

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti 3D výtisků

Vedoucí práce: doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Autor práce: Tomáš Ryska

© 2022 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Ryska

Procesní inženýrství
Technologická zařízení staveb

Název práce

Mechanické vlastnosti 3D výtisků

Název anglicky

Mechanical properties of 3D printed things

Cíle práce

Cílem práce je provést literární rešerši v oblasti zkoušení 3D vytištěných objektů. Popis základních zkoušek mechanických vlastností, způsoby tisku a zkoušení zkušebních objektů metodou 3D tisku.

Metodika

- 1) Úvod
- 2) Stavba polymerních materiálů
- 3) Vliv plniv na polymerní materiály
- 4) Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti
- 5) Mechanické zkoušky 3D výtisků
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

3D tisk, Mechanické vlastnosti, Technologické vlastnosti, Filament

Doporučené zdroje informací

- DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vysoká škola chemicko-technologická, 1995.
- EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. Scientia, 2009.
- FERRY, John D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1980.
- GARCÍA-DOMÍNGUEZ, Amabel, et al. Considerations on the applicability of test methods for mechanical characterization of materials manufactured by FDM. Materials, 2020, 13.1: 28.
- GARZON-HERNANDEZ, S., et al. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. Materials & Design, 2020, 188: 108414.
- LANDEL, Robert F.; NIELSEN, Lawrence E. Mechanical properties of polymers and composites. CRC Press, 1993.
- MLEZIVA, Jaroslav. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000.
- VAN KREVELEN, Dirk Willem; TE NIJENHUIS, Klaas. Properties of polymers: their correlation with chemical structure; their numerical estimation and prediction from additive group contributions. Elsevier, 2009.
- WARD, Ian M.; HADLEY, Dennis W. An introduction to the mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons Ltd.; John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- WARD, Ian M.; SWEENEY, John. Mechanical properties of solid polymers. John Wiley & Sons, 2012.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Rostislav Chotěborský, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2021

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Mechanické vlastnosti 3D výtisků" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích a cenné rady, které mi pomohly vypracovat tuto bakalářskou práci.

Mechanické vlastnosti 3D výtisků

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá popisem mechanických vlastností 3D výtisků. Cílem práce je analyzovat faktory ovlivňující mechanické vlastnosti objektů, které byly vytištěny technologií 3D tisku. Zároveň se zabývá mechanickými zkouškami, které se provádí za účelem zjištění těchto vlastností.

Práce je rozdělena je na 4 části. V první části jsou popsány metody a technologie 3D tisku, zároveň i to, jak vznikají syntetické polymery a jak se vyrábí.

Druhá část se věnuje plnivům pro polymerní materiály. V této části jsou definovány druhy plniv a jejich vliv na mechanické vlastnosti filamentů.

V třetí části jsou uvedeny typy nejpoužívanějších filamentů, popis jejich vlastností a vhodnost použití v praxi. Dále tato část obsahuje popis technologických aspektů tisku, které ovlivňují mechanické vlastnosti výsledného 3D výtisku.

Poslední část popisuje definice a průběhy mechanických zkoušek, které se provádějí na polymerních materiálech určených pro 3D tisk, a zároveň je zde uvedeno v jakých standardních prostředích se musí vykonávat. Závěrem jsou popsány dokončovací operace, které se provádějí na 3D výtiscích.

Klíčová slova: 3D tisk, Mechanické vlastnosti, Technologické vlastnosti, Filament

Mechanical properties of 3D printed things

Abstract

This bachelor thesis deals with the description of mechanical properties of 3D prints. The aim of the thesis is to analyze the factors affecting the mechanical properties of objects that have been printed by 3D printing technology. At the same time, it deals with the mechanical tests that are carried out in order to determine these properties.

The thesis is divided into 4 parts. The first part describes the methods and technologies of 3D printing, as well as how synthetic polymers are created and how they are produced.

The second part deals with fillers for polymer materials. In this part, the types of fillers and their influence on the mechanical properties of filaments are defined.

In the third part, the types of the most commonly used filaments, description of their properties and suitability for practical use are presented. Furthermore, this part contains a description of the technological aspects of printing that affect the mechanical properties of the resulting 3D print.

The last section describes the definitions and flow of mechanical tests that are performed on polymeric materials intended for 3D printing, and also indicates the standard environments in which they must be performed. Finally, the finishing operations that are performed on 3D prints are described.

Keywords: 3D printing, Mechanical properties, Technological properties, Filament

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 1 |
| 2. Cíl a metodika práce | 2 |
| 3. Stavba polymerních materiálů | 3 |
| 3.1. Metody a technologie 3D tisku | 3 |
| 3.2. Vznik syntetických polymerů | 4 |
| 3.3. Stavba polymerních materiálů vhodných pro 3D tisk..... | 6 |
| 4. Vliv plniv na polymerní materiály | 12 |
| 4.1. Plniva pro 3D tiskové materiály..... | 13 |
| 5. Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti | 18 |
| 5.1. Srovnání vybraných vlastností filamentů..... | 24 |
| 5.2. Technologické aspekty tisku | 24 |
| 6. Mechanické zkoušky 3D výtisků..... | 28 |
| 6.1. Tahová zkouška..... | 28 |
| 6.2. Tlaková zkouška..... | 30 |
| 6.3. Ohybová zkouška | 31 |
| 6.4. Zkoušky tvrdosti..... | 33 |
| 6.5. Dokončovací operace | 35 |
| 6.6. Standardní podmínky pro zkoušení polymerů | 35 |
| 7. Závěr | 37 |
| 8. Seznam použitých zdrojů..... | 38 |
| Seznam obrázků..... | 43 |
| Seznam tabulek..... | 44 |

1. Úvod

Technologie 3D tisku není záležitostí několika posledních let. Průkopníkem se stal Charles Hull, který si již v roce 1986 nechal patentovat technologii, která spočívala ve vytvoření objektu postupným vytvrzováním polymerů. Nazývala se stereolitografie. První oficiální stroj pro 3D tisk Hull vytvořil na konci 90. let a nazval ho stereolitografický aparát SLA-1. V tehdejší době se ještě pojem 3D tiskárna nepoužíval. Tento aparát položil základy pro vývoj 3D tiskáren, tak jak je známe dnes. [1]

V současnosti se 3D tisk označuje jako aditivní proces, což je proces, při kterém se postupně přidává materiál. Ve 3D tisku jde nejčastěji o polymerní materiály. Dnes je možné díky této technologii vytisknout nepřeberné množství výrobků. Od konstrukčních modelů, náhradních dílů, dekorativních prvků až po protézy či dokonce domy. Proto se tak můžeme setkat s velkým množstvím různých technologií, pro které existuje ještě větší seznam možných materiálů pro použití a tento seznam se nadále rozšiřuje. [1]

Velký důraz se v dnešní době klade na zvyšování mechanických vlastností tiskových materiálů. Samotné filamenty jsou obohaceny o různé druhy plniv, které slouží jak pro zvýšení mechanických vlastností, tak i pro změnu vzhledových parametrů výsledného materiálu. Tyto materiály se zkouší pomocí statických a dynamických zkoušek. Pomocí těchto zkoušek se určí, jaké vlastnosti se změnilo po využití technologie 3D tisku, neboť materiál prochází určitou tepelnou přeměnou.

2. Cíl a metodika práce

Cílem bakalářské práce je provést literární rešerši na téma zkoušek polymerních výrobků vyrobené technologií 3D tisku. Popis 3D tiskových technologií, polymerních materiálů vhodných ke 3D tisku a mechanických zkoušek, které se využívají pro zkoumání vlastností vytištěného objektu.

Metodika práce:

- Popis nejpoužívanějších 3D tiskových technologií. Analýza vzniku syntetických polymerních materiálů, které jsou vhodné pro tuto technologii, a jejich popis výroby.
- Popis plniv pro polymerní materiály a jejich využití pro technologii 3D tisku. Popis druhů plniv a výhody jejich použití.
- Analýza používaných filamentů, popis jejich pozitivních i negativních vlastností, vhodnost jejich použití a obtížnost tisku. Analýza vlivu technologických aspektů na vlastnosti polymerního materiálu.
- Popis mechanických zkoušek, prováděných na polymerních materiálech pro 3D tisk a technologických podmínek pro zkoušení.

3. Stavba polymerních materiálů

V této části bakalářské práce jsou popsány hlavní metody a technologie 3D tisku. Popis vzniku syntetických polymerních materiálů, které se používají pro 3D tisk. V poslední části této kapitoly jsou uvedeny nejdůležitější polymerní materiály používané pro 3D tisk, jejich stavba a vlastnosti.

3.1. Metody a technologie 3D tisku

3D tisk se označuje za aditivní výrobu. Nejprve se vytvoří návrh objektu pomocí modelovacího softwaru. Poté 3D tiskárna vytvoří objekt přidáváním vrstvy po vrstvě určitého vybraného materiálu, dokud se nevytvoří konečný tvar požadovaného objektu. Konečný výrobek může být vyroben řadou tiskových materiálů ať už je to plastová struna, pryskyřice, polyamidový nebo kovový prášek. [2]

Fused Filament Fabrication (FFF) / Fused Deposition Modeling (FDM)

Jedná se o nejpoblárnější a zároveň o nejlevnější metodu 3D tisku. Filament neboli plastová struna, která je namotaná na cívce, je přiváděna do trysky tiskárny. Tato tryska je zahřátá na potřebnou teplotu, která filament roztaví a poté skrze ní vytlačuje vlákno. Vytlačované vlákno je nanášeno na tiskovou plochu, která může a nemusí být zahřátá. Nanesené vlákno se vlivem okolního prostředí ochladí a ztuhne. Tryska poté dále nanáší vrstvu po vrstvě a tento cyklus se neustále opakuje, dokud není objekt plně vytištěn. Tiskovým materiálem pro tuto metodu je plastová struna. Nejčastějšími průměry strun jsou 3 a 1,75 mm. [3, 4]

Stereolitografie (SLA)

Jde vůbec o první tiskovou technologii na světě. Tato metoda dala základ pro komerční využívání 3D tisku. Stereolitografie využívá princip fotopolymerizace k výrobě 3D modelů pomocí pryskyřice citlivé na UV záření. Na tiskárně jsou umístěny zrcadla, kterým se v tomto případě říká galvanometry. Jedno je umístěno na ose x a druhé na ose y . Galvanometry namíří laserový paprsek na pryskyřici a ta se poté vytvrzuje a tuhne vrstvu po vrstvě. Velkou výhodou této metody je, že osa z pracuje s velmi malými výškami, řádově 15 až 100 mikrometrů a díky tomu je povrch součásti velmi hladký a vrstvení tisku je velmi těžko rozeznatelné. Jde o jednu z nejpřesnějších metod 3D tisku. [3, 4, 5]

Digital Light Processing (DLP)

Tyto typy tiskáren jsou principově totožné jako tiskárny SLA. Hlavní rozdíl je v tom, že DLP využívá digitální světelný projektor, který celou vrstvu zpevní pouze jedním zábleskem. Obraz každé vrstvy se skládá ze čtvercových pixelů, což znamená, že tisknutá vrstva je tvořena malými obdélníkovými bloky. Dalším rozdílem oproti metodě SLA je to, že DLP využívá LED nebo lampu vyzařující UV záření. Světlo z diod nebo záření z lampy je nasměrováno na tiskovou plochu pomocí mikrozrcadel. [5]

Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda spékání práškových materiálů. Nádoba s polymerním práškem se zahřeje téměř na bod teploty tání daného polymeru. Poté se nanese velmi tenká vrstva prášku, obvykle o tloušťce 0,1 mm, na tiskovou plochu. Laser začne materiál spékat. Po dokončení spékání se nanese na spečený materiál další vrstva prášku a celý proces se opakuje, dokud není objekt vytištěn. [4, 5]

Material Jetting (MJ)

Funguje na principu inkoustové tiskárny. Z tiskové hlavy tryská velké množství malých kapiček fotopolymeru, které se vytvrzují pomocí UV světla. Jakmile je nanesena jedna vrstva, tisková plocha se posune o jednu tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje. Od ostatních technologií se liší především tím, že tiskne bodově, nikoliv nanášením filamentu. Takto tištěné objekty potřebují podpory, které se tisknou zároveň s výtiskem a následně se odstraní pomocí rozpouštědel. [5]

3.2. Vznik syntetických polymerů

Ke 3D tisku se v drtivé většině případů využívají tzv. syntetické polymery. Ty se v přírodě jako takové nevyskytují, ale jsou vyráběny se chemickou syntézou. K jejich vzniku se využívají tři základní chemické reakce, a sice polymerace, polyadice a polykondenzace. Tyto reakce se několikrát opakují tak, že se z nízkomolekulární sloučeniny zvané monomer stane vysokomolekulární látka s názvem polymer. Podmínkou k reakci je, aby v monomeru byly alespoň dvě funkční skupiny, které jsou schopné reakce. [6, 7]

Polymerace

Jde o chemickou řetězovou reakci, které se účastní velké množství molekul monomeru a z této reakce vzniknou dlouhé makromolekuly polymeru. Aby mohl být proces polymerace zahájen, je potřeba stejně jako u dalších chemických reakcí dodat tzv. aktivační energii, aby

byly částice schopné chemické reakce. V tomto případě lze použít účinek tepelné energie nebo UV záření. Polymeraci rozdělujeme na 3 děje. Prvním z nich se nazývá reakce neboli iniciace, kde se pomocí iniciátoru dodává aktivační energie. Dalším dějem je růst nazývaný propagace. Zde dochází k růstu řetězce. Poslední částí je končení neboli terminace, kde dochází k zastavení růstu řetězce. Pokud polymerace probíhá u vícero monomerů současně, tak se jedná o kopolymeraci. Ta má ovšem velký význam, neboť je díky tomu možné řízeně měnit fyzikální vlastnosti polymeru. [6, 7]

Polymeraci můžeme rozdělit na radikálovou, iontovou nebo koordinační. To záleží na druhu aktivních částic. [6]

U radikální polymerace se pomocí reaktivních radikálů rozštěpí násobná vazba molekuly monomeru. Tyto radikály vznikají rozpadem reaktivní látky po dodání aktivační energie. Začne se opakovat proces, kdy radikál začne reagovat s molekulou monomeru a výsledkem je růst řetězce. Řetězec přestane růst například spojením dvou radikálů. Jedním z vhodných iniciátorů jsou například peroxidy. [6, 7]

Iontová polymerace nastává tehdy, když aktivní centrum nové vznikající makromolekuly dokáže vytvořit tzv. polarizované seskupení. Mezi toto seskupení je následně ukládána monomerní molekula. U tohoto druhu polymerace je třeba mnohem menší aktivační energie než u polymerace radikálové. [6]

Iontová polymerace se dělí podle toho, jak je vázaný atom uhlíku polarizován. Je-li polarizován kladně, jedná se o polymeraci kationtovou. Naopak, když je polarizován záporně, jde o polymeraci aniontovou. U kationtové polymerace dochází k terminaci při reakci kationtu a aniontu nebo když se atom uhlíku odtrhne z monomeru. Jako iniciátor se používá například fluorid boritý nebo chlorid titaničitý, což jsou látky, které velice silně kyselě reagují. U aniontové polymeraci nelze úplně hovořit o terminaci, jelikož polymerace končí tím, že se monomer spotřebovává. Dá se ovšem snadno obnovit přidáním původního monomeru. Může se přidat i jiný monomer, to už se ale jedná o vznik kopolymeru. Iniciátorem jsou v tomto případě například alkalické kovy, neboť ty jsou naopak silně zásadité. [6]

O koordinační polymeraci se jedná, když vznikají prostorově pravidelně uspořádané řetězce. Monomer se ukládá na konce těchto řetězců koordinovaně. K tomuto způsobu polymerace se používají Zieglerovy-Nattovy katalyzátory (iniciátory). [6]

Polykondenzace

Probíhá na podobném principu jako polymerace, ale zásadní rozdíl je ve výsledném produktu. Zatímco u polymerace se neliší chemické složení výsledného monomeru od použitého polymeru, tak při polykondenzaci vzniká polykondenzát, který má jiné chemické složení než látka, ze které vznikl. Stejně jako u polymerace dochází ke vzniku a růstu řetězce, ale při každém dalším napojení se odštěpí nízkomolekulární látka. Ve většině případů se jedná o vodu, dále chlorovodík nebo amoniak. Terminace se provádí velkým zvýšením viskozity prostředí, kde reakce probíhá. Vhodnou látkou k ukončení růstu jsou například monokarboxylové kyseliny. [6, 7]

Polyadice

Reakce dvou a více odlišných monomerů, která v molekule pojímají reaktivní atomové skupiny. Atom vodíků se přenesení z jedné skupiny na druhou a vzniká adice (slučování). Během polyadice se nevytváří žádný vedlejší produkt, ale vzniká nová, odlišná struktura. [6, 7]

3.3. Stavba polymerních materiálů vhodných pro 3D tisk

Pro 3D tisk jsou nejvhodnější polymerní materiály ze skupiny termoplastů, neboť se po ohřátí stávají materiálem tvarovatelným, poddajným a následným ochlazením se dostanou zpět do stavu tuhého. Termoplasty se dělí podle profesora Ducháčka [6] dělí na polyolefiny, fluoroplasty, vinylové, styrenové, akrylové polymery, polyestery, polyethery, polyamidy a polyurethany. Dále se práce věnuje termoplastům využívaných pro 3D tisk.

Termoplasty

Jsou to polymery, které se díky zvýšení své teploty dostanou do stavu plastického ze stavu tuhého a ochlazením se dostanou zpět do stavu tuhého. Při zahřívání neprobíhá žádná chemická reakce, to znamená, že termoplasty procházejí pouze fyzikálními změnami a celý proces je vratný. [9]

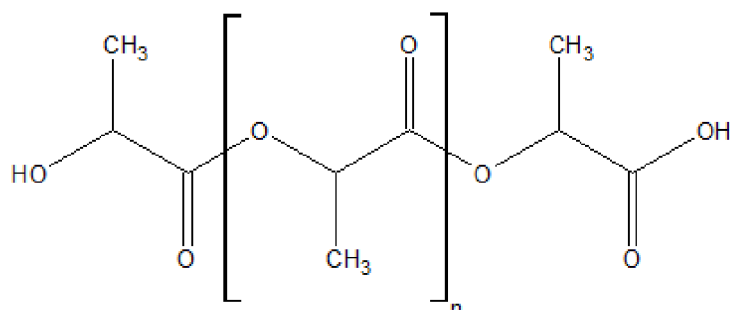
Termoplasty se dělí dle tvaru molekul na lineární a rozvětvené. Lineární molekuly se k sobě mohou snáze přibližovat a tím lépe vyplnit prostor. Tím je dána větší hustota a vyšší krystalinita polymeru. Tyto polymery se vyznačují dobrou rozpustností a tavitelností. Naopak rozvětvené špatně vyplňují prostor, čímž polymer vykazuje menší hustotu a nižší krystalinitu. Velká vzdálenost molekul zpřičiňuje pokles sil mezi nimi a tím pádem zhoršení většiny mechanických vlastností. [8, 9]

Dále se dělí podle uspořádání molekul na amorfní a semikrystalické. U amorfních polymerů molekuly zabírají naprosto náhodnou pozici. Příznačnými vlastnostmi jsou tvrdost, křehkost, vysoká pevnost, velký modul pružnosti a nízký index lomu. Semikrystalické polymery jsou určitým způsobem uspořádané. Příznačnými vlastnostmi jsou houževnatost, pevnost a modul pružnosti roste se stupněm krystalinity a mají větší index lomu. [8, 9]

Kyselina polylactonová

Kyselina polylactonová (polyactid acid) je termoplast vyrobený z přírodních materiálů, například z kukuřice, cukrové třtiny nebo řepy. Z těchto materiálů se pomocí mokrého mletí oddělí škrob. Poté se škrob namixuje s enzymy nebo jinými chemikáliemi a tento mix se následně zahřeje. Výsledným produktem je D-glukóza. Tento druh cukru se nechá fermentovat na kyselinu mléčnou, která pak následně pomocí polymerace dá vzniknout polymeru jménem PLA. [10, 11]

Kyselina mléčná se pro výrobu PLA zpracovává dvěma způsoby. Prvním je kondenzace kyseliny mléčné na laktid, který se následně podrobí polymeračnímu procesu. Druhým je pak použití kondenzačního procesu přímo s kyselinou mléčnou. [10]

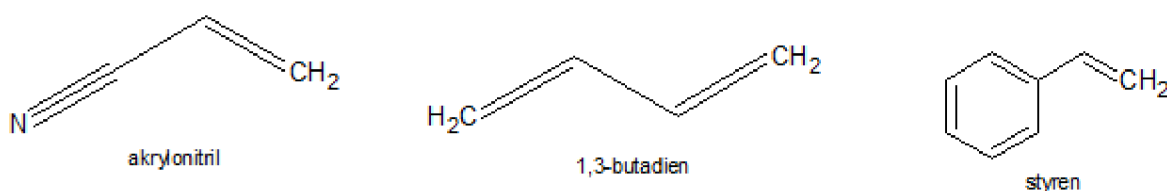


Obrázek 1 - Chemická struktura kyseliny polylactonové [11]

Kopolymery styrenu

Hlavním důvodem výroby kopolymeru styrenu je významné zvýšení houževnatosti, čím vyřeší jeho nedostatek u polystyrenu. Nejvýznamnějšími jsou kopolymery styrenu s akrylonitrilem a butadienem. Vyrábějí se sloučením klasického polystyrenu s elastomerem. Po dosažení větší houževnatosti se významně snižuje průhlednost. Veškeré mechanické vlastnosti, kromě zvýšené hodnoty houževnatosti, zůstávají téměř totožné s původním polystyrenem. [6]

Hlavním představitelem této skupiny je tzv. ABS neboli akrylonitril butadien styren. Jedná se o amorfnní polymer, který se vyrábí buď pomocí emulzní nebo blokové polymerace akrylonitrilu a styrenu za přítomnosti polybutadienu. Díky velké škále poměrů těchto složek lze vyrobit velké množství těchto kopolymerů s velmi odlišnými vlastnostmi. Na trhu se nabízí až přes 50 různých druhů ABS. Akrylonitrilová složka významně zvyšuje jeho chemickou odolnost a butadienová složka zase zvyšuje jeho houževnatost. Velmi vhodné je využití ABS u kompozitních materiálů, kdy se vyztuží například skleněnými vlákny, které zvýší jeho mechanické vlastnosti. Zajímavostí také je, že se dá místo butadienové složky použít kaučuk akrylátového typu pro lepší stabilizaci proti UV záření. Takový termoplast se nazývá akrylonitril styren akrylát, zkráceně ASA. [6, 12, 13]



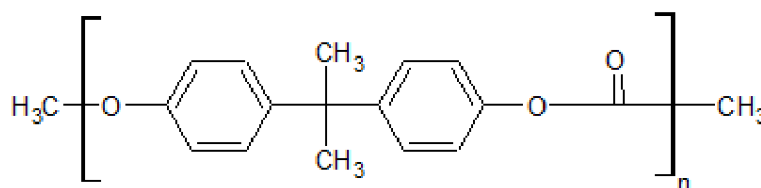
Obrázek 2 - Chemické vzorce monomerů ABS [12]

Polykarbonáty

Jsou to polyestery kyseliny uhličitě a dihydroxysloučenin. Pojímá 2 fenolická jádra, která jsou spojená můstkem. Nejlepší polykarbonáty nalezneme pod názvem dian, což jsou polykarbonáty, u kterých je základem 2,2-bis(4-hydroxyfenyl) propan. Ty se vyrábějí buď přeesterifikací nebo přímou fosgenací. Přeesterifikace probíhá při recipročním účinku dianu a difenylhydrokarbonátu za působení teploty v rozmezí 150 až 300 °C. O fosgenaci mluvíme, když spolu reaguje zásaditý vodný roztok dianu a fosfogen. Tento proces je nejčastěji doprovázen hydroxidem sodným nebo pyridinem. Následně je možné pomocí terminace regulovat molekulovou hmotnost polymeru. [6]

Polykarbonáty jsou amorfnní termoplasty, které mají velice dobré mechanické a dielektrické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou stálé v teplotách o rozmezí -70 až 140 °C. Jsou polární, ale mají malou nasákavost, takže to prakticky neovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Mezi hlavní charakteristiky patří vysoká pevnost, tuhost, tvrdost a houževnatost. Také jsou velmi odolné proti lomu a křípu. Velkou výhodou je jejich fyziologická nezávadnost a jsou prakticky bez zápachu. Jsou rozpustné v chlorovaných uhlovodících a mají velmi dobrou chemickou odolnost, kdy se velice těžko rozpouštějí v aromatických

uhlovodících, esterech a ketonech. Odolávají také UV záření a působení vody, zásadám a solím. [6, 13]

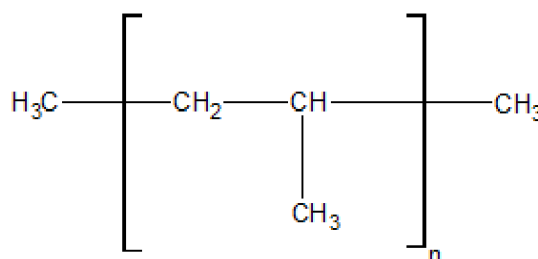


Obrázek 3 - Opakující se základní jednotka polykarbonátu [6]

Polypropylen

K výrobě polypropylenu se využívá buď radikálové nebo kationtové polymerace a za působení Zieglerova katalyzátoru vznikne tzv. izotaktický neboli čistý polypropylen, který je vysokomolekulární a vysoce krystalický. Mechanické vlastnosti snižuje kašovitý stav polypropylenu, jemuž se říká ataktický podíl. Ten se dá odstranit alifatickými uhlovodíky. Sumární vzorec polypropylenu je $(C_3H_6)_n$. [6]

Stejně jako polyethylen je polypropylen semikrystalický termoplast a jeho struktura je nepolární, a tudíž se jedná o nenavlhavý termoplast. Teplota tání je u čistého produktu $176\text{ }^\circ\text{C}$, avšak kvůli části ataktického podílu se pohybuje v rozmezí 160 až $170\text{ }^\circ\text{C}$. Také má dobrou chemickou odolnost, jelikož odolává polárním rozpouštědly, solím, zásadám a kyselinám i při vyšších teplotách. Charakterizuje ho vyšší pevnost, tuhost, tvrdost, a především vyšší odolnost proti oděru. Jedná se o hořlavý materiál. [6, 13]



Obrázek 4 - Chemická struktura polypropylenu [6]

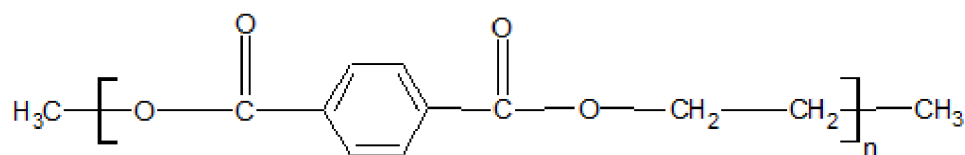
Polyethyltereftalát

Termoplastický, lineární polyester, který může být jak amorfni, tak i semikrystalický. Jedná se o polykondenzát kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Je polární a pokud je polyethyltereftalát amorfni, má velmi vysokou hodnotu propustnosti světla. Vyrábí se dvoufázově. V té první se dimethyltereftalát transesterifikuje ethylenglykolem a přitom se

uvolňuje methylalkohol. Výsledný polymer vzniká ve druhé fázi, kdy se vydestiluje přebytečný ethylenglykol. Tento proces probíhá za teploty mezi 190 až 195 °C. [6, 13]

Vyniká především pro své mechanické vlastnosti. Má příznivé kluzné vlastnosti a není náchylný na kríp. Je křehký a jeho teplotní odolnost je kolem 100 °C. [13]

Do polyethylentereftalátu se ve 3D tiskové praxi ještě přidává modifikovaný glykol, který se přidává během polymerace. Výsledný produkt následně vykazuje mnohem větší odolnost vůči nárazu.

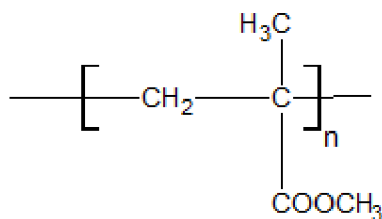


Obrázek 5 - Chemická struktura polyethylentereftalátu [13]

Polymethylmethakrylát (PMMA)

Amorfní termoplast ze skupiny akrylových polymerů, který se získává polymerací. Charakterizuje se především svojí dokonalou číroostí a bezbarvosťou. Jeho propustnosť světla je až 92 %. V jeho chemickém složení se nachází kyslík, díky němuž vznikají mnohem větší mezimolekulární síly. Díky tomu má polymethylmethakrylát velice dobré mechanické vlastnosti. [6, 13]

Jedná se o polární termoplast, takže materiál navlhává a to vede ke špatným elektroizolačním vlastnostem a nízké chemické odolnosti. Rozpouští se v ketonech, esterech a v chlorovaném uhlovodíku. Naopak dokáže odolat roztokům kyselin, zásad, solí a oxidaci. Velice dobře odolává povětrnostním podmínkám a UV záření. Jeho odolnost proti teplotě je až 100 °C. PMMA není náchylný na kríp. Je křehký a není příliš odolný proti rázům. [6, 13]



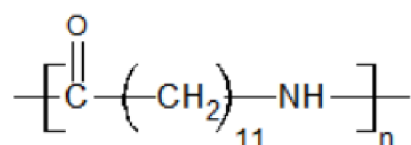
Obrázek 6 - Chemická struktura polymethylmethakrylátu [13]

Polyamidy

Semikrystalické, lineární termoplasty. Tvoří ho řetězce, ve kterém se zpravidla nachází skupiny amidové a methylenové uspořádané za sebou. Vyrábí se pomocí tří polyreakcí a sice

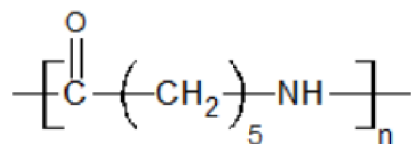
polykondenzací aminokarboxylových kyselin, polymerací jejich cyklických aminů a polykondenzací diaminů s karboxylovými kyselinami nebo jejich dichloridy. Nejvýznamnějšími produkty těchto reakcí pro 3D tiskové filamenty jsou především polyamid 12 (PA-12) neboli nylon 12 a polyamid 6 (PA-6) neboli nylon 6. Číslo polyamidu charakterizuje výchozí polymer podle počtu atomů uhlíků v jejich molekulách. [6, 13]

Nylon 12 se vyrábí polymerací lauryllaktamu při teplotě nad 260 °C. Zpracovává se vytlačováním a vstřikováním. Má dobré kluzné vlastnosti, dobrou odolnost proti opotřebení, dobrou odolnost proti korozi a vysokou houževnatost. [14]



Obrázek 7 - Chemická struktura nylonu 12 [14]

Nylon 6 se vyrábí hydrolytickou nebo aniontovou polymerací buď z kyseliny 6-aminokapronové nebo 6-kaprolaktanu. Má obdobné vlastnosti jako nylon 12, ovšem má vyšší hygroskopické vlastnosti, čímž snadněji vsakuje vody. Proto je PA-12 pro 3D tisk výhodnější. [14]



Obrázek 8 - Chemická struktura nylonu 6 [14]

4. Vliv plniv na polymerní materiály

Přidáním plniv do polymerních materiálů vzniká tzv. kompozit čili materiál skládající se ze dvou nebo více složek. Hlavním důvodem výroby kompozitu je sloučit dohromady alespoň dvě složky, kde každá plní ve výsledném produktu svoji specifickou funkci. Například může docházet ke zvýšení mechanických vlastností, k vyšší odolnosti proti vysokým teplotám, ke zvýšení tvrdosti a houževnatosti nebo i ke změně barvy původního materiálů přidáním složky obsahující námi požadovaného pigmentu. Kompozit se dělí na matrici (v tomto případě polymerní materiál) a výztuž, což je složka, po jejímž přidání k matrici se změni materiálové vlastnosti výsledného produktu. [15]

Kompozit je na rozdíl od původního materiálu heterogenní a anizotropní. Z toho je třeba si uvědomit, že matrice a výztuž mají jiné vlastnosti. Díky anizotropii dochází k tomu, že při normálovém namáhání může vznikat nejen normálové, ale i smykové napětí. Dále je důležité, že materiály musí mít dobrou mezifázovou adhesi, a především vhodné deformačně-napěťové vlastnosti. [16, 17]

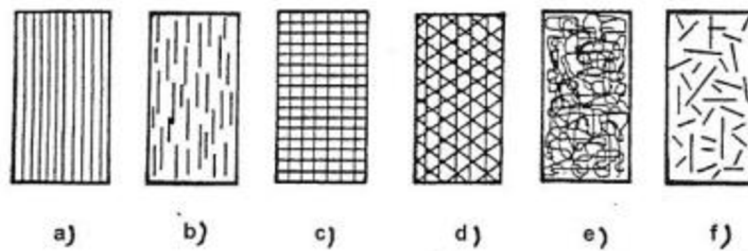
Jako plniva se používají anorganické i organické látky. Rozdělují se podle geometrického tvaru výztuže. První kategorií jsou vlákna o různých délkách. Druhá jsou pak částicová plniva ve tvaru prášku nebo kuliček. Tyto plniva se dále dělí na vyztužující a nevyztužující. [17]

Vláknitá plniva

Rozdělují se na dlouhovláknové a krátkovláknové. Velice důležitou charakteristikou tohoto druhu plniv je především jejich orientace. Orientace vláken se volí podle druhu zatížení. Vlákenná plniva se využívají pro zvýšení pevnosti a houževnatosti výsledného materiálu. Dále jsou uvedeny charakteristické typy geometricky uspořádaných vláken:

- a) jednosměrná dlouhá vlákna
- b) jednosměrná krátká vlákna
- c) dvousměrné vyztužení
- d) vícesměrné vyztužení
- e) náhodná orientace vláken
- f) náhodná orientace krátkých vláken

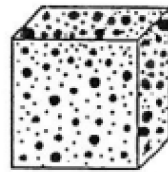
Typy takto uspořádaných vláken jsou zobrazeny na obrázku 9. [15]



Obrázek 9 - Geometrické upořádání vláken [15]

Částicová plniva

Jak už bylo uvedeno, tak částicová plniva se využívají buď prášek nebo malé kuličky. Tyto částice se rozptýlí po celé matici a jejich hlavní funkcí je především výrazně omezit růst plastických deformací. Částicová plniva zvyšují tvrdost materiálu. Dalším efektem tohoto druhu plniva může být zlepšení tepelné a elektrické vodivosti. Rozmístění částic v matici je zobrazeno na obrázku 10. [15]



Obrázek 10 - Rozmístění částic v matici [15]

4.1. Plniva pro 3D tiskové materiály

Plniva pro 3D tiskové polymerní materiály se mohou kategorizovat do 7 skupin. Jsou to plniva uhlíková, keramická, skelná, minerální, plniva z kovových prášků, plniva obsahující dřevo a poslední skupinou jsou tzv. hybridní kompozity, kde dochází ke kombinaci více než jednoho typu plniva. [18]

Plniva na bázi uhlíku

Tyto plniva se používají především s cílem zvýšit mechanické vlastnosti polymerních materiálů. Toto zlepšení nastává díky vysoce anizotropní hexagonální struktuře. Existují jak ve tvaru vlákna, tak i v prášku. Mezi nejpoužívanější patří dlouhá uhlíková vlákna, grafeny a uhlíkové nanotrubičky. [17, 18, 19]

Kompozity s dlouhými uhlíkovými vlákny a grafeny vykazují velké zvýšení pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. Například po přidání uhlíkových vláken se u materiálu PLA při optimálních podmínkách zvýší pevnost v tahu až o 41 % a modulu pružnosti v tahu

až o 26 %. Výhodou také je, že se nijak významně nemění teplota skelného přechodu. Důležitým parametrem tohoto plniva je jeho obsah z celkové hmotnosti, protože při vyšším podílu hmotnosti z celkového materiálu může docházet k pórovitosti a tím pádem i ke zhoršení pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. [18]

Při použití uhlíkových nanotrubiček se zvýší pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. Kromě mechanických vlastností nanotrubičky zvyšují krystalinitu kompozitu. [18]

Keramická plniva

Jedná se o částicová plnidla a mezi hlavní zástupce patří keramiky skládající se z oxidu hlinitého (Al_2O_3), oxidu titaničitýho (TiO_2), oxidu zinečnatého (ZnO), titaničitanu barnatého (BaTiO_3) a diborid zirkoničitý (ZrB_2). Používají se ve tvaru prášku. Oxid hlinitý se přidává za účelem zvýšení viskozity materiálu. Vedlejším účinkem je mírné navýšení hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. Oxid titaničitý výrazně navyšuje pevnost v tahu, ale zároveň snižuje tažnost. Oxid zinečnatý má přesně opačný efekt. Vylepšuje hodnotu tažnosti, ale hodnota pevnosti v tahu je menší než původní materiál. Vedlejším efektem je mírné zvýšení elektrické vodivosti materiálu. Titaničitan barnatý se využívá kvůli navýšení hodnoty permitivity. Permitivita značí míru odporu pro vytváření elektrického pole. Posledním uvedeným zástupcem je diborid zirkoničitý, jehož úlohou je navyšovat hodnotu tažnosti a viskozity materiálu. Mírně navyšuje i pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. [18]

Skelná plniva

Oproti uhlíkovým plnivům se jedná o materiál izotropní a amorfní. Používají se ve tvaru vláken, prášku i kuliček. Mezi hlavní představitele skelných plniv patří skelná vlákna skládající se z oxidu draselného (K_2O), oxidu hlinitého (Al_2O_3), oxidu křemičitýho (SiO_2), oxidu vápenatýho (CaO), oxidu hořečnatýho (MgO) a oxidu sodnýho (Na_2O). Tyto vlákna se dále rozdělují podle jejich procentuálního obsahu oxidu. První skupinou jsou tzv. E – skloviny, které fungují jako skvělé elektrické izolanty. Další skupinou jsou S nebo R – skloviny, které se přidávají pro zvýšení pevnosti materiálu. C – sklovina se vyznačují především svou vysokou chemickou odolností. Přidávají se za účelem zvýšení odolnosti proti kyselinám a agresivním látkám. Poslední skupinou jsou ECR – skloviny neboli bezborité skloviny. Mají vysokou dielektrickou konstantu a díky tomu výsledný materiál bude špatně vést elektrický proud. [18, 19]

Kovová plniva

Hlavními zástupci kovových plniv jsou železo, měď, wolfram, bronz a hliník. Mohou se používat ve tvaru vlákna a prášku. Kovová plniva mají vliv na velké množství vlastností materiálu ať už jsou to vlastnosti mechanické, tepelné, elektrické a v neposlední řadě vlastnosti tvarovatelnosti. Ovšem je potřeba si uvědomit, že kovem plněné materiály jsou velice abrazivní a sťažuje to jejich další zpracovatelnost, především u 3D tisku. [18, 20]

Přidáním železa se zvyšuje hodnota elektrické vodivosti a zároveň se snižuje jeho tepelná kapacita, tažnost, pevnost v tahu a viskozita. Měď se přidává za účelem zvýšit pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu a elektrickou vodivost. Naopak snižuje hodnotu tažnosti, tepelné kapacity a viskozity. Wolfram má pozitivní vliv na hodnotu radiačního stínění a zároveň snižuje viskozitu materiálu. Vedlejšími účinky tohoto plniva je mírné zvýšení nebo snížení hodnot pevnosti v tahu, tažnosti, permitivity a teploty skelného přechodu. Bronz se využívá pro snížení pevnosti v tahu a ohybového napětí. Posledním uvedeným zástupcem je hliník, po jehož přidání se výslednému materiálu zvýší především mechanické vlastnosti a sice pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. [18, 20]

Minerální plniva

Hlavními minerálními plnivy používané do polymerních materiálů pro 3D tisk jsou zeolity, montmorillonity, perlity, spinely, mastky. Používají se jak ve tvaru vláken, tak i prášku. Zeolit je hlinitokřemičitý minerál, který se vyznačuje svou mikroporézní strukturou. Využívá se pro zvýšení krystalinity a tažnosti materiálu. Má vliv i na změnu teploty skelného přechodu. Montmorillonit patří do skupiny jílových minerálů. Má vliv především na zvýšení hodnot pevnosti v tahu, tažnosti, ohybového napětí a tepelné kapacity. Perlity jsou amorfni vulkanická skla, které obsahují vysoký podíl vody. Zvyšují modul pružnosti v tahu, a naopak snižují tažnost materiálu. Mají i menší vliv na krystalinitu. Spinel je minerál, který zvyšuje hodnoty pevnosti v tahu a ohybového napětí. Toto plnivo pak snižuje krystalinitu a teplotu skelného přechodu. Posledním zde uvedeným minerálním plnivem je mastek, což je jednoklonný minerál. Je oblíbený zejména pro svou žáruvzdornost a vysokou odolnost. Zvyšuje krystalinitu materiálu a snižuje ohybové napětí a teplotu skelného přechodu. [18]

Aramidová vlákna

Jedná se o organická vlákna, které jsou tvořeny amidovými a aromatickými skupinami. Použitím aramidových plniv vzniká velmi pevný kompozit díky kovalentním vazbám, které spojují molekuly aramidu. Hlavním zástupcem je para-aramid (Kevlar). Jeho použitím se

kompozitu výrazně zvyšuje pevnost v tahu a houževnatost. Problémem může být jeho velice nízká adheze a náchylnost ke snižování modulu pružnosti v tahu, pokud se materiál nasákne vodou. [19]

Plniva na bázi dřeva

Dřevěným plnivem nazýváme dřevo ve tvaru prášku. Slouží především jako designový prvek výsledného materiálu, který má imitovat dřevo. Problémem u následného tisku je, že toto plnivo výrazně snižuje jeho mechanickou odolnost a soudržnost vrstev. Snižuje především modul pružnosti v tahu a tažnost. [18, 20]

Hybridní kompozity

Hybridních kompozitů existuje celá řada. Pro příklad jsou zde uvedeny dva příklady, kdy je matrice, v tomto případě polymer, sloučen se dvěma různými plnivy neboli výztužemi. V prvním případě byla použita kombinace plniv z hliníku a oxidu hlinitého. Použitím této kombinace se výrazně zvýšila odolnost proti opotřebení a tepelná kapacita výsledného kompozitu. Naopak se snížila krystalinita, pevnost v ohybu a teplota skelného přechodu. V druhém případě byl použit karbid křemíku a oxid hlinitý. Rapidně se zvýšila odolnost proti opotřebení. [18]

Barviva

Filamenty se vyrábějí v různých barevných odstínech. Ke změně barvy se využívají plniva ve tvaru prášku. Ovšem poté nastává problém s vlastnostmi filamentu, protože částice plniva barviv, které se do něj přidávají nemění pouze jejich vzhled ale i jeho mechanické vlastnosti.

Tomuto problému se věnoval ve své práci Wittbrodt [21]. Zkoumal vliv pěti různých aditiv barev na materiál PLA a sice černou, stříbrnou, modrou, bílou a surový materiál bez přidané barvy. Nejvyšší mez pevnosti dosahovalo surové PLA bez příměsí. Nejnižších naopak barva stříbrná. Materiál má kvůli tomuto plnivu tendenci se dříve lámat. Z toho lze usuzovat, že vyšších hodnot mechanických vlastností budou filamenty dosahovat bez příměsí barviv pouze v surovém stavu. Vliv plniv na materiál PLA je uveden v tabulce 1. [21]

Tabulka 1 - Vliv barevných plniv na mez pevnosti materiálu PLA [21]

| Barva | Mez pevnosti [MPa] |
|--------------|-------------------------------|
| Natural | 57,16 |
| Black | 52,81 |
| Gray | 50,84 |
| Blue | 54,11 |
| White | 53,97 |

Nejvyšších hodnot mechanických vlastností se dosahuje u struktur, která mají dlouhovláknovou výztuž především z uhlíkových a skelných vláken. Tyto plniva se tak stávají nejžádanějšími na trhu a jejich cena stále klesá. [17]

Na závěr této kapitoly je potřeba říci, že hodnoty veškerých změn výše uvedených vlastností se různí podle receptury různých firem. Zde bylo pouze uvedeno, na jaké vlastnosti mají různá plniva vliv.

5. Filamenty pro 3D tisk a jejich vlastnosti

Filamenty neboli tiskové struny pro 3D tisk se vyrábějí z termoplastů. V této kapitole jsou uvedeny nejběžnější a nejpoužívanější filamenty. Jsou popsány jejich vlastnosti, jaké mají výhody a nevýhody z hlediska použití a jaké mají nároky na tisk. Závěrem jsou uvedeny i hlavní tiskové aspekty, které ovlivňují změnu mechanických vlastností tištěného objektu.

PLA

Kyselina polylactická je bioplast, který je oblíbený pro svou ekologickou šetrnost. Dá se rozložit v kompostárnách za působení teploty alespoň 80°C. Ovšem jeho rozklad není tak jednoduchý, za ideálních podmínek tomuto plasty trvá 3 měsíce, než se rozloží. Jde o levný materiál, který se používá především na výtisky, u kterých je potřeba se zaměřit na detail. Vhodný je i na výrobu rychlých modelů, u kterých neočekáváme vysoké nároky na teplotní nebo mechanickou odolnost. [9, 22]

PLA je tuhý a křehký plast, má nízkou pevnost v ohybu a oproti ostatním materiálům se při zatížení neohýbá, ale zlomí. Má nízkou teplotu skelného přechodu, což znamená, že za působení tepla se rychle deformuje, a proto nepotřebuje k tisku vyhřívanou podložku. Nemá ani moc velkou odolnost vůči UV záření, které by mohlo tento materiál také deformovat. Není rozpustný v rozpouštědlech, ale některé chemikálie mohou uvolňovat z tohoto materiálu kyselinu mléčnou, která může být zdraví škodlivá. [9]

Mezi výhody tohoto materiálu patří bezpochyby jeho velmi snadný tisk, takže ho zvládne využít téměř každá 3D tiskárna a jak už bylo zmíněno, nevyžaduje vyhřívanou tiskovou plochu, ovšem dá se využít pro lepší přilnavost povrchu. V tom případě se tisková plocha zahřívá ideálně na 60 °C. PLA vyžaduje poměrně nízké teploty trysky při tisku a sice kolem 215 °C. Materiál má velké množství druhů barev. Jedná se netoxický materiál, díky čemuž se dá dobře využít například v lékařském a potravinářském průmyslu. Neoddiskutovatelnou výhodou je, že PLA při tisku neuvolňuje téměř žádné výpary a práce s tímto plastem nese jen minimální riziko. [9, 22]

ABS

Akrylonitrilbutadienstyren je termoplast vhodný především pro různé konstrukční modely, u kterých je očekáváno velké mechanické namáhání. Mezi hlavní klady tohoto materiálu patří vysoká tuhost, nízká teplota tání, odolnost proti nárazu i při nízkých teplotách od -40 °C, dobré izolační vlastnosti, dobrá svařitelnost, odolnost proti otěru a mechanickému

namáhání a vysoká rozměrová stabilita, to znamená, že je mechanicky pevný a stabilní. Vykazuje vysokou odolnost vůči kyselinám, zásadám, olejům a tukům. Jedná se i o materiál levný, a proto společně s PLA patří mezi neoblíbenější tiskové materiály pro 3D tisk. [23, 24, 25]

Limitujícími faktory pro ABS je jeho špatná odolnost proti povětrnostním vlivům, špatně snáší rozpouštědla, zejména aromatické uhlovodíky, ketony a estery. Má nízkou dielektrickou pevnost a velmi snadno hoří. Vzhledem k tomu, že se jedná o ropný produkt, tak při jeho tisku, kdy se tento materiál roztavuje, dochází k uvolňování nebezpečných toxických výparů. [23, 27]

U tisku z materiálu ABS se doporučuje teplota trysky kolem 255 °C a vzhledem k tomu, že se při zahřívání silně kroučí, je nutná vyhřívaná tisková plocha zahřátá v rozmezí 80 až 110 °C, a to podle toho, jak velký objekt je požadován na vytištění. Čím větší objekt, tím vyšší teplota tiskové plochy. Jelikož ABS při tisku uvolňuje do okolního prostředí toxické výpary, je velmi důležité toto prostředí větrat, ovšem materiál je při tisku velmi náchylný na změny okolního prostředí, při kterém má tendenci ke kroucení. Proto je nezbytné tiskárnu izolovat od vlivů okolního prostředí a udržovat v prostředí tiskárny konstantní podmínky. ABS se dále snadno upravuje, například za použití acetonu lze velice jednoduše vyhladit povrch výtisku. Výtisky z materiálu ABS mají velkou tendenci se smršťovat, proto je vhodné upravit měřítko modelu ještě před jeho vytištěním. Je nutno počítat s průměrnou smrštitivostí 1 až 2 %. [26]

PETG

Glykolem modifikovaný polyethylene tereftalát je termoplast, který kombinuje jednoduchost tisku PLA a sílu ABS. Řadí se amorfní plasty, který je 100 % recyklovatelný. Jedná se o kopolymer, kdy se k PET během výroby přidává glykol a tím se materiál stává méně křehkým a je mnohem lépe tisknutelný na 3D tiskárně, protože samostatný PET během tisku způsobuje velké přehřívání. Tento materiál je vhodný pro užití ve vnitřních i venkovních prostorech. [28, 29]

Mezi hlavní charakteristiky PETG patří vysoká tvrdost, houževnatost, rázová a chemická odolnost, průhlednost, tepelná stabilita a voděodolnost. Jde o levný materiál s poměrně snadnou tisknutelností. Jeho hlavní nevýhodou je rozpustnost v nebezpečných chemikáliích. Podobně jako PLA je tento kopolymer považován za zdravotně nezávadný, ovšem na výtisku

se ve vrstvách mohou usazovat bakterie, proto je vhodné na vytištěný objekt nanést zdravotně nezávadný epoxid a tím tomuto problému předejít. [28, 29]

U parametrů tisku se u materiálu PETG doporučuje teplota tisku mezi 220 až 260 °C a je nutné využít vyhřívanou tiskovou plochu. Ta se nastavuje běžně kolem 85 °C. Důležitý také je v tomto případě výběr povrchu tiskové plochy. Nedoporučuje se klasická hladká podložka s polyetherimidovou fólií, protože může být poškozen její povrch. Namísto toho je lepší využít buď texturovaný plát nebo saténovou podložku. U tisku prakticky nedochází ke kroucení a materiál se vyznačuje dobrou přilnavostí k podložce. Během tisku může docházet ke vzniku vlásků mezi vrstvami. Tomu lze zabránit využitím chlazení, ovšem menší teplota zabraňuje plnému spojení vrstev a dochází ke snížení pevnosti modelu. Nepříliš vhodné je používat podpěry během tisku, jelikož se jedná o lepkavý materiál. Jejich následné odstranění je obtížné a může to narušit dobrý vzhled vytištěného objektu. [28, 29]

ASA

Celým názvem akrylonitril styren akryl je termoplast, který byl vyroben jako alternativa k materiálu ABS. ASA charakterizují podobné vlastnosti jako ABS, ale vyznačuje se především větší odolností vůči UV záření, a proto je vhodný hlavně pro užití ve venkovních prostorech. Využívá se pro tisk detailních objektů. [30, 31]

Jelikož se jedná o podobný materiál jako ABS, pojí ho i velmi podobné vlastnosti, jako jsou vysoká odolnost proti nárazu, mechanickému namáhání a vysoká tuhost. Hlavní výhodou je jeho teplotní odolnost, uvádí se až 93 °C a jeho vysoká teplota skelného přechodu. [30, 31]

U termoplastu ASA je doporučená teplota trysky kolem 260 °C a vyžaduje vyhřívanou, hladkou tiskovou plochu. Doporučená teplota zahřátí podložky je v rozmezí 90 až 110 °C. Stejně jako u ABS, tak i u tiskového procesu ASA je nutné zajistit stálé podmínky v okolí tiskárny, aby nedocházelo ke kroucení tisknutého objektu. I u tohoto termoplastu dochází k uvolňování styrenových výparů, ikdyž ne v tak vysoké míře. Proto je opět důležité místnost pravidelně větrat. Výhodou je, že při tisku nedochází ke tvorbě vlásků. Jelikož má ASA velkou odolnost proti broušení a nárazu, tak se jedná o velice přívětivý materiál pro následné dokončovací operace. Oproti jiným materiálům lze tento termoplast rozpustit v acetonu, obdobně jako ABS. [30, 31]

Polykarbonát (PC)

Termoplastický materiál, mezi jehož hlavní charakteristiky patří vysoká teplotní odolnost, houževnatost, odolnost v tahu, dobré elektrické izolační vlastnosti, vysoká optická čistota, mechanická pevnost v teplotách o rozmezí -40 až +135 °C a odolnost proti povětrnostním vlivům. Vhodné pro tisk konstrukčních dílů. [32, 33]

Nevýhodou je jeho nízká chemická odolnost, materiál se velmi lehko odírá a pokud teplota polykarbonátu klesne pod -40 °C, tak se v tu chvíli stává křehkým. Nevýhoda je i jeho poměrně vysoká cena a složitější nároky na tisk. PC je hygroskopický materiál, což znamená, že absorbuje hodně vlhkosti ze vzduchu, a proto je důležité filament ukládat do vzduchotěsných obalů. Ve chvíli, kdy filament absorbuje vlhkost, tak během tisku začne prskat. [32, 34]

Doporučená teplota trysky je okolo 275 °C. Teplota podložky je uváděna v rozmezí 110 až 120 °C. Kryt na tiskárnu není nutný, ovšem kvůli silné kroucení, obzvláště u velkých modelů, se doporučuje. Proti kroucení a odtrhávání od tiskové plochy je vhodné tisknout objekty s méně hustými výplněmi. Materiál PC by se neměl tisknout na hladkou tiskovou plochu, ale je žádoucí texturovaný tiskový plát. Dále je vhodné nanést na plochu separační vrstvu, například pomocí tyčinkovým lepidlem. To zabraňuje následnému poškození tiskové plochy. [32]

NYLON

Syntetický polymer ze skupiny polyamidů. Ve 3D tisku se využívá především pro polopružné a mechanické díly. Nylon oplývá vysokou mechanickou a chemickou odolností, je tuhý ve velkých objemech a ohebný v tenkých vrstvách a má vysokou adhezi mezi vrstvami. Oproti ostatním polymerním materiálům má mnohem vyšší odolnost proti UV záření. [35, 36, 37]

Nevýhodou je jeho náchylnost ke kroucení a je vhodné mít zvýšenou teplotu v okolí tiskárny. Obdobně jako u polykarbonátu, tak i nylon je hygroskopický materiál a absorbuje vlhkost ze vzduchu, proto by se měl skladovat ve vzduchotěsných obalech. [35]

Doporučená teplota trysky je kolem 250 °C a teplota vyhřívané podložky 90 °C. Nylon by se měl tisknout nejlépe na texturované tiskové ploše, na které by měla být nanášena separační vrstva pro snadnější oddělení výtisku od podložky. Před tiskovým procesem je

nutné filament vysušit, a to minimálně na 4 hodiny v prostředí o teplotě 90 °C. Výhodou je, že při tisku tento materiál nevylučuje téměř žádný zápach. [35]

CPE

Kopolyester na bázi kyseliny tereftalové, který je vhodný pro tisk funkčních modelů mechanických součástí a tenkostěnných nádob. Vyznačuje se především vysokou soudržností vrstev, mechanickou, teplotní a chemickou odolností, vysokou houževnatostí, dlouhodobou rozměrovou stálostí a vysokou pevností v tahu. Z výrobního hlediska se jedná o vylepšený PETG filament. [38, 39, 40]

Hlavní nevýhodou je jeho vysoká cena. Je to hygroskopický materiál, takže musí být skladován ve vzduchotěsném obalu. Problémem může být i tvorba vlásků během tisku. [38]

Teplota trysky se doporučuje kolem 275 °C a teplota vyhřívané podložky 90 °C. Doporučuje se tisknout na texturovaném nebo saténovém plátu, kvůli vysoké přilnavosti tohoto materiálu. Při tisku nedochází k téměř žádnému deformování ani smršťování a materiál neuvolňuje žádné zdravý škodlivé výpary, proto tiskový proces nevyžaduje žádné významné úpravy. [38, 40]

nGEN

Kopolyester velice podobný filamentu PETG. Tento materiál vytvořila firma ColorFabb, která k výrobě použila polymer s názvem Eastman Amphora AM3300. Využívá se především k tisku od funkčních a estetických modelů až po tisk protéz. [41, 42]

Mezi největší klady tohoto materiálu patří jeho vysoká mechanická, teplotní a chemická odolnost. Obrovskou výhodou tohoto polymeru je jeho minimální degradace, dá se teoreticky opakovaně roztavovat a používat. Má dobré průtokové vlastnosti tryskou tiskárny. Je mnohem lépe zpracovatelný i při nižších teplotách. Během tisku materiál prakticky nezapáchá. [41, 42]

U tisku je nGEN náchylný ke stringování a podobně jako PETG hůře zvládá tisk převisů a přemostění. Teplota trysky je standardně doporučována v rozmezí 220 až 240 °C a teplota podložky kolem 90 °C. Vzhledem k vysoké adhezi materiálu není doporučeno tisknout na hladké podložce, ale je lepší využít texturovanou tiskovou plochu. Dle výrobce je lepší mít zapnuté chlazení při tisku pouze pro perimetry, zatímco u výplně vypnuté, protože může narušovat soudržnost vrstev. [41]

HIPS

Polystyren obohacený kaučukem. Používá se pro velké 3D tiskové objekty a především, díky své snadné rozpustitelnosti, jako materiál pro tisk podpor pro objekty z ABS, ASA a PETG. [43]

Má velmi dobré mechanické vlastnosti, srovnatelné s ABS, ale není tolik náchylný ke smršťování se. Dá se rozpustit v limonenu a acetonu. Díky acetonu se dá povrch HIPS velice dobře vyhladit. Pokud se HIPS využívá při tisku podpěr pro materiály ABS a ASA, není dobré nechávat působit rozpouštědlo příliš dlouho, neboť se mohou zčásti rozpustit i objekty z těchto materiálů. [43]

Teplota trysky se nastavuje obvykle kolem 220 °C a teplota podložky kolem 110 °C. Pro tisk není potřeba žádná speciální tisková plocha, dá se využít klasická, hladká podložka. Snadné jsou i dokončovací operace. Vytištěný HIPS se dá snadno brousit a následné vyhlazení acetonem trvá pouze několik minut. [43]

Polypropylen (PP)

Termoplast využívaný především pro potravinářský průmysl a pro svoji ohebnost i pro tisk například pantů nebo řemínků. [44]

Jde o lehký materiál s vysokou chemickou odolností proti kyselinám, zásadám a organickým rozpouštědlům. Je vysoce houževnatý. Vyrábí se z granulátu, který je nezávadný při styku s potravinami. Problémem je jeho velká náchylnost ke kroucení, proto se doporučuje tisk ve vyhřívaném boxu, který zajistí stálé podmínky v okolí tiskárny. Polypropylen nemá příliš dobrou přilnavost k povrchu. Jde o poměrně drahý materiál. [44]

Doporučená teplota trysky je mezi 225 až 245 °C a teplota podložky 80 až 105 °C. Vhodná tisková plocha je hladká podložka, ovšem kvůli špatné přilnavosti materiálu se doporučuje opatřit na podložku izolepu a tisknout na vyšší teplotu. [44]

PVB

Termoplast, nazývaný polyvinyl butyral, vhodný především pro tisk okrasných a designových objektů. Pro svou dobrou průsvitnost se využívá například pro tisk stínítek. Kombinuje vlastnosti většiny již zmíněných materiálů. Není náročný na tisk, ale nedají se z něj tisknout funkční modely. [45]

Pokud si srovnáme tento termoplast s ostatními materiály, můžeme říct, že má téměř stejnou houževnatost jako CPE, podobnou odolnost v tahu jako PETG a tiskové vlastnosti obdobné PLA. Charakterizuje jej především průsvitnost filamentu a téměř nulová smrštitivost při tisku. Problémem je, že se jedná o materiál hygroskopický čili je náchylný na vlhkost a je potřeba jej skladovat ve vzduchotěsném obalu. Patří mezi cenově nákladnější materiály. [45]

Tryska se obvykle nastavuje na teplotu v rozmezí 205 až 225 °C a teplota podložky 75 °C. Díky dobré přilnavosti k povrchu je nejlepší použít hladkou nebo saténovou podložku. Vytisknutý objekt se dá jednoduše vyhladit chemicky pomocí IPA. [45]

5.1. Srovnání vybraných vlastností filamentů

Hodnoty většiny vlastností filamentů závisí na daných recepturách firem, které je vyrábějí. Proto jsou v následující tabulce tyto vlastnosti dány v určitém rozmezí hodnot.

Tabulka 2 - Srovnání vybraných vlastností filamentů [46]

| Materiál | Odolnost v tahu [MPa] | Teplotní odolnost [°C] | Teplota trysky [°C] | Teplota podložky [°C] | Tisk se zakrytou tiskárnou |
|----------|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
| PLA | 29 až 65 | 50 až 58 | 210 až 215 | 60 | NE |
| ABS | 36 až 47 | 81 až 97 | 240 až 255 | 110 | ANO |
| PETG | 37 až 51 | 68 až 78 | 230 až 270 | 90 | NE |
| ASA | 34 až 42 | 86 až 96 | 260 až 265 | 95 až 110 | ANO |
| PC | 59 až 63 | 109 až 113 | 270 až 275 | 115 | ANO |
| NYLON | 27 až 45 | 76 až 110 | 250 až 270 | 75 až 90 | ANO |
| CPE | 42 | 75 | 275 | 90 | NE |
| PP | 14 | 56 | 220 | 100 | ANO |
| nGEN | 50 | 71 | 240 | 90 | NE |
| PVB | 50 | 55 | 215 | 75 | NE |

5.2. Technologické aspekty tisku

Vliv na vlastnosti vytištěného materiálu mají technologické aspekty tisku ať už je to výška vrstvy tisku, tvar a výplň, teplota tisku, z hlediska pevnosti výtisku orientace tištěných vláken a v neposlední řadě barva filamentu, jejíž problematika byla probírána v kapitole o vlivu plniv na polymerní materiály.

Výška vrstvy tisku

Tento parametr ovlivňuje především mezeru mezi vlákny materiálu. Této problematice se věnoval ve své práci Tymrak [47]. Byly zkoumány celkem tři výšky vrstev a sice 0,2 mm,

0,3 mm a 0,4 mm na dvou tiskových materiálech PLA a ABS. Pomocí standardních tahových testů se zjistily hodnoty meze pevnosti, prodloužení na mezi pevnosti a modul pružnosti. Podle výsledků nejvyšších mechanických vlastností dosahovala výška vrstvy 0,2 mm jak u materiálu PLA, tak i u ABS. Při vyšších výškách vrstvy tisku vznikaly větší mezery mezi vrstvami a to způsobilo, že výtisk nebyl dostatečně homogenní. Výsledky tahových zkoušek jsou uvedeny v tabulce 3. [47]

Tabulka 3 - Vliv výšky vrstvy tisku na mechanické vlastnosti [47]

| Materiál | Výška vrstvy [mm] | Mez pevnosti [MPa] | Modul pružnosti [MPa] | Prodloužení na mezi pevnost [%] |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--|
| PLA | 0,2 | 60,4 | 3480 | 1,96 |
| PLA | 0,3 | 48,5 | 3340 | 1,71 |
| PLA | 0,4 | 54,9 | 3286 | 1,94 |
| ABS | 0,2 | 29,7 | 1839 | 2,01 |
| ABS | 0,3 | 27,6 | 1736 | 2,01 |
| ABS | 0,4 | 28,2 | 1875 | 1,97 |

Tvar a výplň

Fernandez-Vincente [48] ve své práci zjišťoval, jaký vliv má vzor a výplň na mechanické vlastnosti vytištěného objektu z materiálu ABS. Experiment se věnoval třem různým výplním a sice 20, 50 a 100 % a pro tři různé vzory. Zkouškami byli zjišťovány hodnoty pro pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 4. [48]

Tabulka 4 - Vliv vzorů a výplní na mechanické vlastnosti [48]

| Vzor výplně | Výplň [%] | Pevnost v tahu [MPa] | Modul pružnosti v tahu [MPa] |
|--------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Line | 20 | 16,00 | 499 |
| Line | 50 | 20,06 | 640 |
| Line | 100 | 35,68 | 784 |
| Rectilinear | 20 | 15,62 | 408 |
| Rectilinear | 50 | 19,58 | 659 |
| Rectilinear | 100 | 36,40 | 834 |
| Honeycomb | 20 | 16,52 | 568 |
| Honeycomb | 50 | 21,78 | 745 |
| Honeycomb | 100 | 36,10 | 802 |

Nejvyšší hodnotu pevnosti v tahu vykazuje kombinace přímočarého vzoru se stoprocentní výplní. Velice podobných výsledků dosahuje i kombinace vzoru ve tvaru

plástve se stoprocentní výplní. Z výše uvedené tabulky můžeme uvést, že se zvyšující se výplní se zvyšují i hodnoty pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. [48]

Teplota tisku

Tento faktor je jeden z nejdůležitějších pro konečnou pevnost tištěného objektu, neboť ovlivňuje především pevnost mezi tištěnými vrstvami. Ovlivňuje dobu, po kterou bude materiál roztaven, což má zásadní vliv na dobré spojení s poslední vytištěnou vrstvou.

Pro příklad je uveden výzkum Copolla [49]. Byl zkoušen tisk u dvou různých druhů PLA, které pak byly doplněny jílovým plnivem. Prvním vzorek byl materiál PLA 4032D (obsah D-izomeru 1,5 %) a druhým PLA 2003D (obsah D-izomeru 4 %). Jako plnivo byl použit organicky modifikovaný montmorillonit (C30B). Při každém tisku byla navyšována teplota trysky o 15°C. Výsledky výzkumu jsou uvedeny v tabulce 5. [49]

Tabulka 5 - Vliv teploty trysky na mez pevnosti [49]

| Vzorek | Teplota trysky [°C] | Mez pevnosti [MPa] |
|----------------|---------------------|--------------------|
| PLA 4032D | 185 | 50 |
| PLA 4032D | 200 | 49 |
| PLA 4032D | 215 | 51 |
| PLA 4032D+C30B | 185 | 40 |
| PLA 4032D+C30B | 200 | 46 |
| PLA 4032D+C30B | 215 | 47 |
| PLA 2003D | 185 | 37 |
| PLA 2003D | 200 | 47 |
| PLA 2003D | 215 | 52 |
| PLA 2003D+C30B | 185 | 52 |
| PLA 2003D+C30B | 200 | 44 |
| PLA 2003D+C30B | 215 | 43 |

Orientace tištěných vláken

Ve své práci se Krejbychová [50] zabývala mimo jiné, jaký vliv má orientace tištěných vláken na mechanické vlastnosti materiálu PETG. Zkoumala tisk v horizontální a vertikální poloze pro několik konfigurací orientací vláken. Výsledky jejího výzkumu jsou uvedeny v tabulce 6. [50]

Tabulka 6 - Vliv orientace vláken na pevnost materiálu [50]

| Orientace vláken | Mez pevnosti (průměr) [MPa] |
|-----------------------|-----------------------------|
| 45°/-45° horizontálně | 53,98 |
| 90°/0° horizontálně | 47,7 |
| 45°/-45° vertikálně | 19,98 |

Bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot meze pevnosti je dosaženo, když zatížení působí po směru vláken materiálu. Zároveň z toho vyplývá, že pokud se tiskne vertikálně, mají výsledné vytištěné objekty až poloviční hodnotu pevnosti. To je dáno tím, že při zatížení se prosazují pouze síly adheze. [50]

6. Mechanické zkoušky 3D výtisků

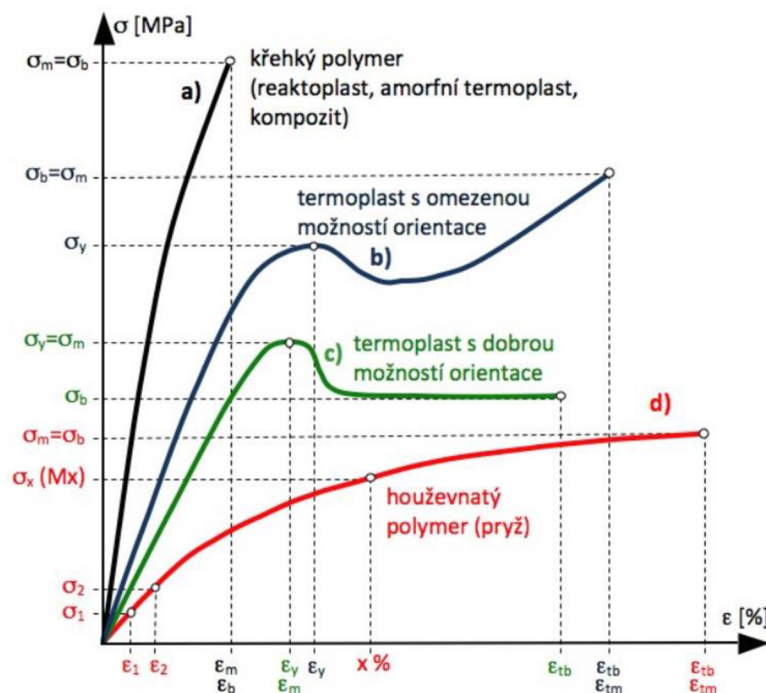
Každý filament během tisku projde tepelnou změnou, kdy se materiál roztaví a pak se pomocí trysky postupně nanáší vrstvu po vrstvě, dokud výsledný objekt nebude vytištěn. Po vytištění vrstvy následuje proces chlazení a tuhnutí materiálu. Tato tepelná přeměna má vliv na změnu mechanických vlastností. Tato kapitola se věnuje popisu mechanických zkoušek, které zjišťují, jaké mechanické vlastnosti má daný vytištěný objekt.

6.1. Tahová zkouška

Zkouška vychází z normy ČSN EN ISO 527-1 (640604) a jedná se o statický druh zkoušky. Vytištěný objekt se umístí do čelistí trhacího stroje a je vystaveno jednoosému namáhání. Rozměry a tvar zkoušeného objektu jsou dány normou. Na ukotvené těleso je připojen průtahoměr, který měří poměrné prodloužení. Norma udává, že zkouška se musí provádět minimálně na pěti zkušebních vzorcích. Tento postup je platný pro obecné zkoušení tahových vlastností polymerních materiálů. [51]

Deformační křivka

Po vystavení namáhání je výsledkem tzv. deformační křivka, ze které se určují pevnostní charakteristiky zkoušeného výtisku. Křivka udává mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. Příklad deformační křivky je znázorněn na obrázku č.11. [52]



Obrázek 11 - Deformační křivky polymerů v tahu [52]

Smluvní napětí

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Jedná se o poměr síly, která působí na vzorek k ploše průřezu nedeformovaného vzorku. F je působící síla, S_0 průřez tělesa před zatížením. [52]

Tažnost

$$A = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Vlastnost. L_0 uvádí hodnotu měřené délky před zatížením a L_k naopak konečnou délku. [52]

Mez pevnosti

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Jedná se o maximální napětí v tahu. Hodnota, která je shodná s maximální možnou silou použitou na zkušební vzorek. Pokud se zkouška provádí při standardních teplotách, nachází se tato hodnota u polymerů v rozmezí 15 až 100 MPa. Pokud polymer vyztužíme vhodným plnivem, například uhlíkovými vlákny, dosahuje tato hodnota až 170 MPa. [52]

Napětí na mezi kluzu

Značí se σ_y a jde o napětí, kde deformace přechází ze stavu elastického do stavu plastického čili nevratného. Toto napětí je považováno v provozu za maximální možnou vzhledem k tomu, že při překročení tohoto napětí vznikají nevratné deformace. [52]

Napětí při přetržení

Značí se σ_b . Jedná se o napětí, při kterém se zkušební těleso přetrhne. [52]

Modul pružnosti

Obdobně jako mez pevnosti jde o velmi důležitou zkoumanou hodnotu. Tento parametr vyjadřuje tuhost polymerního materiálu. Platí, že čím vyšší modul, tím vyšší tuhost materiálu. Značí se písmenem E a vyjadřujeme jej z Hookeova zákona (5). Tento zákon říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Tato vlastnost se zkoumá na deformační křivce, kde se jedná o lineární závislost napětí na poměrném prodloužení. [52]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (4)$$

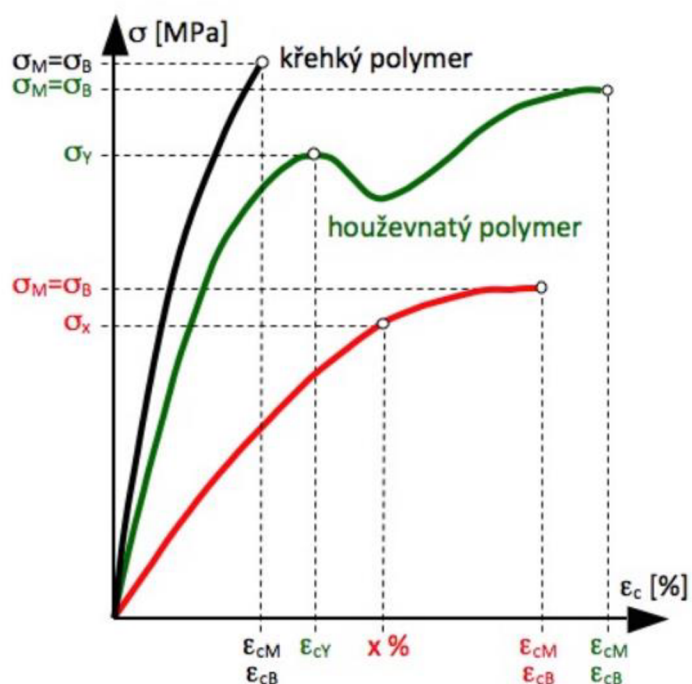
Vzhledem k tomu, že se polymerní materiály obvykle způsobují nelineární průběh křivky na jejím začátku, tak se využívají dvě hodnoty napětí. Tyto napětí odpovídají poměrným prodloužením 0,05 % a 0,25 %. V takovém případě bývá modul pružnosti označován jako tzv. sečný modul pružnosti, který se značí E_t . [52]

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (5)$$

σ_1 a σ_2 jsou výchozími napětími a ε_1 a ε_2 jsou hodnoty poměrného prodloužení.

6.2. Tlaková zkouška

Tlaková zkouška vychází z normy ČSN EN ISO 604 (640606). Zkušební těleso je vloženo mezi dvě tlačné desky a je stlačováno podél jeho hlavní osy. Stlačování musí probíhat při neměnné rychlosti až do porušení nebo do předem definované hodnoty síly. Výsledky se vyhodnocují analogicky jako u tahové zkoušky. Po provedení zkoušky vyjde deformační křivka polymerů v tlaku a z něj se zjišťují hodnoty meze pevnosti v tlaku, jednotlivých napětí v tlaku, poměrného stlačení a modulu pružnosti. Při stlačování dochází ke vzniku vnějších trhlin a vnitřních mikrotrhlin, které vznikají při přemísťování materiálu. Značení je podobné jako u tahové zkoušky, pouze indexy se píšou velkými písmeny. Příklad deformační křivky v tlaku je uveden na obrázku č.12. [52, 53]



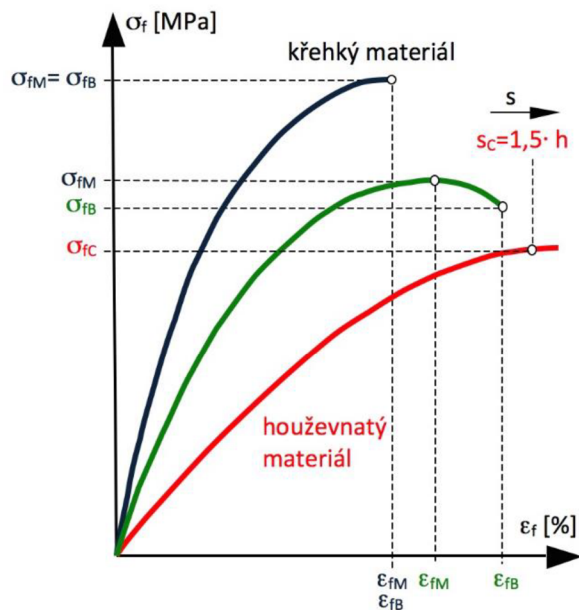
Obrázek 12 - Deformační křivky polymerů v tlaku [52]

6.3. Ohybová zkouška

Ohybová zkouška vychází z normy ČSN ISO EN 178 (640607). Proces zkoušení se dělí na dva způsoby. Prvním je tříbodový ohyb, kdy se na dvě podpěry umístí zkoušený vzorek a doprostřed mezi podpěry působí síla. Druhým je pak následně čtyřbodový ohyb, kde se vzorek opět položí na dvě podpěry a je zatížen dvěma stejnými silami, které jsou umístěny v určité vzdálenosti od podpěr. Tento způsob se používá především pro velké a tenkostěnné zkoušené vzorky. Celá zkouška je ukončena buď přelomením vzorku nebo pokud vzorek dosáhne 5 % ohybové deformace. Záleží na tom, která situace nastane dříve. [52, 54]

Deformační křivka

Výsledkem zkoušky je opět deformační křivka, ze které se získává hodnota pevnosti v ohybu. Příklad deformační křivky v ohybu je uveden na obrázku č.13. [52]



Obrázek 13 - Deformační křivky polymerů v ohybu [52]

Pevnost v ohybu

Tato pevnost se získá podílem maximálního ohybového momentu a průřezového modulu (7). [52]

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_o} [MPa]$$

(6)

Maximální ohybový moment pro tříbodový ohyb se získá dle rovnice (8) a pro čtyřbodový ohyb podle rovnice (9). [52]

$$M_{o,max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} [N \cdot mm]$$

(7)

$$M_{o,max} = F_{max} \cdot L_a [N \cdot mm]$$

(8)

F_{max} je maximální použitá síla k přelomení nebo k dosažení 5 % ohybové deformace. L je vzdálenost mezi podpěrami a L_a je vzdálenost sil od podpěr u čtyřbodového ohybu.

Průřezový modul se vypočítá z rovnice (10), kde b je šířka a h je tloušťka zkoušeného hranolu. [52]

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3]$$

(9)

Následnými úpravami výše uvedených rovnic získáme konečnou rovnici pro pevnost v ohybu a sice pro třibodový ohyb (11) a čtyřbodový ohyb (12). [52]

$$\sigma_{fM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot L}{b \cdot h^2} [MPa]$$

(10)

$$\sigma_{fM} = 6 \cdot \frac{F_{max} \cdot L_a}{b \cdot h^2} [MPa]$$

(11)

Velikost modulu pružnosti E_f se určí obdobně jako u tahové zkoušky dle rovnice (6), kde opět výchozí napětí odpovídají hodnotám deformace ohybem. [52]

6.4. Zkoušky tvrdosti

Pro zkoušení tvrdosti polymerních materiálů se využívá především metody dle Rockwella a metody dle Shoreho. Hlavním cílem těchto zkoušek je zjistit, jaký odpor povrchu polymeru je proti vnikání tvrdšího materiálu do něj. Obecně jde o vtlačování indentoru neboli vnikajícího tělesa do zkušební vzorku. Měří se hloubka vniknutí indentoru. U polymerních látek po odlehčení tělesa dochází k tzv. zpětnému krípu (elastickému zotavení). Proto se hloubka vniknutí měří přímo při zatížení nebo až po zpětném krípu. [52]

Metoda dle Rockwella

Tato metoda se rozděluje podle stupnic tvrdosti dle Rockwella na stupnice R, L, M a E. Vtlačují se ocelové kuličky o různých rozměrech do polymerního materiálu. Nejprve proběhne předběžné konstantní zatížení a následně kulička vnikne pomocí přidavného zatížení dovnitř povrchu materiálu. Poté se zatížení odlehčí zpět do předběžného zatížení a počká se 15 s kvůli účinku zpětného krípu. Poté se změří hloubka vtisku, která se značí h . Výsledná tvrdost dle Rockwella se spočítá podle rovnice (13). [55]

$$HR = 130 - \frac{h}{0,002} [-]$$

(12)

Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 2039-1 (640619), která uvádí normované rozměry ocelových kuliček a zatěžovací síly dle stupnic. Tabulka stupnic dle Rockwella je uvedena v tabulce 7. [55]

Tabulka 7 - Tabulka stupnic dle Rockwella [55]

| Stupnice tvrdosti dle Rockwella | Předběžné zatížení [N] | Přídavné zatížení [N] | Průměr měřicí kuličky [mm] |
|---------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|
| R | 98,07 | 588,4 | 12,7 ± 0,015 |
| L | 98,07 | 588,4 | 6,35 ± 0,015 |
| M | 98,07 | 980,7 | 6,35 ± 0,015 |
| E | 98,07 | 980,7 | 3,175 ± 0,015 |

Metoda dle Rockwella α

Tato metoda je velice podobná původní Rockwellově metodě. Do zkušebního materiálu se vtlačuje ocelová kulička o průměru 12,7 mm do polymerního materiálu. Zatížení se v tomto případě rovná 588,4 N. Jediný rozdíl oproti původní metodě je ten, že se hloubka vtlačení měří přímo při zatížení, nikoliv po odlehčení. Výsledná tvrdost se stanovuje dle rovnice (14). [52]

$$HR_{\alpha} = 150 - \frac{h}{0,002} [-]$$

(13)

Metoda dle Shoreho

V praxi se jedná o nejrozšířenější metody měření tvrdosti polymerních materiálů. Provádí se dle normy ČSN EN ISO 868 (640624) a rozděluje se na dvě metody, kde obě metody spočívají ve vtlačování tělesa do povrchu polymeru silou vyvozenou tlakem ocelové pružiny. Metoda Shore A používá ke vtlačování hrot, který má tvar komolého kužele. Velikost síly, kterou je hrot vtlačován do polymerního materiálu je 10 N. Tato metoda se používá pro měkké polymery. Metoda Shore D využívá kužel s kulatým vrchlíkem a velikost přitlačné síly je 50 N. Shore D je určena pro tvrdší polymery. Hloubka vtlačení zároveň vyjadřuje i hodnotu tvrdosti, která se udává ve stupnici od 0 do 100. Zkoumá se buď tzv.

okamžitá tvrdost, kdy se hloubka odečítá do 1 s po dotyku tělesa anebo klasická tvrdost po 15 s. [52, 56]

6.5. Dokončovací operace

Vliv na tvrdost povrchu 3D výtisků mají dokončovací operace, což je poslední krok v procesu 3D tisku. Hlavním cílem je především zbavit se viditelných vrstev a dosáhnout, co nejhladšího povrchu. [58]

Chemické vyhlazování

Pro tyto účely se používá především aceton, kterým se dá rozleptat povrch ABS a tím se vyhladí čáry vrstev viditelné na povrchu součásti. Výtisk z materiálu PLA je na metodu chemického vyhlazování je složitější, ale dá se vyhladit použitím buď tetrahydrofuranu (THF) nebo butanonem (MEK), ovšem výsledky nebudou tak pěkné jako u ABS. Posledním příkladem bude materiál PVB, u kterého je možné použít k vyhlazení izopropylalkohol. [58]

Leštění

Leštit se dá hadříkem z mikrovláken nebo leštičkou na plasty. Před leštěním se musí výtisk nejprve obrousit. Nejlépe nejjemnějším brusným papírem. Po broušení se musí povrch ještě očistit od všech částic. [58]

Dále lze využít dalších mechanických operací jako jsou například omílání nebo mikro tryskání.

Epoxidový nátěr

Epoxidový nátěr zlepšuje pevnost 3D výtisků. Kromě toho také utěsňuje porézní části tisku a působí jako ochranná vrstva. Nátěr se skládá ze dvou chemikálií a sice z epoxidové pryskyřice a tvrdidla. [58]

6.6. Standardní podmínky pro zkoušení polymerů

Každá zkouška by měla probíhat za normovaných podmínek. To předepisuje norma ČSN EN ISO 291 (640204). Tato norma udává, jaké hodnoty vlhkosti a teploty vzduchu by měli být konstantní během průběhu zkoušky. Důležité jsou i rozsahy atmosférického tlaku a rychlost recirkulace vzduchu. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č.8 a č.9. [57]

Tabulka 8 - Kondicionování dle normy ČSN EN ISO 291 [57]

| Symbol standardního prostředí | Teplota vzduchu [°C] | Relativní vlhkost [%] |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 23/50 | 23 | 50 |
| 27/65 | 27 | 65 |

Tabulka 9 - Třídy standardního prostředí [57]

| Třída | Dovolená odchylka teploty [°C] | Dovolená odchylka relativní vlhkosti [%] | |
|--------------|---------------------------------------|---|-------|
| | | 23/50 | 27/65 |
| 1 | ±1 | ±5 | ±5 |
| 2 | ±2 | ±10 | ±10 |

Tyto hodnoty jsou určeny pro normální nadmořské výšky s tlakem atmosférickým od 86 kPa do 106 kPa. Rychlost recirkulace vzduchu musí být ≤ 1 m/s. [57]

7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo analyzovat faktory ovlivňující mechanické vlastnosti objektů, vyrobených technologií 3D tisku. Popsat mechanické zkoušky, které se provádí za účelem zjištění těchto vlastností na vytištěných objektech.

V první kapitole byly popsány druhy technologií 3D tisku a jejich princip. Dále byly popsány základní chemické reakce pro vznik syntetických polymerů, a sice polymerace, polykondenzace a polyadice. U těchto polymerů, které jsou vhodné pro technologii 3D tisku, byla popsána jejich výroba, charakteristické vlastnosti a jejich chemická struktura.

Druhá kapitola se věnovala vlivům plniv na polymerní materiály. Plniva jsem rozdělil do dvou kategorií. Na vláknitá a částicová plniva, kde vláknitá plniva mají vliv na zvýšení pevnosti a houževnatosti výsledného kompozitu a oproti tomu částicová plniva zvyšují tvrdost a omezují růst plastických deformací kompozitu. Dále byla plniva rozdělena do 7 skupin a byly popsány hlavní zástupci těchto skupin a jejich vliv na mechanické vlastnosti kompozitu. Nejvyššího zlepšení mechanických vlastností dosahovali struktury, které měli dlouhovláknovou výztuž z uhlíkových nebo skelných vláken. Zajímavostí je vliv barviv na mez pevnosti kompozitu. Zatímco nejvyšších hodnot meze pevnosti dosahovali materiály v surovém stavu, tak po přidání plniv ke změně barvy se tato hodnota snížila.

Třetí kapitola se věnovala filamentům pro 3D tisk a jejich vlastnostem. Byli popsány mechanické a fyzikální vlastnosti filamentů, jaké mají výhody a nevýhody z hlediska použití v praxi a jak jsou náročné na tisk. Byli analyzovány technologické aspekty tisku, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti vytištěného objektu. U materiálů PLA a ABS bylo zjištěno, že nejvyšších mechanických vlastností se dosahovalo při výšce vrstvy tisku 0,2 mm. Dále můžeme uvést, že se zvyšující se výplní tištěného objektu se zvyšují i hodnoty pevnosti v tahu a modulu pružnosti v tahu. U orientace tištěných vláken bylo zjištěno, že nejvyšších hodnot meze pevnosti je dosaženo, když zatížení působí po směru vláken materiálu.

Poslední kapitola popisuje mechanické zkoušky polymerních materiálů a za jakých podmínek se zkoušky musí vykonávat. Je popsán princip zkoušení a způsob získání hodnot mechanických vlastností. Závěrem jsou popsány dokončovací operace pro 3D vytištěné objekty, které se provádějí za účelem zbavení se viditelných vrstev a dosáhnout, co nejhladšího povrchu.

8. Seznam použitých zdrojů

- [1] 3D tisk na zakázku. *Historie a současnost 3D tisku* [online]. 2022 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>
- [2] 3D Printing. 3D Printing Technologies: An Overview [online]. 2018 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/>
- [3] MANOJ PRABHAKAR, M., A.K. SARAVANAN, A. HAITER LENIN, I. JERIN LENO, K. MAYANDI a P. SETHU RAMALINGAM. A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **45**, 6108-6114 [cit. 2022-02-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320378317>
- [4] Na3D. *Technologie 3D tisku* [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>
- [5] All3DP. The Types of 3D Printing Technology of 2022 [online]. 2021 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Příprava (syntéza) syntetických polymerů* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-02-11]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/02.html>
- [8] LENFELD, Petr. *Technologie II* online [online] 2009 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [9] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Rozdělení a charakteristika polymerů* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-02-11]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [10] GUTIERREZ, Rocío Jaimes. PLA Plastic/Material: All You Need to Know in 2020 [online]. 2020 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-pla-plastic-material-properties/>
- [11] Rong, Xiaoying & Keif, Malcolm. A Study of PLA Printability with Flexography. *Graphic Communication* [online]. 2007 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/48909444_A_Study_of_PLA_Printability_with_Flexography

- [12] ABS | Polymerové typy - Resinex. *Resinex - Distribuce plastů a kaučuků* [online]. Copyright © 2022 RESINEX Group, Czech Republic [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: [https://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html#:~:text=Mezi%20hlavn%C3%AD%20v%C3%BDrobce%20ABS%20\(a%20krylonitril,Chemick%C3%A9%20vzorce%20monomer%C5%AF%20ABS](https://www.resinex.cz/polymerove-typy/abs.html#:~:text=Mezi%20hlavn%C3%AD%20v%C3%BDrobce%20ABS%20(a%20krylonitril,Chemick%C3%A9%20vzorce%20monomer%C5%AF%20ABS)
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Termoplasty – základní druhy* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-02-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [14] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. Vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-8520-72-7.
- [15] Prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc. *MECHANIKA KOMPOZITŮ*. DOCPLOYER [online]. Brno, 2008 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanikakompozituprof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-telesmechatronikyabiomechaniky-fakultastrojniho-inzenyrstvi-vut-v-brne.html>
- [16] GIBSON, Ronald F. *Principles of Composite Material Mechanics, Fourth Edition*. Boca Raton: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4987-8824-3.
- [17] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Složení polymerů – přísady* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-02-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [18] ANGELOPOULOS, Panagiotis M., Michail SAMOUHOS a Maria TAXIARCHOU. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication; a review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **37**, 4031-4043 [cit. 2022-02-22]. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214785320351579>
- [19] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [20] Prusa Knowledge Base. *Kompozitní materiály (plněné dřevěným či kovovým práškem)* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/kompozitni-materialy-plnene-drevenym-ci-kovovym-praskem_166863
- [21] WITTBRODT, Ben a Joshua M. PEARCE. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **8**, 110-

- 116 [cit. 2022-02-23]. ISSN 22148604. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214860415000494>
- [22] Prusa Knowledge Base. *PLA* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062
- [23] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and its Features [online]. Paris France: Omnexus [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/acrylonitrile-butadiene-styrene-abs-plastic>
- [24] ABS Thermoplast [online]. Sušice: Plasticsystems.cz, 2020 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/ABS/>
- [25] Ostatní termoplasty – popis termoplastů [online]. Jedovnice: Koplast, 2016 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/ostatni-termoplasty-popis-termoplastu/>
- [26] Prusa Knowledge Base. *ABS* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058
- [27] ABS tiskový materiál a jeho další varianty. ABS [online]. Brno: Materialpro 3D, c2020 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [28] Prusa Knowledge Base. *PETG* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059
- [29] All you need to know about PETG for 3D printing - 3Dnatives. *Impression 3D et Imprimante 3D : Actualités, Comparatifs, Meilleurs Prix...* [online]. 2022 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/#:~:text=PETG%2C%20or%20glycolized%20polyester%2C%20is,and%20the%20strength%20of%20ABS.&text=On%20the%20other%20hand%2C%20there,why%20PETG%20is%20used%20instead>
- [30] Prusa Knowledge Base. *ASA* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809
- [31] Simplify3d. *ASA* [online]. 2020 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/asa/>
- [32] Prusa Knowledge Base. *Polykarbonát (PC)* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/polykarbonat-pc_165812

- [33] Tereza Provazníková. Polykarbonát | vlastnosti, výhody, použití [online]. 2006 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/architektura/clanek/polykarbonat-vlastnosti-vyhody-pouziti>
- [34] Gizmodorks. 3D PRINTING POLYCARBONATE FILAMENT [online]. 2015 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://gizmodorks.com/polycarbonate-3d-printer-filament/>
- [35] Prusa Knowledge Base. *Nylon* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon_167188
- [36] CROW. POLYAMIDE FIBERS (NYLON) [online]. CROW, 2015 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Fibers/Nylon.html>
- [37] Na3D. *Přehled dostupných materiálů* [online]. [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [38] Prusa Knowledge Base. *CPE* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/cpe_166877
- [39] All3DP. CPE Filament: Best Brands [online]. 2019 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cpe-filament-simply-explained-brands-compared/>
- [40] CPE 3D tisková struna. CPE [online]. Brno: Materialpro 3D, c2020 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/cpe/>
- [41] Prusa Knowledge Base. *NGEN* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/ngen_167174
- [42] ColorFabb. *Filaments – NGEN* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://colorfabb.com/filaments/co-polyesters-filaments/ngen?gclid=Cj0KCQiAjc2QBhDgARIsAMc3SqTH02_PKVNgS8MOFY4Fbi_smokSh_aiqJHFmNRdJ-yTfLxQ5zJxK6gaAmKIEALw_wcB
- [43] Prusa Knowledge Base. *HIPS* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/hips_167118
- [44] Prusa Knowledge Base. *Polypropylen (PP)* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/polypropylen-pp_167126
- [45] Prusa Knowledge Base. *PVB* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pvb_196708
- [46] Prusa Knowledge Base. *Prusa Tabulka Materiálů* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/materials>
- [47] TYMRAK, B.M., M. KREIGER a J.M. PEARCE. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental

- conditions. *Materials & Design* [online]. 2014, **58**, 242-246 [cit. 2022-03-25]. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914001538>
- [48] FERNANDEZ-VICENTE, Miguel, Wilson CALLE, Santiago FERRANDIZ a Andres CONEJERO. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2016, **3**(3), 183-192 [cit. 2022-03-25]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: <http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2015.0036>
- [49] COPPOLA, Bartolomeo, Nicola CAPPETTI, Luciano DI MAIO, Paola SCARFATO a Loredana INCARNATO. 3D Printing of PLA/clay Nanocomposites: Influence of Printing Temperature on Printed Samples Properties. *Materials* [online]. 2018, **11**(10) [cit. 2022-03-25]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/10/1947>
- [50] KREJBYCHOVÁ, Adéla. Analýza mechanických vlastností plastových dílů realizovaných 3D tiskem. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [51] ČSN EN ISO 527-1: Část 1: Základní principy. 1997.
- [52] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2022-02-25]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [53] ČSN EN ISO 604: Stanovení tlakových vlastností. 2004.
- [54] ČSN EN ISO 178. Plasty – Stanovení ohybových vlastností. 2019.
- [55] ČSN EN ISO 2039. Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtláčením kuličky. 2003.
- [56] ČSN EN ISO 868. Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore). 2003.
- [57] ČSN EN ISO 291. Plasty – Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení. 2009.
- [58] All3DP. 3D Printing Post-Processing for FDM: 10 Easy Ways [online]. 2022 [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Chemická struktura kyseliny polymléčné [11] | 7 |
| Obrázek 2 - Chemické vzorce monomerů ABS [12] | 8 |
| Obrázek 3 - Opakující se základní jednotka polykarbonátu [6] | 9 |
| Obrázek 4 - Chemická struktura polypropylenu [6] | 9 |
| Obrázek 5 - Chemická struktura polyethyltereftalátu [13] | 10 |
| Obrázek 6 - Chemická struktura polymethylmethakrylátu [13] | 10 |
| Obrázek 7 - Chemická struktura nylonu 12 [14] | 11 |
| Obrázek 8 - Chemická struktura nylonu 6 [14] | 11 |
| Obrázek 9 - Geometrické upořádání vláken [15] | 13 |
| Obrázek 10 - Rozmístění částic v matrici [15] | 13 |
| Obrázek 11 - Deformační křivky polymerů v tahu [52] | 28 |
| Obrázek 12 - Deformační křivky polymerů v tlaku [52] | 31 |
| Obrázek 13 - Deformační křivky polymerů v ohybu [52] | 32 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 - Vliv barevných plniv na mez pevnosti materiálu PLA [21]..... | 17 |
| Tabulka 2 - Srovnání vybraných vlastností filamentů [46] | 24 |
| Tabulka 3 - Vliv výšky vrstvy tisku na mechanické vlastnosti [47]..... | 25 |
| Tabulka 4 - Vliv vzorů a výplní na mechanické vlastnosti [48]..... | 25 |
| Tabulka 5 - Vliv teploty trysky na mez pevnosti [49] | 26 |
| Tabulka 6 - Vliv orientace vláken na pevnost materiálu [50]..... | 26 |
| Tabulka 7 - Tabulka stupnic dle Rockwella [55]..... | 34 |
| Tabulka 8 - Kondicionování dle normy ČSN EN ISO 291 [57]..... | 36 |
| Tabulka 9 - Třídy standardního prostředí [57]..... | 36 |