědlům. Dle typu zpracovávání může být průhledný nebo tónovaný v nejrůznějších barvách. PET lze využívat v rozsahu teplot 60-130 °C. Má výborné izolační vlastnosti jak proti plynům, tak proti vlhku. Je schválený pro kontakt s potravinami a je vhodný i do mikrovlnné trouby. Jeho nízká hustota, transparentnost a odolnost proti rozbití z něj dělá konkurenta pro anorganické sklo. PET je nejvíce recyklovaný plast vůbec. Z recyklátu se vyrábí nepotravinářské výrobky, flísové mikiny, koberce, přikrývky. Má menší tvarovatelnost, proto je třeba pro 3D tisk využít glykolu pro vytvoření kopolymeru s PET. Glykol zajistí nižší teplotu tání a lepší zpracovatelnost. Výsledná směs se označuje PETG. [24]

Pro použití v automobilovém a leteckém průmyslu je vhodný PET modifikovaný polyolefiny vyztužený skelnými vlákny. Tato úprava zlepší tepelnou i rázovou vlastnost. Z PET, díky vynikajícím izolačním vlastnostem, se vyrábí mnoho obalového materiálu například lahve na minerální vodu a jiné sycené nápoje. Obzvlášť vhodný je jako obal pro kosmetiku, průhledné folie, či krabičky na jídlo do mikrovlnné trouby. Lepící pásky a tkané filtry pro oleje jsou také z PET. Tkaniny tkané z PET nebo bavlněné s příměsí PET jsou lehké, pevné na přetržení a odolné proti protažení. Využití též našel v elektronickém průmyslu na elektrorozvaděče, pojistkové skříně, fotovoltaické panely. [24]

PET je možné vstřikovat, vyfukovat do tvaru PET lahví, vytlačovat do folii. Přidáním glykolu během polymerace vznikne kopolymer PETG (polyetyléntereftalát – glykol), který je optimální pro 3D tisk. PETG vyniká oproti ABS a PLA snazším tiskem, menším smrštěním při tisku, vyšší pevností. Po správném nastavení tiskárny, se jedná o nejjednodušší materiál pro tisk. Doporučená teplota extruderu při tisku je 240 °C a podložka vyhřívaná

na 100 °C. [25] Uhlíková vlákna přidávaná do PETG zvýší tuhost a odolnost vůči nárazům i za nízkých teplot. Tyto materiály s příměsí až 20 % uhlíkových vláken se označují PETG/CF (polyetyléntereftalát – glykol/carbon fiber). Materiál vyztužený uhlíkovými vlákny je abrazivnější než nenaplněné materiály, takže způsobí opotřebení trysky. Proto je vhodné použít kvalitnější trysku z kalené oceli. PETG/CF je chemicky odolnější a asi 3krát méně navlhavý než ABS. [26]

2.3.4 Polyamidy (PA)

Polyamidy je široká skupina syntetických polyamidů s dlouhými řetězci, kde se alespoň 85 % amidových vazeb připojí ke dvěma alifatickým skupinám. Polyamidy mají mnoho obchodních názvů. Jeden z prvních vyráběných polyamidů je polyamid 6 s komerčním označením Nylon 6 či Silon. Vyrábí se z ε-kaprolaktamu či kyseliny-aminokapronové. Dále známe polyamidy 6,6, polyamid 4 či 11. Jejich odlišnost spočívá hlavně v použití odlišných monomerů a jejich kombinací, což ovlivňuje vlastnosti výsledných materiálů. [27]

Jedna z nejlepších vlastností polyamidů je pevnost v tahu. Oproti ostatním termoplastům používaným při FDM tisku jsou výrazně pružnější a lépe odolávají nárazům a mají velice dobrou pevnost, přičemž jsou chemicky odolné. Ve srovnání s ostatními používanými plasty na FDM tisk mají nejlepší odolnost proti UV záření. Jsou nehořlavé, ovšem silně nasákavé, což je výhodné při barvení syntetickými barvami. Pro zlepšení pevnosti se do polyamidů přidává skelné nebo uhlíkové vlákno. [27,28]

Tam, kde je požadována vynikající pevnost v tahu, jsou polyamidy nejlepší volbou. S polyamidem se setkáme u padáků, výpletu tenisových raket, bezpečnostních pásů v automobilech. Z vláken polyamidů se vyrábí lana, koberce, štětinky kartáčků, spacáky a stany. Polyamidy se používají jako textilní vyztuž v pneumatikách, dopravních pásech a hadicích. Z textilního průmyslu je vytlačil polyester, hlavně kvůli vyšší ceně polyamidů. [27]

FDM tisk z polyamidů je náročnější než u ostatních materiálů. Žádá si vyšší teplotu tisku, a to 220-270°C. Proti kroucení tištěného objektu při tisku je vhodné temperovat podložku tiskárny a zajistit pozvolné chlazení výrobku. Rychlá změna teploty výrobku či příliš vysoká rychlost tisku může způsobit deformace. [28]

Jedním ze speciální plniv do filamentů je uhlík. Uhlíková vlákna se přidávají do polymerů pro zlepšení mechanických vlastností. Směs polyamidových a až 20 % uhlíkovým vláknem, děla z filamentu houževnatý, tuhy materiál odolný na tah. Na trhu jsou filamenty PLA s až 15 % uhlíku, který dělá výrobek pevnější a tuhý. [29]

2.3.5 Akrylonitril-styren-akryl (ASA)

ASA byl vyvinut jako alternativa k ABS, přičemž je vhodný pro venkovní použití, protože má lepší tepelnou odolnost a je dlouhodobě odolný proti UV záření a povětrnostním podmínkám. Nevýhodou materiálu ASA je jeho cena a poměrně náročnější tisk oproti ostatním termoplastům. Zároveň se při tisku uvolňuje styren a jeho výpary jsou zdraví nebezpečné. Teplota tisku je 220-245 °C a teplota podložky tiskárny 90-110 °C. [30]

2.3.6 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je organickým materiálem získaným z celulózy, uhlí, zemního plynu a ropy. Je rázově houževnatý a dobře tepelně izoluje, přitom je lehký. Jeho mechanické vlastnosti jsou zachovány v teplotách od -40 °C až 135 °C. Je odolný povětrnostním vlivům a dobře propouští světlo. Nevýhodou je špatná chemická odolnost a špatná otěruvzdornost. PC se využívá na výrobu polykarbonátových desek na zastřešení teras a jako jiná náhrada skla. Používá se na výrobu optických médii jako je CD a DVD, elektroniky, světlometů aut a lékařských nástrojů. [31]

Polykarbonátové vlákno je silné a má možnost se ohýbat jako tvrdá pryž. Před tiskem je nutné PC sušit, v případě vlhké struny hrozí bubliny či bílé pásky na výrobku. Teplota extruderu bývá kolem 260 °C pro tisk PC. Jeho zahřívání je na rozdíl od PLA pomalejší, proto je nutné optimalizovat rychlost tisku a teplotu extruderu. PC se při tisku často kroutí, čemuž je možné předejít tiskem v tepelné komoře či příměsí ABS. Teplota podložky tiskárny by mít 120 °C. Filament PC je na komerční trh dodáván ve velkém barevném spektru ale i transparentní. [32]

2.3.7 Flexibilní materiály

3D tisk pryže je nemožný, tudíž byly vyvinuty následující alternativy. Měkčené PLA má vlastnosti podobné pryží, ale jeho odolnost otěru je malá. Na trhu je SBS (Styrene Butadiene Styrene), který je vhodný, pokud jsou požadovány vlastnosti pryže. Je trvanlivý, otěru vzdorný, elastický. Dále byly vyvinuty termoplastické elastomery například TPE

(termoplastický polypropylen) a TPU (termoplastický polyuretan), které mají daleko vyšší pružnost a odolnost proti tlaku a otěru. Navíc jsou odolné vůči olejům. Využívají se u pouzder na telefon, víček, podešví pro obuv, těsnění. Jejich výborná izolační vlastnost se využívá u oplášťování vodičů. Teplota tisku těchto flexibilních materiálů je okolo 230°C. [33]

2.3.8 Speciální polymery

Na trhu je obrovské množství materiálů vhodných pro 3D tisk, ze kterých je možno mít výrobek elektricky vodivý, průhledný, odolný mechanickému poškození, magnetický, vzdorující vysokým teplotám, samozhášivý, fosforeskující či svíticí ve tmě, voňavý po kávě či pivu. [34]

Jeden z nejdražší tiskových polymerních materiálů na trhu je PEEK (PolyEtherEtherKeton), který vyniká svými vlastnostmi. Snese dlouhodobé působení tepla až do 250 °C, má vynikající mechanické vlastnosti a odolnost vůči UV záření. Využívá se v leteckém a automobilovém průmyslu. [35] Další z nejdražších a velmi těžce tisknutelných polymerů pro tisk je Polytetrafluorethylen (PTFE). FDM tisk tohoto materiálu sníží množství odpadu, které se vytváří při tradičních technikách výroby předmětů z PTFE. Je nevodivý, hydrofobní a nepřilnavý a využívá se v chemickém, automobilovém a leteckém průmyslu. Kvůli vysoké ceně a komplikovaném tisku se PTFE pro 3D tisk příliš nepoužívá. [36]

Další možností, jak splnit požadované vlastnosti výrobků, je přidání dvou a více materiálů s různými polymerními materiály. Nejčastěji jde o částice materiálů na bázi kovů, dřev nebo papíru s polymery typu PLA, PVB (Polyvinylbutyral), ABS. [34,35] Pro výrobek průsvitný až průhledný, je PMMA (Polymethylmethakrylát) vhodný materiál. Kopolymer polyethylenu je vhodný pro funkční prototypy a mechanické součástky. Je tvarově stálý a lehce tisknutelný.[35]

2.3.9 Podpůrné materiály

Pro složitější členité součástky je nutné do návrhu konstrukce zařadit i podpůrné materiály. Převislé prvky jsou pro 3D tisk problémem, proto jsou používány podpory, pro zamezení deformaci či úplného zhroucení. Nejčastějšími materiály pro podpůrnou konstrukci jsou PVA (polyvinylalkohol) a HIPS (High Impact Polystyrene). [37]

PVA je měkký, biologicky rozložitelný polymer citlivý na vlhkost. Pro tisk je vyžadována teplota extruderu 185–200 °C. Navlhlé PVA může během tisku způsobovat nežádoucí bubliny. PVA jako podpůrný materiál je výhodný kvůli rozpustnosti teplou vodou a nevyžaduje další rozpouštědla pro odstranění z tištěného objektu. Jeho hlavní nevýhodou je vysoká cena. [38] PVA je kompatibilní s PLA díky podobným podmínkám tisku. [37]

HIPS je snadno tvarovatelný, obrobitelný a rázově odolný termoplast. Mimo 3D tisk se HIPS používá na kelímky pro horké nápoje, obložení chladniček, počítačové skříně, hračky a televizní součástky. V 3D tisku je vynikající jako podpůrný materiál při tisku ABS kvůli stejným tiskovým podmínkám a kvůli rozpustnosti HIPS v limonenu – rozpouštědle, získávaného z cyklických terpenů a v přírodě získatelného z citrusů. Vložením objektu do limonenu na 24 hodin vznikne výsledný výrobek bez nutnosti jiné mechanické úpravy. HIPS je běžně využíván i samostatně na 3D tisk, pokud je potřeba mít produkt lehce brousitelný, obrobitelný, trvanlivý, flexibilní a rozpustný. Teplota tisku by měla být 230-240 °C a teplota podložky tiskárny 100°C. Během tisku se uvolňuje styren, jež vydává slabší zápach. [37]

2.4 Aplikace 3D tisku

3D tisk se v dnešní době rozvinul do mnoha odvětví strojírenství, stavebnictví, medicíny, umění, designu a další. Aditivní technologie 3D tisku je již jednou z hlavních výrobních technologii. Stejně tak jako vynález parního stroje nebo knihtisku, může mít 3D tisk hluboký dopad na všechny výrobní odvětví. [39]

2.4.1 Stavebnictví

Vývoj 3D tisku ve stavebnictví má velký potenciál. Byly provedeny plány na tisk domů z vláknobetonu, které by měly pomoci v obnově obydlí pro oběti přírodních katastrof. Technologii pro stavebnictví podporuje NASA a její rozvoj není stále u konce. [40]

2.4.2 Výroba a prototypy

Od 80. let minulého století byl 3D tisk zaměřen na výrobu prototypů pro snížení výrobní doby. Přesnější technologie frézování a soustružení dílů je časově náročnější a pro prototypy příliš drahé. Vývoj 3D tisku umožnil výrobu prototypů, ale i konečných dílů rychleji, levněji a s dostatečnou kvalitou a přesností pro detail. Často jsou již technologie 3D tisku využívány pro rychlou výrobu forem na vyfukování, ražení či odlévání. [39]

2.4.3 Medicína

Od 90. let minulého století se začal 3D tisk využívat v oblasti lékařství. Lékaři si na modelu z 3D tisku mohli rekonstrukci operace vyzkoušet a být lépe připraveni na danou operaci. Dále se začaly využívat implantáty na míru pacienta s velkým úspěchem. Biologicky rozložitelné materiály mají v chirurgii velké využití jako dlahy, tkáně a jiné. V roce 2013 čínští vědci vytiskli a úspěšně aplikovali uši, játra ledviny ze živé tkáně. Roku 2014 byla vyrobená protetická ruka pro pětiletou Britku, díky mnoha dobrovolníků zapojených do sítě open-source. Tištěné náhrady a implantáty byly úspěšně aplikovány i mnohým zvířatům, například zobáky a kolenní implantáty. V roce 2020 3D tisk pomáhal s tiskem respirátorů a ochranných pomůcek pro boj s koronavirem. [39]

2.4.4 Textilní průmysl

Společnost Nike roku 2012 použila 3D tiskárny k prototypu a výrobě fotbalové boty. Společnost New Balance vyrábí boty pro sportovce díky 3D tisk na míru jednotlivce. Módní návrháři experimentují s 3D tiskem na bikin, šatů či brýlí. [39]

2.4.5 Automobilový průmysl

3D tisk se využívá i při výrobě aut. Boční zrcátka, vzduchové kanály, titanové komponenty pro výfuk a turbodmychadla byla tisknuta švédskými výrobci supersportu. V roce 2014 vzniklo první fungující vozidlo zkonstruováno, kromě pohonné jednotky, celé pomocí technologii 3D tisku. V leteckém průmyslu se 3D tisk využívá na komponenty či výrobu náhradních dílu pro letadla Eurofighter a Airbus A350, ve kterém je více jak 1000 dílů vyrobených 3D tiskem. [39]

2.4.6 Výroba zbraní

Od roku 2012 se pokouší různé společnosti o výtisk plnohodnotné zbraně. V dalším roce se výroba pistole povedla a její plány byly zveřejněny na internetu. Z důvodu možného zneužití vydaly americké úřady pokyn ke stažení z webových stránek. V roce 2014 byl Japonec odsouzen ke dvěma rokům vězení za výrobu zbraní a distribuci plánů pro výtisk pistole schopné vystřelit kulku. [39]

2.4.7 Vesmírný 3D tisk

V roce 2014 byla vyvinuta tiskárna pro použití na místech s nulovou gravitací. Aplikace ve vesmíru umožní vytisknout nástroje nebo náhradní díly přímo na kosmických stanicích. Druhá tiskárna byla vylepšena o recyklační zařízení pro snížení produkce odpadu na kosmické stanici. Další projekty zkoumají možnosti tisku lunárních základen pro osídlování planet. [39]

2.4.8 Enviromentální použití

V Bahrajnu byly 3D tiskem vytvořeny korálové útesy pro regeneraci poškozených mořských ploch. Pískovec má pro umělé útesy daleko lepší vlastnosti než beton. Má neutrální pH a je možné tvořit přirozenější útvary. [39]

2.4.9 Vzdělávání a výzkum

Díky 3D tisku se mohou studenti učit názorněji orgány v lidské těle, konstruovat předměty vytvořené pomocí školních softwarů, tisknou architektonické výrobky, topografické mapy a další. [39]

2.4.10 Domácí tisk

Díky opravdu rychlému rozvoji a miniaturizaci 3D tiskáren se stává tisk dostupný pro domácí použití za přijatelné peníze. K dispozici jsou na trhu jak zkompletované tiskárny, které stačí připojit k počítači a používat, tak i stavebnicové modely, které je nutné před použitím sestavit. Sestavení tiskárny nezabere více jak hodinu. Pro domácí použití jsou vhodné tiskárny SLA a FDM. Není třeba vlastnit složité softwary pro konstrukci dílů, internetová knihovna má spousty 3D modelů připravených k tisku. Domácí tiskárny se běžně využívají k tisku misek, šperků, váziček, dekorací, obalů a další. [41]

3 VYBRANÉ METODY ZKOUŠEK FILAMENTU

3.1 Diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC)

Jednou z nejrozšířenějších termických analýz je diferenciální skenovací kalorimetrie. Slouží k určení množství tepla, které je schopen materiál během chemických nebo fyzikálních změn uvolnit či absorbovat. Analýza se provádí za konstantního tlaku, kdy dochází k exotermické a endotermickému ději. Rozdíl vnitřních energii se jmenuje entalpická změna a je dána měrnou tepelnou kapacitou. Měrná tepelná kapacita udává množství energie, jež je potřeba k ohřátí o 1 °C jednogramový vzorek za konstantního tlaku. Zaznamenané množství tepla mezi vzorkem a referenčním materiálem známé jako teplený tok (Q) je přímo úměrné měrné tepelné kapacitě (c_p) a rychlosti ohřevu (v_h) hmotnosti vzorku (m). [42]

$$Q = c_p \cdot v_h \cdot m \text{ [W]} \quad (1)$$

DSC se využívá pro zjištění toho, co se děje v materiálu během změn tepla. [43] Výhoda této analýzy je velké rozpětí teplot od -100 do 650 °C dle typu přístroje. Měření probíhá v inertní atmosféře spolu s referenčním materiálem. Diferenciální skenovací kalorimetrii je možné zkoumat pevné tak i kapalné materiály. Pomocí této metody je možné zjistit teplota skelného přechodu, teplota tání, degradace, tepelná kapacita a krystalinita. Metodou lze ověřit kvalitu polymerního, biopolymerního a skelného materiálu a studovat jejich fázové přeměny. [42] Obvykle se metoda termických analýz využívá ve výzkumu, vývoji a průmyslu. Vyšetřovaný vzorek materiálu je buď lineárně ohříván a chlazen nebo vyšetřován na konstantní teplotě. Během DSC se mění rychlost tepelného toku, která je úměrná měrnému teplu. [44]

Měření diferenciální skenovací kalorimetrie se provádí na zařízení zvaném kalorimetr. Heat-flux DSC je kalorimetr, který měří přímo tepelný tok. Měřený vzorek i referenční materiál je temperován tak, aby rozdíl teplot byl nulový. Během toho se měří rozdíl dodané energie pro vzorek a referenční materiál. Druhý typ kalorimetru je Power-compensation DSC, který dodává stejnou energii a měří se teplota vzorku oproti referenčnímu materiálu. Tepelný tok se dále počítá dle vzorce:

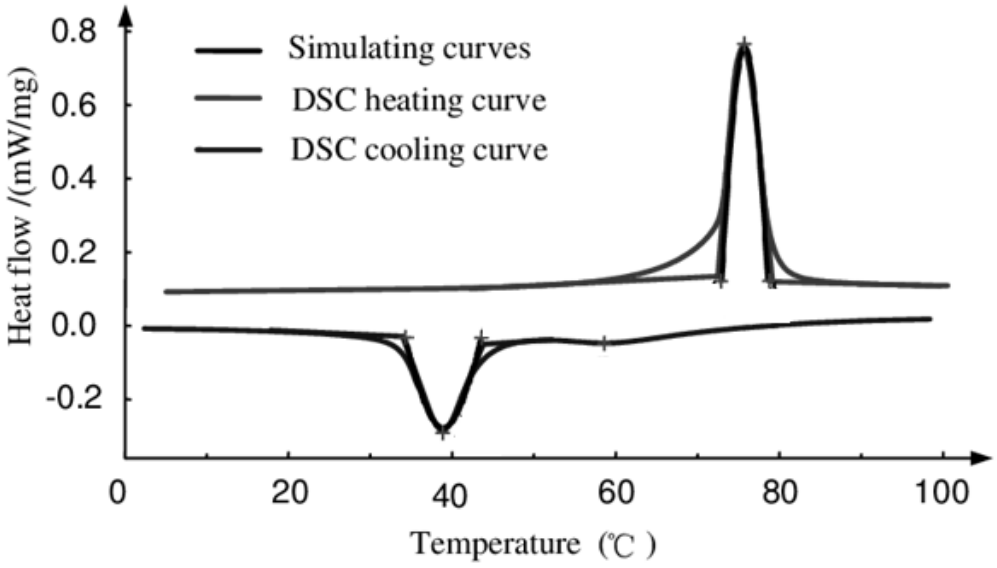
$$\frac{dQ}{dT} = \frac{\Delta T}{R_D} \quad (2)$$

Metoda DSC se jako referenční matriál používá prázdná hliníková pánvička a měřený vzorek je zalisován do pánvičky druhé. Měření probíhá za přítomnosti inertních plynů, jako jsou

dusík, argon či hélium. V případě měření oxidační stability se využívá oxidační atmosféry kyslíku či vzduchu. [42]

Pro přesné měření je nutné znát přesnou hmotnost vzorku a zajistit co největší plošný kontakt s pánvičkou, pro rovnoměrné ohřívání materiálu. Rychlost ohřevu a chlazení znatelně ovlivňuje strukturu a vlastnosti materiálu a také výsledky měření. Dalšími faktory přesného měření závisí na průtoku a volbě plynu, stanovení teplot pro začátek a konec měření a správně kalibrované měřené veličiny. [42]

Nejčastěji je metoda DSC využívána pro měření plastů. Pomocí této technologie je zjišťována o daném polymeru teplota tání, krystalizace, skelného přechodu. Je možné zjistit kdy polymer degraduje nebo se dovědět jaký je stupeň vytvrzení termosetů. [42]



Obr. 8 Křivky zobrazující entalpické změny ohřevu a chlazení [45]

Během zkoušky je typicky vzorek dvakrát ohříván. Jednou pro odstranění jeho mechanické a tepelné historie. Podruhé pro určení měřených charakteristik. [42]

Při přechodu ze skelného do kaučukovitého stavu dochází k uvolnění molekul za prudkého zvýšení objemu a měrné tepelné kapacity. Proces tání probíhá z pevného krystalického stavu do kapalného amorfního a během tohoto procesu neprobíhá chemická ani hmotnostní změna. Fázi tání a tvar křivky ovlivňuje zpracování vzorku dříve. Důležitý bod na křivce je teplota počátku krystalizace. Tímto bodem začíná materiál krystalizovat z kapalného stavu do pevného. Některé polymery dokáží krystalizovat během ohřevu, tyto mají studenou krystalizaci. Jiné polymery mají dokrystalizaci, která vzniká až během doby po zpracování. [42]

3.2 Tahová zkouška

Jednou z mechanických zkoušek vlastností materiálu je odolnost na tah. Během zkoušky na tah je těleso vystavené jednosměrnému namáhání v tahu a zaznamenává se poměrné prodloužení. Tahová zkouška je experimentální destruktivní zkouška, prováděna na trhacím stroji, která poskytne informace o vlastnostech materiálu. Namáhání (σ) v podobě smluveného napětí je působící síla (F) na plochu daného průřezu tělesa před namáháním (S_0). [46]

Smluvené namáhání:

$$\sigma = \frac{F}{S_o} \text{ [MPa]} \tag{3}$$

Poměr protažení zkoušeného tělesa (ΔL) k délce tělesa původní (L_o) představuje relativní poměrné prodloužení (ε) násobené stem pro procentuální vyjádření. [47]

Relativní poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 \text{ [\%]} \tag{4}$$

Ze vzorku materiálu je nutné udělat zkušební tělísko tvaru hranolu, lopatky, v případě pryží kroužek či z folie pásek. Tvar pro každý typ materiálu je definovaný normou. [46] Zkouška začíná u upnutí zkušebního tělesa do čelistí trhacího stroje. Následné se k tělísku nasadí průtahoměr, který měří protažení zkušebního tělíska. Trhací stroj zaznamenává napětí v podobě vyvolané síly na poměrném prodloužení a software vykresluje deformační tahovou křivku do okamžiku přetržení zkoušeného vzorku. [47] Pomocí této křivky je možné vyčíst mez pevnosti, napětí na mezi kluzu nebo potřebnou sílu k přetržení. [46]

Mez pevnosti (σ_m)

Mez pevnosti je bod na křivce, který určuje maximální napětí odpovídající maximální síle naměřené během tahové zkoušky. Není pravidle, že mez pevnosti odpovídá bodu přetržení tělesa. U polymerních materiálů se mez pevnosti pohybuje v běžných podmínkách (teploty, tlaku) od 15 MPa do 100 MPa. V případě polymerů s vyztuží je mez kluzu až 170 MPa. U elastomerů je mez pevnosti nižší a to od 7–28 MPa. Výpočet meze pevnosti vychází z maximální síly (F_{max}) na plochu průřezu zkušebního tělesa (S_0). [46]

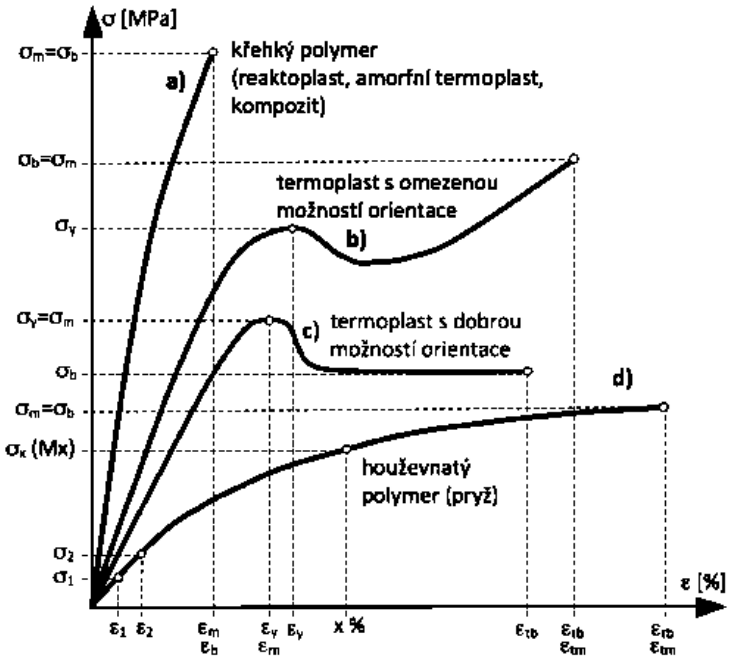
$$\sigma_m = \frac{Fmax}{S_0} \text{ [MPa]} \tag{5}$$

Napětí na mezi kluzu (σ_y)

Mez kluzu jasně definuje hranici použitelnosti materiálu při podmínkách provozu. Při překročení této meze dochází k deformaci. Mez kluzu odpovídá napětí, při kterém vzniká tzv. krček, jež se protahuje s dalším napětím a vzniká trvalé poškození součásti. U plastu se semikrystalickou strukturou a nižším obsahem krystalinity je shodná mez kluzu s mezí pevnosti. [46]

Napětí pro přetržení (σ_b)

Napětí pro přetržení odpovídá bodu, jež se zkušební těleso přetrhne. V případě křehkých polymerů může být stejné jako u mezi pevnosti. [46]



Obr. 9 Typické křivky polymerů v tahu [46]

Modul pružnosti (E)

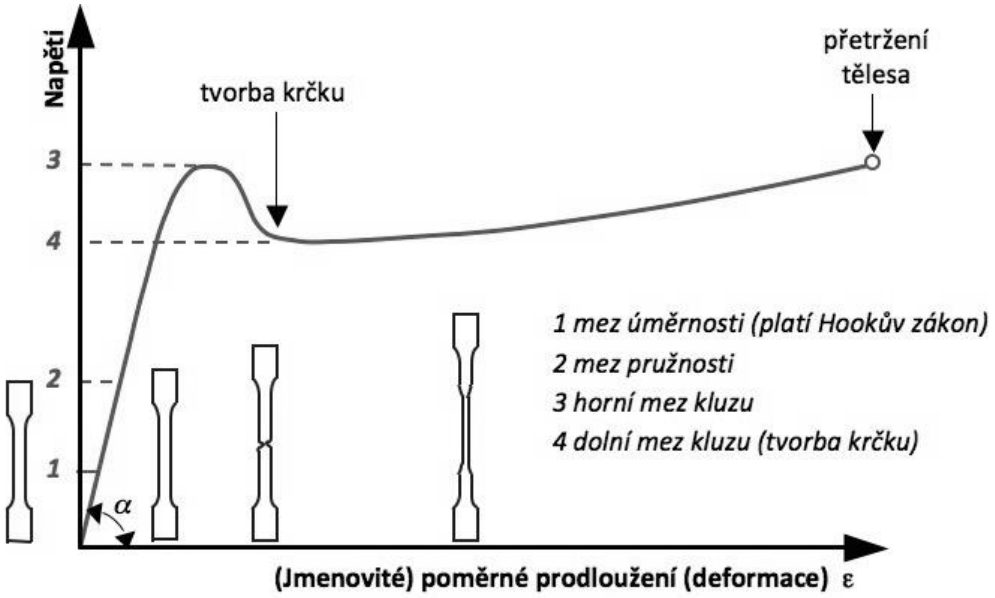
Modul pružnosti vyjadřuje tuhost materiálu a určuje se z deformační křivky. Jeho hodnota je v oblasti lineární závislosti napětí na poměrném prodloužení. V této oblasti je platný Hookův zákon, jež je popisuje přímo úměrnou deformaci na napětí materiálu. Místo, do kterého Hookův zákon platí, je označováno jako mez úměrnosti. [46]

Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \tag{6}$$

Kde σ je smluvní napětí, E je modul pružnosti v tahu a ε poměrné prodloužení. [46]

Dalším zatěžováním se, dostane materiál do stále vrátné deformace označované jako mez pružnosti. Do tohoto bodu dochází zakřivení křivky pružnou a plastickou deformací. Dalším zatěžováním přichází trvalá plastická deformace a nastává mez kluzu. Zda dochází za tímto bodem k poklesu napětí, jedná se o horní mez kluzu. Pokud křivka dále roste jedná se o dolní mez kluzu. U semikrystalických polymerů se jedná o dolní mez a napětí dále roste, až do přetržení, které je na křivce znázorněno poklesem napětí. Polymery, jež se přelomí těsně za mezí pružnosti bez větší deformace, se označují jako křehké. [46]



Obr. 10 Typická zatěžovací křivka pro semikrystalické polymery [46]

Modul pružnosti je možné vypočítat pomocí upravené rovnice Hookova zákonu. Grafické vyjádření je pak směrnicí tangenty úhlu alfa. [46]

Modul pružnosti:

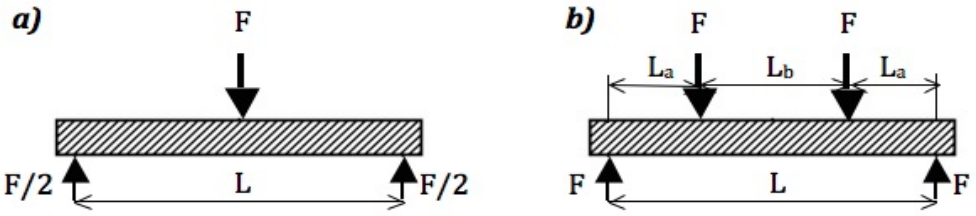
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}\,[\mathrm{MPa}] \tag{7}$$

Nelineární průběh začátku deformační křivky je způsoben viskoelastickými vlastnosti plastu. Tyto vlastnosti mají houževnaté polymery a jejich modul pružnosti se vyhodnotí ze dvou hodnot napětí, a to při poměrném protažení ε_1=0,05 % a ε_2=0,25 %. [46,47]

3.3 Ohybová zkouška

Jednou z požadovaných vlastností polymerů je odolnost proti ohybu. Velké množství výrobků jako jsou třeba nosníky, obkladové materiály či materiály střešních krytin, jsou

namáhány na ohyb. Pro materiály pěnové či elastomery se zkoušky na ohyb příliš často nepoužívají. Jejích tuhost není dostatečná pro velké zatížení. Na ohyb se obvykle využívají tělíska tvaru hranolu, které jsou umístěny na rovnoběžné podpory se vzdáleností (L) předepsanou normou. Na tělísko pak působí síla v polovině a jedná se o ohyb tříbodový anebo je síla rozdělena na 2 stejně velké síly působící v předepsané vzdálenosti, pak se jedná o ohyb čtyřbodový, který se používá pro tlustostěnné vzorky. [46,48]



Obr. 11 Ohybová zkouška a) tříbodová b) čtyřbodová [46]

Ohybovou pevnost (σ_{fM}) je možné spočítat dle vzorce:

$$\sigma_{fM} = \frac{Mo_{max}}{Wo} \text{ [MPa]} \tag{8}$$

Kde (Mo_{max}) je maximální ohybový moment a (W_o) modul průřezu. [46]

Maximální ohybový moment u tříbodového ohybu lze vyjádřit rovnicí:

$$Mo_{max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} \ [N \cdot mm] \tag{9}$$

Průřezový modul pro zkušební tělesa tvaru hranolu od šířce (b) a výšce (h) lze vypočítat dle rovnice [46]:

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \ [mm^2] \tag{10}$$

Rovnice je možné dále upravit pro získání konečného vztahu pro pevnost v ohybu tříbodovým ohybem [46]:

$$\sigma_{fM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \tag{11}$$

A pro ohyb čtyřbodový je konečný vztah vyjádřen [46]:

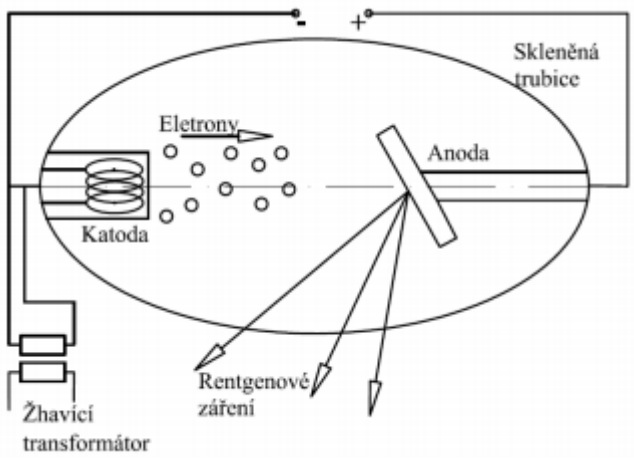
$$\sigma_{fM} = 6 \cdot \frac{F_{max} \cdot L_o}{b \cdot h^2} \text{ [MPa]} \tag{12}$$

3.4 Rentgenová analýza

RTG záření

Roku 1895 německý vědec W.K. Roentgen objevil nové záření tzv. paprsky X. Roku 1912 byla objevena RTG difrakce Maxem von Laue, který ozářil krystal skalické modré. [50] Rentgenové záření je svazek elektromagnetického záření o krátkých vlnových délkách od 10^{-12} do 10^{-8} m. RTG záření je možné dělit dle vzniku na brzdné a charakteristické. Vlnová délka 10^{-10} m dělí rentgenové záření na měkké a tvrdé. [51] RTG je charakterizováno vlnovou délkou a frekvencí vyzařovaných fotonů ve svazku s velkou energii. [50]

Brzdné záření spočívá ve ztrátě energie při dopadu záření na vrstvu zkoumaného materiálu, tím se spojitě mění rychlost a frekvence elektromagnetického záření. Naopak charakteristické záření vzniká uvolněním energie při předávání do materiálu. Tím vznikne charakteristické čárkové spektrum daného materiálu. [50, 51]



Obr. 12 Schéma rentgenové lampy [50]

RTG difrakce

Difrakce RTG záření se využívá pro strukturní analýzu vzorků. Dělí se dle použitého záření, dle způsobu detekce nebo typu vzorku [51] Zdroj RTG záření pro difrakční analýzu je rentgenová lampa složená ze skleněné trubice, kterou je nutné chladit. V trubici je vysoké napětí 20 až 60 kV, při kterém fokusují elektrony mezi katodou a anodou. Během dopadů elektronu na anodu vzniká energie (převážně v podobě tepla) a také rentgenové záření (asi 1 % z celkové energie). Průchodem záření o vlnové délce 0,05 až 0,25 nm zkoušeným tělesem dojde k indikaci dipólového momentu, který vyšle sekundární záření o stejné frekvenci. [50] V případě, že se elektrony po dopadu rozkmitají stejnou frekvencí, dojde

ke skládání vln. Interferencí může docházet i ke zeslabování nebo destrukci vln. Interference dvou vln je dána Braggovou rovnicí:

$$2 \cdot d \cdot sin\Theta = \mathrm{n} \cdot \lambda \tag{13}$$

Kde vzdálenost atomových rovin je d [nm]. λ [nm] představuje vlnovou délku, Θ difrakční úhel mezi rovinou a dopadajícími paprsky vyjádřen v radiánech. Řád reflexe je značen bezrozměrným n. [51]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem práce je připravit vzorky tělísek z vybraných polymerních materiálů pomocí FDM 3D tiskárny. Následným úkolem je na vytištěných tělískách a použitém filamentu provést mechanické a strukturní zkoušky pro zjištění vybraných vlastností polymerních materiálů používaných pro filament do FDM 3D tiskáren. Pro mechanické zkoušky pevnosti v ohybu a tahu byl zvolen trhací stroj. Strukturní změny vybraných materiálů byly vyhodnocovány pomocí DSC a RTG analýz. Výsledky jednotlivých zkoušek materiálů byly porovnány.

5 PŘÍPRAVA A ZKOUŠKY VZORKŮ

Pro měření byly použity filamenty různých polymerních materiálů od prodejců Solidify 3D, s.r.o. (Česká republika), Filament-PM (Česká republika) a ColorFabb BV (Nizozemsko). Průměr struny byl u všech vzorků stejný, a to 1,75 mm. Na filamentech z běžně požívaných materiálů ABS-T, PLA, PETG-XT, PETG CF Jet Carbon a Smartfil Nylstrong byla provedena zkouška na tah a strukturní změny pozorovány pomocí RTG, DSC.

Pomocí 3D tiskárny Prusa i3 (Prusa Research a.s, Česká republika) byly vytisknuty z vybraných filamentů tělíska o rozměrech 4,05 x 10,15 x 81,7 mm s téměř 100 % plněním. Podmínky pro tisk byly voleny dle technických listů filamentu. Následně vytištěná tělíska kondicionovala po dobu 40 dní při konstantních laboratorních podmínkách. Tělíska byla podrobena testům na ohyb a RTG.

5.1 Technické listy použitých filamentů

5.1.1 ABS-T

Filament z materiálu akrylonitrilbutadienstyren byl vybrán ABS-T od firmy Filament-PM.

- Barva: Černá
- Teplota tisku: 230-250 °C
- Teplota podložky: 110 °C
- Rozpouštědlo: Aceton
- Modul pružnosti: 2000 MPa
- Hustota: 1,08 g/cm^3

5.1.2 PLA

Filament materiálu polylaktid byl vybrán PLA od firmy Filament-PM.

- Barva: Šedá
- Teplota tisku: 200-230 °C
- Teplota podložky: 20-60 °C
- Rozpouštědlo: Toulen
- Modul pružnosti: 3500 MPa
- Hustota: 1,24 g/cm^3

5.1.3 PETG CF

Filament materiálu polyethylentereftalátglykol byl vybrán PETG-CF Jet Carbon od firmy Filament-PM. Filament obsahuje až 20 % vláken uhlíku.

- Barva: Černá
- Teplota tisku: 220-250 °C
- Teplota podložky: 60-80 °C
- Rozpouštědlo: Benzen
- Modul pružnosti: 2500 MPa
- Hustota: 1,27 g/cm^3

5.1.4 PETG-XT

Filament materiálu polyethylentereftalátglykol byl vybrán PETG-XT Black od firmy ColorFabb BV.

- Barva: Černá
- Teplota tisku: 240-260 °C
- Teplota podložky: 60-70 °C
- Rozpouštědlo: Benzen
- Modul pružnosti: 2100 MPa
- Hustota: 1,27 g/cm^3

5.1.5 Smartfil Nylstrong

Filament materiálu polyamidu 6 byl vybrán Smartfil Nylstrong od firmy Solidify 3D, s.r.o. Filament je vyztužený skelným vláknem.

- Barva: Bílá
- Teplota tisku: 250 ± 10 °C
- Teplota podložky: 90-110 °C
- Modul pružnosti: 1800 MPa
- Hustota: 1,58 g/cm^3

5.2 Použité metody zkoušek

Pro zjištění vybraných vlastností polymerních materiálů byla použita metoda DSC, RTG a mechanické vlastnosti změřeny na pevnost v tahu a ohybu.

5.2.1 RTG difrakční analýza

RTG difrakční analýza proběhla na přístroji X´Pert PRO (PANalytical, Holandsko) s RTG zářičem CuK_{α}, Ni filtrem a detektorem X´Celerator. Pro měření byl přístroj nastaven na konfiguraci Bragg – Brentanovu o proudu 30 mA a 40 kV napětí. Měření probíhalo v rozsahu 2Θ = 5–30° při atmosférickém tlaku, konstantní laboratorní teplotě a vzdušné vlhkosti.

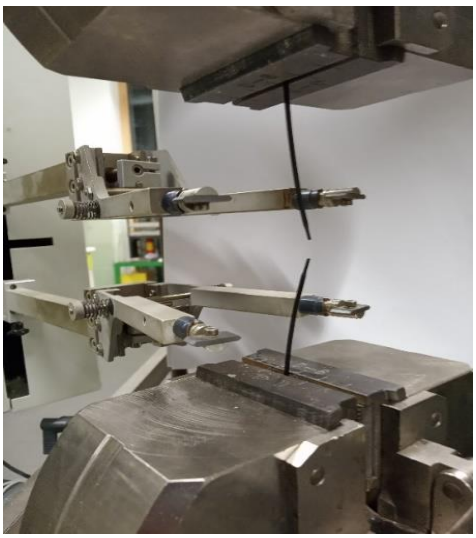
Krystalinita byla stanovena podílem součtu plochy všech krystalických píků ku ploše amorfního pozadí.

5.2.2 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Pro zjištění chování materiálu za zvýšené teploty byly vzorky analyzovány pomocí diferenciální snímací kalorimetrie přístrojem Pyris 7 (Perkin Elmer, USA) v atmosféře N_2. Vzorky přibližně 6 mg materiálu z filamentu byly zalisovány do hliníkových pánviček. Vzorky byly podrobeny tepelnému namáhání, při kterém se nejprve zahřály na teplotu 280 °C (200 °C pro materiál PLA a ABS-T) rychlosti 10 °C/ min pro odstranění tepelné historie materiálu. Následně byly ochlazeny na teplotu 30 °C rychlostí 10 °C/min pro získání teplotu krystalizace. Pro získání teploty tání se vzorek opět ohřívá rychlostí 10 °C/min na teplotu 280 °C (200 °C pro materiál PLA a ABS-T).

5.2.3 Tahová zkouška filamentu

Zkouška vybraných filamentů na tah byla provedena německým strojem Zwick 1456 (ZwickRoell, Rakousko). Pro uchycení byly použity mechanické čelisti, které zajistí filament proti vysmeknutí. Pro měření poměrného prodloužení byl nasazen průtahoměr. Rychlost posuvu čelistí byla 50 mm/min. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí softwaru TestExpert. Změřeny byly všechny vybrané filamenty (ABS-T, PLA, PETG CF, Smartfil Nylstrong, PETG-XT).



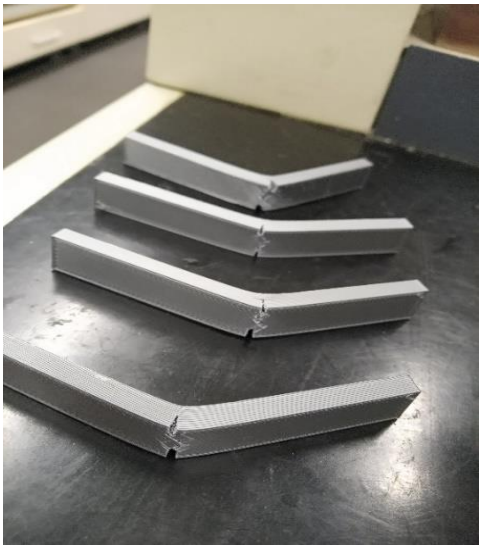
Obr. 13 Filament po tahové zkoušce

Obr. 14 Měřený filament

5.2.4 Ohybová zkouška tělísek

Ohybová zkouška pro plastová tělíska byla zvolena tříbodová. Na trhacím stroji Zwick 1456 bylo změřeno 5 zkušebních tělísek vytisknutých z vybraných materiálů. Vzdálenost podpor byla 64 mm a hrana podpory měla rádius 5 mm. Tělísko bylo zatěžováno přesně ve středu mezi podpěrami. Výsledky byly zaznamenány a vyhodnoceny softwarem TestExpert. Zkouška probíhala při laboratorních podmínkách při konstantní pokojové teplotě a atmosférickém tlaku.

Obr. 15 Ohybová zkouška tělíska



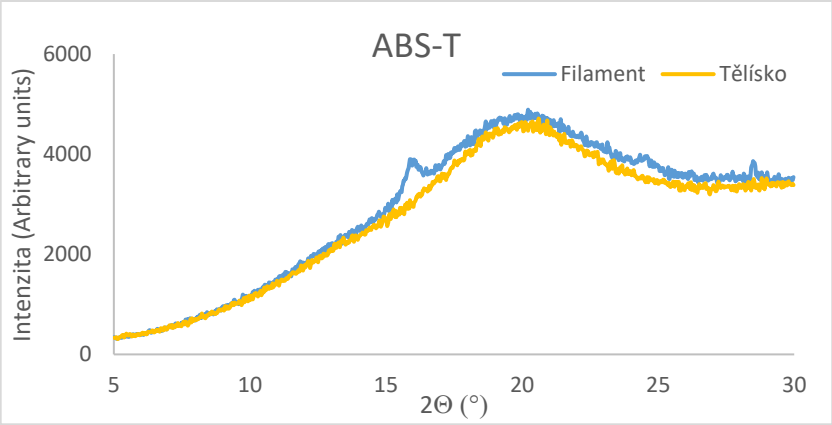
Obr. 16 Tělíska po ohybové zkoušce

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1 Výsledky analýzy RTG

RTG difrakční analýza probíhala na filamentech a vytištěných vzorcích pro vybraných 5 typů materiálu (ABS-T, PLA, PETG CF, PETG-XT, Smartfil Nylstrong).

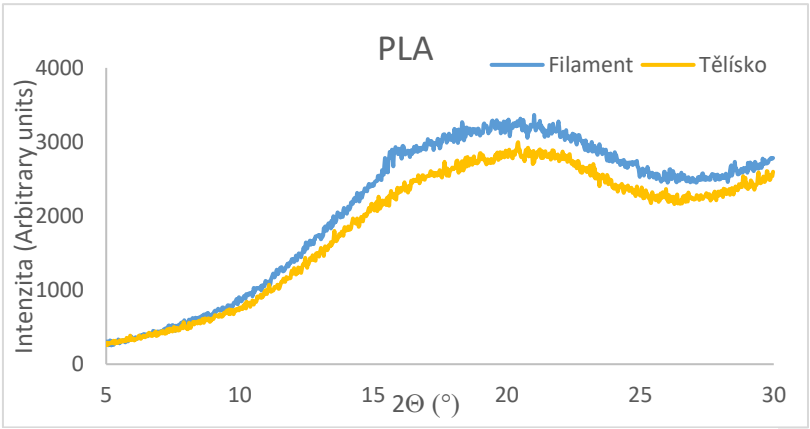
6.1.1 ABS-T



Obr. 17 Záznam RTG difrakční analýzy ABS-T

Analýza RTG prováděna na materiálu ABS-T dokázala, že zkoumaný materiál je amorfní. Filament vykazoval podíl krystalické fáze 4,1 %. V případě tělíska RTG difrakční analýza prokázala podíl krystalické fáze 5,0 %. U analýzy filamentu byl zaznamenán pík při úhlu 16° 2Θ, který byl způsoben nejspíš příměsí v polymeru. Po zpracování filamentu tiskem tato příměs již nebyla zaznamenána.

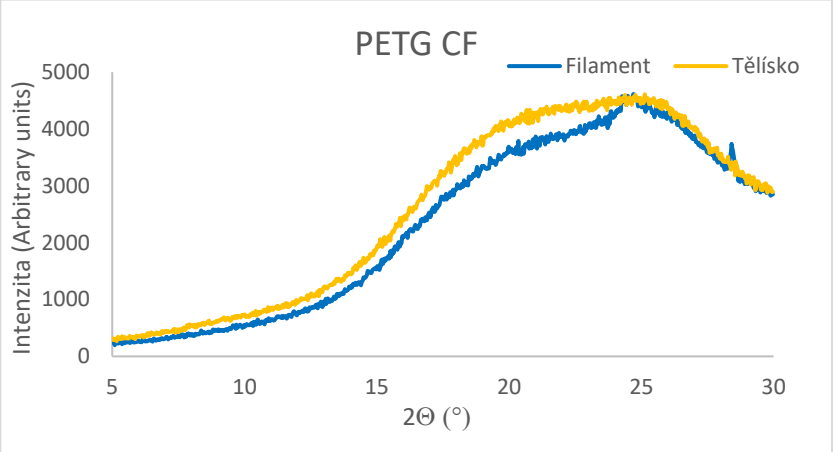
6.1.2 PLA



Obr. 18 Záznam RTG difrakční analýzy PLA

Materiál PLA analyzován metodou RTG vykazoval nahodile uspořádanou strukturu. Pro filament byla naměřena krystalinita 3,7 % pro filament a pro tělíska byla analyzována krystalinita 4,8 %.

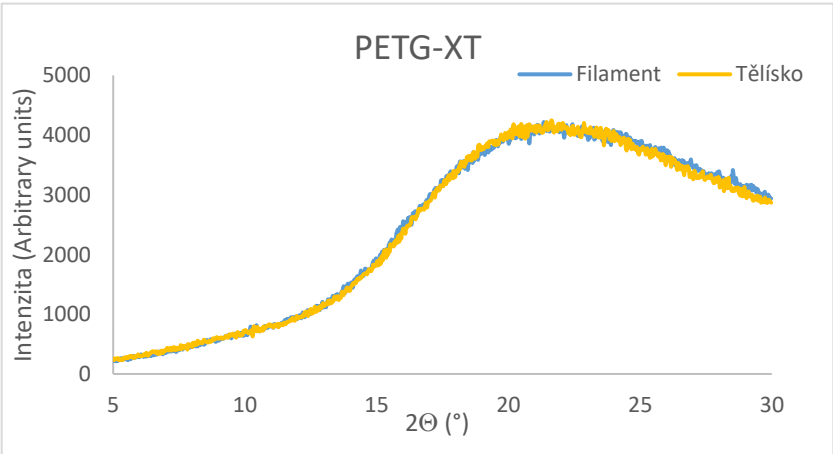
6.1.3 PETG CF



Obr. 19 Záznam RTG difrakční analýzy PETG CF

RTG analýza materiálu PETG CF ukázala, že jedná o materiál amorfní. Krystalinita v případě filamentu byla 5,4 %. Pro tělísko byla analyzována krystalinita 2,8 %. Filament navíc vykazoval pík při úhlu 28,4°2Θ, který nejspíš náleží zpracovatelské přísadě. Tato přísada se již ve vytištěném tělísku nevyskytovala.

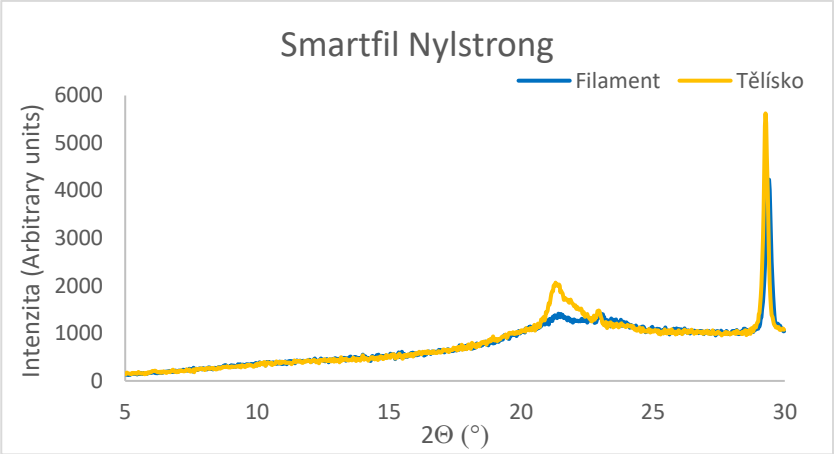
6.1.4 PETG-XT



Obr. 20 Záznam RTG difrakční analýzy PETG-XT

RTG analýza PETG-XT dokázala náhodnou strukturu materiálu. Struktura filamentu vykazuje krystalinitu 3,0 %. V případě vytisknutého tělíska byla krystalinita stejná.

6.1.5 Smartfil Nylstrong



Obr. 21 Záznam RTG difrakční analýzy Smartfil Nyslstrong

Materiál Smartfil Nylstrong byl analyzován pomocí RTG difrakce jako amorfní polymer. Pík při úhlu 29,4°2Θ byl způsoben příměsí. V případě filamentu byla krystalinita 26,1 % a v případě tištěného tělíska 39,5 %. Příměs ve filamentu byla ovlivněna tepleným zpracováním a po tisku více zkrystalizovala. Navíc je patrný pík i při úhlu 21,3°2Θ, který vznikl až po zpracování u vytištěného tělíska.

6.1.6 Vyhodnocení RTG analýzy

Tab. 1 Krystalinita materiálu

Materiál		Krystalinita [%]	Vrchol píku 2Θ (°)
ABS-T	Filament	4,14	20,2
	Tělísko	5,03	20,6
PLA	Filament	3,68	21,0
	Tělísko	4,77	20,4
PETG XT	Filament	2,98	21,3
	Tělísko	3,04	21,6
PETG CF	Filament	5,42	24,7
	Tělísko	2,80	25,1
Nylstrong	Filament	26,01	29,4
	Tělísko	39,50	29,3

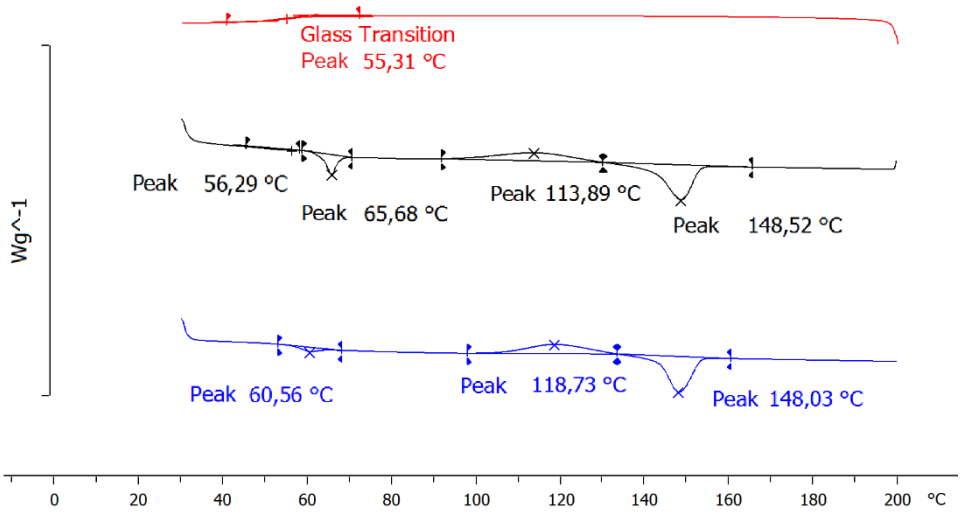
Materiály, jež byly analyzovány pomoci RTG difrakční analýzy, jsou amorfní s malou krystalinitou. Největší krystalinitu vykazuje materiál Nylstrong, což je dáno přísadou. Z výsledků lze soudit, že výrobce filamentu je pomocí příměsí schopen ovlivňovat

krystalinitu materiálu po tisku. Po zpracování vykazují materiály (kromě PETG CF) vyšší krystalinitu. Vrcholy píku u materiálu ABS-T a PLA jsou přibližně ve stejném úhlu 2Θ (°). Z toho lze soudit, že výrobce těchto materiálů Filament-PM používá při výrobě stejné příměsi, které mají vyšší krystalinitu než samotný materiál.

6.2 Výsledky DSC

První tavení vzorku (černá křivka) vypovídá o vlastnostech, které nadefinoval výrobce. Druhým tavením (modrá křivka) se získají vlastnosti materiálu. Z chlazení (červená křivka) je možné vyčíst teplotu skelného přechodu.

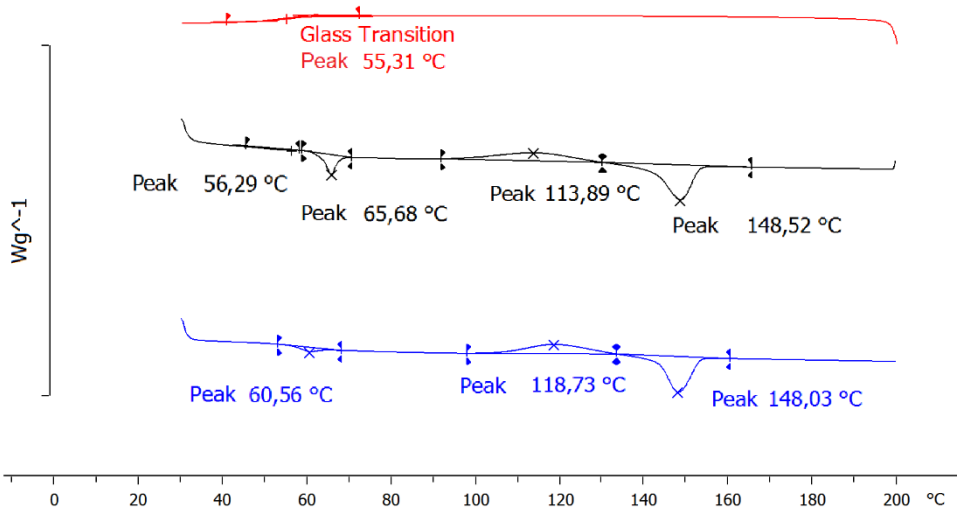
6.2.1 ABS-T



Obr. 22 Záznam DSC vzorku ABS-T

Vzorek filamentu o hmotnosti 5,98 mg byl vystaven dvakrát ohřevu a jedou chlazení. Z analýzy vyplývá, že se jedná o amorfní polymer jen s malými píky. Teplota tání 52,09 °C patří nejspíš příměsi, kterou výrobce přidává pro lepší zpracovatelnost. Teplota skelného přechodu materiálu se při druhém ohřevu snížila ze 104,96 °C na 100,53 °C, což by mohlo po tisku zmenšit tepelnou odolnost výrobku. Teplota skelného přechodu při chlazení ABS je 99,67 °C.

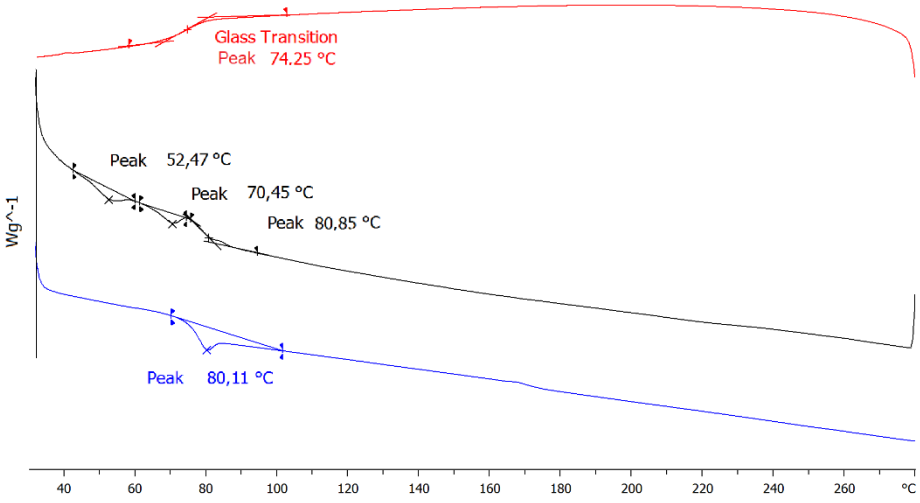
6.2.2 PLA



Obr. 23 Záznam DSC vzorku PLA

Vzorek PLA o hmotnosti 6,25 mg vykazoval pří ohřevu teplotu tání při 56,29 °C, 65,68 °C a 148,52 °C. Při druhém ohřevu první pík zmizel, nejspíš se jednalo o malé množství těkavé příměsi přidané výrobcem. Druhý pík se posunul o 5 °C níže. Třetí pík se se oproti prvnímu ohřevu posunul o půl stupně níže. U PLA je patrný jev studené krystalizace při teplotě 113,89 °C u prvního ohřevu. U druhého ohřevu se teplota studené krystalizace posunula na hodnotu 118,73 °C. Tento jev je u PLA typický. Bod na křivce chlazení při teplotě 55,31 °C vypovídá o nízké teplotě skelného přechodu a o amorfní struktuře polymeru.

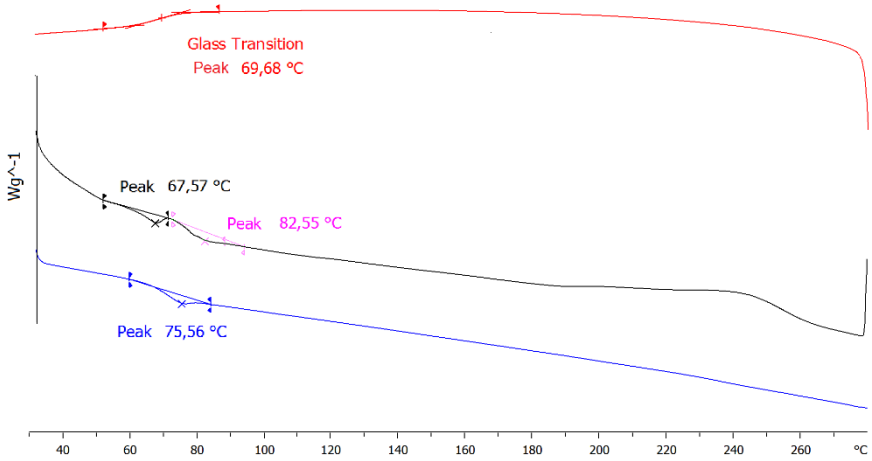
6.2.3 PETG CF



Obr. 24 Záznam DSC vzorku PETG CF

Při analýze vzorku PETG CF o hmotnosti 6,05 mg byly zaznamenány během prvního ohřevu 2 píky při teplotě 52,47 °C a 70,45 °C vykazující teplotu tání. Pík při 80,85 °C udává teplotu skelného přechodu. Během druhého ohřevu byl zaznamenán jeden pík teploty tání při 80,11 °C. Zřejmě výrobce upravil vlastnosti materiálu příměsemi, které se tepelným zpracováním vypálily. Teplota skelného přechodu je u materiálu PETG-CF při chlazení zaznamenána na teplotě 74,25 °C.

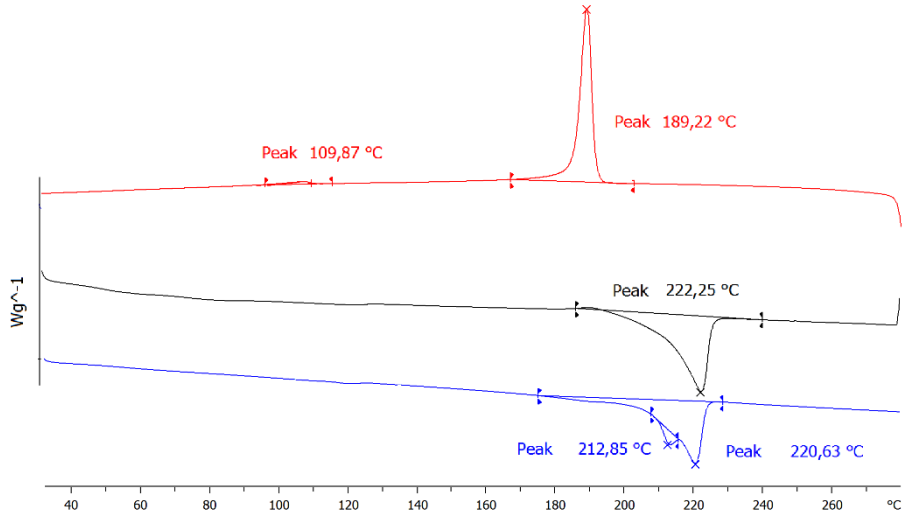
6.2.4 PETG-XT



Obr. 25 Záznam DSC vzorku PETG-XT

Analýza vzorku PET-XT (hmotnosti 6,05 mg) ukázala při prvním ohřevu 2 píky při teplotách 67,57 °C a 85,55 °C. Při druhém ohřevu byl zaznamenán pík teploty tání jen jeden, a to při teplotě 75,56 °C. Z toho lze dedukovat, že jeden z píku prvního ohřevu je způsoben přísadou výrobce. Teplota skelného přechodu vzorku byla při teplotě 69,68 °C. Tyto nízké teploty přechodů umožňují jednoduchý tisk s malou tepelnou odolností výrobku. Pro zpřesnění DCS analýzy je nutné upravit podmínky průběhu tepelného namáhání.

6.2.5 Smartfil Nylstrong



Obr. 26 Záznam DSC vzorku Smartfil Nylstrong

Materiál Smartfil Nylstrong byl DSC analyzovaná jako částečně krystalický, při teplotě 189,22 °C, což bylo dáno příměsí. Prvním tavením byl zaznamenán pík při teplotě 222,25 °C. Během druhého ohřívání byly zaznamenány píky při teplotách 212,85 °C a 220,63 °C. Výrobci filamentu se podařilo zlepšit jeho vlastnosti zvýšením teploty tání o více jak 2 °C.

6.2.6 Vyhodnocení diferenciální skenovací kalorimetrie

Tab. 2 Výsledky diferenciální skenovací kalorimetrie

Materiál	Tm1 °C	Tc/Tg °C	Tm2 °C
ABS	52,09 104,96	99,67	 100,53
PLA	56,29 65,68 113,89 * 148,52	55,31	60,56 118,73 * 148,03
PETG-CF	52,47 70,45 80,85	74,25	 80,11
PETG XT	67,57 82,55	69,68	75,56
Smartfil Nylstrong	 222,25	189,22 109,87	212,85 220,63

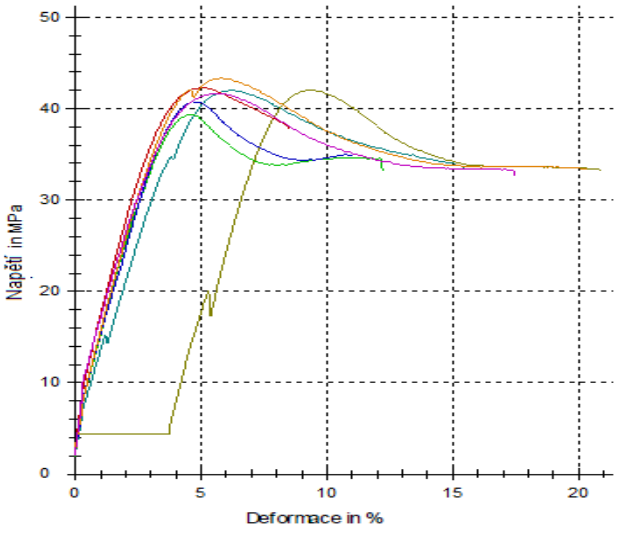
*studená krystalizace

Z výsledků je patrné, že výrobci přidávají do filamentů teplem se rozkládající přísady pro zlepšení vlastností při tisku. Další píky na 1. ohřevu mohly být způsobeny přidaným pigmentem. Teplota tisku doporučená výrobcem je znatelně vyšší, než je naměřená teplota tání, zřejmě aby zajistil protavení celého objemu filamentu. Teplota tání se často u materiálu mění tepelným zpracováním, u prvního ohřevu je vždy vyšší. Pro podrobnější informace o filamentech by bylo nutné optimalizovat podmínky DSC analýzy.

6.3 Výsledky tahové zkoušky

Tahová zkouška probíhala pro všech 5 vybraných filamentů materiálů (ABS-T, PLA, PETG CF, PETG-XT, Smartfil Nylstrong). U každého materiálu bylo testováno 6 vzorků na modul pružnosti, napětí a prodloužení na mezi pevnosti. Zkouška byla provedena softwarem TestExpert.

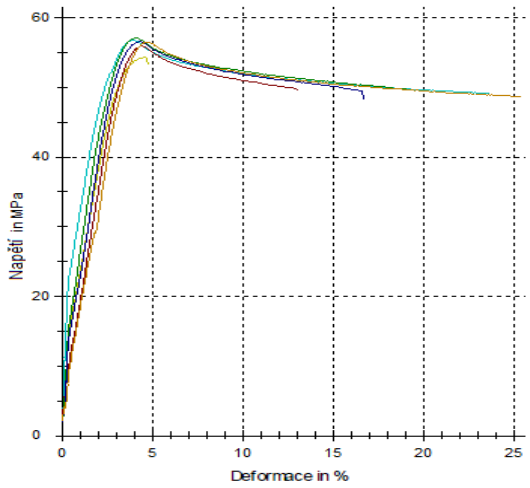
6.3.1 ABS-T



Obr. 27 Diagram tahové zkoušky ABS-T

Zkoušeno bylo celkem 6 vzorku z materiálu ABS-T. Na jeden vzorek filamentu byl nejspíše špatně upnut průtahoměr. Naměřené výsledky byly spíše podobné. Průměrnou hodnotou pro maximální pevnost v tahu je 41,6 MPa. Modul pružnosti v tahu stanovený průměrnou hodnotou 6 zkoušek vzorku filamentu je 1590,9 MPa a poměrné prodloužení v maximální pevnosti je 5,8 %.

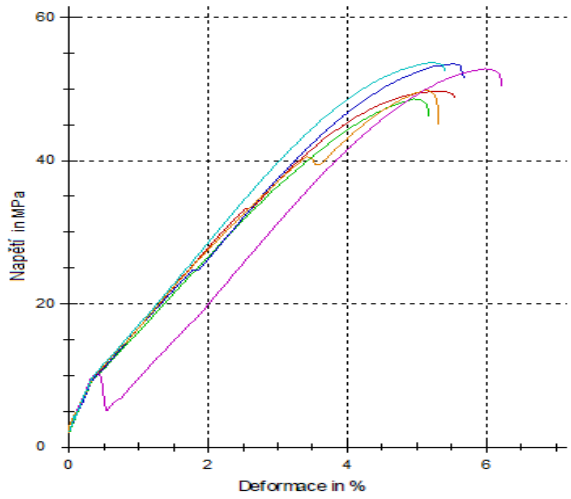
6.3.2 PLA



Obr. 28 Diagram tahové zkoušky PLA

Tahová zkouška na šesti vzorcích filamentu PLA probíhala standartně a měla velmi podobné výsledky. Byla naměřena maximální pevnost v tahu 56,2 MPa. Hodnota modulu pružnosti je 3910 MPa a poměrné prodloužení při maximálním napětí je 4,3 %. Hodnoty byly stanovené průměrem měření vybraných vzorků.

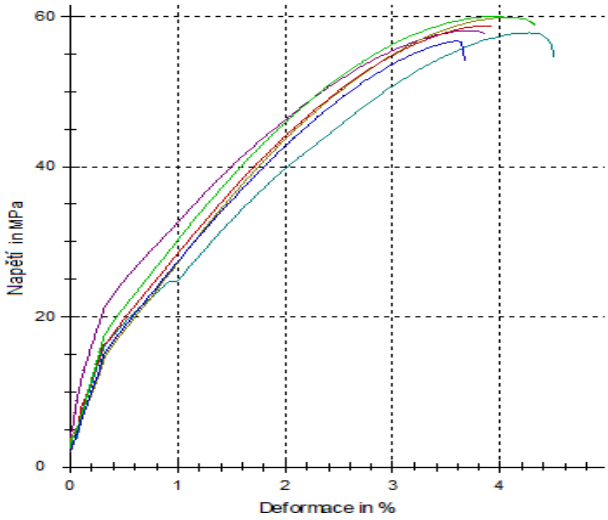
6.3.3 PETG CF



Obr. 29 Diagram tahové zkoušky PETG CF

Tahová zkouška na šesti vzorcích filamentu PETG CF probíhala standartně a měla velmi podobné výsledky. Jeden ze vzorků byl nejspíše špatně upnuty do čelistí. Byla naměřena maximální pevnost v tahu 58,6 MPa. Hodnota modulu pružnosti je 4561,4 MPa a poměrné prodloužení při maximálním napětí je 3,9 %. Hodnoty byly stanovené průměrem měření vybraných vzorků. Pro zpřesnění měření by bylo vhodné provést zkoušku na vícero ústřižků filamentu.

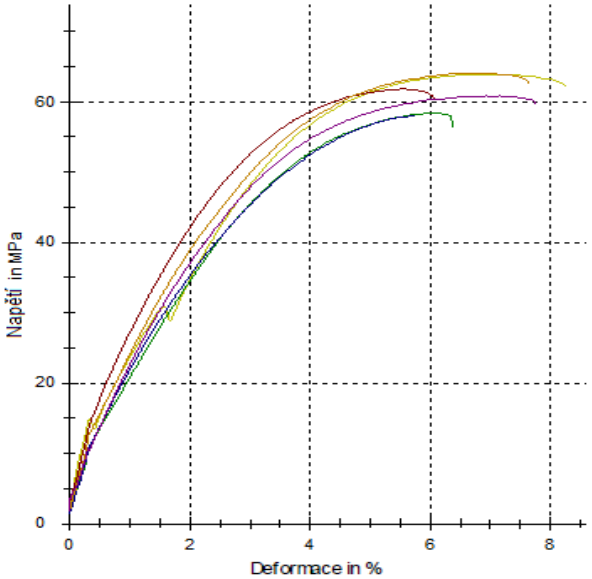
6.3.4 PETG-XT



Obr. 30 Diagram tahové zkoušky PETG-XT

Tahová zkouška na šesti vzorcích filamentu PETG-XT probíhala standartně a měla velmi podobné výsledky. Byla naměřena maximální pevnost v tahu 51,3 MPa. Hodnota modulu pružnosti je 2127,3 MPa a poměrné prodloužení při maximálním napětí je 5,3 %. Hodnoty byly stanovené průměrem měření vybraných šesti vzorků.

6.3.5 Smartfil Nylstrong



Obr. 31 Diagram tahové zkoušky Nylstrong

Tahová zkouška na šesti vzorcích filamentu Smartfil Nylstrong probíhala standartně a měla velmi podobné výsledky. Byla naměřena maximální pevnost v tahu 61,2 MPa. Hodnota modulu pružnosti je 2957,9 MPa a poměrné prodloužení při maximálním napětí je 6,3 %. Hodnoty byly stanovené průměrem měření vybraných šesti vzorků.

6.3.6 Vyhodnocení tahové zkoušky

Tab. 3 Výsledky tahové zkoušky

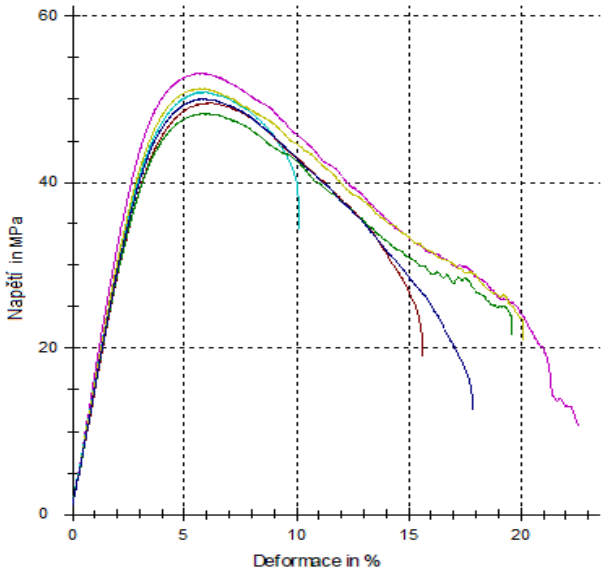
	Naměřeno					
Materiál	Modul pružnosti v tahu	Sm. odchylka	Napětí na mezi pevnosti	Sm. odchylka	Prodloužení na mezi pevnosti	Sm. odchylka
	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%
ABS-T	1590,9	601,8	41,6	1,3	5,8	1,6
PLA	3910,5	1823,2	56,2	1,0	4,3	0,3
PETG CF	4561,4	741,5	58,6	1,3	3,9	0,2
PETG-XT	2127,3	133,3	51,3	2,2	5,3	0,4
Nylstrong	2957,9	702,9	61,2	2,6	6,3	0,6

Tahová zkouška prováděna na filamentech ukázala, že největší modul pružnosti v tahu má materiál PETG CF, a to díky jeho příměsi karbonového vlákna. Nejmenší modul pružnosti byl naměřen u materiálu ABS-T. Z provedených zkoušek strun lze vyvodit, že vlastnosti se po jeho délce příliš nemění a výrobce produkuje konstantní filament.

6.4 Výsledky ohybové zkoušky

Tříbodová ohybová zkouška probíhala na vytištěných tělískách pro všech 5 vybraných materiálů (ABS-T, PLA, PETG CF, PETG-XT, Smartfil Nylstrong). U každého materiálu bylo změřeno 6 vzorků a vyhodnoceny softwarem TestExpert.

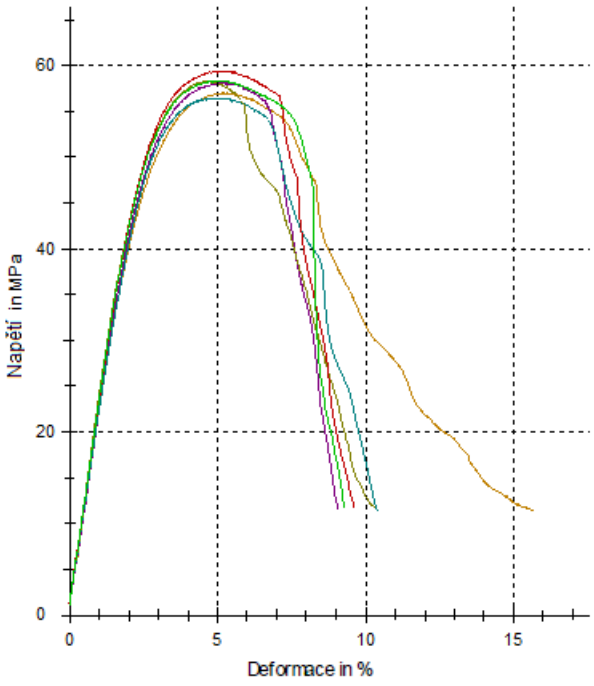
6.4.1 ABS-T



Obr. 32 Ohybová zkouška tělíska z ABS-T

Tříbodovou ohybovou zkouškou pro materiál ABS-T byl změřen modul pružnosti 1400 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 50,6 MPa a prodloužení na mezi pevnosti 5,8 %. Vykonaná práce do maximálního napětí 603,5 Nmm. Zkouška u všech 6 vzorků probíhala standartně a výsledky byly podobné.

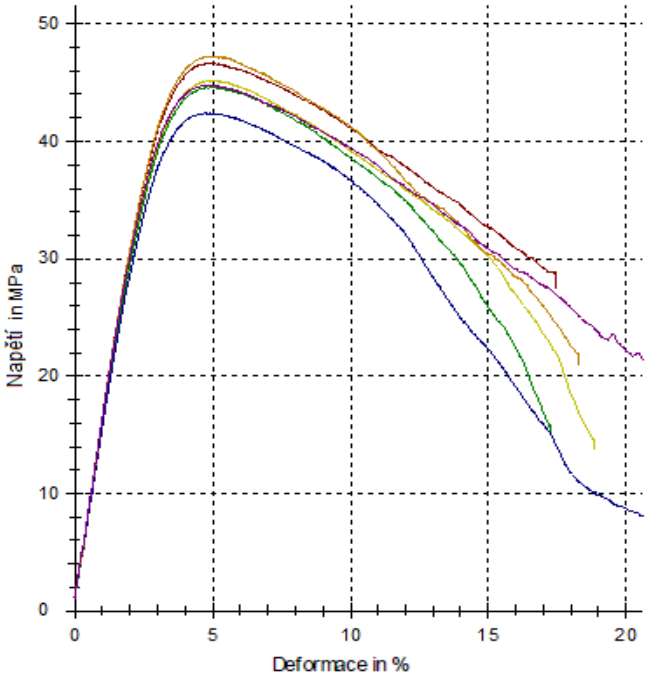
6.4.2 PLA



Obr. 33 Ohybová zkouška tělíska z PLA

Tříbodovou ohybovou zkouškou pro materiál PLA byl změřen modul pružnosti 2180 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 58 MPa a prodloužení na mezi pevnosti 5 %. Vykonaná práce do maximálního napětí 618,1 Nmm. Zkouška u všech 6 vzorků probíhala standartně a výsledky byly podobné.

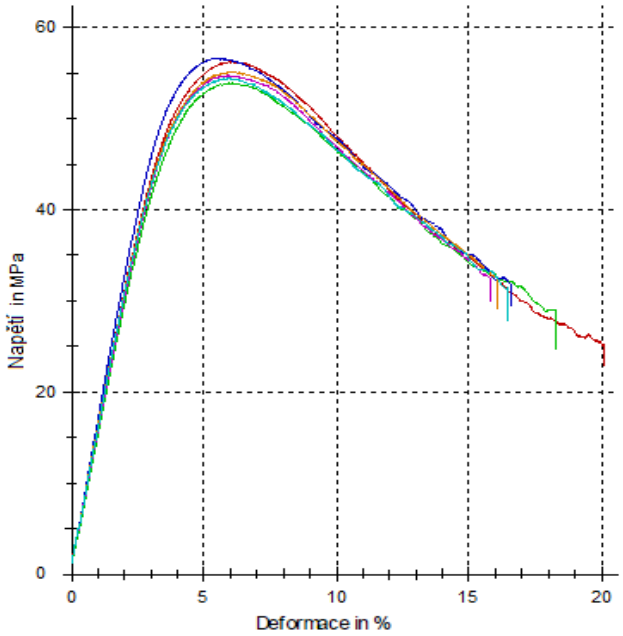
6.4.3 PETG CF



Obr. 34 Ohybová zkouška tělíska z PETG CF

Tříbodovou ohybovou zkouškou pro materiál PETG CF byl změřen modul pružnosti 1490 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 45,2 MPa a prodloužení na mezi pevnosti 4,9 %. Vykonaná práce do maximálního napětí 474,6 Nmm. Zkouška u všech 6 vzorků probíhala standartně.

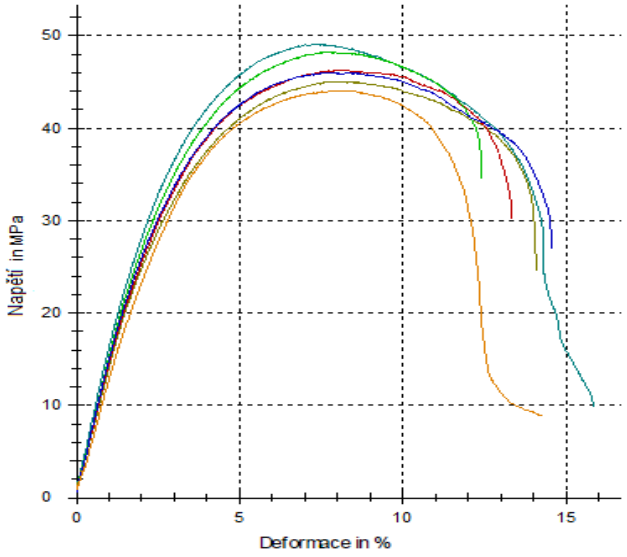
6.4.4 PETG-XT



Obr. 35 Ohybová zkouška tělíska z PETG-XT

Tříbodovou ohybovou zkouškou pro materiál PETG-XT byl změřen modul pružnosti 1490 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 55,2 MPa a prodloužení na mezi pevnosti 5,9 %. Vykonaná práce do maximálního napětí 648,1 Nmm. Zkouška u všech 6 vzorků probíhala standartně a výsledky byly podobné.

6.4.5 Smartfil Nylstrong



Obr. 36 Ohybová zkouška tělíska z Nylstrong

Tříbodovou ohybovou zkouškou pro materiál Smartfil Nylstrong byl změřen modul pružnosti 1300 MPa, maximální napětí na mezi pevnosti 46,5 MPa a prodloužení na mezi

pevnosti 7,9 %. Vykonaná práce do maximálního napětí 906,7 Nmm. Zkouška u všech šesti vzorků probíhala standartně. Výsledky šesti tělísek z materiálu Smartfil Nylstrong byly nepatrně odlišné.

6.4.6 Vyhodnocení ohybové zkoušky

Tab. 4 Výsledky ohybové zkoušky

	Naměřeno					
Materiál	Modul pružnosti v ohybu	Sm. odchylka	Napětí na mezi pevnosti	Sm. odchylka	Prodloužení na mezi pevnosti	Sm. odchylka
	MPa	MPa	MPa	MPa	%	%
ABS-T	1400	66,1	50,6	1,66	5,8	0,1
PLA	2180	105,0	58,0	1,05	5,0	0,2
PETG CF	1490	43,4	45,2	1,71	4,9	0,1
PETG-XT	1490	52,3	55,2	1,06	5,9	0,3
Nylstrong	1300	173,0	46,5	1,90	7,9	0,4

Dle výsledků měření ohybové zkoušky lze srovnat hodnoty modulu pružnosti deklarované výrobce a změřené. Všechny měřené materiály vykazovaly menší hodnotu modulu pružnosti, než udávají výrobci v technických listech. Důvodem odlišností výsledků může být zpracování filamentu během tisku, stáří filamentu, výška vrstev tisku či poměr výplně tělíska. Zpřesnění měření by bylo možné docílit i větším počtem měřených tělísek.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat literární rešerši na téma vlastnosti polymerních materiálů vhodných pro technologii FDM, dále z vybraných filamentů vytisknout technologii FDM zkušební tělíska. Třetím úkolem bylo na tělískách a filamentu charakterizovat mechanické a strukturní vlastnosti polymerních materiálů pro 3D tisk.

V teoretické části práce byly popsány základní technologie 3D tisku, materiály typicky používané technologii FDM a jejich charakteristické vlastnosti. Využití FDM tisku v praxi a požadavky uživatelů na materiál filamentu. Pro volbu vhodného filamentu pro dané použití je nutno materiálové vlastnosti znát.

V části praktické byly odstřiženy části filamentů pro mechanické zkoušky na tah. Než byly vzorky filamentu destruktivně zkoušeny na trhacím stroji, byla provedena RTG difrakční analýza. Ze struny bylo odebráno i malé množství materiálu pro metodu DSC, pomocí které byly zjištěny teploty strukturních změn materiálu. Na vytištěných tělískách byla provedena RTG difrakční analýza a byly vystaveny ohybové zkoušce na trhacím stroji.

Metody RTG difrakční analýza i DSC ukázaly amorfní strukturu všech vybraných materiálů. Bylo patrné, že jsou při výrobě přidávány teplem odbouratelné přísady pro lepší zpracovatelnost a optimální tisk. U materiálu ABS-T a PLA od totožného prodejce Filament-PM byl pozorován pík při podobném úhlu, což může být způsobeno použitím stejné příměsi. Příměsi, jež do filamentu výrobci přidávají, mají obvykle vyšší krystalinitu a po zpracování se odpaří či vypálí. V případě materiálu Smartfil Nylstrong byla pozorována příměs, která způsobila vyšší krystalitu po tisku. Doporučená tisková teplota je značně vyšší, než teplota tání u všech zkoušených vzorků. Výrobce tím zajistí správné roztavení filamentu při tisku v celém objemu. Teplota tání pří prvním ohřevu byla vždy nepatrně vyšší než teplota druhého ohřevu. Naopak krystalinita materiálu na vytisknutých tělískách se oproti filamentu nepatrně zvýšila.

Z mechanických zkoušek provedených na filamentech a tělískách vykazoval modul pružnosti odlišné hodnoty, než udává výrobce. Tento fakt mohl být způsoben tepelným zpracováním, stářím filamentu, tloušťkou tištěných vrstev či teplotou tisku.

Pro zpřesnění výsledků měření by bylo vhodné optimalizovat teploty tavení u metody DSC. Dále zlepšení přilnavosti první vrstvy k podložce a vyladit podmínky tisku by mohlo vést k objektivnějším výsledkům.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] 3D Printing. *3D Printing Technologies: An Overview* [online]. 2018 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/

[2] Miroslav Kováčik. *HISTORIE 3D TISKU* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://3dfatory.cz/2017/10/27/historie/

[3] DANA GOLDBERG. *History of 3D Printing: It's Older Than You Are (That Is, If You're Under 30)* [online]. 2018 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/

[4] Alexandrea P. *The Complete Guide to Stereolithography (SLA) in 3D Printing* [online]. 2017 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.3dnatives.com/en/stereolithography-explained100420174/

[5] All3DP. *2020 Types of 3D Printing Technology* [online]. 2020 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/

[6] Alkaios Bournias Varotsis. *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/

[7] Materialise. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm

[8] Sculpteo. *SLS (Selective Laser Sintering): 3D Printing Powder-based Process* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-sintering-sls-definition/

[9] Alkaios Bournias Varotsis. *Introduction to Binder Jetting 3D printing* [online]. 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/

[10] Efunda. *Laminated Object Mfg* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/lom.cfm

[11] Yan and Gu. *Schematic of LOM process* [online]. 1997 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-LOM-process-Yan-and-Gu-1997_fig10_281004567

[12] 3dhubs. *FDM 3D Printing materials compared* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/

[13] Filaments.ca. *Starter Temperatures & Printing Guide* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://filaments.ca/pages/temperature-guide

[14] BĚHÁLEK, Luboš. Přechodové teploty polymerů. *Polymery* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/06.html

[15] 3D Printing. *How to Get Stronger FDM 3D Prints* [online]. 2020 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://3dprinting.com/how-to/how-to-get-stronger-fdm-3d-prints/

[16] MALOCH, Jaroslav, Eva HNÁTKOVÁ, Milan ŽALUDEK a Petr KRÁTKÝ. Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Samples. *Materials Science Forum*. 2018, 919, 230-235. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.230. ISSN 1662-9752. Dostupné z: https://www.scientific.net/MSF.919.230.

[17] Jakub Kočí. *How to improve your 3D prints with annealing* [online]. 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/how-to-improve-your-3d-prints-with-annealing/

[18] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features [online]. Paris France: Omnexus [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic

[19] ABS tiskový materiál a jeho další varianty. ABS [online]. Brno: Materialpro 3D, c2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/abs/

[20] *Ostatní termoplasty - popis termoplastů* [online]. Jedovnice: Koplast, 2016 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.koplast.cz/ostatni-termoplasty-popis-termoplastu/

[21] *ABS Thermoplast* [online]. Sušice: Plasticsystems.cz, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://tiefziehen.com/cz/ABS/

[22] GUTIERREZ, Rocío Jaimes. *PLA Plastic/Material: All You Need to Know in 2020* [online]. 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/pla-plastic-material-polylactic-acid/

[23] Jiří Vyorálek. Jaký použít materiál pro 3D tisk – PLA vs. ABS [online]. 2017 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://blog.vyoralek.cz/3d-tiskarny/jaky-pouzit-material-3d-tisk-pla-vs-abs/Ú

[24] Polyethylene Terephthalate (PET): A Comprehensive Review [online]. SpecialChem, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic

[25] Materialpro3d. *PET, PET-G, PET-G/CF* [online], Materialpro 3D, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovnik/pet-g/

[26] 3dxtech. CARBONX™ PETG+CF [online]. 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.3dxtech.com/carbonx-petg-cf/

[27] CROW. *POLYAMIDE FIBERS (NYLON)* [online]. CROW, 2015 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://polymerdatabase.com/Fibers/Nylon.html

[28] Treatstock. *Nylon (FDM 3D printing)* [online]. Newark: Treatstock, 2020 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.treatstock.com/material/nylon-fdm

[29] All3dp: Tyler Koslow. *The Best Carbon Fiber 3D Printers & Filaments* [online]. 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/best-carbon-fiber-3d-printer-price/

[30] Simplify3d. *ASA* [online]. 2020 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/asa/

[31] Tereza Provazníková. *Polykarbonát | vlastnosti, výhody, použití* [online]. 2006 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: http://www.earch.cz/cs/polykarbonat-vlastnosti-vyhody-pouziti

[32] Gizmodorks. *3D PRINTING POLYCARBONATE FILAMENT* [online]. 2015 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://gizmodorks.com/polycarbonate-3d-printer-filament/

[33] Beamler. *What is the difference between TPE and TPU in 3D printing?* [online]. 2019 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.beamler.com/difference-between-tpe-and-tpu/

[34] All3dp. *The PLA Filament Buyer's Guide* [online]. All3DP, 2019 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://all3dp.com/1/pla-filament-3d-printing/

[35] Materialpro3d. *SPECIÁLNÍ FILAMENTY* [online], Materialpro 3D, 2020 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/

[36] 3ders. *3M makes non-stick PTFE polymers 3D printable through new patent-pending tech* [online]. 2016 [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.3ders.org/articles/20160916-3m-makes-non-stick-ptfe-polymers-3d-printable-through-new-patent-pending-tech.html

[37] Joseph Flynt. *Dissolvable HIPS Filament Properties and Best Brands* [online]. 2018 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://3dinsider.com/hips-filament/

[38] Simplify3d. PVA [online]. 2019 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pva/

[39] En.wikipedia. *Applications_of_3D_printing* [online]. 2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Applications_of_3D_printing

[40] VTM: HELENA VRECKOVÁ. *Netušené možnosti 3D tisku* [online]. [cit. 2020-04--3]. Dostupné z: http://vtm.e15.cz/netusene-moznosti-3d-tisku

[41] Cdrmarket.cz. *3D tiskárna do domácnosti a její využití* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://www.cdrmarket.cz/3d-tiskarna-do-domacnosti-a-jeji-vyuziti/

[42] EHRENSTEIN, Gottfried W., Gabriela RIEDEL a Pia TRAWIEL. *Thermal analysis of plastics: theory and practice*. Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 2004. ISBN 978-3-446-22673-9.

[43] Differential scanning calorimetry [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: http://pslc.ws/macrog/dsc.html

[44] Luboš Běhálek. *DSC jako nástroj pro ověřování kvality plastů* [online]. 2015 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/dsc-jako-nastroj-pro-overovani-kvality-plastu.html

[45] ZHANG, JIAN-JUN & YIN. *Based Study of Self-Sensing Properties for Shape Memory Alloy-Actuated Artificial Muscle: Sensors* [online]. Switzerland, 2013 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257205192

[46] BĚHÁLEK, Luboš. Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. *Polymery* [online]. © Code Creator, 2016 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/09.html

[47] Pslc.ws. *The Meaning of "Mechanical"* [online]. 2020 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://pslc.ws/macrog/mech.htm

[48] WARD, I. M. a J. SWEENEY. *Mechanical properties of solid polymers*. Third edition. Chichester, West Sussex: John Wiley, 2012. ISBN 9781444319507

[49] BĚHÁLEK, Luboš. *Vlastnosti polymerů – materiálový list, inspekční certifikát Index toku taveniny termoplastů* [online]. © Code Creator, 2016 [cit. 2020-04-132]. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/09.html

[50] JANDA. *Vliv vnějších polí na fázový přechod II-I isotaktického polybutenu-1* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/40654. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martina Hřibová

[51] KRAMOLIŠ. *Vliv vnějších polí na přechod II - I u isotaktického PB - 1* [online]. Zlín, 2014 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/28679. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Martina Hřibová

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

%	Procento
°C	Stupeň Celsia
3D	Trojrozměrný prostor
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitrilstyrenakryl
BJ	Binder Jetting
CF	Carbon fiber
cm	Centimetr
c_p	Tepelná kapacita
DLP	Digital Light Processing
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie
E	Modul pružnosti
F	Síla
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
G	Gram
HIPS	High Impact Polystyrene
ISO	Organization for Standardization
ITT	Index toku taveniny
kV	Kilovoltt
LED	Význam třetí zkratky.
LOM	Laminated Object Manufacturing
M	Hmotnost
mA	Miliamper

MFR	Melt Flow Rate
MJ	Material Jetting
mm	Milimetr
Mo	Ohybový moment
MPa	Mega pascal
mV	Milivolt
MVR	Melt Volume Rate
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PA	Polyamid
PBT	Polybutylentereftalát
PC	Polykarbonát
PEEK	PolyEtherEtherKeton
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Polylaktid
PMMA	Význam třetí zkratky.
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA	Polyvinylalkohol
PVB	Polyvinylbutyral
Q	Teplený tok
RC	Rapid Casting
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RM	Rapid Manufacturing
RT	Rapid Tooling
S	Plocha průřezu
SGC	Solid Grounding Curing

SLA	Stereolitogrpahy apparatus
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selektivní laserové slinování
SLS	Selective Laser Sintering
T	Teplota
T	Čas
T_f	Teplota viskozitního toku
T_g	Teplota skelného přechodu
T_m	Teplota tání
TPE	Termoplastický polypropylen
TPU	Termoplastický polyuretan
UV	Ultra Violet
v_h	Rychlosti ohřevu
W_o	Modul průřezu
E	Poměrné prodloužení
Θ	Úhel dopadu paprsku
σ	Napětí
σ_b	Napětí pro přetržení
σ_{fm}	Napětí v ohybu
σ_m	Napětí na mezi pevnosti
σ_y	Napětí na mezi kluzu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Princip tisknutí výrobků technologii SLA rozmítacím zrcátkem [5].....12
Obr. 2 Postup výroby objektu technologii FDM [7].....13
Obr. 3 Princip tisku výrobku technologii BJ [5].....15
Obr. 4 Princip tisku předmětu technologii MJ [5].....16
Obr. 5 Schéma tisku pomocí technologie LOM [11].....17
Obr. 6 Výrobek z materiálu PETG před a po temperování [15].....20
Obr. 7 Cyklus PLA [22].....22
Obr. 8 Křivky zobrazující entalpické změny ohřevu a chlazení [45].....31
Obr. 9 Typické křivky polymerů v tahu [46].....33
Obr. 10 Typická zatěžovací křivka pro semikrystalické polymery [46].....34
Obr. 11 Ohybová zkouška a) tříbodová b) čtyřbodová [46].....35
Obr. 12 Schéma rentgenové lampy [50].....36
Obr. 13 Filament po tahové zkoušce.....43
Obr. 14 Měřený filament.....43
Obr. 15 Ohybová zkouška tělíska.....43
Obr. 16 Tělíska po ohybové zkoušce.....43
Obr. 17 Záznam RTG difrakční analýzy ABS-T.....44
Obr. 18 Záznam RTG difrakční analýzy PLA.....44
Obr. 19 Záznam RTG difrakční analýzy PETG CF.....45
Obr. 20 Záznam RTG difrakční analýzy PETG-XT.....45
Obr. 21 Záznam RTG difrakční analýzy Smartfil Nyslstrong.....46
Obr. 22 Záznam DSC vzorku ABS-T.....47
Obr. 23 Záznam DSC vzorku PLA.....48
Obr. 24 Záznam DSC vzorku PETG CF.....48
Obr. 25 Záznam DSC vzorku PETG-XT.....49
Obr. 26 Záznam DSC vzorku Smartfil Nylstrong.....50
Obr. 27 Diagram tahové zkoušky ABS-T.....51
Obr. 28 Diagram tahové zkoušky PLA.....52
Obr. 29 Diagram tahové zkoušky PETG CF.....52
Obr. 30 Diagram tahové zkoušky PETG-XT.....53
Obr. 31 Diagram tahové zkoušky Nylstrong.....53
Obr. 32 Ohybová zkouška tělíska z ABS-T.....55

Obr. 33 Ohybová zkouška tělíska z PLA.....55
Obr. 34 Ohybová zkouška tělíska z PETG CF.....56
Obr. 35 Ohybová zkouška tělíska z PETG-XT.....57
Obr. 36 Ohybová zkouška tělíska z Nylstrong.....57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Krystalinita materiálu.....46
Tab. 2 Výsledky diferenciální skenovací kalorimetrie.....50
Tab. 3 Výsledky tahové zkoušky.....54
Tab. 4 Výsledky ohybové zkoušky.....58